



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

ANALISI TERMICA DELLE COPERTURE VENTILATE

Relatore: Prof. Renato Lazzarin

Correlatore: Ing. Filippo Busato

Laureando: ALESSANDRO LIVOTTO

ANNO ACCADEMICO 2012 - 2013

*Ai miei genitori per avermi sostenuto
e per aver creduto in me*

INDICE

Introduzione	pag. 1
---------------------------	--------

I. Il tetto

1.1.Principali funzioni di un tetto	pag. 3
1.2.Tipologie di copertura	pag. 4
1.3.Il tetto a falde	pag. 5
1.3.1.La pendenza della falda	pag. 6
1.3.2.Gli strati funzionali della copertura	pag. 6

II. Termodinamica dell'edificio

2.1.Isolamento termico	pag. 11
2.2.Coefficiente globale di scambio termico dell'involucro	pag. 12
2.3.Bilancio energetico invernale dell'edificio	pag. 14
2.4.Carichi termici invernali	pag. 16
2.4.1.Ponti termici	pag. 17
2.5.Calcolo carichi termici invernali	pag. 19
2.5.1.Scambio termico per trasmissione	pag. 19
2.5.2.Scambi termici per ventilazione	pag. 22
2.5.3.Apporti termici gratuiti generati internamente	pag. 23
2.5.4.Irraggiamento solare	pag. 24
2.5.5.Energia fornita dai sistemi di riscaldamento	pag. 26
2.5.6.Scambi di calore latente	pag. 26
2.6.Quadro normativo di riferimento	pag. 27
2.6.1.Normativa relativa all'efficienza energetica	pag. 27
2.7.Stagione estiva ed inerzia termica	pag. 33
2.7.1.Normativa relativa alla stagione estiva	pag. 36
2.8.Diffusione di vapore d'acqua attraverso l'involucro	pag. 40

III. La ventilazione del tetto

3.1.Tetto ventilato, vantaggi e svantaggi	pag. 45
3.2.Microventilazione e ventilazione	pag. 46
3.2.1.Normativa per la certificazione	pag. 47
3.3.Soluzioni costruttive	pag. 48
3.4.Linea di colmo e di gronda	pag. 51
3.5.Comportamento termico dell'intercapedine	pag. 52
3.5.1.Bilancio termico	pag. 53
3.5.2.Modello numerico per lo scambio termico	pag. 54
3.5.3.Modello numerico per il flusso di aria	pag. 55
3.6.Caratteristiche del flusso di aria e coefficienti di convezione ..	pag. 57
3.6.1.Convezione naturale in cavità inclinate	pag. 61
3.6.2.Effetti del vento e convezione mista	pag. 64
3.7.Profili di velocità e temperatura nella cavità	pag. 67
3.8.Prestazioni termiche nella stagione estiva	pag. 69
3.9.Comportamento nella stagione invernale	pag. 71
3.10.Comportamento igrometrico	pag. 73

IV. Simulazione dinamica

4.1.Trnsys	pag. 75
4.1.1.Trnbuild	pag. 77
4.1.2.Simulation Studio e motore simulativo di Trnsys	pag. 78
4.1.3.Le Type impiegate nella simulazione	pag. 79
4.2.Comis	pag. 81
4.2.1.Interazione tra Trnsys e Comis	pag. 82
4.3.Il modello dell'edificio	pag. 83
4.4.Modellizzazione dei canali di ventilazione	pag. 86
4.5.Dati metereologici	pag. 87
4.6.Analisi dei risultati	pag. 87
4.6.1.Effetti del vento	pag. 89
4.6.2.Analisi delle giornate invernali	pag. 90
4.6.3.Analisi giornate estive	pag. 94
4.6.4.Variazione della pendenza del tetto	pag. 98

4.6.5. Variazione dello spessore delle cavità	pag. 98
4.6.6. Variazione dell'orientazione dell'edificio	pag. 98
4.6.7. Variazione del grado di isolamento termico	pag. 99
4.6.8. Analisi degli effetti delle schermature	pag. 100
4.6.9. Variazione della posizione geografica	pag. 101
4.6.10. Tetto ventilato e comfort termico	pag. 101
4.6.11. Chiusura delle cavità nella stagione invernale	pag. 103

Appendice al capitolo IV. Descrizione dettagliata del modello

4A.1. Descrizione edificio in Trnbuild	pag. 105
4A.2. Configurazione di Simulation Studio	pag. 112
4A.2.1. Parte in comune della simulazione	pag. 113
4A.2.2. Configurazione di Comis	pag. 117
4A.2.3. Calcolo dei coefficienti di convezione	pag. 120
4A.3. Modello semplificato	pag. 125

Conclusioni	pag. 127
--------------------------	----------

Bibliografia	pag. 131
---------------------------	----------

INTRODUZIONE

Con l'aumento dei prezzi dell'energia e con la maggiore sensibilità pubblica ai temi ambientali, il risparmio energetico negli edifici è sempre più importante e costituisce il principale serbatoio di idee per possibili soluzioni utili al fine di orientare in senso sostenibile i consumi di energia. A tale ambito appartengono le cosiddette tecnologie passive che interpretano elementi quali sole, vento, acqua e calore naturale non più come agenti esterni dai quali proteggere l'ambiente interno, rivedendone piuttosto il ruolo di utili risorse nel contenimento dei fabbisogni energetici legati a riscaldamento e raffrescamento.

La consapevolezza dell'emergenza del problema energetico si è tradotta nella necessità di un approccio basato sulla valutazione del comportamento energetico globale dell'edificio (riscaldamento, raffrescamento, illuminazione), includendo le analisi delle prestazioni dei singoli componenti del sistema impiantistico e dell'involucro edilizio. La rivalutazione del ruolo dell'involucro edilizio a ben più che semplice chiusura del volume abitato si rivela sicuramente scelta prioritaria. Il manto di copertura che si realizza con il tetto richiede particolare attenzione, dato che rappresenta buona parte della superficie disperdente dell'edificio, trovandosi inoltre esposto alle sollecitazioni termiche e meteorologiche in modo predominante rispetto a tutte le rimanenti superfici perimetrali. In regioni climatiche come quella italiana, caratterizzate da notevoli valori di irraggiamento solare, la temperatura superficiale del tetto può raggiungere valori molto elevati. Il desiderio e la necessità di sfruttare tutti i volumi disponibili hanno portato all'utilizzo dello spazio sotto falda come luogo abitativo. Soprattutto in concomitanza con livelli di isolamento carenti, il surriscaldamento della superficie del tetto può causare condizioni non accettabili nei vani sottostanti. Tale problema ha portato alla diffusione di tecnologie edili complesse, come i tetti ventilati. Questi consistono in soluzioni costruttive in cui si ha l'implementazione di un'intercapedine aperta di aria nella stratigrafia del tetto, in modo da promuovere moti ascensionali dell'aria derivanti sia dal gradiente di densità indotto dalla differenza di temperatura tra condizioni esterne e cavità ventilata, che dalla pressione del vento. Tale flusso di aria contribuisce a sottrarre parte del calore trasmesso dal manto di copertura. La letteratura tecnica riporta vari esempi di un miglioramento delle prestazioni termiche del tetto a seguito dell'instaurarsi sotto falda di una portata d'aria. Uno studio di M. Ciampi et al.

(2005) ha evidenziato che tale soluzione è in grado di contenere il flusso di calore che attraversa il tetto dal 10% al 30%, a seconda dello spessore dell'intercapedine e dell'inclinazione della copertura. L'energia entrante dal tetto è soltanto una parte dell'energia totale che entra attraverso l'intero involucro di un edificio. Il presente lavoro intende quindi ricercare l'effettiva convenienza delle coperture ventilate, verificando la diminuzione del fabbisogno energetico estivo di un edificio di riferimento rispetto ad una struttura non ventilata, in funzione di diverse condizioni operative. Nel primo capitolo è presentata una descrizione generale del sistema tetto (tipologie, principali funzioni e stratigrafia). Nel secondo capitolo sono analizzati i processi di scambio di energia e massa che coinvolgono l'involucro dell'edificio. Nel terzo capitolo si entra nello specifico delle coperture ventilate con il confronto delle principali soluzioni costruttive e la presentazione della normativa italiana sul tema, che divide le coperture ventilate in due tipologie: microventilate e ventilate. È inoltre riportato un modello numerico degli scambi termici nella cavità e del flusso di aria, con una ricerca in letteratura per quanto riguarda i coefficienti di scambio termico convettivo delle superfici interne dell'intercapedine e le prestazioni nella stagione estiva ed in quella invernale. Nel quarto capitolo è stato costruito un modello tramite il software Trnsys con il quale si è simulato il comportamento termico dinamico annuale di un edificio di riferimento. Il flusso di aria all'interno delle cavità è stato invece simulato con l'ausilio del software Comis. I due software lavorando in parallelo hanno permesso di creare un modello simulativo di un edificio con tetto ventilato, in modo tale da analizzarne le prestazioni al variare di parametri quali la posizione geografica, intensità del vento, spessore di intercapedine e pendenza della cavità. Tale modello è descritto approfonditamente nell'appendice al capitolo quarto.

CAPITOLO 1

Il tetto

1.1.Principali funzioni di un tetto

Il tetto fa da manto di copertura per l'edificio e ne rappresenta la parte più esposta alle sollecitazioni termiche e meteorologiche. Deve rispondere a svariati requisiti, quali:

- protezione contro l'intrusione di acqua piovana;
- basse dispersioni termiche invernali;
- basso passaggio di calore d'estate ed elevata inerzia termica;
- tenuta al vento ed impermeabilità all'aria;
- veloce smaltimento della condensa invernale ed estiva;
- alto potere fonoisolante;
- adeguata resistenza meccanica per resistere alla spinta del vento e al carico della neve;
- deve essere attrezzabile, manutenibile ed ispezionabile.

Per quanto riguarda le dispersioni termiche il tetto è una parte molto importante dell'involucro dell'edificio. Come si vede in Fig. 1.1, infatti, rappresenta mediamente il 25% delle dispersioni totali delle abitazioni.

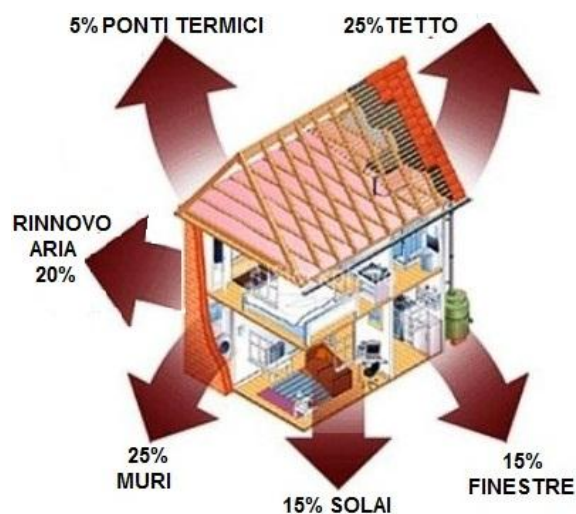


Figura 1.1. Dispersioni termiche medie attraverso l'involucro dell'edificio

Il tetto va quindi studiato con particolare attenzione e va progettato in base al clima ed alle specifiche esigenze (tipologia d'uso del sottotetto, comfort voluto, ecc.).

1.2. Tipologie di copertura

Vi sono diverse opzioni costruttive delle coperture. Principalmente si possono classificare rispetto alla tipologia di manto di copertura:

- *coperture discontinue*: il manto è effettuato con vari materiali che, grazie al modo in cui sono collegati e alla loro pendenza, assicurano la tenuta dell'acqua. Fanno parte di questa tipologia le coperture di tegole/coppi in laterizio o cemento, lastre di pietre, etc. Un esempio di tale copertura è riportato in Fig. 1.2 a destra.
- *coperture continue*: il manto è attuato con elementi molto ampi congiunti insieme durante la posa in opera, in modo da assicurare la tenuta indipendentemente dalla pendenza della superficie. Quindi, non essendo vincolato né a particolari pendenze né a specifiche morfologie, questa soluzione permette la realizzazione di coperture curve o piane orizzontali. In genere vengono realizzate con pannelli di metallo o di materie plastiche, guaine bituminose. In Fig. 1.2 a sinistra un esempio di copertura continua in metallo.



Figura 1.2. A sinistra un esempio di copertura continua in metallo ed a destra una copertura discontinua in laterizio

Inoltre in base alla pendenza ed alla struttura portante le coperture possono anche essere suddivise in:

- teito a falde: si tratta di una copertura caratterizzata da una o più facce piane inclinate, dette falde. La pendenza dipende dai materiali usati per il manto. La struttura portante può essere in legno, cemento-laterizio o acciaio.
- teito piano: realizzati con pendenze minime ma commisurati per smaltire le acque. La struttura portante è in cemento-laterizio.

1.3. Il teito a falde

I tetti a falde possono avere le più disparate geometrie, però hanno in comune il fatto che essendo inclinati sfruttano la forza di gravità per attutire gli effetti degradanti degli agenti atmosferici. Le geometrie più semplici sono riportate in Fig. 1.3.

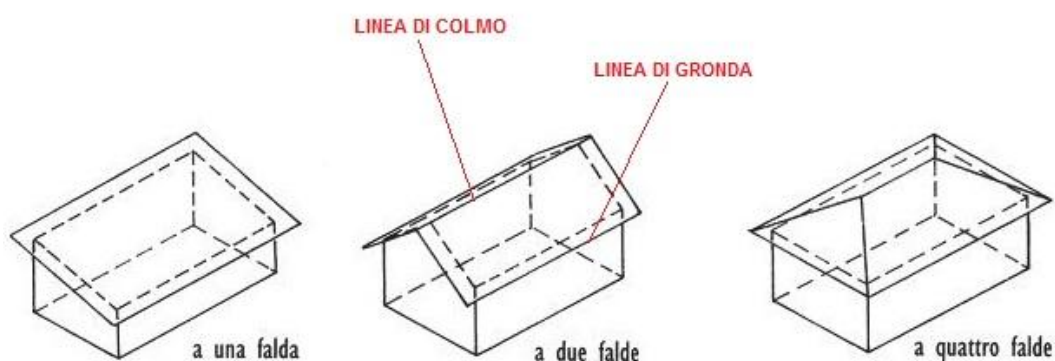


Figura 1.3. Esempi di geometrie di teito a falde

Si intende per linea di colmo la linea orizzontale di intersezione di due falde con pendenza divergente e la linea di gronda la linea perimetrale inferiore delle falde in cui è posizionata la grondaia, canale di scolo per le acque meteoriche. La linea di colmo, così come la linea di gronda, possono essere a quota costante o a quota variabile. Normalmente, le falde hanno pendenza costante e si privilegiano quelle soluzioni che conducono l'acqua meteorica verso il perimetro della costruzione. Le linee di gronda possono interessare l'intero perimetro dell'edificio (ad es. le tipologie a padiglione) o solo alcuni lati (ad es. le tipologie a falda unica oppure quelle a due falde).

1.3.1. La pendenza della falda

La pendenza della falda è data dal rapporto in percentuale o in gradi tra il dislivello compreso tra la linea di gronda e quella di colmo (raffigurato dal segmento h in Fig. 1.4) e la loro distanza in proiezione orizzontale (segmento b in Fig. 1.4).

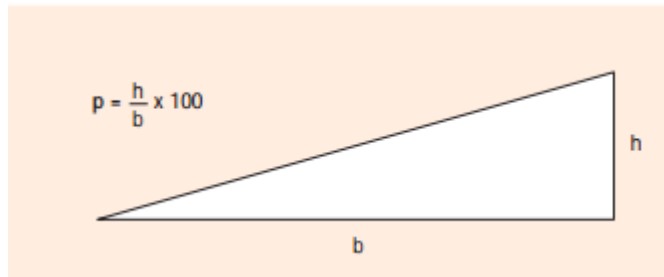


Figura 1.4. Calcolo della pendenza di un tetto a falde

Generalmente per climi mediamente piovosi e con modeste precipitazioni nevose si usano pendenze intorno al 35% (20°). Per climi asciutti e con poche precipitazioni meteoriche sono utilizzate pendenze minori, ma comunque non inferiori al 30%. Infine per climi dove abbonda la neve si usano pendenze molto elevate. Infatti, maggiore è la pendenza, minore è la neve che tende ad accumularsi sopra il tetto; se la pendenza del tetto è maggiore del 176% (60°) la neve non si accumula. Se la pendenza è inferiore al valore ottimale per il microclima in cui è posizionato l'edificio si possono verificare infiltrazioni causate da pioggia battente e/o temporali oppure, in caso di piogge di scarsa portata, l'acqua può ristagnare tra le sovrapposizioni e negli incastri degli elementi del manto.

1.3.2. Gli strati funzionali della copertura

Il tetto a falde è costituito generalmente da 5 strati funzionali che contribuiscono al corretto funzionamento dell'intera copertura. Questi 5 strati funzionali sono: il manto di copertura; la ventilazione o microventilazione sottotegola; l'isolamento; l'impermeabilizzazione e la struttura portante. A questi poi si possono aggiungere elementi funzionali quali il camino per l'evacuazione dei fumi interni dell'edificio, le grondaie per il deflusso e la raccolta delle acque meteoriche, le finestre per

l'illuminazione del sottotetto, i pannelli solari termici per la produzione e l'accumulo di energia termica ed i pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica. In Fig. 1.5 è riportato un esempio di tetto con struttura portante in legno e sono illustrati i vari strati funzionali.

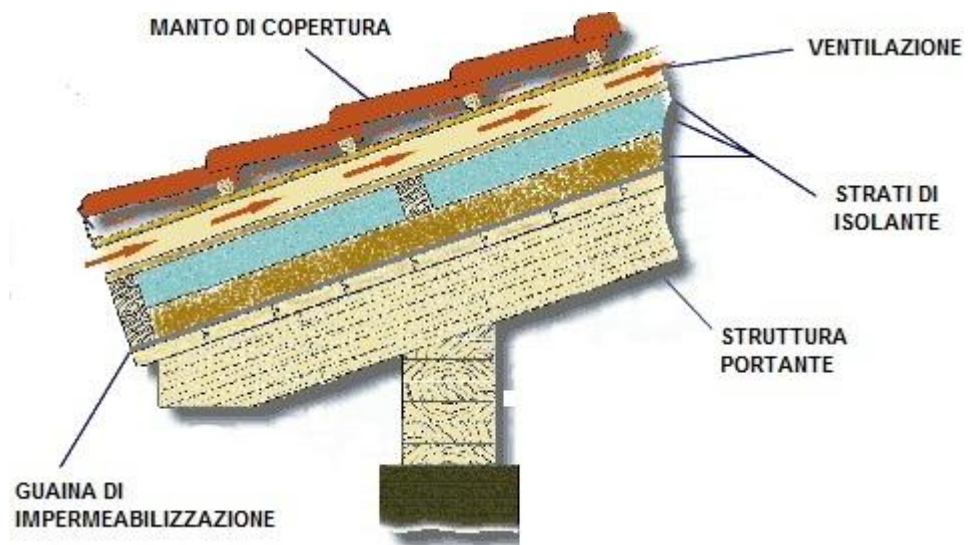


Figura 1.5. Esempio di tetto a falde con struttura in legno

Di seguito vengono descritti più approfonditamente i 5 strati funzionali:

- **Manto di copertura:** è lo strato più esterno della copertura ed è l'elemento di tenuta contro le sollecitazioni chimiche, fisiche e meccaniche dell'ambiente esterno. Garantisce la tenuta all'acqua mediante la sovrapposizione variabile (coppi) o fissa (tegole) di elementi contigui posati nel senso della pendenza. Coppi e tegole sono realizzati in laterizio, stesso materiale utilizzato generalmente per i mattoni. Si tratta di materiale argilloso cotto in fornaci a temperature intorno ai 1000 °C per l'indurimento. Dato che, se posato a dovere, il manto rappresenta un'efficace barriera nei confronti dell'azione della pioggia battente e della risalita capillare, normalmente la tenuta all'acqua è affidata unicamente a questo strato. Quando però si ritiene che il manto di copertura possa essere particolarmente messo alla prova dalla spinta del vento e dalla pioggia battente o quando si è in presenza di una complessa geometria del tetto o di elementi di discontinuità, si preferisce installare uno strato di

tenuta all'acqua di tipo continuo complementare. Questo anche perché nel tempo il manto tende a rovinarsi ed a perdere la tenuta all'acqua. Si utilizzano per questo scopo membrane impermeabili traspiranti.

- Strato di ventilazione: è posto immediatamente sotto il manto ed è costituito da una intercapedine, che va dalla linea di gronda fino al colmo, in cui può fluire l'aria esterna. Questo strato, oggetto della tesi, verrà approfondito più avanti.
- Strato di isolamento termico: ha la funzione di aumentare la coibenza termica del tetto fino ai valori richiesti ed è costituito da una o più tipologie di pannelli di materiale isolante.
- Impermeabilizzazione: ha la funzione di evitare infiltrazioni d'acqua o percolamenti di condensa che se raggiungessero lo strato isolante o la struttura portante potrebbero causare seri danni. Realizzato con l'ausilio di guaine impermeabili.
- Struttura portante: ha la funzione di sostenere i carichi permanenti (il peso proprio più il peso della sovrastruttura), i sovraccarichi accidentali (agenti atmosferici quali neve, ghiaccio, vento e grandine) e l'eventuale presenza di attrezzature ed operai. Inoltre entro certi limiti deve resistere ad eventi eccezionali quali terremoti e forti tempeste. La struttura può essere principalmente di due tipi; con piano portante continuo o discontinuo. Nel primo caso la funzione portante si esplica lungo l'intero piano della falda; rientrano in questa tipologia i solai di copertura latero-cementizi (in Fig. 1.6 a sinistra ne è riportato un esempio). Nel secondo caso la funzione portante si esplica unicamente lungo delle linee o dei punti, cioè lungo travi orizzontali o verticali. In questo caso si tratta di solai a carpenteria lignea o metallica (Fig. 1.6. a destra).

Anche gli strati e gli elementi funzionali che costituiscono la sovrastruttura devono avere caratteristiche di resistenza in base alla funzione che devono svolgere. Per esempio il manto di copertura in laterizio deve garantire una certa resistenza alla sollecitazione di flessione per resistere a carichi dovuti al passaggio di installatori e manutentori.

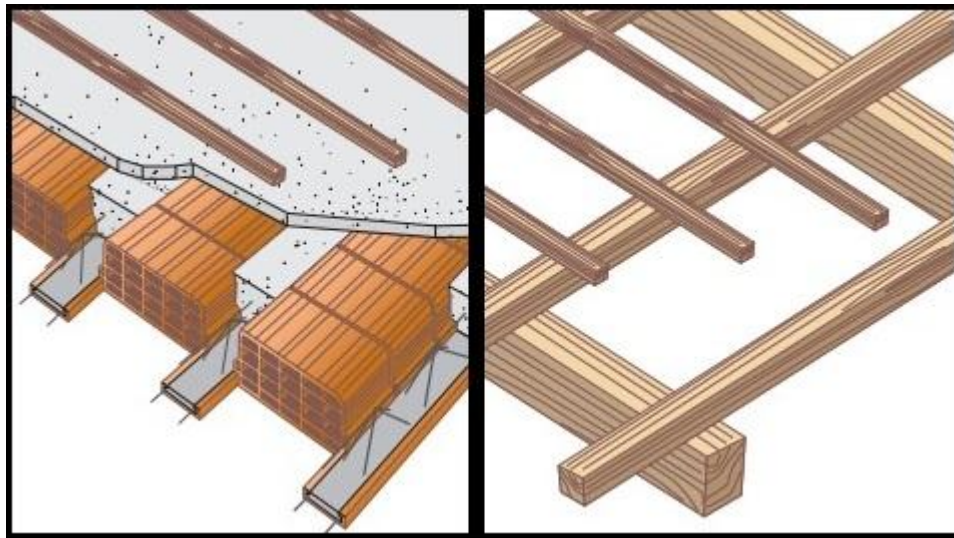


Figura 1.6. *Struttura portante in latero-cemento a sinistra e a carpenteria lignea a destra*

Questo tipo di copertura possiede diversi vantaggi:

- L'inclinazione della falda consente in modo semplice e rapido di raccogliere e allontanare le acque meteoriche.
- Si tratta di una tecnica costruttiva semplice ed intuitiva e la piccola manutenzione risulta semplice ed economica.
- Il volume che si può ricavare sotto le falde, il cosiddetto sottotetto, è uno spazio aggiuntivo che può essere utilizzato. Inoltre contribuisce al comfort degli ambienti sottostanti costituendo uno strato d'aria in grado di contenere la trasmissione del calore agli spazi sottostanti.
- La sporgenza del tetto, costituita dal cornicione di gronda, assicura alla superficie della facciata dell'edificio un efficace riparo dalla pioggia, limitando così le spese di manutenzione.

CAPITOLO 2

Termodinamica dell'edificio

2.1. Isolamento termico

Una risposta adeguata per aumentare l'efficienza energetica degli edifici è quella di aggiungere alla parte strutturale e al rivestimento esterno un isolamento che contrasti la dispersione energetica, contenendo i costi ed allo stesso tempo migliorando il comfort abitativo. Questo strato è detto coibentazione. I costi di investimento in una buona coibentazione si recuperano in pochi anni di esercizio, inoltre la vita dei materiali termoisolanti è molto lunga, garantendo quindi un elevato ritorno dell'investimento considerandone l'intera vita utile. Un isolante termico è un materiale le cui caratteristiche fisiche permettono di ridurre il flusso termico di calore scambiato tra due ambienti a temperature differenti. La capacità di isolamento termico di un determinato materiale è misurato dalla sua conducibilità termica (λ). Tanto più è bassa la conducibilità, tanto più il materiale isolante è efficace. Essa rappresenta l'attitudine di un corpo alla trasmissione del calore per conduzione e dipende solo dalla natura del materiale e non dalla sua forma. Viene definita come la quantità di calore che attraversa, nell'unità di tempo, una parete di area unitaria e spessore unitario, per effetto di una differenza di temperatura pari a 1 Kelvin. Secondo la legge di Fourier si ha:

$$\lambda = \frac{Q d}{\Delta T} \quad ,$$

con:

$\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$: conducibilità termica;

$Q \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$: quantità di calore che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo;

$d \text{ [m]}$: spessore unitario;

$\Delta T \text{ [K]}$: differenza di temperatura agli estremi.

Dato che la conducibilità varia al variare della temperatura (per alcuni materiali aumenta all'aumentare della temperatura, per altri diminuisce) e della vita dell'isolante (con il tempo si rovina e perde parzialmente le sue caratteristiche), generalmente ad ogni isolante sono associati due valori di Lambda:

- λ_d : conducibilità termica media del materiale alla temperatura di 10 °C;
- λ_o : conducibilità termica alla temperatura di 10 °C ponderato in 25 anni di esercizio.

Se si considera il sistema isolante nel suo complesso è importante anche considerare lo spessore del materiale; tanto più esso è elevato, tanto maggiore sarà la resistenza termica (R). Questa si calcola con il rapporto tra lo spessore e la conducibilità dell'isolante:

$$R = \frac{s}{\lambda} .$$

Se riferita all'unità di superficie è espressa in $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$. Un materiale risulterà pertanto tanto più resistente al passaggio di energia termica tanto maggiore sarà il suo spessore e tanto minore sarà la sua conducibilità termica.

Se voglio calcolare la prestazione energetica di una parete o copertura composta da più strati di materiale eterogeneo la resistenza termica totale sarà eguale alla somma delle resistenze parziali di ciascun strato componente della struttura.

Si ha:

$$R_T = \sum R_i = \sum \left(\frac{s_i}{\lambda_i}\right) ,$$

dove $\left(\frac{s_i}{\lambda_i}\right)$ è la resistenza termica dello strato i-esimo di spessore s_i e conducibilità termica λ_i .

2.2.Coefficiente globale di scambio termico dell'involucro

Le superfici di un componente generico dell'involucro trasmettono e ricevono calore con l'ambiente esterno ed interno tramite convezione ed irraggiamento. Nel momento in cui siamo in presenza di diverse modalità di scambio termico (convezione, irraggiamento e conduzione) si introduce il concetto di coefficiente globale di scambio termico, detto anche coefficiente di trasmittanza (U). Questo

definisce in condizioni di regime stazionario la quantità di calore che, nell'unità di tempo, passa attraverso l'unità di superficie, quando la differenza di temperatura tra le due facce è di 1 grado Kelvin. È espresso in $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$.

La relazione della trasmissione del calore tra due fluidi separati da una parete può essere espressa come:

$$Q = U A(T_i - T_e) \quad ,$$

dove T_i e T_e sono rispettivamente le temperature all'interno ed all'esterno dell'ambiente (rilevate in posizione tale da non risentire degli effetti convettivi innescati dalle temperature superficiali della parete), A rappresenta la superficie della parete. Minore sarà la trasmittanza maggiore sarà l'isolamento offerto dalla parete o dalla copertura. Essa è data dal reciproco della somma delle resistenze termiche di conduzione attraverso lo spessore del materiale e di convezione ed irraggiamento tra superfici ed ambiente. Per questi ultimi due tipi di trasmissione del calore, al fine di calcolare la trasmittanza per un componente edilizio, non si calcolano le resistenze prese singolarmente ma si ricorre a dei coefficienti che inglobano sia gli effetti convettivi si quelli riguardanti l'irraggiamento. Questi sono detti coefficienti di adduzione (α) e sono espressi in $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$, si ha:

$$\alpha = h_{cv} + h_r \quad ,$$

con h_{cv} trasmittanza termica per convezione e h_r trasmittanza termica per irraggiamento. Con il reciproco delle adduttanze, interna ed esterna, si trovano le resistenze termiche superficiali sulle due facce interna ed esterna del componente. Per i componenti edilizi i coefficienti di adduzione si trovano tabulati nella Norma UNI 10344 in funzione della situazione geometrica e della stagione dell'anno. In Tabella 2.1 sono riportati i valori, riguardanti la stagione invernale per le pareti o coperture con pendenza inferiore di 60°, rispettivamente per la superficie interna e per quella esterna.

La resistenza termica globale R_G è quindi data dalla sommatoria di queste resistenze termiche e dalla resistenza termica per conduzione. Infine il coefficiente globale di scambio termico U è dato da:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_e}} \quad .$$

Tipologia superficie	$R_s \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$	$\alpha \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
Copertura, lato interno	0,10	10
Parete, lato interno	0,13	7,7
Copertura e Parete, lato esterno ¹	0,04	25

Tabella 2.1. Valori di adduzione e resistenza termica superficiale per i componenti edilizi riportati dalla norma UNI 10344

2.3. Bilancio energetico invernale dell'edificio

L'edificio può essere considerato un sistema termodinamico aperto confinato dall'ambiente esterno dal suo involucro. Il sistema è stato definito aperto perché di fatto avvengono sempre scambi di massa (aria umida) tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno attraverso i fori o le fessure che esistono, intenzionalmente o meno, sulla superficie di confine e che costituiscono quindi sezioni di immissione ed espulsione d'aria. Per ipotesi lo si considera operante in regime stazionario anche se in realtà l'evoluzione termica degli edifici è sempre non stazionaria. Infatti, anche se questa ipotesi può essere considerata parzialmente vera all'interno degli edifici in cui tramite gli impianti la temperatura è mantenuta al valore desiderato, lo stesso non si può dire per le condizioni esterne, in cui temperatura e intensità di radiazione solare variano continuamente durante la giornata. Però in inverno e alle nostre latitudini la radiazione solare (la principale grandezza climatica che ha la capacità di produrre un regime dinamico nell'edificio) è di entità poco rilevante e il fatto di considerare il sistema in regime stazionario semplifica molto i calcoli. Un'altra ipotesi necessaria è la monodimensionalità dei flussi termici attraverso gli elementi dell'involucro edilizio. Il bilancio energetico richiede la definizione di intervalli temporali e la scomposizione dell'edificio in zone termiche omogenee per proprietà termofisiche e condizioni al contorno. Per ognuna di queste zone va impostata un'equazione di equilibrio termico in cui compaiano i flussi scambiati con l'esterno e con le altre

¹ Si assume una emissività ε pari a 0,9 ed ad una velocità del vento media di 4 m/s. Se la velocità del vento è superiore il coefficiente di adduzione esterno sarà maggiore e può essere calcolato con la formula: $\alpha_e = 8,16 + 4 \cdot v$

zone e la variazione di energia interna. Scegliere intervalli temporali troppo piccoli e suddividere l'edificio in eccessive zone renderebbe il calcolo molto complicato e sarebbe difficile trovare le informazioni necessarie (per esempio disporre per ogni località di dati orari relativi alle grandezze climatiche necessarie al calcolo). Per questi motivi secondo la normativa italiana si prende in esame l'intero edificio o una zona di esso di dimensioni non inferiori al vano, omogenea per temperatura interna e condizioni al contorno e servita da uno stesso impianto. Il periodo di studio è mensile in quanto i valori medi mensili dei parametri climatici necessari allo studio sono resi disponibili nella norma UNI 10349 relativamente a tutti i capoluoghi di provincia.

Per un sistema aperto per il primo principio si ha:

$$Q - L = \Delta H + \Delta E \quad ,$$

dove Q è il calore assorbito dal sistema, L è il lavoro eseguito dal sistema, ΔH è la variazione di entalpia del sistema (energia interna più energia di pressione del fluido) e ΔE è la variazione della somma delle altre forme di energia immagazzinabili dal sistema (meccanica, cinetica, elastica). Dato che il sistema considerato, l'aria interna all'edificio, non ha scambi di lavoro con l'esterno e poiché non si verificano variazioni apprezzabili né della quota né della velocità dell'aria tra le sezioni di immissione ed espulsione dal sistema, possiamo affermare che $\Delta E = 0$ ed $L = 0$. La formula diventa quindi:

$$Q = \Delta H \quad .$$

Non considerando il bilancio di vapore all'interno dell'involucro edilizio ed ipotizzando che l'aria si comporti come un gas perfetto, la variazione di entalpia vale:

$$\Delta H = mc_p(T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}}) \quad ,$$

quindi:

$$Q = mc_p(T_{\text{finale}} - T_{\text{iniziale}}) \quad ,$$

Dove m è la massa dell'aria interna all'involucro, c_p è il calore specifico a pressione costante dell'aria ed i termini tra le parentesi sono le temperature dell'aria prima e dopo la trasformazione termodinamica. Ogni scambio di calore provoca quindi una trasformazione che porta al cambiamento della temperatura a bulbo secco dell'aria interna alla zona occupata. Dato che l'ipotesi è che il sistema sia in regime stazionario, durante il periodo di studio la temperatura è

costante e la variazione di energia interna nulla. Tenendo conto dei vari carichi termici² gravanti sul sistema si ha infine:

$$(\dot{Q}_{\text{int}} + \dot{Q}_{\text{sol}}) - (\dot{Q}_{\text{H,tr}} + \dot{Q}_{\text{H,ve}}) = 0 \quad .$$

In Fig. 2.1 sono riportati tali carichi termici in entrata ed uscita dall'edificio in inverno.

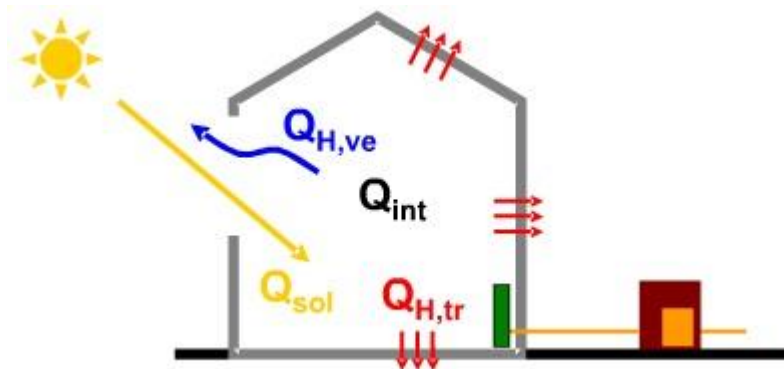


Figura 2.1. Flussi di calore in un edificio

2.4.Carichi termici invernali

- Dispersioni per trasmissione $\dot{Q}_{\text{H,tr}}$: potenza trasmessa attraverso l'involucro dell'edificio (pareti, copertura, vetrate e solaio inferiore). Questo valore viene influenzato da:
 - rapporto Superficie/Volume: minore sarà la superficie dell'involucro per la volumetria interna data, minori saranno le dispersioni.
 - prestazioni dell'isolamento termico dell'involucro. Minore sarà la trasmittanza termica globale dei componenti dell'involucro minore sarà tale flusso di calore.
 - presenza di ponti termici (vedi paragrafo 2.4.1).
- Dispersioni per ventilazione $\dot{Q}_{\text{H,ve}}$: perdite energetiche derivanti dal flusso d'aria di infiltrazione o di ventilazione (necessaria per garantire gli standard

² Per convenzione, per la stagione invernale, i flussi verso l'interno o generati internamente hanno segno positivo.

richiesti per la purezza dell'aria). Sono influenzate dalla progettazione delle aperture e dalla tenuta all'aria dell'involucro.

- Carichi generati internamente \dot{Q}_{int} : potenza termica generata internamente all'edificio. È costituito da due componenti:

$$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{imp} + \dot{Q}_{gr} \quad ,$$

dove:

- \dot{Q}_{imp} : potenza fornita dagli impianti di riscaldamento per mantenere la temperatura interna al valore desiderato.
 - \dot{Q}_{gr} : apporti gratuiti interni che contribuiscono al riscaldamento dell'edificio (calore emanato dalle persone o generato da apparecchiature ed illuminazione). Questi apporti riducono il fabbisogno termico.
- Apporti gratuiti derivanti dalla radiazione solare \dot{Q}_{sol} : potenza termica entrante derivante dall'irraggiamento solare diretto attraverso le componenti trasparenti dell'involucro (vetrate) e quelle opache (pareti e copertura). Dipende principalmente da forma e orientamento dell'edificio, posizione e dimensione delle aperture e schermature solari.

2.4.1. Ponti termici

I ponti termici sono discontinuità presenti nell'involucro che creano delle vie preferenziali alla propagazione del calore. Possono essere di due tipi:

- Ponti termici geometrici: componenti edilizi in cui la superficie interna riscaldata è minore della superficie esterna raffreddata. Per esempio gli angoli degli edifici quale l'innesco tra parete e solaio (vedi Fig. 2.2, immagine a sinistra).
- Ponti termici dovuti a discontinuità nei materiali: parti di involucro composti da diversi materiali che presentano un coefficiente di conducibilità termica λ maggiore rispetto al materiale circostante. Per esempio travi in metallo, pilastri in cemento armato...etc.

Favorendo gli scambi di calore tra interno ed esterno, i ponti termici possono arrivare anche a triplicare la trasmissione del calore in una sezione dell'edificio, pur rappresentando solo una minima parte della superficie stessa.

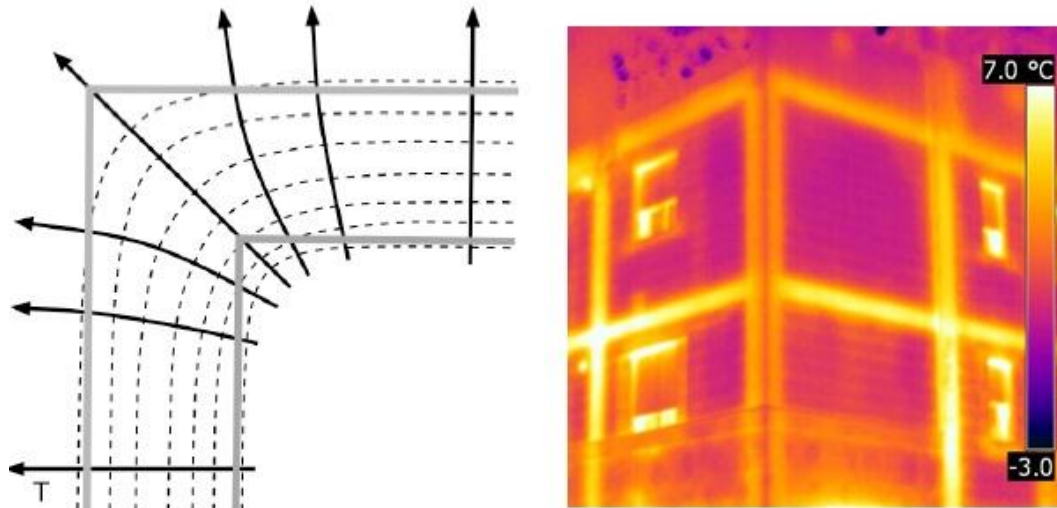


Figura 2.2. Nell'immagine a sinistra è riportato un esempio di ponte termico geometrico, con linee di flusso e curve isoterme di un innesto parete-solaio. Nell'immagine a destra si ha una termografia di un edificio che mette in mostra vari ponti termici dovuti a discontinuità nei materiali.

Nell'immagine a sinistra di Fig. 2.2 è riportato un ponte termico geometrico con linee isoterme e linee di flusso (perpendicolari ad esse). Nello spigolo il calore, abbandonando il perimetro interno, si ripartisce all'uscita su un perimetro esterno maggiore, determinando un flusso maggiore di calore verso l'esterno.

Nell'immagine a destra si ha una termografia (effettuata tramite fotografia agli infrarossi) di una facciata di un edificio. Si può notare che, in prossimità delle colonne portanti ed i solai vi sia una temperatura maggiore, in quanto queste hanno una conducibilità termica minore rispetto ai muri, che sono coibentati. Le pareti in genere hanno una trasmittanza che può variare da $0.3 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ a $0.7 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, mentre nel calcestruzzo delle strutture portanti essa varia da $2.2 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ a $2.6 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$; ne consegue che il flusso termico che attraversa le strutture in cemento armato è tra le 7 e le 10 volte maggiore di quello che attraversa le pareti e quindi fungono da by pass per il flusso termico.

2.5. Calcolo carichi termici invernali

Nei prossimi paragrafi vengono analizzati in dettaglio i carichi termici, presentati nel paragrafo 2.4, e per ognuno di essi viene esposta la procedura di calcolo così come è indicata nella normativa italiana.

2.5.1. Scambio termico per trasmissione

Per ogni mese lo scambio termico per trasmissione può essere calcolato come:

$$Q_{H,tr} = H_{tot}(t_i - t_e)\tau + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,k} \right\} \tau \quad ,$$

dove:

- $H_{tot} \left[\frac{W}{K} \right]$: coefficiente globale di scambio termico; tiene conto sia dello scambio termico attraverso l'involucro sia di quello verso il terreno.
- t_i [K]: temperatura interna operante. Deriva dall'effetto combinato della temperatura dell'aria e dalla temperatura media radiante di tutte le superfici del locale. Si può approssimare come la media aritmetica delle due temperature. Secondo la normativa italiana, per gli edifici adibiti ad abitazione, si assume una temperatura interna costante pari a 20 °C.
- t_e [K]: temperatura media mensile dell'ambiente esterno. Si trovano tabellate nella norma UNI 10349 in base alla località ed al mese.
- τ [s]: durata del mese considerato.

La seconda parte della formula, $\left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,k} \right\} \tau$, rappresenta il flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste.

Coefficiente di scambio termico globale

Dato che il coefficiente globale di scambio termico tiene conto sia dello scambio termico attraverso l'involucro sia di quello verso il terreno, si ha:

$$H_{tot} = H_T + H_D \quad ,$$

con:

- U_T : coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno. Secondo la norma UNI EN ISO 13370 può essere calcolato con la seguente formula:

$$H_T = AU_f b_{tr} \quad ,$$

dove A è la superficie del solaio, U_f è la trasmittanza unitaria del solaio che tiene conto anche dei ponti termici solaio-parete, b_{tr} è un fattore di aggiustamento che varia in base alla tipologia di fondamenta dell'edificio. Se il pavimento è interrato bisogna tenere conto anche della trasmissione per conduzione attraverso la parte delle pareti che è interrata. Secondo la norma b_{tr} può assumere i valori riportati in Tabella 2.2.

Ambiente confinante	b_{tr}
Pavimento appoggiato al terreno	0,45
Parete appoggiata al terreno	0,45
Pavimento su spazio areato	0,8

Tabella 2.2. Valori del fattore di aggiustamento nel calcolo della trasmittanza nello scambio termico con il terreno dell'edificio, in base alla tipologia di pavimento. Valori riportati dalla normativa.

- H_D : coefficiente di scambio termico per trasmissione verso l'ambiente esterno. Tiene conto dello scambio termico attraverso le varie superfici dell'involucro dell'edificio e dell'effetto dei ponti termici. Si ha:

$$U_D = \sum_i (U_i A_i) + \sum_j (U_{L,j} L_j) \quad ,$$

con:

- A_i [m^2]: area dell'i-esima superficie;
- U_i [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]: trasmittanza termica unitaria dell'elemento di involucro i-esimo;
- $U_{L,j}$ [$\frac{W}{m \cdot K}$]: coefficiente di trasmissione termica longitudinale riferito alla superficie esterna del ponte termico lineare j-esimo;
- L_j [m]: lunghezza del ponte termico lineare j-esimo.

Extraflusso radiativo

Dato che di notte il cielo è più freddo dell'edificio, si innescherà un flusso di radiativo (infrarossi) verso la volta celeste. Come scritto in precedenza la formula per calcolare tale flusso è:

$$\left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,k} \right\} \tau \quad ,$$

con:

- $\Phi_{r,k}$ [W] : extraflusso radiativo verso la volta celeste mediato sul tempo del componente edilizio k-esimo.
- $F_{r,k}$: fattore di forma tra il componente edilizio e la volta celeste. È adimensionale ed è dato da:

$$F_{r,k} = \frac{F_{omb}(1 + \cos S)}{2} \quad ,$$

dove:

S : angolo di inclinazione del componente sull'orizzonte;

F_{omb} : fattore di riduzione per ombreggiatura, pari ad 1 in assenza di ombreggiature da elementi esterni.

Per calcolare $\Phi_{r,k}$ si usa la seguente formula:

$$\Phi_{r,k} = R_{se} U_{c,k} A_{c,k} h_r \Delta T_{er} \quad .$$

I dati relativi al componente k-esimo sono:

- $R_{se} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$: resistenza termica superficiale esterna, pari a $0,04 \left[\frac{m^2K}{W} \right]$;
- $U_{c,k} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$: trasmittanza termica;
- $A_{c,k} [m^2]$: superficie di scambio;
- $\Delta T_{er} [K]$: differenza media di temperatura dell'aria esterna e della temperatura apparente del cielo, tale differenza è pari a 11 K secondo la normativa;
- $h_r \left[\frac{W}{m^2K} \right]$: coefficiente di scambio termico esterno per irraggiamento;

Secondo la normativa può essere calcolato come:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma(t_{ss} + 273,15)^3 \quad ,$$

con:

ε : emissività della superficie esterna. Tipicamente per i materiali da costruzione vale 0,9;

σ : costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$;

t_{ss} : differenza media di temperatura dell'aria esterna e della temperatura apparente del cielo, pari a 11 K.

2.5.2.Scambi termici per ventilazione

In un edificio possono esserci due tipi di flussi d'aria tra interno ed esterno.

- Infiltrazioni attraverso l'involucro che dipendono dalla tenuta stagna dello stesso; i punti più critici sono gli infissi.
- Ventilazione indotta per garantire un adeguato ricambio d'aria indispensabile per avere un'aria pulita negli ambienti interni.

Gli scambi termici per ventilazione derivano dalla differenza di entalpia tra il flusso d'aria che esce dal locale alla temperatura t_i e quello che entra alla temperatura t_e . Lo scambio termico vale:

$$Q_{H,ve} = H_V(t_i - t_e)\tau$$

Il coefficiente di dispersione termica per ventilazione H_V è espresso in $\left[\frac{W}{K} \right]$ e può essere calcolato con la seguente formula:

$$H_V = \dot{m}_V c_{pa} = \rho_a c_{pa} \sum_k (\dot{V}_k f_k b_k)$$

dove:

- ρ_a : densità dell'aria a 20 °C, pari a $1,3 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$;
- c_{pa} : calore specifico a pressione costante dell'aria a 20 °C, pari a 1000 $\left[\frac{J}{kg K} \right]$;
- \dot{V}_k : portata d'aria mediata sul tempo del k-esimo flusso $\left[\frac{m^3}{s} \right]$;
- f_k : frazione di tempo in cui si verifica il flusso d'aria k-esimo (per un flusso permanente f_k vale 1);
- b_k : fattore di correzione che tiene conto di quei casi in cui la temperatura di mandata non è uguale alla temperatura dell'ambiente esterno. Questo

si verifica quando è presente un sistema di pre-riscaldamento o di recupero termico dell'aria di ventilazione.

I parametri principali legati alla qualità dell'aria negli edifici residenziali sono l'umidità relativa e la presenza di anidride carbonica (CO₂). Per contenere a livelli accettabili tali parametri, secondo le normative, il ricambio d'aria deve essere almeno 0,5 volte il volume della stanza ogni ora (vol/h). Per le stanze con destinazioni d'uso particolare il valore consigliato è maggiore; per esempio per le cucine è di 1,5 vol/h e per i bagni di 2 vol/h. Bisogna anche tenere conto che per ogni persona bisogna garantire almeno 30 m³/h di ricambio d'aria. Tale ricambio può essere ottenuto in modo naturale attraverso l'apertura delle finestre o in maniera controllata mediante un impianto.

2.5.3. Apporti termici gratuiti generati internamente

Gli apporti termici gratuiti interni derivano da:

- Calore emanato dalle persone. I flussi termici che interessano il corpo umano si suddividono in scambi termici sulla superficie del corpo (convezione con aria esterna, irraggiamento con le superfici dell'ambiente ed evaporazione e sudorazione superficiale) e scambi termici nel cavo polmonare (convezione con l'aria inspirata e flussi di vapore). Per quanto riguarda i flussi di calore sensibile, variano a seconda del tipo di attività svolta e dal peso della persona stessa. Mediamente vanno dai 65 W per una persona seduta a riposo agli 800 W quando lo sforzo fisico è massimo.
- Calore disperso per effetto joule dagli elettrodomestici.
- Calore prodotto dal sistema di illuminazione. Nelle lampade ad incandescenza una parte della potenza assorbita (il 10% circa) è trasformata in energia luminosa, mentre la rimanente viene rilasciata sotto forma di calore (radiazione 80%, convezione e conduzione 10%). Nelle lampade fluorescenti l'efficienza è maggiore, il 25% della potenza assorbita è trasformata in energia luminosa. Il flusso termico che ne deriva, al variare dei flussi installati, può essere stimato come segue: circa 5 W/m² di superficie dell'abitazione per lampade a scarica e fluorescenti, e 10 W/m² per lampade ad incandescenza.

- Calore sensibile e latente prodotto da cucine e fornelli durante la cottura dei cibi.

Secondo la normativa UNI EN ISO 7730 lo scambio termico derivante dagli apporti interni gratuiti per abitazioni residenziali fino ai 170 m² di superficie può essere stimato con la seguente formula:

$$Q_{gr,int} = (5,294 \cdot A_u - 0,01577 \cdot A_u^2) \tau \quad ,$$

dove A_u è la superficie utile di pavimento delle parti abitate dell'edificio. Invece, per abitazioni con superficie maggiore di 170 m², si calcola con la formula:

$$Q_{gr,int} = 450 \cdot \tau \quad .$$

2.5.4. Irraggiamento solare

L'apporto dell'irraggiamento solare sull'involucro dell'edificio può essere calcolato con la seguente formula:

$$Q_{sol} = (I_{m,k} A_{cap,k} F_{omb,k}) \tau \quad ,$$

dove:

- $I_{m,k} \left[\frac{W}{m^2} \right]$: irradianza solare media mensile sulla superficie k-esima. I valori si trovano tabellati, per i capoluoghi di provincia, nella norma UNI 10349 in base alle principali orientazioni (N, S, E e O, SE e SO, NE e NO).
- $F_{omb,k}$: fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni. Dipende dalla latitudine, dall'orientamento dell'elemento ombreggiato, dal clima, dal periodo considerato e dalle caratteristiche geometriche degli elementi ombreggianti.
- $A_{cap,k} [m^2]$: area di captazione solare effettiva della superficie k-esima. Il calcolo cambia se si tratta di un componente dell'involucro trasparente (vetrate) o un componente opaco (pareti e coperture).

Area di captazione per i componenti opachi

Per il componente opaco l'area di captazione si può calcolare con la seguente formula:

$$A_k = \alpha_k R_k U_k A_{p,k} \quad ,$$

dove:

- α_k : fattore di assorbimento solare del componente. Dipende dal colore della superficie esterna del componente. Colori scuri riflettono meno le radiazioni, consentendo alla parete di accumulare più calore. Può essere assunto pari a 0,3 per componenti di colore chiaro, 0,6 per componenti di colore medio e 0,9 di colore scuro.
- $R_k \left[\frac{m^2K}{W} \right]$: resistenza termica superficiale esterna del componente, pari a $0,04 \left[\frac{m^2K}{W} \right]$.
- $U_k \left[\frac{W}{m^2K} \right]$: trasmittanza termica del componente.
- $A_{p,k} [m^2]$: area proiettata del componente.

Area di captazione per i componenti trasparenti

Per le vetrate l'area di captazione si calcola con la formula seguente:

$$A_k = F_{sc,k} U_{sol,k} (1 - F_{F,k}) A_{v,k} \quad ,$$

con:

- $F_{sc,k}$: fattore di riduzione relativo all'utilizzo di schermature mobili (per es. tende).
- $U_{sol,k} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$: trasmittanza di energia solare totale dell'elemento vetrato aggiustata per l'angolo di incidenza dei raggi solari sulla vetrata. Misura la capacità della struttura vetrata di trasmettere il calore assorbito. I valori si trovano tabellati nella norma UNI EN 410 in base alla tipologia di vetro e variano da $0,76 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ di una vetrata a singolo vetro a $0,45 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ di una vetrata con triplo vetro con rivestimenti basso emissivi.
- $F_{F,k}$: coefficiente di riduzione dovuto al telaio, pari al rapporto tra l'area proiettata del telaio della vetrata e l'area proiettata totale (in genere pari a 0,87).
- $A_{v,k} [m^2]$: area proiettata totale.

2.5.5. Energia fornita dai sistemi di riscaldamento

Gli impianti di riscaldamento permettono di fornire il carico termico sufficiente per avere una temperatura interna idonea per il comfort abitativo.

L'impianto viene progettato a partire dalle formule del bilancio energetico dell'edificio descritte nei paragrafi precedenti fissando una temperatura interna di progetto di 20 °C:

$$\dot{Q}_{imp} = \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{sol} - (\dot{Q}_{H,tr} + \dot{Q}_{H,ve}) \quad .$$

L'impianto viene dimensionato sul fabbisogno energetico di picco, cioè per la situazione più critica durante la stagione invernale. Gli scambi di calore latente vengono trascurati.

2.5.6. Scambi di calore latente

Oltre ai carichi di calore sensibile descritti nei paragrafi precedenti sono presenti anche carichi di calore latente che non contribuiscono a modificare la temperatura a bulbo secco dell'aria ma influiscono nel comfort dell'ambiente.

Questi derivano da:

- Calore latente generato internamente. Respirazione ed evaporazione cutanea delle persone (per una persona a riposo è quantificabile in 55 W), e prodotto da eventuali processi o apparecchiature presenti nell'edificio.
- Perdita di vapore acqueo per diffusione attraverso l'involucro. Tale scambio di calore latente è trascurabile rispetto agli altri.
- Differenze di umidità specifica tra l'aria esterna ed interna. Dato che in genere in inverno l'umidità dell'aria interna è maggiore di quella dell'aria esterna il flusso di calore latente che ne deriva è verso l'esterno. Può essere quantificato come:

$$Q_{ve,lat} = r\rho_a \sum_k [(\dot{V}_k f_k)(x_i - x_e)] \quad ,$$

dove:

$r \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$: calore di evaporazione dell'acqua, pari a circa 2500 $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$;

$x_i \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_a} \right]$: contenuto di vapore dell'aria nelle condizioni interne;

$x_e \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_a} \right]$: contenuto di vapore dell'aria nelle condizioni esterne.

2.6.Quadro normativo di riferimento

La normativa tecnica per progettare correttamente una copertura in laterizio da un punto di vista termoigrometrico può essere suddivisa in tre ambiti.

Un primo ambito in cui vengono riportate la terminologia, l'analisi degli strati funzionali e le regole di progettazione generale. Le definizioni funzionali e geometriche di tutti i possibili elementi della copertura sono riportate nelle norme UNI 8089, 8090, 8091. La norma UNI 8178 fornisce un'analisi della funzione svolta dagli elementi del manto e dai diversi strati da considerare nella progettazione delle coperture. La norma UNI 9460, infine, riporta le istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di coperture discontinue.

Un secondo ambito riguarda l'insieme di norme tecniche che contengono le principali caratteristiche dei materiali utilizzati nei tetti. Tali caratteristiche sono indispensabili per il calcolo delle trasmittanze e per la verifica termoigrometrica delle varie soluzioni costruttive. La norma UNI 10355 riporta i valori delle resistenze termiche unitarie relative alle tipologie di murature e solai maggiormente diffuse in Italia; la norma UNI EN ISO 10456 specifica i metodi per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto per materiali e prodotti per l'edilizia che siano termicamente omogenei. In essa è contenuta, inoltre, una banca dati con valori di progetto in funzione della densità, conducibilità termica, calore specifico e fattore di resistenza alla diffusione del vapore, per prodotti comunemente utilizzati nelle costruzioni; nella UNI EN 1745, sono trattate le caratteristiche delle varie tipologie di murature e i prodotti per muratura.

Un ultimo ambito normativo riguarda le procedure per il calcolo e la verifica delle prestazioni termiche ed igrometriche delle strutture di involucro dell'edificio. Questa normativa è riportata nei paragrafi sottostanti

2.6.1.Normativa relativa all'efficienza energetica

Il D.Lgs 192/05, successivamente modificato dal D.Lgs 311/06 e dal DPR 59/09, regola le modalità di calcolo delle dispersioni energetiche degli edifici. La norma prevede un livello minimo di prestazione degli edifici nel settore residenziale espresso in consumo di energia primaria $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{anno}} \right]$. La norma inoltre prevede una tabella in cui vengono riportati i valori limite di trasmittanza per i

componenti dell'involucro dell'edificio (copertura, pareti, pavimenti), a seconda della zona climatica in cui l'edificio è collocato. I metodi di calcolo della trasmittanza e della resistenza termica dei componenti sono riportati dalla norma UNI EN ISO 6946. Una norma presente nel Decreto Ministeriale 26 Gennaio 2010 introduce dei valori opzionali di trasmittanza (più bassi rispetto a quelli obbligatori), da rispettare per poter accedere a detrazioni fiscali per il 55% sul reddito IRPEF dei costi sostenuti per il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. Tali detrazioni scadono nel 2012 ma è in lavorazione una legge che dovrebbe garantire una detrazione del 50%.

In Fig. 2.3 è riportata la tabella, con valori obbligatori e valori per accedere alle detrazioni, mentre in Fig. 2.4 è illustrata la Suddivisione schematica del territorio in base alle zone climatiche. Tali zone sono individuate attraverso il parametro del grado giorno (GG), che permette di caratterizzare i climi italiani in base all'andamento della temperatura dell'aria esterna durante il periodo di riscaldamento.

VALORI LIMITE TRASMITTANZA $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$		Dal 01/01/2010		STRUTTURE OPACHE		
ZONA CLIMATICA	PARETI		COPERTURE		PAVIMENTI	
	Secondo D.Lgs 192/05	Per detrazione del 55%	Secondo D.Lgs 192/05	Per detrazione del 55%	Secondo D.Lgs 192/05	Per detrazione del 55%
A	0,62	0,54	0,38	0,32	0,65	0,6
B	0,48	0,41	0,38	0,32	0,49	0,46
C	0,40	0,34	0,38	0,32	0,42	0,40
D	0,36	0,29	0,32	0,26	0,36	0,34
E	0,34	0,27	0,30	0,24	0,33	0,30
F	0,33	0,26	0,29	0,23	0,32	0,28

Figura 2.3. Valori limite di trasmittanza e valori opzionali da rispettare per poter accedere alle detrazioni fiscali per i diversi componenti dell'involucro edilizio in base alla zona climatica.

Viene calcolato tramite la somma, estesa ad un certo intervallo di tempo, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente interno e la temperatura media esterna giornaliera.

Si ha:

$$GG = \sum_{j=1}^N (t_i - t_{me})^+ ,$$

dove:

- t_i : temperatura interna di riferimento, pari a 20 °C.
- t_{me} : temperatura media esterna giornaliera; viene calcolata sulla media di quattro valori di temperatura: la massima, la minima, quella riferita alle ore 8:00 e quella riferita alle ore 19:00.
- N : giorni del periodo di riscaldamento; tale periodo è stabilito dalla legge in base alla zona climatica di appartenenza.

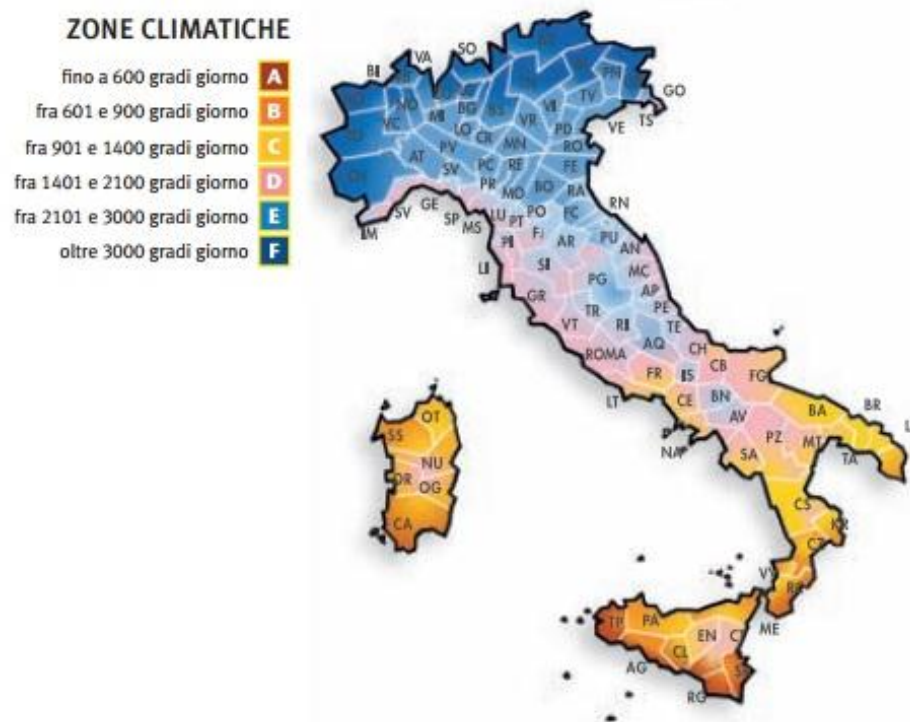


Figura 2.4. *Suddivisione territoriale in zone climatiche in base ai gradi giorno della località.*

Quindi, per esempio, valori elevati di gradi giorno indicano temperature medie giornaliere molto inferiori alla temperatura interna e conseguentemente periodi prolungati di riscaldamento degli edifici.

Certificazione energetica

Secondo la Direttiva europea 2002/91/CE sul rendimento energetico degli edifici, recepita dalla legislazione italiana con il D.Lgs 192/05, per ogni abitazione nuova o in generale che deve essere sottoposta a passaggi di proprietà o di locazione è necessario richiedere ai soggetti abilitati una certificazione energetica. Si tratta di un documento, redatto secondo i criteri stabiliti dalla norma, che attesta l'efficienza energetica dell'edificio. Il documento ha una validità di 10 anni e deve essere aggiornato nel caso di interventi di riqualificazione che riguardino almeno il 25% della superficie esterna dell'immobile o nel caso di interventi di ristrutturazione impiantistica, sostituzione di componenti o apparecchi che riducano la prestazione energetica dell'edificio.

Attualmente è utilizzato principalmente per due scopi: durante il rogito è indispensabile per gli atti notarili di compravendita di una casa, così come per l'accesso alle detrazioni del 55% in cui è parte della documentazione necessaria. Secondo tale certificazione gli edifici vengono classificati in base ad un indice di prestazione energetica globale (EP_{gl}) espresso in $\left[\frac{\text{kwh}}{\text{m}^2 \text{anno}} \right]$, così definito:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs} + EP_e + EP_{ill} \quad ,$$

dove:

- EP_i : indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale;
- EP_e : indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva;
- EP_{acs} : indice di prestazione energetica per la produzione di acqua calda sanitaria;
- EP_{ill} : indice di prestazione energetica per illuminazione artificiale.

In base all'indice di prestazione l'edificio sarà classificato in una classe energetica indicata con una lettera dell'alfabeto (vanno dalla classe A alla G, dove la classe A è la migliore). Sia l'indice globale che i suoi componenti avranno dei valori di limite minimo da rispettare in caso di nuova costruzione o interventi di ristrutturazione. La certificazione inoltre riporterà il fabbisogno energetico dell'edificio, il rendimento medio stagionale dell'impianto, l'eventuale presenza di fonti rinnovabili e le raccomandazioni per il miglioramento della prestazione energetica. La metodologia per il calcolo dell'indice di prestazione globale ed i suoi componenti si trova nelle norme UNI/TS 11300-1 e UNI/TS 11300-2. Ad oggi queste due norme non permettono il calcolo relativo al raffrescamento estivo (EP_e), cosa che sarà resa possibile dalle successive parti della norma,

attualmente in fase di elaborazione. Inoltre la determinazione dell'indice di prestazione del sistema di illuminazione (EP_{ill}) non è obbligatoria per gli edifici residenziali.

Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale

L'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale (EP_i) può essere ricavato come:

$$EP_i = \frac{Q_h}{A_{pav} \eta_g} \quad ,$$

dove:

- $A_{pav} [m^2]$: superficie utile (pavimento).
- η_g : rendimento globale medio stagionale dell'impianto di riscaldamento.

I rendimenti che concorrono al rendimento globale sono quelli di emissione (η_e), regolazione (η_{rg}), distribuzione (η_d) e generazione (η_{gn}).

$$\eta_g = \eta_e \cdot \eta_{rg} \cdot \eta_d \cdot \eta_{gn}$$

In Fig. 2.5 sono riportati i rendimenti comuni per un impianto di riscaldamento.

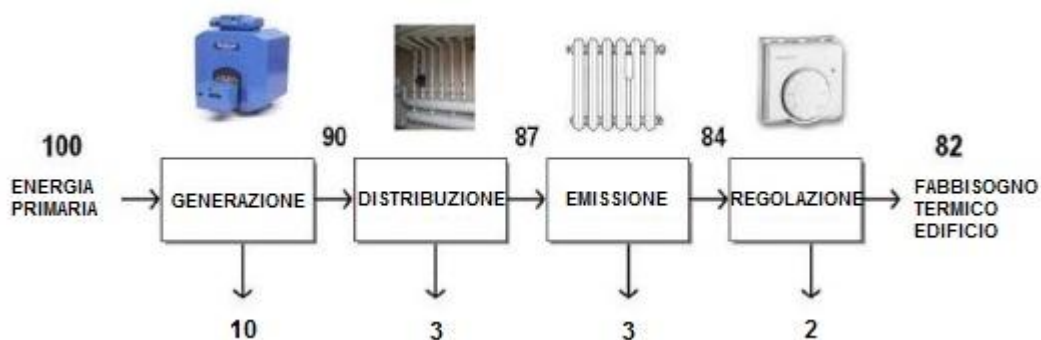


Figura 2.5. Esempio tipo delle perdite energetiche del sistema di riscaldamento costituito dai 4 sotto sistemi generazione, distribuzione, emissione e regolazione.

- Q_h [kwh]: fabbisogno di energia termica per l'intero periodo di riscaldamento; è dato da:

$$Q_h = 0,024 \cdot GG(H_{tr} + H_{ve}) - f_x(Q_s + Q_i) \quad ,$$

con GG i gradi giorno relativi alla località in cui è situato l'edificio; H_{tr} , H_{ve} , Q_s e Q_i rispettivamente sono le trasmittanze di trasmissione e ventilazione e gli apporti gratuiti interni e solare; parametri analizzati nei paragrafi precedenti. Il fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti è indicato con f_x . Quest'ultimo indica l'effettiva percentuale di utilizzazione di tali apporti per il fabbisogno termico. Infatti non sempre gli apporti gratuiti portano ad una riduzione della richiesta di calore da parte del sistema di riscaldamento. Per esempio, in certi momenti, può accadere che gli apporti gratuiti riscaldino l'ambiente oltre il dovuto causando l'aumento delle dispersioni a causa della maggiore differenza di temperatura. Ciò è dovuto principalmente agli apporti solari, che sono massimi nelle ore più calde. Il fattore di utilizzazione viene fornito dalle norme in base alla capacità termica dell'edificio (capacità di accumulare il calore relativo ai guadagni ed utilizzarlo in tempi differiti, quando è più utile) e al rapporto tra apporti gratuiti e perdite per trasmissione e ventilazione (con l'aumento del rapporto tra apporti lordi e perdite, la percentuale d'utilizzo diminuisce perché i fenomeni di surriscaldamento diventano più frequenti e più acuti).

A seconda dell' EP_i che caratterizza l'edificio esso viene inserito in una classe specifica di prestazione energetica. Le classi sono costruite in maniera tale che l'edificio che abbia un indice di prestazione energetica invernale pari al limite minimo di legge ($EP_{i,L}$) ricada in classe C. In Fig. 2.6 è riportato il sistema di classificazione definito sulla base dei limiti massimi ammissibili del corrispondente indice di prestazione energetica in vigore a partire dal 1 gennaio 2010 ($EP_{i,L}$ 2010).

Classe A _{i+} < 0,25 $EP_{i,L}$ (2010)
0,25 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe A _i < 0,50 $EP_{i,L}$ (2010)
0,50 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe B _i < 0,75 $EP_{i,L}$ (2010)
0,75 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe C _i < 1,00 $EP_{i,L}$ (2010)
1,00 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe D _i < 1,25 $EP_{i,L}$ (2010)
1,25 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe E _i < 1,75 $EP_{i,L}$ (2010)
1,75 $EP_{i,L}$ (2010) ≤ Classe F _i < 2,50 $EP_{i,L}$ (2010)
Classe G _i ≥ 2,50 $EP_{i,L}$ (2010)

Figura 2.6. Valori limite delle classi energetiche per la climatizzazione invernale.

Il valore di EP limite si ottiene per interpolazione lineare nella tabella fornita dalla normativa (vedi Fig. 2.7). I valori sono espressi in funzione di:

- rapporto S/V dell'edificio, dove S è la superficie disperdente verso ambienti non riscaldati e V è il volume riscaldato racchiuso da S;
- zona climatica in cui è ubicato l'edificio, rappresentata dai gradi giorno.

Rapporto di forma dell'edificio S/V	Zona Climatica [kWh/m ² anno]										
	A		B		C		D		E		F
	fino a 600 GG	da 601 GG	a 900 GG	da 901 GG	a 1400 GG	da 1401 GG	a 2100 GG	da 2101 GG	a 3000 GG	oltre 3000 GG	
≤ 0,2	9,5	9,5	14	14	23	23	37	37	52	52	
≥ 0,9	41	41	55	55	78	78	100	100	133	133	

Figura 2.7. Valori di EP limite della climatizzazione invernale forniti dalla normativa in base a zona climatica e rapporto superficie-volume dell'edificio.

2.7. Stagione estiva ed inerzia termica

Nella stagione estiva, dato che la temperatura dell'aria esterna è superiore di quella dell'aria interna, i flussi termici di trasmissione e ventilazione risultano in ingresso al sistema. Aggiungendo anche gli apporti gratuiti si ha che tutti i flussi sono in entrata al sistema. Un eventuale impianto di climatizzazione permette di esportare calore dal sistema per mantenere nell'ambiente le condizioni termoigrometriche di comfort. La formula del bilancio energetico è:

$$\dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{H,tr} + \dot{Q}_{H,ve} - \dot{Q}_{imp} = C \cdot \frac{dT}{d\tau} \quad .$$

Nelle ore notturne può accadere che la temperatura dell'aria interna sia superiore a quella dell'aria esterna. Quindi in questa situazione, come accade nella stagione invernale, i flussi termici di trasmissione e ventilazione risultano in uscita dal sistema. Come nella stagione invernale, secondo la normativa il calcolo va effettuato su base mensile ipotizzando il regime stazionario. Però tale calcolo in estate è poco affidabile a causa delle elevate escursioni termiche dell'aria esterna e della variabilità dell'apporto dell'irraggiamento solare durante le ore

diurne. Per una stima verosimile quindi il sistema non può più essere considerato in condizioni stazionarie ma è necessario effettuare una analisi dinamica. In queste condizioni assume importanza il concetto di inerzia termica. A causa della variabilità dei carichi termici durante una giornata estiva, mediamente si ha un andamento sinusoidale della temperatura della superficie esterna dell'involucro edilizio, che oscilla tra i valori minimi e massimi di giornata (rispettivamente notte e primo pomeriggio). Queste condizioni periodiche sulla superficie generano oscillazioni della temperatura che si propagano all'interno dei materiali come onde termiche. L'inerzia termica consiste nella capacità dell'involucro di opporsi al passaggio del flusso di calore e di assorbirne una quota, senza rilasciarlo in maniera immediata e contribuendo al contenimento delle oscillazioni della temperatura interna. L'inerzia termica deriva dall'effetto combinato della resistenza termica e della capacità termica. Come già scritto la resistenza termica misura l'attitudine del sistema isolante alla trasmissione del calore e all'aumentare di questa diminuisce la velocità con cui il calore viene ceduto. La capacità termica invece è la quantità di calore necessaria per far variare di 1 °C la temperatura del materiale. Essa è data dal prodotto tra la massa ed il calore specifico:

$$C = mc \quad ,$$

dove:

- $C \left[\frac{J}{K} \right]$: capacità termica
- $m [kg]$: massa
- $c \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$: calore specifico unitario

Il calore che accumula la struttura dopo una variazione di temperatura ΔT è dato dal prodotto tra la capacità termica e la variazione di temperatura:

$$Q = C \Delta T \quad .$$

In immagine 2.8 si può notare che la parete provoca uno smorzamento dell'ampiezza dell'onda di temperatura esterna rispetto a quella interna e uno sfasamento delle onde, intervallo di tempo tra l'ora in cui si registra la massima temperatura nella parte esterna e in quella interna. Ne consegue che, a parità di calore specifico, le strutture con capacità termica ridotta, cioè leggere o con spessori ridotti, sono in grado di accumulare poco calore, cedendolo rapidamente all'ambiente interno.

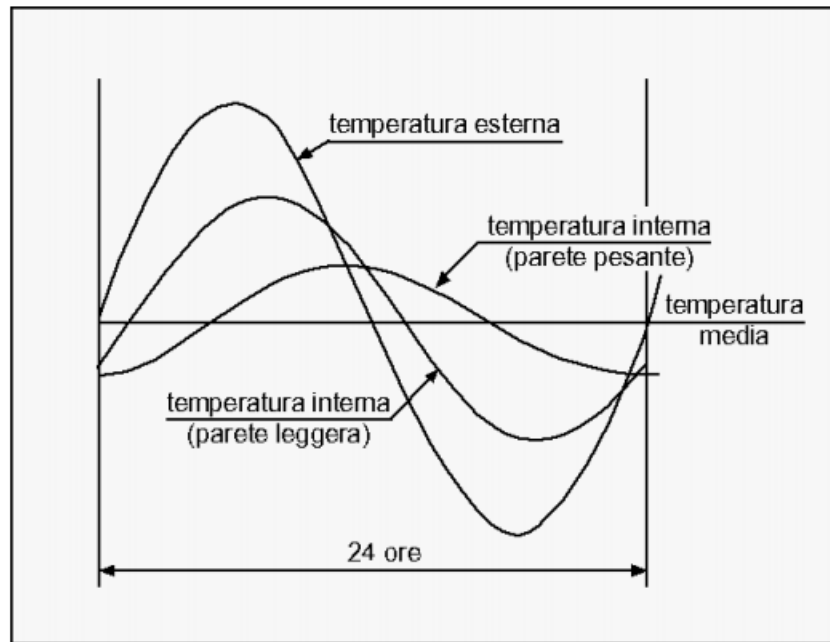


Figura 2.8. Andamento sinusoidale della temperatura della superficie esterna dell'involucro edilizio e conseguente andamento, smorzato e sfasato, della temperatura interna al variare della massività delle pareti.

Sfasamento e smorzamento dipendono anche dalla diffusività termica. Essa si calcola con la seguente formula:

$$d = \frac{\lambda}{\rho c} \quad ,$$

dove:

- $d \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$: diffusività termica
- $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$: conducibilità termica del materiale
- $\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$: densità
- $c \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$: calore specifico unitario

La diffusività termica rappresenta il rapporto tra la capacità che ha un materiale di condurre energia termica e la sua capacità di accumularne. Misura la velocità di propagazione del flusso termico conduttivo causato dalla variazione nel tempo della temperatura. Minore risulta la diffusività tanto migliori saranno le sue prestazioni in termini di attenuazione e sfasamento dell'onda termica.

La soluzione tecnica migliore da adottare è quella di scegliere un sistema dotato contemporaneamente di sufficiente massa e bassa conduttività, senza prediligere soltanto una di queste caratteristiche. Uno sfasamento ottimale è di 12 ore e non dovrebbe essere inferiore alle 8 ore. Infatti, con tali valori, il calore entrerà all'interno dell'abitazione nelle ore notturne, durante le quali il calore è ceduto all'aria esterna che è più fredda rispetto all'involucro ed inoltre è possibile arieggiare gli ambienti interni. Lo sfasamento e lo smorzamento dell'onda termica dipendono non soltanto dalle caratteristiche e dallo spessore dei singoli materiali, ma anche dalla sequenza dei materiali stessi rispetto alla direzione del flusso di calore. Il gradiente di temperatura attraverso il materiale si riduce con la distanza dalla superficie riscaldata, ossia il materiale più interno partecipa sempre meno all'accumulo. Non è però sufficiente avere uno strato "massivo" esterno in quanto gli apporti gratuiti generati internamente e l'irraggiamento solare che entra attraverso le finestre tenderebbero a surriscaldare l'ambiente.

2.7.1. Normativa relativa alla stagione estiva

Secondo il DPR n.59 del 2 Aprile 2009 per le coperture che si trovano in aree in cui l'irradianza al suolo è maggiore di 290 W/m^2 è previsto un limite della trasmittanza termica periodica ($Y_{i,e}$) che deve essere minore di $0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Quest'ultima è un parametro che esprime la capacità di un componente di attenuare e sfasare nel tempo il flusso termico proveniente dall'esterno nelle 24 ore. Il calcolo delle prestazioni termiche dinamiche, quali trasmittanza periodica, sfasamento e attenuazione dell'onda termica, va eseguito secondo il metodo riportato in UNI EN ISO 13786. Essa si calcola attraverso la seguente relazione:

$$Y_{i,e} = U f_a \quad ,$$

dove:

$Y_{i,e} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$: trasmittanza termica periodica;

$U \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$: trasmittanza termica in regime stazionario;

f_a : fattore di attenuazione. È calcolato come:

$$f_a = \frac{\dot{Q}_{max}}{\dot{Q}'_{max}} \quad ,$$

con:

\dot{Q}'_{max} : flusso termico massimo in assenza di accumulo di calore, pari al prodotto della trasmittanza termica in regime stazionario per la differenza di temperatura tra il valore massimo esterno ed il valore interno.

\dot{Q}_{max} : flusso termico massimo in condizioni reali. Si calcola attraverso la soluzione dell'equazione generale della conduzione in regime variabile.

regime periodico stabilizzato

Un metodo semplificato per calcolare il flusso termico è quello di considerare la variabilità delle condizioni esterne attraverso il regime periodico stabilizzato. Si suppone cioè che, mentre la temperatura interna T_i dell'aria rimane costante (a mezzo di un impianto), quella esterna T_e vari con legge periodica sulle 24 ore secondo la relazione:

$$T_e = T_{me} + A \cos(\omega\tau) \quad ,$$

dove:

- T_e : temperatura esterna;
- T_{me} : temperatura media nelle 24 ore;
- A : ampiezza di oscillazione, differenza tra la temperatura massima e quella media;
- τ : tempo;
- ω : la pulsazione, pari a $2\pi/T$ (con $T=24$ ore). Rappresenta l'armonica fondamentale dello sviluppo in serie di Fourier cui può essere ricondotta la funzione periodica che esprime la temperatura esterna.

L'effetto combinato sulla superficie esterna dell'involucro della variazione della temperatura dell'aria esterna e dell'irraggiamento solare è studiato attraverso la temperatura aria-sole. La superficie opaca esposta all'irraggiamento solare si riscalda rispetto alla temperatura dell'aria aumentando quindi il flusso termico verso l'interno; però vi sarà anche uno scambio termico tra la parete e l'aria esterna ad una temperatura più bassa. La temperatura aria-sole è la temperatura che avrebbe l'aria esterna per simulare il flusso termico che effettivamente si realizza. In Fig. 2.9 si riporta un esempio di andamento della temperatura aria-sole in funzione del tempo per una parete.

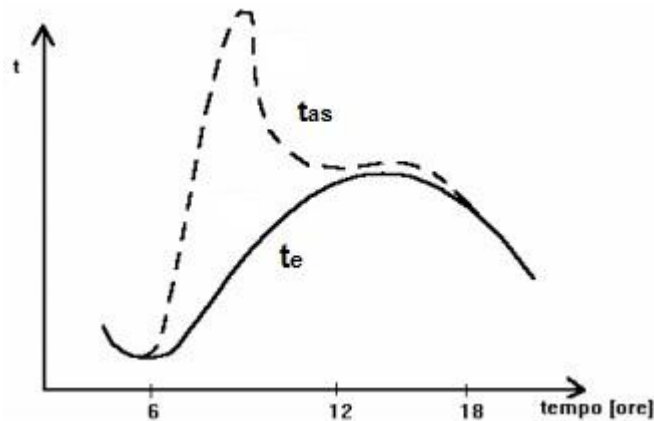


Figura 2.9. Andamento della temperatura dell'aria esterna e della temperatura fittizia aria-sole della superficie esterna di un componente opaco dell'involucro.

La temperatura aria-sole può essere calcolata con la seguente formula:

$$T_{as} = T_e + \frac{aI_i}{\alpha_e} \quad ,$$

con:

T_e [K] : temperatura aria esterna;

a : fattore di assorbimento solare del componente;

I_i $\left[\frac{W}{m^2}\right]$: intensità radiazione solare incidente, mediata nella giornata;

α_e $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$: coefficiente di adduzione esterno.

I dato della temperatura esterna dell'aria e dell'irradianza solare sono riportati, per ogni capoluogo di provincia, dalla norma UNI 10349.

In regime periodico stabilizzato il flusso termico specifico scambiato attraverso la superficie interna dei componenti opachi dell'involucro può essere stimato con la seguente formula:

$$\dot{q}_i = U(T_{me} - T_i) + \alpha_i \gamma A \cos(\omega\tau - \varphi) \quad ,$$

dove:

- U $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$: trasmittanza in regime stazionario;
- T_{me} [K] : temperatura media aria-sole;
- T_i [K] : temperatura interna; secondo la normativa italiana, per gli edifici adibiti ad abitazione, si assume una temperatura interna costante pari a 26 °C;
- α_i $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$: coefficiente di adduzione interno;

- γ : fattore di smorzamento, dato dal rapporto tra la temperatura della superficie esterna massima e la temperatura della superficie interna massima durante le 24 ore;
- φ : fattore di smorzamento.

La relazione esprime il flusso termico come somma di due termini: il primo costante pari a $U(T_{me} - T_i)$, corrispondente al flusso termico specifico che la parete scambierebbe in regime stazionario se la temperatura esterna fosse costante pari T_{me} e un secondo termine sinusoidale che tiene conto della variazione delle condizioni esterne (temperatura dell'aria e irraggiamento solare).

Calcolo trasmittanza termica periodica e fattore di attenuazione

La trasmittanza termica periodica $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ indica il flusso termico scambiato sulla faccia interna della parete \dot{q}_i a causa di una variazione sinusoidale della temperatura esterna di ampiezza unitaria. È espressa in numero complesso per tenere conto dello sfasamento del flusso termico rispetto alla variazione di temperatura aria-sole della superficie esterna:

$$Y_{i,e} = \frac{\dot{q}_i}{\Delta T_e} \quad ,$$

con:

$$\Delta T_e = \Delta T_{e,max} e^{j\omega\tau} \quad ,$$

$$\dot{q}_i = \Delta \dot{q}_{i,max} e^{j\omega\tau} \quad .$$

Infine la formula del flusso termico specifico del paragrafo precedente si può scrivere come:

$$\dot{q}_i = U(T_{me} - T_i) + Y_{i,e}A \cos(\omega\tau - \varphi) \quad ,$$

oppure allo stesso modo:

$$\dot{q}_i = U[(T_{me} - T_i) + f_a A \cos(\omega\tau - \varphi)] \quad ,$$

con:

$$f_a = \frac{Y_{i,e}}{U} = \frac{\alpha_i \gamma}{U} \quad .$$

Il fattore di attenuazione, che è un numero adimensionale, esprime quindi il rapporto tra il flusso termico scambiato dalla superficie interna della parete per

effetto di una variazione sinusoidale della temperatura esterna di ampiezza unitaria e il flusso termico scambiato in regime stazionario per differenza unitaria di temperatura tra ambiente esterno ed interno.

Capacità termica aerea

La trasmittanza termica periodica risulta però un indicatore inadeguato a valutare situazioni in presenza di elevati carichi interni. È stata quindi introdotta la capacità termica aerea interna $\left[\frac{kJ}{^{\circ}C}\right]$ che esprime la capacità di un componente edilizio di accumulare il calore proveniente dal lato interno, cioè dai carichi termici interni e del calore dovuto all'irraggiamento solare attraverso le vetrate. Si calcola con la seguente formula:

$$C_a = \rho d c \quad ,$$

Con ρ densità, d spessore e c il calore specifico unitario. Lo spessore d è calcolato come il minimo di tali valori:

- metà dello spessore totale della struttura;
- spessore del materiale fino al raggiungimento del primo strato di isolante, senza considerare l'intonaco;
- spessore massimo di 0,1 m.

Per avere un buon valore di tale parametro quindi è necessario che sul lato interno del componente opaco vi sia uno strato massivo, che consenta l'accumulo dei carichi interni in modo da mantenere le temperature superficiali interne su valori accettabili.

2.8. Diffusione di vapore d'acqua attraverso l'involucro

Molte proprietà dei materiali da costruzione sono influenzate dal loro contenuto di umidità: in particolare le principali prestazioni alterate sono la durata, la resistenza strutturale, le proprietà di isolamento termico. La conducibilità termica degli strati coibenti tende a ridursi con l'innalzamento dei contenuti vista la rilevante conducibilità dell'acqua rispetto all'isolante (100 a 1). Per di più, per quanto riguarda le coperture, la condensa che si forma nella struttura ricade verso il solaio andando a provocare macchie nei soffitti degli ambienti interni. Un

ulteriore problema è che la permanenza nel tempo di una eccessiva umidità e condensa negli strati del tetto porterà alla formazione di muffe che ridurranno la durabilità della copertura. In generale la condensa si può manifestare sulla superficie della parete, condensa superficiale, o all'interno della parete dando luogo alla condensa interstiziale. Essa può derivare da infiltrazioni d'acqua (per esempio per risalita capillare dal terreno, pioggia battente, rottura di tubazioni idriche, ecc.) o più frequentemente dal naturale passaggio di vapore attraverso le strutture. Negli ambienti interni alle abitazioni la concentrazione del vapore è per la maggior parte del tempo più elevata rispetto all'aria esterna; ciò è dovuto al fatto che all'interno delle abitazioni sono presenti sorgenti di vapore dovute agli occupanti, alle attività di cottura cibi e alle attività legate all'igiene personale (docce e bagni). Il vapore tende a diffondere attraverso le strutture perimetrali dell'edificio costituite da materiali porosi. Tale fenomeno dipende dalla differenza di pressione parziale del vapore tra ambiente interno ed esterno, un discorso analogo a quello dell'aria che tende a spostarsi da zone con temperatura più alta verso quelle più basse. Si ha che:

$$P = P_v + P_a \quad ,$$

con:

P : pressione atmosferica

P_v : pressione parziale del vapore

P_a : pressione parziale dell'aria

La pressione parziale del vapore dipende dall'umidità assoluta dell'aria. Secondo la legge di Fick attraverso uno strato poroso che separa due ambienti, in cui quello interno è caratterizzato da una pressione parziale del vapore P_{vi} maggiore di quella dell'ambiente esterno P_{ve} , si verifica trasporto di vapore dall'interno verso l'esterno. In condizioni di regime stazionario e ipotizzando che il vapore si comporti come un gas perfetto, la portata specifica di vapore $g'_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \right]$ può essere espressa in perfetta analogia a quanto discusso nella trasmissione del calore.

$$g'_v = \frac{(P_{vi} - P_{ve})}{Z'_{vt}} \quad ,$$

dove $Z'_{vt} \left[\frac{\text{m}^2\text{s Pa}}{\text{kg}} \right]$ è la resistenza specifica totale alla trasmissione del vapore.

Essa è esprimibile nello stesso modo della resistenza termica globale:

$$Z'_{vt} = \frac{1}{\beta_i} + \frac{L}{\delta} + \frac{1}{\beta_e} \quad .$$

Essa è la somma delle resistenze $1/\beta_i$ e $1/\beta_e$ in corrispondenza delle superfici interna ed esterna e dalla resistenza L/δ dello strato. β_i e β_e sono detti coefficienti convettivi di trasporto di massa ed hanno significato analogo ai coefficienti termici convettivi della trasmissione del calore. Quest'ultimi possono essere ritenuti trascurabili a fronte della resistenza offerta dagli altri componenti edilizi. La grandezza $\delta \left[\frac{\text{kg}}{\text{Pa m s}} \right]$ è detta permeabilità al vapore ed esprime la capacità del vapore ad attraversare una determinata sostanza. Essa ha lo stesso significato della conduttività termica λ . Infatti, analogamente alla legge di Fourier per la conduzione, per la trasmissione del vapore nel materiale poroso può scriversi la relazione di Fick:

$$g'_v = - \delta \frac{dP_v}{dx} \quad .$$

Tale legge di Fick può anche essere posta nella forma:

$$g'_v = - \frac{dP_v}{dZ'_v} \quad ,$$

dove:

$$dZ'_v = \frac{dx}{\delta} \quad ,$$

che rappresenta la resistenza alla trasmissione del vapore di uno strato di spessore dx . In termini finiti, per uno strato di spessore L , sarà pari a:

$$Z'_v = \frac{L}{\delta} \quad .$$

Nella pratica, la resistenza al vapore dei materiali viene espressa in relazione al comportamento dell'aria, tramite l'indice di diffusione del vapore μ :

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad .$$

Tale coefficiente adimensionale indica quanto la resistenza al passaggio del vapore di un certo materiale è superiore a quella dell'aria, a parità di spessore e di temperatura. Per l'aria μ è pari a 1. La permeabilità al vapore dell'aria è:

$$\delta_a = 1,944 \cdot 10^{-12} \cdot T^{0,81} \quad .$$

In Tabella 2.3 sono riportati i valori di indice di diffusione del vapore per alcuni materiali da costruzione.

Materiale	μ
Fibra di vetro	2
Intonaco	8
Mattoni pieni	10
Calcestruzzo armato	50
Polistirolo espanso	100
Legno compensato	200
Bitume	60×10^3
Alluminio (s = 0,025 mm)	$3,5 \times 10^9$

Tabella 2.3. *Indice di diffusione del vapore per i principali materiali da costruzione.*

Poiché la resistenza alla diffusione del vapore di un materiale edile è funzione del suo spessore, moltiplicando l'indice di diffusione del vapore di un materiale μ per il suo spessore S in metri, si ottiene il cosiddetto strato di aria equivalente S_d .

$$S_d = \mu S \quad .$$

La condensazione del vapore d'acqua si ha quando la pressione parziale dello stesso raggiunge la pressione di saturazione. Quest'ultima è funzione della temperatura (temperatura di condensazione o di rugiada); a parità di temperatura, più alto è il contenuto di vapore, e quindi più alta l'umidità relativa, maggiori sono i rischi della formazione di condensa. Al fine di verificare l'insorgere o meno della condensa occorre pertanto controllare che la temperatura, superficiale e interna alla parete, sia maggiore della relativa temperatura di condensazione, cioè che la pressione parziale del vapore sia maggiore della pressione di saturazione. La procedura per la verifica termoigrometrica è riportata nella norma UNI EN ISO 13788, che definisce un metodo di riferimento per determinare la temperatura superficiale interna minima dei componenti edilizi tale da evitare la crescita di muffe, in corrispondenza a valori prefissati di temperatura e umidità relativa interna; inoltre tale norma indica il metodo per la valutazione del rischio di condensazione interstiziale dovuta alla diffusione del vapore acqueo. Per quanto riguarda quest'ultima, secondo la norma la verifica si svolge per ciascuno dei 12 mesi, durante i quali si calcola se, quando e quanta condensa si accumula nella parete e se questa è in grado di evaporare nel periodo più favorevole. La quantità massima accumulata non deve superare un valore limite e deve evaporare completamente durante l'estate.

CAPITOLO 3

La ventilazione del tetto

3.1.Tetto ventilato, vantaggi e svantaggi

Un tetto ventilato, si può chiamare tale quando il manto di copertura si distacca dallo strato isolante, creando un'intercapedine che permetta ad un flusso omogeneo d'aria di circolare dalla gronda fino al colmo, per effetto del gradiente termico dovuto alla differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e quello interno all'intercapedine. Tale soluzione progettuale nasce dall'esigenza di assicurare un migliore benessere termo-igrometrico nelle abitazioni. Nella stagione estiva gli irraggiamenti tipici italiani possono portare ad un surriscaldamento del manto di copertura che può raggiungere temperature nell'ordine degli 80 °C. Il moto convettivo di aria che si sviluppa all'interno dell'intercapedine permette di asportare una quota del calore derivante dall'irraggiamento sul manto di copertura. Inoltre, la circolazione d'aria consente lo smaltimento del vapore d'acqua, che sale dagli ambienti sottostanti, prima che si verifichi la condensazione sull'intradosso freddo del manto di copertura. Condensa che ricadrebbe e andrebbe a deteriorare il materiale isolante e le altre strutture della copertura.

Oltre a queste due caratteristiche vi sono altri vantaggi:

- Aumenta la vita utile del tetto limitando le escursioni termiche tra la parte superiore e inferiore delle tegole o dei coppi, causa di tensioni e dilatazioni differenziate. L'elevato livello di isolamento richiesto oggi dalle norme vigenti porta al raggiungimento di elevate temperature estive a carico della superficie esterna dell'isolante, che ne potrebbero compromettere la durabilità nel tempo; lo strato di ventilazione quindi limita queste temperature mantenendo i materiali in condizioni di esercizio ottimale.
- Consente di mantenere analoghe caratteristiche termo-igrometriche sopra e sotto il manto di copertura, consentendo alle tegole o ai coppi di respirare e di mantenersi asciutti, aumentando così anche la loro resistenza al gelo.

- Nelle zone di montagna, nella stagione invernale, in prossimità della linea di gronda si creano facilmente pericolosi accumuli di ghiaccio, causa di infiltrazioni nella struttura del tetto. La presenza della ventilazione, con aria a temperatura maggiore di quella esterna, permette lo scioglimento uniforme del manto nevoso, impedendo la formazione di accumuli di ghiaccio.
- Rende possibile lo smaltimento, sotto forma di vapore, dell'acqua meteorica che filtra dal manto di copertura.

Il principale svantaggio della ventilazione è che in inverno estrae calore dalla struttura contribuendo a raffreddare gli ambienti interni, diminuendo quindi l'efficienza energetica dell'edificio. Però, come andremo a vedere nei paragrafi successivi, utilizzando delle sezioni di ventilazioni non eccessive si hanno riduzioni significative nei flussi termici entranti nelle ore a maggiore irraggiamento e, più limitatamente, perdite d'inverno.

3.2. Microventilazione e ventilazione

Secondo la norma UNI 9460 che regolamenta le coperture per l'edilizia, un tetto per essere definito ventilato deve essere dotato di una camera di ventilazione, fra manto e strato coibente, con una grandezza di falda (area della sezione dell'intercapedine per metro di lunghezza del tetto) non inferiore a $550 \text{ cm}^2/\text{m}$. Non devono esserci impedimenti lungo la falda che intralcino il flusso ascensionale dell'aria; la quale deve entrare facilmente a livello di gronda e uscire dal colmo attraverso un elemento di sfiato adeguato a garantire il deflusso dell'aria riscaldata, in quantità almeno pari a quella di entrata. Se questi fattori non vengono rispettati non si può parlare di ventilazione, bensì di microventilazione. Quest'ultima può essere insufficiente per l'asportazione dell'energia termica incidente sulla copertura, ma riporterà tutti gli altri vantaggi descritti nel paragrafo precedente. Per questo è un accorgimento funzionale indispensabile al corretto funzionamento di un manto di copertura per tutti gli schemi previsti dalle norme UNI; la ventilazione, invece, è un sistema facoltativo in relazione al comfort che si vuole ottenere negli ambienti sottostanti. Questi due sistemi di aerazione della copertura (microventilazione e ventilazione) possono anche coesistere.

3.2.1. Normativa per la certificazione

La norma UNI EN ISO 6946 definisce il comportamento termico di intercapedini d'aria aventi queste caratteristiche:

- sono limitate da due facce effettivamente parallele e perpendicolari alla direzione del flusso termico e con una remissività non minore di 0,8;
- il loro spessore (nella direzione del flusso termico) è minore del 10% delle altre due dimensioni e comunque minore di 0,3 m;

Un'intercapedine di aria è definita non ventilata se non vi è una specifica configurazione affinché l'aria possa attraversarla. Le resistenze termiche, relative all'intercapedine, da utilizzare nel calcolo della trasmittanza termica della parete sono riportate in Tabella 3.1 al variare dello spessore dell'intercapedine e della direzione del flusso termico. I valori relativi al flusso orizzontale si applicano anche a flussi termici inclinati fino a $\pm 30^\circ$ rispetto al piano orizzontale.

Un'intercapedine d'aria non separata dall'ambiente esterno da uno strato isolante, ma con delle piccole aperture, deve essere considerata come intercapedine non ventilata se tali aperture non sono maggiori di:

- 500 mm^2 per metro di lunghezza per le intercapedini d'aria verticali;
- 500 mm^2 per metro quadrato di superficie per intercapedini d'aria orizzontali;

Spessore intercapedine [mm]	Direzione del flusso termico		
	Ascendente $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$	Orizzontale $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$	Discendente $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,18
25	0,17	0,18	0,19
50	0,18	0,19	0,21
100	0,19	0,20	0,22
300	0,20	0,21	0,23

Tabella 3.1. Valori di resistenza termica per intercapedini non ventilate³

³ I valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

Un'intercapedine è definita debolmente ventilata quando vi è un passaggio di aria limitato, proveniente dall'ambiente esterno, attraverso aperture aventi le caratteristiche seguenti:

- apertura maggiore di 500 mm^2 ma minore di 1500 mm^2 per metro di lunghezza per le intercapedini d'aria verticali;
- apertura maggiore di 500 mm^2 ma minore di 1500 mm^2 per metro quadrato di superficie per intercapedini d'aria orizzontali.

La resistenza termica, in questo caso, è uguale alla metà del valore corrispondente della tabella 3.1. Tuttavia, se la resistenza termica tra l'intercapedine di aria e l'ambiente esterno è maggiore di $0,15 \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$, essa deve essere riportata al valore $0,15 \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$.

Una intercapedine, invece, è definita fortemente ventilata se le aperture tra l'intercapedine e l'ambiente esterno sono maggiori di:

- 1500 mm^2 per metro di lunghezza per le intercapedini d'aria verticali;
- 1500 mm^2 per metro quadrato di superficie per le intercapedini orizzontali.

La resistenza termica totale di un componente per edilizia, contenente un'intercapedine d'aria fortemente ventilata, si ottiene trascurando la resistenza termica dell'intercapedine di aria e di tutti gli altri strati che la separano dall'ambiente esterno e includendo una resistenza termica superficiale esterna corrispondente all'aria immobile.

3.3.Soluzioni costruttive

La configurazione costruttiva del tetto ventilato si ottiene generalmente con la posa di listelli in perpendicolare alla linea di gronda, al di sopra della copertura di coibentazione. Sopra alla listellatura viene quindi collocato un tavolato continuo o una serie di listelli perpendicolari per il posizionamento ed il sostegno dello strato di copertura (vedi Fig. 3.1). Alla base dell'intercapedine viene disposta una griglia in modo da permettere allo stesso tempo, il passaggio d'aria ed evitare l'introduzione di sporcizia o piccoli animali.

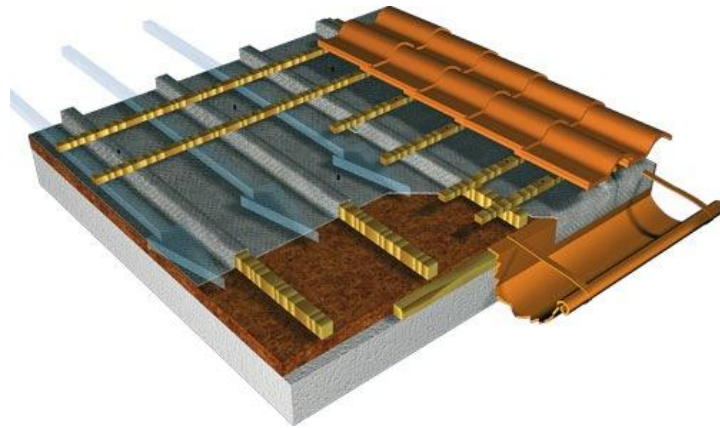


Figura 3.1. Intercapedine creata con doppia listellatura

Alternativamente vengono impiegati strati isolanti che realizzano da sé le intercapedini necessarie per la ventilazione. In Fig. 3.2 ne è riportato un esempio.



Figura 3.2. Canali di ventilazione creati dal pannello isolante

Lo strato di microventilazione è sempre posto sottotegola. Se coesiste con un sistema di ventilazione sopra descritto è sempre separato da questo (in genere con un tavolato).

Ci sono diversi metodi costruttivi per realizzare tale strato, qui sotto sono riportati i principali:

- *Pannelli strutturali componibili*

Si tratta di moduli standard composti da uno strato di isolante termico, solitamente rivestito nelle due facce con materiale impermeabile, su cui è fissato un profilo in lamiera (vedi Fig. 3.3). Quest'ultimo ha la funzione di supporto per la posa del manto di copertura e al tempo stesso, grazie ai propri fori, di permettere la microventilazione. I moduli sono assemblati sopra il tetto e sigillati nei giunti tramite silicone e successivamente

ricoperti con nastro di alluminio in modo da ridurre i ponti di calore e permettere l'impermeabilizzazione.

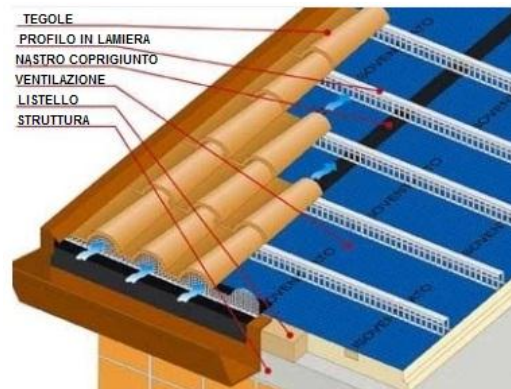


Figura 3.3. Microventilazione realizzata con pannelli componibili

- *Lastra sottotegola*

Costituita da una lastra ondulata posta sotto il manto di copertura che è fissato a dei listelli perpendicolari alla linea di falda (vedi Fig 3.4). Permette una ulteriore impermeabilizzazione e una microventilazione. È caratterizzata da sezioni di ventilazione molto inferiori a alla tipologia costruttiva dei pannelli strutturali.

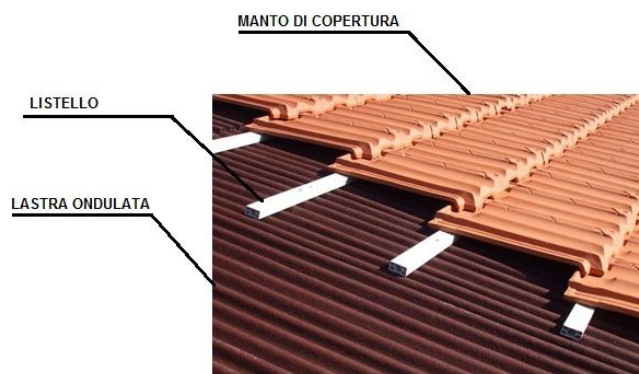


Figura 3.4. Microventilazione realizzata con lastra sottotegola

- *Pannello isolante sottotegola*

Costituito da un pannello isolante con scanalature orizzontali atte al supporto delle tegole e scanalature verticali per la microventilazione. Caratterizzato anch'esso da una bassa ventilazione.

3.4.Linea di colmo e di gronda

Particolari importanti nella realizzazione di una camera di ventilazione sono l'ingresso in gronda e la fuoriuscita attraverso il colmo. La linea di gronda si realizza tra la cornice e la grondaia, necessita sempre di una griglia per evitare l'ingresso di animali, insetti e sporcizia varia. La linea di colmo deve garantire allo stesso tempo lo smaltimento dell'aria calda e la tenuta all'acqua piovana. Nel caso classico di tetto non ventilato si impiegano elementi in laterizio che vengono murati tramite malta cementizia sulla linea di colmo. Per un tetto ventilato, invece, è più opportuno impiegare dei fissaggi meccanici.

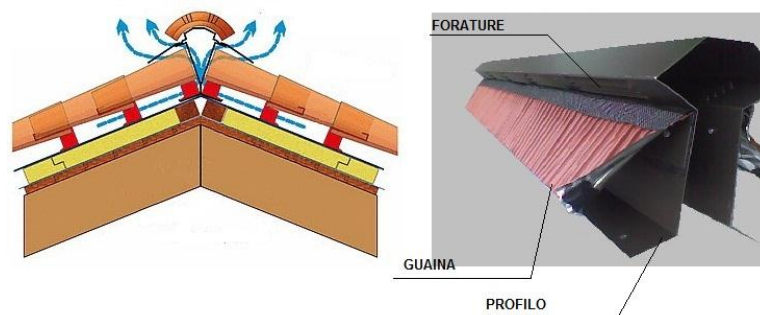


Figura 3.5. Colmo ventilato

In genere è utilizzato un profilo in lamiera costruito appositamente per i tetti ventilati (vedi Fig. 3.5). Questo permette di ancorare saldamente gli elementi di colmo al supporto del manto di copertura ma, allo stesso tempo, li distanzia adeguatamente in modo da non ostacolare il libero passaggio di aria. Ai lati del profilo è attaccata una guaina, da appoggiare sopra i coppi laterali, per garantire l'impermeabilità. L'aria proveniente dalla camera di ventilazione entra alla base del profilo ed esce nella parte superiore dove sono presenti delle forature. L'ingresso in gronda e la fuoriuscita in colmo devono essere dimensionate per garantire pari o maggiore areazione rispetto all'intercapedine lungo la falda.

3.5. Comportamento termico dell'intercapedine

Il flusso d'aria all'interno della cavità è influenzato dal principio di Archimede, detto anche effetto camino per i gas, e dalla pressione del vento.

- *Effetto camino*

L'aria all'interno dell'intercapedine si trova ad una temperatura maggiore rispetto a quella dell'aria esterna, in quanto riscaldata dal calore che lo strato superiore dell'intercapedine riceve tramite irraggiamento solare. A causa della minore densità tenderà per galleggiamento a dirigersi verso l'alto per poi uscire all'esterno. Il flusso di aria uscente provoca una depressione alla base dell'intercapedine che quindi attira aria esterna più fresca. In definitiva tale effetto dipende dalla differenza di temperatura tra l'aria esterna e l'aria interna.

- *Effetto del vento*

Deriva dalla differenza di pressione del vento tra la sezione di entrata dell'aria e quella di uscita. La pressione del vento in uno specifico punto dell'involucro di un edificio dipende dalla velocità del vento e da un coefficiente che caratterizza quel particolare punto. Quest'ultimo è funzione della direzione del vento, della presenza di ostacoli (alberi, altri edifici,...etc.) e della geometria dell'edificio.

L'effetto combinato di questi due fenomeni crea una differenza di pressione totale tra sezione di entrata e di uscita che determina il flusso di aria nell'intercapedine. Se la velocità del vento è limitata, l'effetto camino è predominante. Se invece la velocità è alta l'effetto del vento è predominante. Tra queste due possibilità vi è un regime transitorio in cui i due fenomeni possono cooperare oppure contrapporsi.

3.5.1. Bilancio termico

In Fig. 3.6 sono rappresentati i flussi termici che coinvolgono un tetto ventilato.

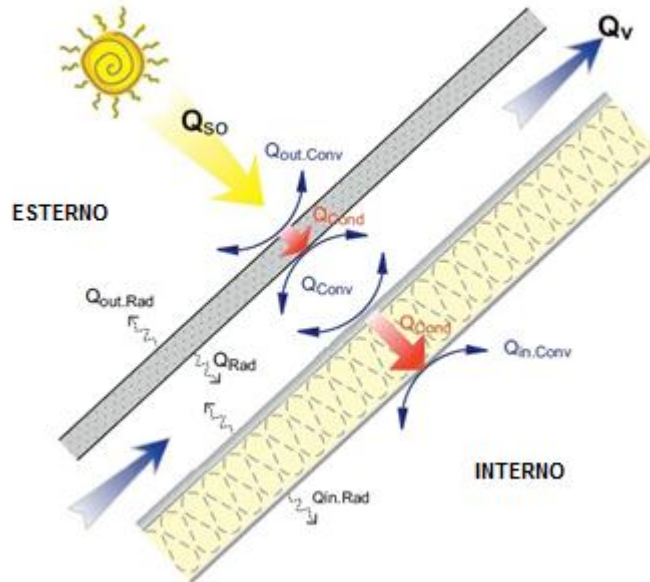


Figura 3.6. Flussi termici in un tetto ventilato

Nella stagione estiva lo strato superiore riceve un elevato flusso di calore derivante dall'irraggiamento solare (Q_{SO}). Questo calore spesso riscalda la superficie esterna del tetto ad una temperatura superiore a quella dell'aria esterna. Quindi una parte del calore in entrata viene disperso tramite irraggiamento e convezione con l'esterno (Q_{OUT}). La superficie superiore della cavità scambia calore tramite irraggiamento con quella inferiore e per convezione con il flusso d'aria all'interno della cavità. Una parte del calore viene portato fuori dall'aria (Q_V) ed il residuo viene scambiato con lo strato inferiore del tetto e quindi trasmesso verso l'interno dell'edificio (Q_{IN}). Il bilancio è:

$$Q_{SO} - Q_{OUT} = Q_{IN} - Q_V \quad .$$

Il calore in uscita derivante dalla ventilazione Q_V è dato da:

$$Q_V = \dot{m}c_p(T_{OUT} - T_{IN}) \quad ,$$

dove:

- $\dot{m} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$: portata di massa dell'aria che attraversa la cavità
- $c_p \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$: calore specifico dell'aria a pressione costante
- $T_{OUT}, T_{IN} [K]$: rispettivamente temperatura dell'aria esterna ed interna

L'aria entra alla temperatura esterna. Riceve calore dalla superficie superiore e una parte di questo lo trasmette alla superficie inferiore, quindi man mano che sale nella cavità aumenta la propria temperatura. Quindi il flusso di calore tra superficie superiore e aria andrà calando mentre aumenta quello tra l'aria e la superficie inferiore.

3.5.2. Modello numerico per lo scambio termico

Viene qui riportato un metodo lineare statico per analizzare lo scambio termico nelle cavità ventilate. La cavità ha lunghezza L , larghezza W e spessore D . Per esprimere l'andamento crescente delle temperature nella cavità questa viene divisa in una serie di N sezioni di lunghezza ΔL lungo la direzione del flusso di aria (in Fig. 3.7 la sezione i -esima)

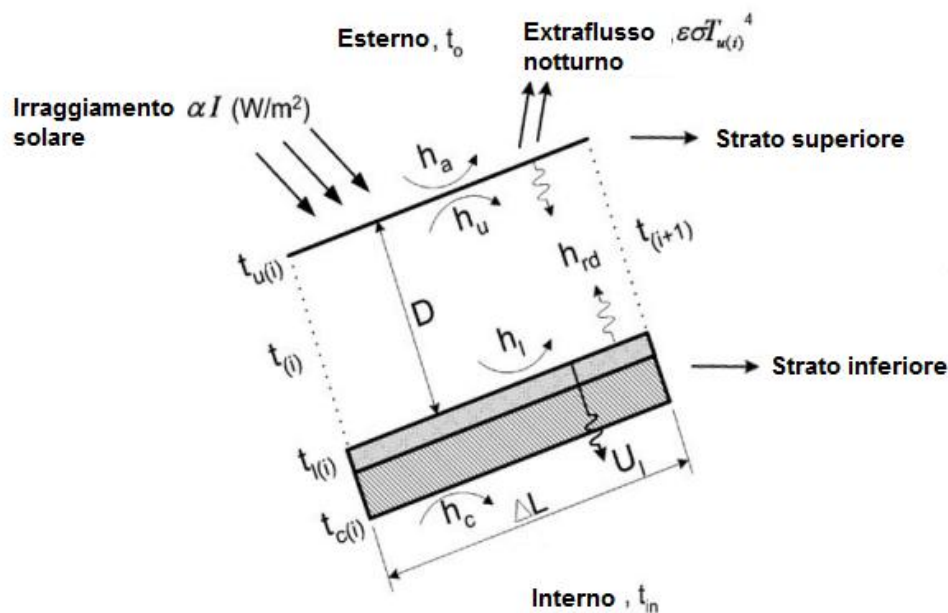


Figura 3.7. Sezione i -esima della cavità con relativi flussi termici

Bilancio energetico strato superiore:

Si ha assorbimento dell'irraggiamento solare, extraflusso notturno verso la volta celeste, convezione con l'ambiente esterno, convezione con l'aria nella cavità e lo scambio radiativo con la superficie inferiore della cavità. La seguente formula descrive tale bilancio:

$$\alpha I - \varepsilon \sigma T_{u(i)}^4 + h_a(t_o - t_{u(i)}) = h_u \left(t_{u(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) + h_{rd}(t_{u(i)} - t_{l(i)}) ,$$

Dove $t_{u(i)}$ è la temperatura dello strato superiore, ipotizzando che sia costante nello spessore, $t_{l(i)}$ è la temperatura della superficie inferiore della cavità, $t_{(i)}$ e $t_{(i-1)}$ sono rispettivamente le temperature dell'aria che entra e di quella che esce dalla sezione.

Bilancio energetico nella cavità:

consiste negli scambi convettivi con le due superfici della cavità e lo scambio di calore tra sezione e sezione dovuto al flusso di aria.

$$\left[h_u \left(t_{u(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) + h_l \left(t_{l(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) \right] W \Delta L = c_p \rho v W D (t_{(i)} + t_{(i-1)}) .$$

La temperatura dell'aria in ingresso della prima sezione può essere considerata uguale alla temperatura esterna. La temperatura dell'aria che lascia una sezione è pari alla temperatura in ingresso della sezione successiva.

Bilancio energetico nello strato inferiore:

consiste nello scambio di calore tramite convezione con l'aria presente nella sezione della cavità, tramite radiazione con la superficie superiore e gli scambi di calore con la zona interna.

$$h_l \left(t_{l(i)} - \frac{t_{(i-1)} + t_{(i)}}{2} \right) + h_{rd}(t_{u(i)} - t_{l(i)}) = U_l(t_{l(i)} - t_{in}) .$$

U_l rappresenta il coefficiente globale di scambio termico dello strato (escluso il coefficiente liminare per la superficie superiore dello strato).

3.5.3. Modello numerico per il flusso di aria

In Fig. 3.8 è riportato il bilancio delle forze nella cavità. La pressione derivante dalle forze di Archimede è data dalla differenza tra la pressione dovuta alla forza gravitazionale agente sulla colonna d'aria esterna con la stessa altezza di quella presente nella cavità e la pressione dovuta alla forza gravitazionale agente sulla colonna d'aria presente nella cavità.

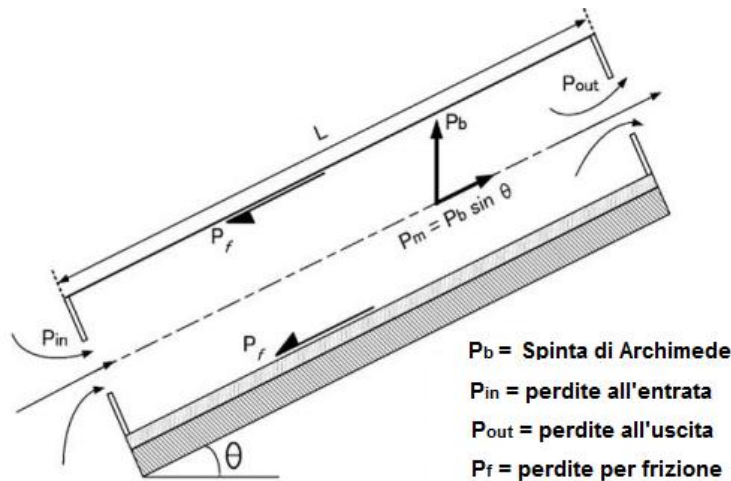


Figura 3.8. Bilancio delle forze nella cavità

Per l'intera cavità si ha:

$$P_b = g\rho_o \left(\frac{273,15}{t_o + 273,15} L \text{sen}(\theta) - \sum_{i=1}^N \frac{273,15}{t_i + 273,15} \Delta L \text{sen}(\theta) \right) .$$

Si assume che la densità dell'aria nella cavità è approssimabile a quella dell'aria esterna. La componente della pressione lungo l'asse della cavità è:

$$P_m = P_b \text{sen}(\theta) .$$

Secondo il teorema di Bernoulli la pressione statica agente sulla cavità P_m è pari alla pressione dinamica derivante dal fluido in moto P_d . Quest'ultima è pari a:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho_o v^2 .$$

La pressione dinamica è limitata dalla perdita di pressione nelle aperture di entrata ed uscita ($P_d k_{in}$ e $P_d k_{out}$) e da quella derivante dalla frizione tra fluido e pareti ($P_d f$). Le formule per stimare k_{in} e k_{out} sono le seguenti

$$k_{in} = 1,0124 \left(\frac{D_{in}}{D} \right)^{-3,137} .$$

$$k_{out} = 1,0049 \left(\frac{D_{out}}{D} \right)^{-2,967} .$$

Questi coefficienti dipendono dal rapporto tra spessore della sezione di entrata o uscita (D_{in} , D_{out}) e lo spessore della cavità (D). Le formule provengono dal database dell'ASHRAE⁴ dei coefficienti di perdita di pressione per i condotti. La frizione tra fluido e parete dipende dalla geometria della cavità e dal numero di

⁴ American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

Reynolds che a sua volta dipende dalla viscosità cinematica (ν_c) e dalla velocità del fluido (v). Per il regime laminare vale la formula:

$$f = f' \frac{L}{D_{id}} \quad ,$$

con:

$$D_{id} = \frac{4DW}{2(D+W)} \quad , \text{ diametro idraulico della cavità}$$

$$f' = \frac{64}{Re} = \frac{64}{D_{id} \nu_c} v \quad , \text{ fattore di frizione di Darcy}$$

In regime turbolento la relazione tra fattore di frizione e numero di Reynolds è più complessa ed è governata dalla relazione di Colebrook. La relazione di Swamee–Jain, qui riportata, rappresenta una approssimazione di quella di Colebrook:

$$f' = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D_{id}} + \frac{5,74}{Re_{D_{id}}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad ,$$

con ε rugosità del condotto [m].

In definitiva si ha:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho_o v^2 (k_{in} + k_{out} + f) \quad .$$

La velocità media dell'aria nella cavità può quindi essere stimata con la seguente formula:

$$v = 2C_D \sqrt{\frac{P_m}{\rho_o}} \quad ,$$

con $C_D = \frac{1}{k_{in} + k_{out} + f}$ definito coefficiente di scarico.

3.6. Caratteristiche del flusso di aria e coefficienti di convezione

La convezione, in base alla natura del moto, può essere naturale e forzata: naturale se il moto del fluido è dovuto esclusivamente alle differenze di densità ed alle forze di galleggiamento presenti all'interno del fluido a causa della differenza di temperatura tra il solido ed il fluido, e forzata se il moto del fluido è dovuto ad azioni esterne. La convezione inoltre può essere distinta in interna ed

esterna a seconda se il moto del fluido è confinato da pareti su tutti i lati eccetto un ingresso ed una uscita.

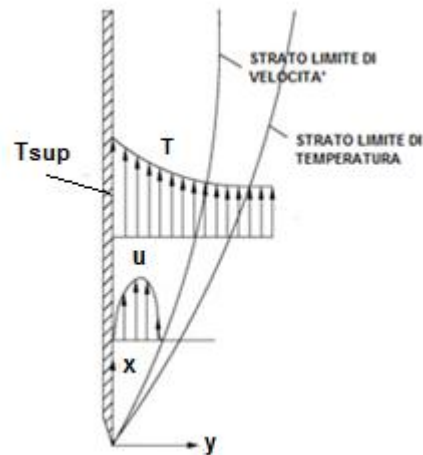


Figura 3.9. *Profili di temperatura e dinamico di convezione su parete verticale con flusso parallelo.*

Il problema in esame è di convezione interna. All'imbocco di un condotto si verifica il fenomeno dello strato limite (dinamico e termico). Una corrente fluida che lambisce un corpo può essere divisa in due zone: una zona sottile aderente alla parete detto strato limite, e una zona esterna ad essa detta corrente indisturbata (vedi Fig. 3.9). Usualmente si definisce spessore dello strato limite dinamico la distanza dalla superficie lambita alla quale la velocità del fluido recupera la velocità della corrente indisturbata. Nel caso particolare di moti in condotti si ha che durante lo sviluppo dello strato limite dinamico la velocità esterna allo strato limite, zona detta cuore del condotto, non risente della presenza del condotto e di conseguenza il profilo di velocità si presenta piatto. A differenza di moti esterni, la velocità del cuore non rimane costante ma, per la costanza della portata massica, aumenta sebbene resti costante il suo valore medio pari alla velocità di ingresso. specularmente allo strato limite dinamico si sviluppa lo strato limite termico. ipotizzando che la temperatura del fluido che scorre nel condotto sia più alta della temperatura delle pareti del condotto si ha che la prima zona di fluido che inizia a scambiare calore è quella a contatto con le pareti. In questa fase il cuore del fluido non risente della presenza delle pareti e pertanto conserva la sua temperatura iniziale. Entrambi gli strati limite terminano quando il fluido all'asse del condotto risente della presenza del condotto. Il flusso si dice completamente sviluppato quando i due profili non variano con la coordinata x . Il moto del fluido all'interno della cavità può essere di tipo laminare o turbolento. Nel primo caso il flusso è governato dalle forze

viscose, è costante nel tempo e avviene con scorrimento di strati infinitesimi gli uni sugli altri senza alcun tipo di rimescolamento di fluido. Nel secondo caso le forze viscose non sono sufficienti a contrastare le forze di inerzia ed il moto delle particelle del fluido avviene in maniera caotica, senza seguire traiettorie ordinate. Queste due tipologie di moto sono caratterizzate da diversi profili di temperatura e velocità. Il moto turbolento garantisce maggiori scambi termici.

La convezione naturale è governata dal gruppo adimensionale di Rayleigh, che a sua volta è dato dal prodotto tra numero di Grashof e numero di Prandtl. Il numero di Grashof rappresenta il rapporto tra le forze di galleggiamento e le forze viscose, viene calcolato con la seguente formula:

$$Gr = \frac{g\beta d^3(|T_s - T_m|)}{\nu_c} ,$$

dove d è la dimensione caratteristica, g è l'accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$, β il coefficiente di espansione volumetrico [K], T_s , T_m sono rispettivamente la temperatura della superficie e la temperatura del fluido indisturbato [K]. Il numero di Prandtl esprime l'importanza della diffusività cinematica rispetto alla diffusività termica. Si ha:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} ,$$

con c_p calore specifico a pressione costante $\left[\frac{J}{kg K}\right]$, μ viscosità dinamica [Pa · s] e λ la conducibilità del fluido $\left[\frac{W}{mK}\right]$. Il numero di Nusselt invece è il gruppo adimensionale che esprime il rapporto tra il flusso di calore scambiato per convezione e il flusso di calore scambiato per conduzione. Può essere espresso dalla seguente relazione:

$$Nu = \frac{h_c d}{\lambda} .$$

Un altro gruppo adimensionale importante è il numero di Reynolds.

$$Re = \frac{d v}{\nu_c} .$$

Permette di valutare, in condizioni di convezione forzata, se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare (in corrispondenza del quale si hanno valori più bassi del numero di Reynolds) o turbolento (in corrispondenza del quale si hanno valori più elevati del parametro).

In Fig. 3.10 sono riportati i profili di temperatura e velocità dinamica in una cavità verticale, con alto rapporto di aspetto L/D , in cui una delle due superfici è mantenuta a temperatura superiore alla temperatura del fluido indisturbato. Il flusso è completamente sviluppato.

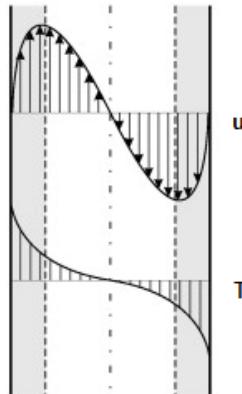


Figura 3.10. *Profili di temperatura e velocità del fluido su una cavità con una superficie riscaldata con flusso uniforme.*

Si nota che è presente un moto ascensionale del fluido adiacente alla superficie riscaldata e discendente nell'altra superficie. Questo tipo di convezione è detto monocellulare ed è riportato in Fig. 3.11.A. In questo caso all'aumentare del numero di Rayleigh il flusso si concentra lungo le superfici con la parte centrale della cavità che rimane quasi stagnante. Nel caso di cavità molto spesse o poco alte (basso rapporto di aspetto L/D) i profili relativi alle due superfici rimangono indipendenti e le condizioni corrispondono a quelle di due superfici isolate. Nel caso, invece, di entrambe le superfici riscaldate con un flusso costante di calore, quindi con temperatura maggiore di quella del fluido indisturbato, il flusso è puramente ascensionale. In una cavità orizzontale, con superficie inferiore riscaldata, il moto del fluido è di tipo multicellulare, con cellule regolarmente distanziate caratterizzate da un moto perpendicolare rispetto all'asse della cavità (vedi 3.11.B). Questo è detto moto convettivo di Rayleigh–Bénard. Se la cavità è inclinata oltre alla componente parallela della forza di galleggiamento agirà anche una componente normale al piano. Ciò provoca il nascere di flussi secondari. Rispetto alla cavità verticale i profili di velocità sono maggiormente asimmetrici. Tale asimmetria è relativamente meno importante quanto minore è lo spessore della cavità.

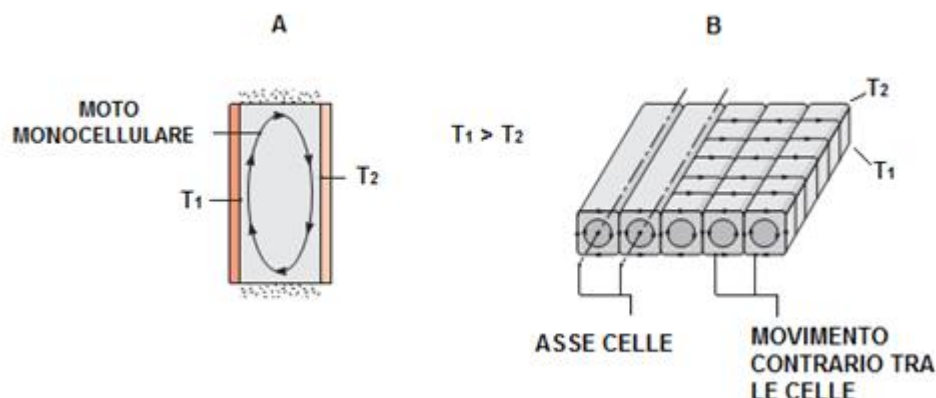


Figura 3.11. Moto convettivo monocellulare (A) e moto di Rayleigh–Bénard (B)

3.6.1. Convezione naturale in cavità inclinate

Nel caso di cavità inclinata con la superficie inferiore riscaldata⁵ il moto del fluido consiste in una combinazione tra il moto cellulare ed il moto di Rayleigh–Bénard. La transizione tra i due tipi di moto avviene ad un angolo critico di inclinazione θ^* , il cui valore, al variare del rapporto di aspetto⁶ L/D , è riportato in tabella:

L/D	1	3	6	12	>12
θ^*	25°	53°	60°	67°	70°

Tabella 3.2. Angolo critico al variare del rapporto di aspetto L/D

Per $L/D > 12$, $\theta < \theta^*$ e flusso laminare completamente sviluppato è valida la correlazione di Hollands et al. (1976):

$$Nu_D = \frac{h_c D}{\lambda} = 1 + 1,44 \left[\left(1 - \frac{1708}{Ra_D \cos \theta} \right) \right] \left\{ 1 - \frac{1708 [\sin(1,8 \cdot \hat{\theta})]}{Ra_D \cos \theta} \right\} + \left[\left(\frac{Ra_D \cos \theta}{5830} \right) - 1 \right],$$

con

$$\boxed{X} = \frac{X + |X|}{2}.$$

$\theta, \hat{\theta}$ è l'angolo, rispettivamente in gradi ed in radianti, di inclinazione della cavità

Si può notare dalla formula come per $Ra_D < \frac{1708}{\cos \theta}$ il numero di Nusselt vale 1. Ciò significa che non vi è moto del fluido e lo scambio di calore avviene

⁵ Ciò che generalmente succede in inverno sulle cavità di un tetto ventilato.

⁶ Una tipica cavità presente in un tetto ventilato ha sicuramente un rapporto $L/D > 12$ e l'inclinazione varia tra i 30° ed i 40°.

esclusivamente per conduzione. Tale equazione tende a sottostimare Nusselt di un 10% per valori di Rayleigh maggiori di 10^5 . Quando invece la superficie superiore è più calda⁷ non si ha convezione di Rayleigh–Bénard, in quanto lo strato d'aria più leggero giace già sopra a quello più denso. B.J. Brinkworth (2000) ha studiato questa situazione in presenza di convezione naturale in cavità create tra pannelli fotovoltaici ed il tetto. Sono state analizzate varie inclinazioni ed è stato osservato che per cavità strette e molto lunghe le formulazioni per la convezione forzata possono essere utilizzate con successo in questo problema di convezione naturale. La correlazione empirica trovata è:

$$Nu_{D_{id}} = \frac{h_c D_{id}}{\lambda} = 5,385 + \frac{0,071}{\left(\frac{L}{D_{id}} Re_{D_{id}} + 0,002\right)}$$

Per numeri di Grashof maggiori di 10^5 la correlazione perde di significato. Alternativamente è possibile usare la correlazione di Arnold et al. (1975) valida per qualsiasi rapporto di aspetto e per valori elevati di Grashof.

$$Nu_D = \frac{h_c D_D}{\lambda} = 1 + [Nu_D(\theta = 90^\circ) - 1] \text{sen}(\theta)$$

Per il calcolo di $Nu_D(\theta = 90^\circ)$ viene impiegata la relazione di MacGregor et al. (1969):

$$Nu_D(\theta = 90^\circ) = 0,046 Ra_D^{0,25} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,3}$$

Questa è valida per $10 < L/D < 40$, $10^4 < Ra_D < 10^7$.

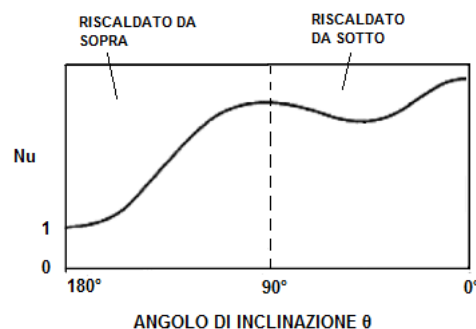


Figura 3.12 Nusselt in funzione dell'angolo di inclinazione⁸ (Bejan et al.2004)

In Fig.3.12 è riportato l'andamento del numero di Nusselt al variare dell'angolo di inclinazione, ponendo uguale ad uno il numero di Nusselt per una cavità orizzontale con superficie superiore riscaldata.

⁷ Caso estivo.

⁸ Per $0 < \theta < 90$ la superficie riscaldata è quella inferiore, mentre per $90 < \theta < 180$ la superficie riscaldata è quella superiore

Il regime laminare completamente sviluppato, per le geometrie tipiche delle cavità dei tetti ventilati, inizia tra i 15 cm ed i 100 cm dall'apertura (W.Miller et al. 2007). Maggiore è il rapporto di aspetto L/D minore sarà questa distanza. Il Numero di Nusselt locale decresce esponenzialmente fino al sopraggiungere del moto completamente sviluppato, poi si stabilizza e cala linearmente.

In Fig. 3.13, per una cavità di un tetto con spessore di 3 cm studiata con software CFD (D. Ababsa et al. 2012), sono riportati a sinistra i profili di velocità a distanze crescenti dalla sezione di entrata e a destra le temperature nel condotto visualizzato in tre dimensioni. Si nota come, spostandosi verso l'alto, viene meno il flusso di aria discendente in prossimità della superficie inferiore più fredda. Ciò è dovuto al fatto che questa superficie in realtà aumenta di temperatura salendo nella cavità.

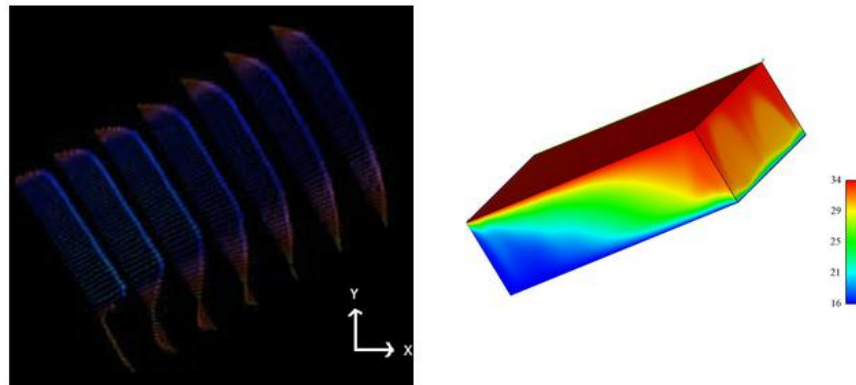


Figura 3.13. A sinistra profili di velocità, a destra un profilo di temperatura tridimensionale di una cavità inclinata in presenza di convezione naturale.

Maggiore è il numero di Rayleigh maggiore è la velocità del fluido, superato un certo valore possono instaurarsi instabilità nel fluido e il moto può passare ad un regime turbolento. Questo è caratterizzato da valori più alti di Nusselt. Per cavità rettangolari verticali, con dimensioni paragonabili a quelle relative alle intercapedini dei tetti ventilati, tale transizione avviene a valori di Grashof (Gr_L) di circa 10^9 (Bejan et al., 1984). Per le cavità inclinate si può presumere che avvenga a valori più alti. Tali valori si raggiungono solo in giornate con irraggiamento particolarmente elevato e solamente nella parte della cavità in prossimità dell'apertura di uscita (W.Miller et al. 2007).

3.6.2. Effetti del vento e convezione mista

Il vento crea un campo di pressione attorno alla struttura dell'edificio. La pressione totale su una facciata di un edificio è pari alla somma della pressione del vento e la pressione atmosferica. Trascurando quest'ultima all'interno di una cavità il vento provoca un aumento della pressione dinamica pari a:

$$\nabla p_w = C_{pi} \left(\frac{\rho v_w^2}{2} \right) - C_{ps} \left(\frac{\rho v_w^2}{2} \right) \quad ,$$

con C_{pi} e C_{ps} rispettivamente i coefficienti di pressione del vento nella sezione di entrata e in quella di uscita. Questi dipendono dalla geometria dell'edificio, dalla relativa posizione delle aperture, dalla presenza di ostacoli vicino all'edificio e dall'angolo di incidenza del vento sull'apertura. Se la differenza di pressione è positiva si avrà un flusso di aria ascendente, che coopera con la convezione naturale, nel caso opposto i due flussi si contrappongono. In Fig. 3.14 è riportato un tipico campo di pressione sulla facciata di un edificio. Si nota come il vento provoca una pressione positiva sulle facciate direttamente colpite ed una depressione in quelle opposte.

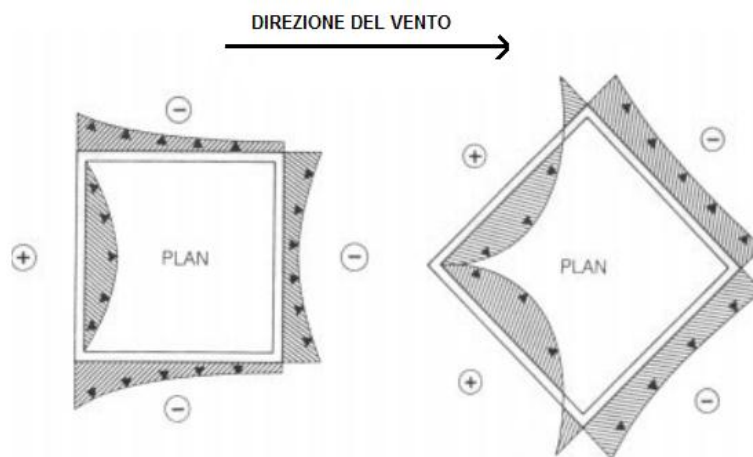


Figura 3.14. Campo di pressione sulle facciate di un edificio

In presenza di un tetto inclinato sulle falde si crea sempre una depressione. In figura 3.15 l'effetto del vento su un modellino.

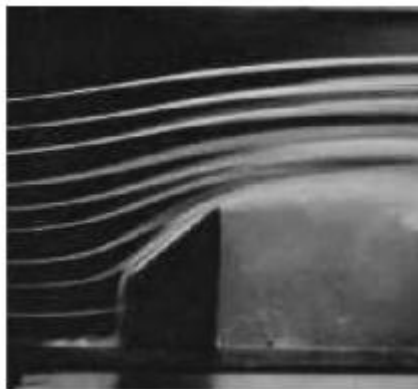


Figura 3.15. Effetto del vento su un tetto inclinato (N.M. Guirguisaa et al. 2007)

Generalmente la velocità del vento rilevata dalle stazioni apposite si riferisce ad una altezza di riferimento di 10 metri. Dato che il profilo verticale di velocità del vento segue delle leggi costanti si può ricavare la sua velocità ad ogni altezza. La velocità del vento cresce all'aumentare dell'altezza dal terreno con una legge logaritmica. Il profilo dipende dalla stabilità dell'atmosfera, dalla rugosità del terreno e dagli ostacoli che trova nel suo cammino. Una legge esponenziale che approssima quella logaritmica è la seguente:

$$v_z = v_{z_0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha ,$$

con:

$v_z \left[\frac{m}{s} \right]$: velocità del vento ad altezza z

$v_{z_0} \left[\frac{m}{s} \right]$: velocità del vento ad altezza di riferimento z_0

α : esponente, il cui valore cresce all'aumentare della rugosità del terreno.

In figura sono riportati vari esponenti al variare delle caratteristiche del terreno:

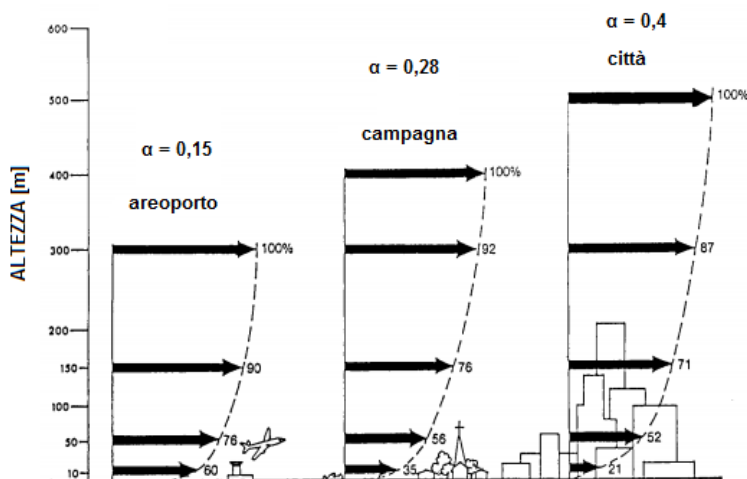


Figura 3.16. Profili di velocità del vento e relativi esponenti

Come scritto precedentemente con l'effetto combinato delle forze di Archimede e del vento si è in presenza di un moto convettivo di tipo misto. Il gruppo adimensionale Gr/Re^2 , detto numero di Richardson, fornisce una misura del rapporto tra forza di galleggiamento e forza di inerzia. Si delineano tre regioni di flusso:

- $Gr_D/Re_D^2 \gg 1$: Convezione naturale pura
- $Gr_D/Re_D^2 \sim 1$: Convezione mista
- $Gr_D/Re_D^2 \ll 1$: Convezione forzata pura

In Fig. 3.17 è riportata una mappa per stabilire la natura del flusso al variare dei numeri di Reynolds e Rayleigh (Metais e Eckert, 1964).

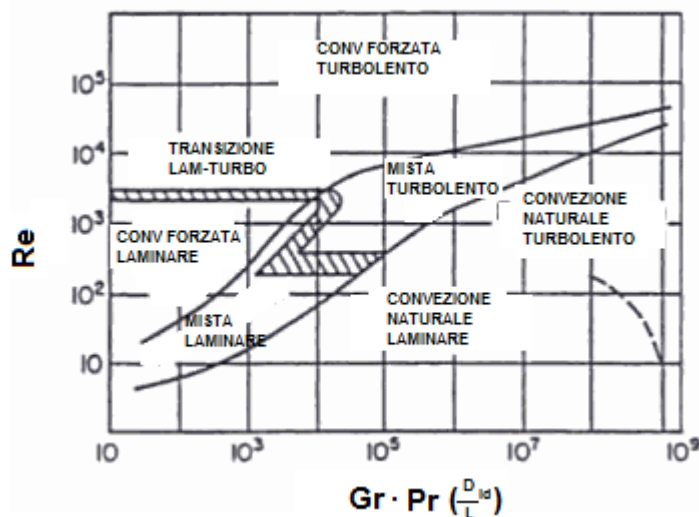


Figura 3.17. Regime del flusso in condizioni di coesistenza di convezione forzata e naturale

Quando la convezione forzata domina il moto, per il regime turbolento può essere utilizzata la relazione di Gnielinski:

$$Nu_{D_{id}} = \frac{h_c D_{id}}{\lambda} = \frac{(f/8)(Re_{D_{id}} - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)}$$

valida per $3000 < Re < 5 \cdot 10^6$ e per condotti circolari. Garantisce un utile approssimazione anche per condotti rettangolari (S.P. Sukhatme, "Textbook Of Heat Transfer" p. 220).

Per stimare il fattore di frizione è possibile utilizzare la relazione di Swamee–Jain, già riportata nei precedenti paragrafi. Questa relazione necessita della rugosità del condotto. Tale valore si può assumere che sia relativamente elevato (0,005 m), per tenere conto della presenza di supporti lungo la cavità (M. Ciampi et al. 2005). Nel caso, invece, che il flusso di aria sia laminare, in presenza di convezione mista possono essere utilizzate le correlazioni fornite da B.J. Brinkworth (2000). Nusselt è calcolato con la seguente formula:

$$Nu_{D_{id}} = \frac{h_c D_{id}}{\lambda} = 5,385 + \frac{0,015}{L^+}$$

dove L^+ rappresenta la lunghezza caratteristica della cavità. Nota la differenza di pressione nella cavità derivante dal vento (Δp_w), L^+ è stimabile con la seguente equazione:

$$\frac{Gr_{D_{id}} \text{sen}(\theta)}{Pr} (L^+)^3 + \frac{\Delta p_w D_{id}^4}{\rho v^2 L^2} (L^+)^2 - 48L^+ - 0,837 = 0$$

3.7. Profili di velocità e temperatura nella cavità

Nella ricerca di Susanti et al. (2007) è stato costruito un modello fisico per studiare il comportamento dell'aria nella cavità di un tetto ventilato, trascurando gli effetti del vento. La cavità ha uno spessore di 8 cm, una lunghezza di circa 5 m e una pendenza di 30°. Lo strato superiore del modello comprende delle resistenze elettriche che simulano il flusso derivante dalla temperatura aria-sole sulla copertura. È stato sottoposto ad una produzione di calore di 100 W/m².

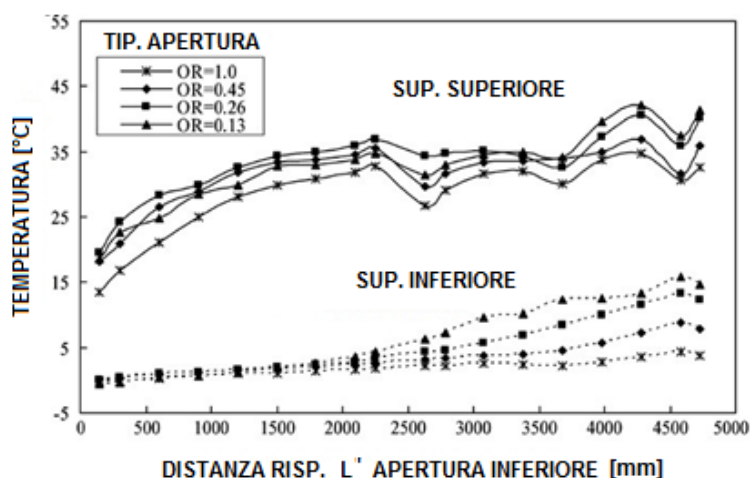


Figura 3.18. Andamento della temperatura⁹ nelle superfici inferiore e superiore della cavità.

⁹ Rispetto alla temperatura della superficie inferiore nella zona di entrata.

Per analizzarne l'effetto, inoltre, il modello è stato configurato con 4 diversi tipi di aperture; la prima completamente aperta e le altre parzialmente chiuse con della lamiera, in modo da garantire un passaggio rispettivamente del 45%, 26% e 13% rispetto alla configurazione aperta. In Fig. 3.18 è riportato il profilo di temperatura lungo la superficie superiore e quella inferiore della cavità. La temperatura delle superfici segue l'andamento crescente della temperatura dell'aria nel condotto. Nella superficie superiore, nei pressi dell'uscita, vi sono diversi cali di temperatura. Ciò è dovuto ad un aumento del coefficiente di scambio termico locale, probabilmente causato da una transizione temporanea tra flusso laminare e turbolento dell'aria o da un diverso grado di turbolenza.

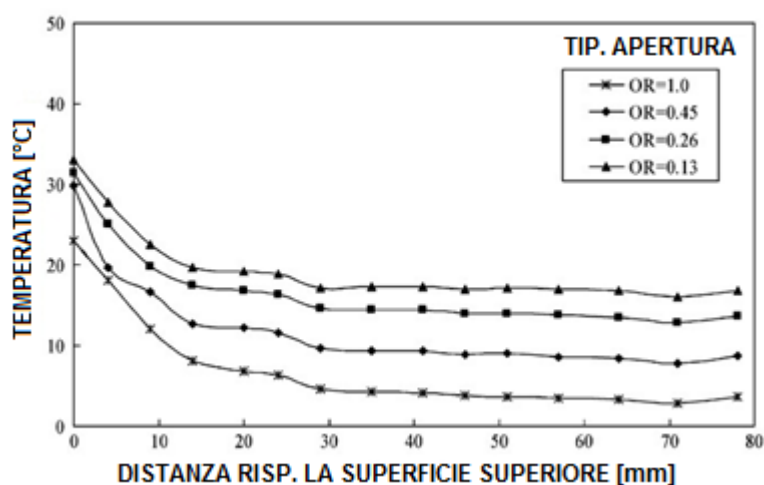


Figura 3.19. Andamento della temperatura nella sezione

In figura 3.19 è riportato il profilo di temperatura dell'aria nell'intercapedine. La temperatura massima si ha in prossimità della faccia superiore e decresce rapidamente spostandosi verso quella inferiore. Il decremento è minore avvicinandosi alla superficie inferiore per poi aumentare leggermente nell'immediata prossimità della superficie inferiore. Questo lieve aumento è dovuto al calore trasmesso dalla faccia superiore a quella inferiore per radiazione. L'aria che si trova in prossimità della superficie superiore, essendo più calda, avrà una densità minore e si muoverà più velocemente rispetto a quella vicina alla superficie inferiore (vedi Fig. 3.20). Il picco di velocità è stato rilevato a 8 mm dalla superficie superiore.

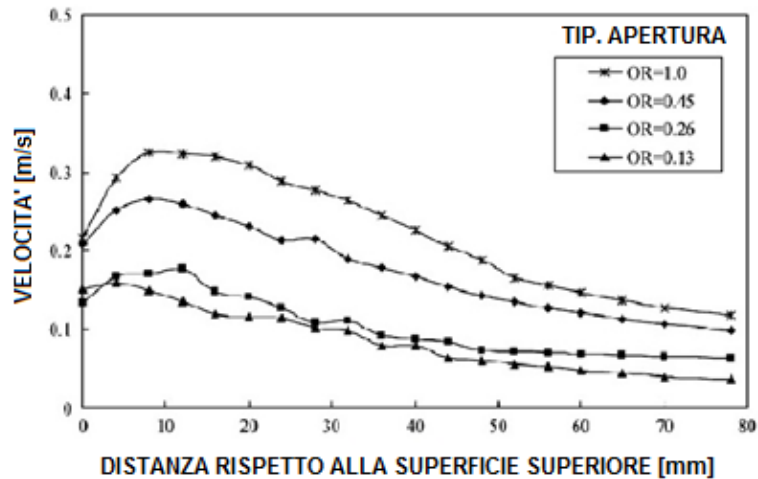


Figura 3.20. Profilo di velocità nella sezione

Con aperture le aperture parzialmente chiuse si ha una sensibile riduzione del flusso d'aria nell'intercapedine e di conseguenza un aumento delle temperature superficiali.

3.8.Prestazioni termiche nella stagione estiva

In Fig. 3.21 è riportato il confronto tra la temperatura della superficie superiore della cavità e di quella inferiore tra un tetto ventilato e uno non ventilato, in una tipica giornata estiva.

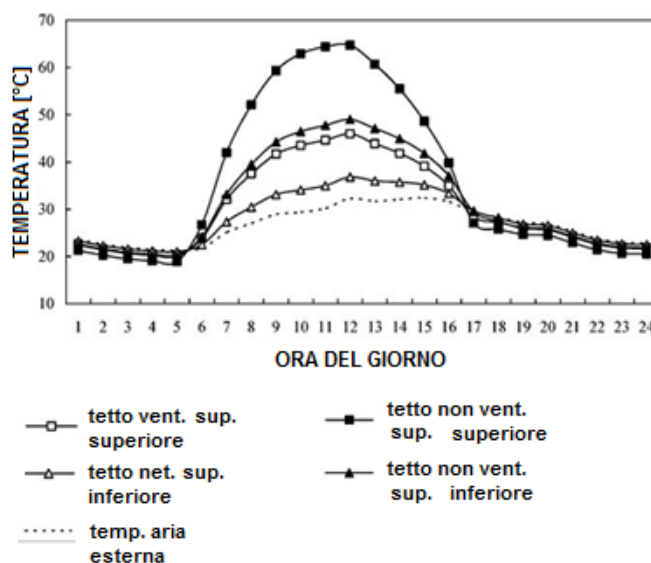


Figura 3.21. Confronto tra tetto ventilato e non ventilato delle temperature superficiali nella cavità (L. Susanti et al. 2010)

Nelle ore diurne le temperature superficiali sono ridotte dalla ventilazione. Durante la notte la temperature superficiali di entrambi i tetti scendono leggermente sotto la temperatura dell'aria esterna. In Fig. 3.22 i relativi carichi termici di raffreddamento. Si denota un peggioramento delle prestazioni nelle ore notturne.

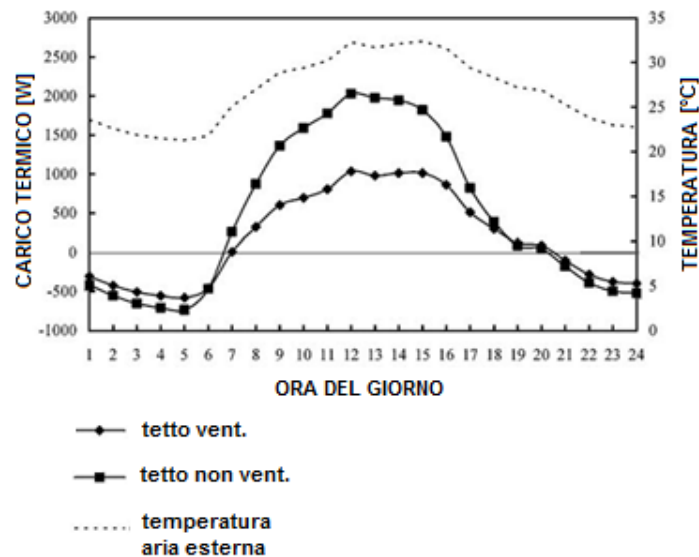


Figura 3.22. Confronto dei carichi termici di raffreddamento

In una ricerca di M. Ciampi et al. (2005) è stato analizzato il comportamento di due tipologie di tetto ventilato¹⁰; uno costituito da copertura in rame e struttura in legno (VR1) e uno da copertura in laterizio e struttura in mattoni (VR2). Entrambi sono caratterizzati dalla stessa trasmittanza globale.

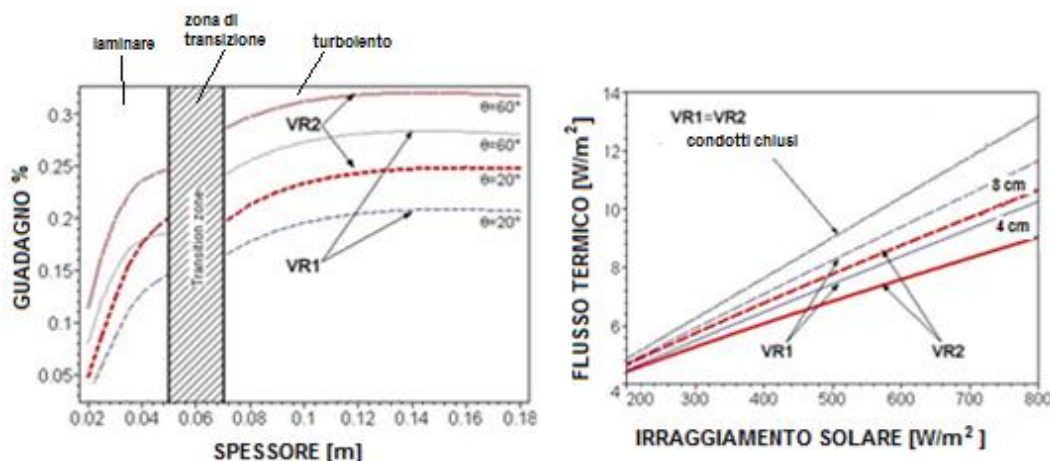


Figura 3.23. Prestazioni termiche della cavità al variare di alcuni parametri

¹⁰ Senza considerare il vento

In Fig. 3.23, a sinistra è riportato l'andamento del guadagno termico¹¹ per i due modelli al variare dello spessore dell'intercapedine e dati due angoli di inclinazione 20° e 60°, a destra invece si ha l'andamento del flusso termico entrante nella stanza al variare dell'irraggiamento solare con spessore dell'intercapedine di 4 cm e 8 cm. Dal punto di vista delle prestazioni termiche il modello migliore è il VR2, avendo lo strato isolante posizionato maggiormente verso l'interno. La posizione ottimale dello strato di isolante è appena sotto l'intercapedine, quindi a contatto con l'aria (A. Gagliano et al. 2011). Ad un maggior irraggiamento solare sulla copertura corrisponde un maggior flusso d'aria nella cavità, quindi le prestazioni di un tetto ventilato sono tanto maggiori all'aumentare dell'irraggiamento. Il guadagno della ventilazione inoltre aumenta all'aumentare dello spessore della cavità e dell'inclinazione della stessa. Il flusso è risultato essere laminare fino a spessori di circa 6 cm per poi passare a turbolento per spessori maggiori. Occorre considerare che un manto in laterizio, rispetto ad un manto continuo, è fortemente permeabile all'aria e la superficie complessiva dei giunti di contatto tra gli elementi assemblati (tegole e coppi) eguaglia, e facilmente supera, quella che è necessario realizzare per garantire l'ingresso di aria in gronda. Pertanto, una soluzione costruttiva in laterizio possiede capacità dissipative (termiche e igrometriche) decisamente superiori a quelle che la teoria classica della ventilazione è in grado di prevedere, assicurando effetti benefici già con modeste portate di aria (M. D'Orazio et al. 2007).

3.9. Comportamento nella stagione invernale

Nella stagione invernale il flusso d'aria che si instaura estrae calore dalla struttura peggiorando le prestazioni termiche. In figura 3.24 sono riportate le curve che rappresentano l'andamento dei valori di trasmittanza per coperture con struttura in legno e strato isolante in polistirene, ma con diversa ventilazione (non ventilate, debolmente ventilate e fortemente ventilate) in funzione dello spessore di isolante ed a confronto con i valori limite del D.Lgs.311/06. Si evidenzia come le variazioni di trasmittanza date dalla tipologia di ventilazione, da considerare secondo la norma, siano estremamente contenute, con scostamenti che non

¹¹ Definito come percentuale di energia termica che il tetto ventilato non fa entrare nella stanza rispetto all'energia termica che entra con un tetto non ventilato

superano il 5-6%. Leggendo il grafico in termini di spessore di isolamento richiesto per raggiungere la stessa prestazione (valore limite di trasmittanza da norma) per coperture a diversa ventilazione, si evidenzia il fatto che la ventilazione risulta penalizzante in fase invernale, in quanto, a parità di tipologia di solaio, è necessario incrementare lo spessore di isolante in una copertura fortemente ventilata per raggiungere la prestazione di una copertura non ventilata. Tale incremento varia dal 2% al 5% per la zona climatica F e dal 10% al 20% per le zone climatiche A,B,C.

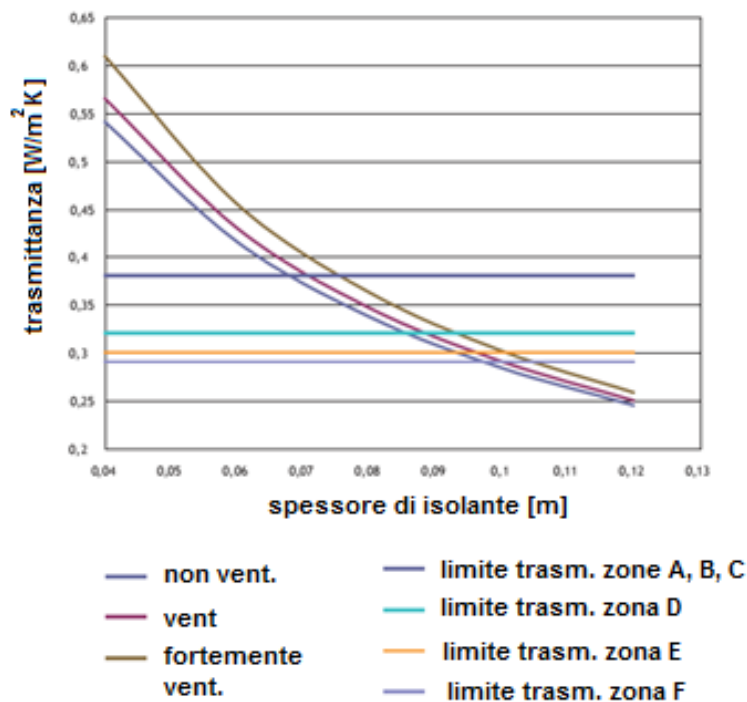


Figura 3.24. Andamento delle trasmittanze di calcolo per coperture con diversa ventilazione in funzione dello spessore di isolante. Si riportano a confronto i limiti di trasmittanza previsti dalla normativa

M. D’Orazio et al. (2007) ha rilevato che i flussi termici reali per le coperture ventilate analizzati sperimentalmente sono inferiori a quelli derivanti dalle procedure di calcolo, in quanto la presenza del manto determina un riscaldamento dell’aria nel condotto non rilevato dall’ipotesi di calcolo della UNI EN 6496. Confrontando il comportamento delle differenti coperture ventilate, si denota che le coperture che si avvicinano maggiormente al limite cautelativo dato dalla UNI EN 6496 sono quelle a maggior dimensione della camera di ventilazione. Coperture a minore sezione della camera appaiono sfruttare maggiormente l’influenza dei carichi radiativi esterni in termini di maggior

scostamento delle temperature dell'aria nel condotto rispetto alla temperatura dell'aria esterna.

3.10. Comportamento igrometrico

L'efficienza termica di una copertura è fortemente connessa al comportamento igrometrico della stessa. Ciò dipende dal fatto che ogni materiale da costruzione, se posto in un ambiente ad alta umidità relativa, può adsorbire parte del vapore acqueo contenuto nell'aria. Ne consegue che all'interno della struttura porosa del materiale può accumularsi acqua, anche in quantità rilevanti rispetto al peso del materiale stesso. L'acqua, per il fatto di avere conducibilità termica elevata, tende come conseguenza ad inficiare le proprietà termofisiche dei materiali da costruzione. Di questo problema ne soffrono soprattutto gli isolanti naturali (fibra di legno, fibra di cellulosa, fibra di canapa, ...etc.) in quanto materiali ad elevata igroscopicità (gli isolanti fibrosi di origine vegetale sperimentati arrivano ad assorbire quantità di umidità 10-15 volte superiori rispetto agli isolanti sintetici).

Assumendo l'ipotesi che l'aria esterna abbia tenori di vapore sempre inferiori all'aria interna all'edificio e che quindi la migrazione del vapore sia costantemente diretta dall'interno verso l'esterno, ne deriva come conseguenza che la ventilazione, introducendo aria esterna nel pacchetto di copertura, e contemporaneamente estraendo l'aria interna, tende a ridurre necessariamente il l'eventuale condensazione nelle zone che rischiano in fase invernale di trovarsi a basse temperature. In uno studio sperimentale di M. D'Orazio et al. (2007) sono state trovate differenze di lieve entità tra l'umidità adsorbita cumulativamente dal tetto con e senza ventilazione. Addirittura è stata trovata una correlazione positiva tra sezione di ventilazione e quantità di acqua adsorbita. Questi risultati derivano dal fatto che non sempre l'aria esterna ha evidenziato tenori di vapore inferiori a quelli interni. Questo tipo di analisi però è fortemente influenzata dalla posizione geografica e dalla produzione di umidità interna dell'edificio.

CAPITOLO 4

Simulazione dinamica

L'ultima parte della tesi sviluppa lo studio dei fabbisogni termici annuali di un edificio attraverso il programma di simulazione Trnsys (Transient Energy System) in combinazione con Comis (Conjunction of Multizone Infiltration Specialists) per il calcolo dei flussi d'aria all'interno delle cavità ventilate. Sono quindi stati analizzati gli effettivi guadagni della ventilazione a seconda di diversi parametri, per esempio la posizione geografica dell'edificio e la pendenza del tetto.

4.1.Trnsys

Trnsys è un programma completo ed estensibile di simulazioni termiche in condizioni dinamiche di sistemi energetici. È utilizzato per verificare la validità teorica di nuove concezioni energetiche, da semplici sistemi domestici per la produzione di acqua calda sanitaria al progetto e alla simulazione di edifici e dei loro impianti, comprese le strategie di regolazione compatibili con il benessere degli abitanti. Viene inoltre utilizzato per studiare diversi sistemi basati sulle energie alternative (eolico, solare termico, solare fotovoltaico, sistemi a idrogeno...etc.). È stato sviluppato dall'Università del Wisconsin e dall'Università del Colorado ed ha iniziato ad essere disponibile commercialmente dal 1975. Il programma viene costantemente aggiornato grazie al lavoro congiunto di una serie di istituzioni (Solar Energy Laboratory negli Stati Uniti, Thermal Energy Systems Specialist negli Stati Uniti; Aiguasol Enginyeria in Spagna, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment in Francia, Transsolar GmbH Energietechnik in Germania). La versione utilizzata in questo studio è la 16.1 del 2006.

Trnsys è composto di una suite di programmi integrati tra loro:

- Trnsys Simulation Studio: interfaccia con il quale si interagisce con il motore per le simulazioni. Tramite l'interfaccia si possono creare simulazioni di progetti con diversi componenti connessi tra loro a proprio piacimento. In Fig. 4.1 è riportata tale interfaccia.

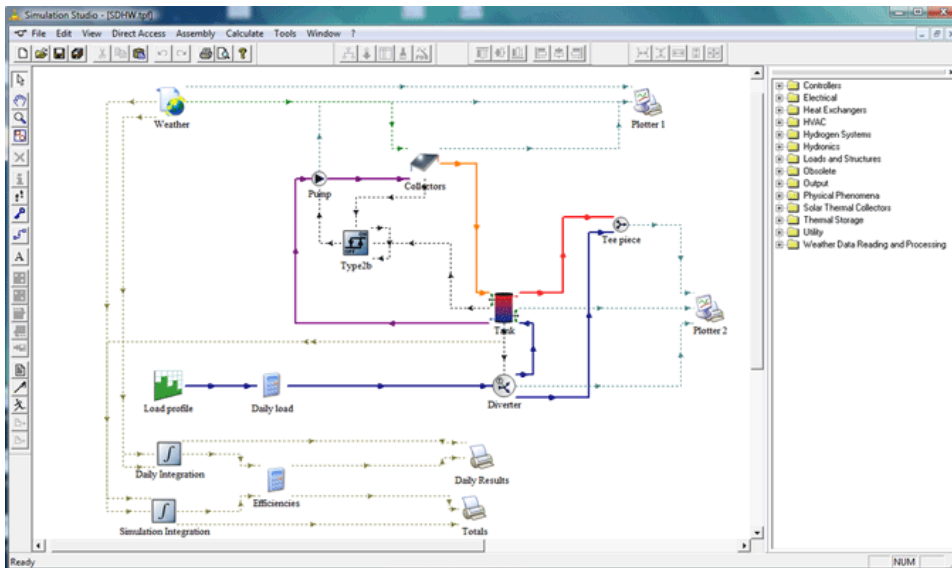


Figura 4.1. *Simulation Studio, interfaccia grafica di Trnsys*

Simulation Studio include la possibilità di controllare diverse variabili. I risultati delle simulazioni possono essere integrati, stampati su file e visualizzati in forma di grafico. In Fig. 4.2 ne è riportato un esempio.

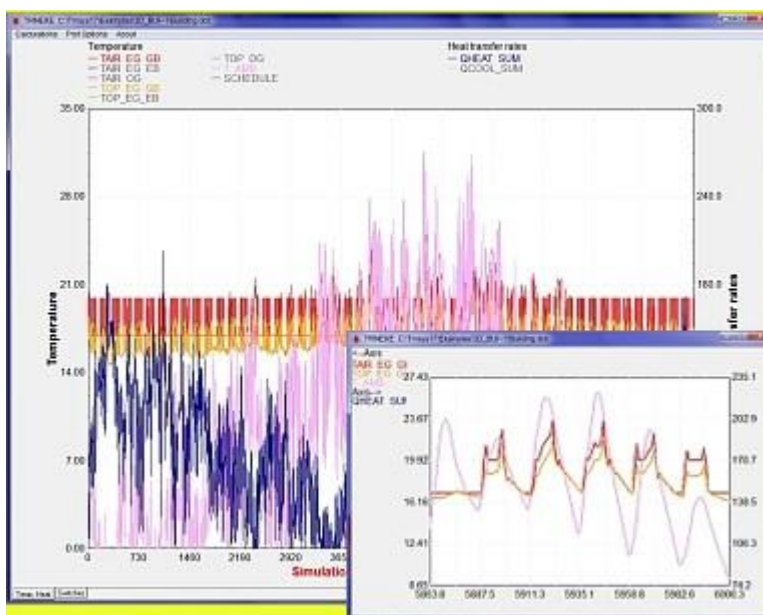


Figura 4.2. *Esempio di grafico creato da Simulation Studio*

- Trnbuild: interfaccia grafica utilizzata per modellizzare edifici e strutture. Consente di specificare tutti i dettagli delle strutture (caratteristiche delle pareti, finestre, tipologia degli impianti di riscaldamento e di raffreddamento,..etc.). In Fig. 4.3 è riportata tale interfaccia.

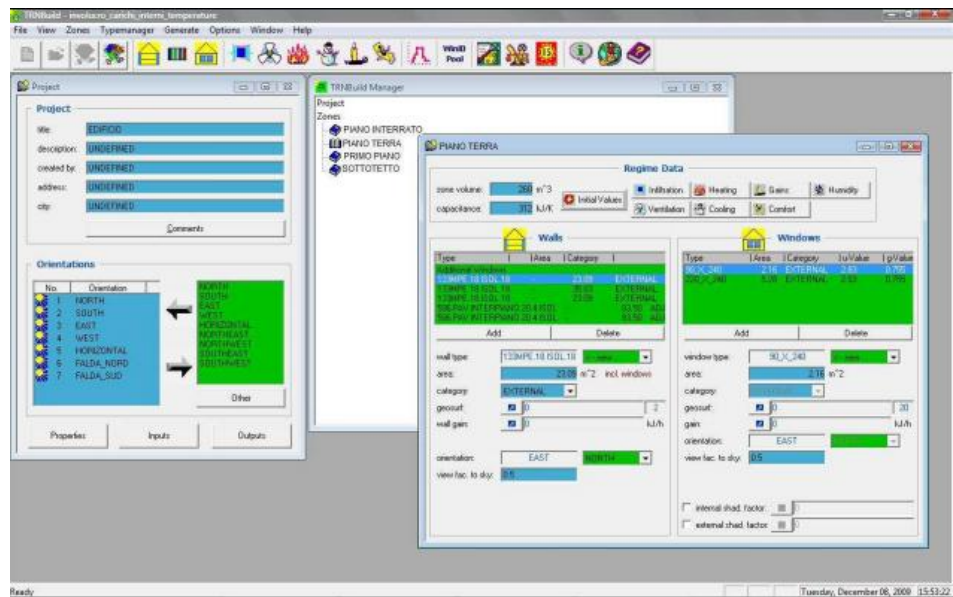


Figura 4.3. Interfaccia grafica di Trnbuild

- Trnedit: strumento per la modifica manuale dei file di input e la creazione di applicazioni “stand-alone” in ambiente Trnsys.

4.1.1. Trnbuild

Per quanto riguarda la modellizzazione, il primo passo è la definizione di un certo numero di superfici associate all’edificio, definite in base all’orientazione spaziale rispetto agli assi cardinali e all’inclinazione rispetto ad un piano orizzontale di riferimento. Ogni edificio viene suddiviso, a seconda della sua complessità, in più zone in cui si ipotizzano condizioni climatiche uniformi nello spazio. Si pensi ad una stanza in cui, con buona approssimazione, rispetto all’intero edificio, si abbiano condizioni climatiche uniformi in ogni punto della stessa. Una volta definite le zone termiche, vengono descritte le strutture murarie che le delimitano ed i componenti finestrati in essi presenti, definendo le proprietà di ciascuno strato componente l’elemento di involucro. Nel programma ci sono librerie di materiali e soluzioni tecnologiche tipiche dell’edilizia, ma è anche possibile definire elementi e materiali ad hoc. È possibile, infatti, costruire le stratigrafie che compongono gli elementi multistrato accostando più strati di materiali diversi, caratterizzandoli con i valori di densità, conducibilità e calore specifico. Ogni superficie è allocata nello spazio dell’edificio, distinguendo tra parete esterna, ovvero di separazione tra la zona termica e l’ambiente esterno, adiacente, cioè di separazione tra zone termiche differenti dell’edificio stesso ed infine parete di confine, ovvero a contatto con un ambiente le cui caratteristiche sono impostate

dall'utente (come accade, ad esempio, nel caso di piano interrato le cui pareti perimetrali confinano con il terreno).

4.1.2.Simulation Studio e motore simulativo di Trnsys

La simulazione in ambiente Trnsys è costituita dall'assemblaggio, tramite l'interfaccia Simulation Studio, di una serie di componenti, detti Type, presi da una libreria già preesistente. Questi sono opportunamente interconnessi in modo tale da svolgere una sequenza ordinata di operazioni. Tale sequenza varia a seconda del tipo di simulazione da eseguire. Ogni Type è descritto da un modello matematico, detto "proforma", una subroutine in Fortran che modella il componente in termini di equazioni matematiche. Il proforma ha una struttura a black-box con INPUT, OUTPUT e PARAMETRI (vedi Fig. 4.4).

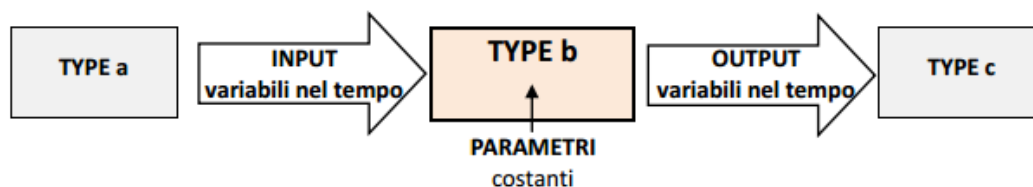


Figura 4.4. *Struttura a black-box delle Type*

Il software è caratterizzato da un codice di programmazione open source, ovvero disponibile agli utenti che possono modificare i modelli esistenti o crearne di nuovi in base alle proprie esigenze, mediante i più comuni linguaggi di programmazione (C, C++, Pascal, Fortran,...etc.). E' inoltre possibile, definire i parametri generali relativi alla simulazione (ad es. l'intervallo di tempo), immettere nel software dati di lettura esterni e regolare la forma degli output del sistema (ad es. un grafico oppure un file Excel). Tutti i componenti utilizzati, le modalità secondo le quali questi saranno chiamati a interagire e le impostazioni generali della simulazione sono raccolti in un file , detto file deck, che rappresenta l'input vero e proprio al motore di simulazione.

Questo è composto da due parti (vedi Fig. 4.5):

- TRNDll.dll: motore che contiene i codici dei componenti, li legge, li richiama e determina la convergenza dei risultati.
- TRNExe.exe: rappresenta la parte esecutiva che effettua la simulazione e stampa i risultati. Per ogni timestep della simulazione risolve l'intero sistema

di equazioni associato al file deck, tenendo conto delle connessioni, tramite un processo iterativo dei valori in entrata e in uscita che soddisfi tutte le equazioni.

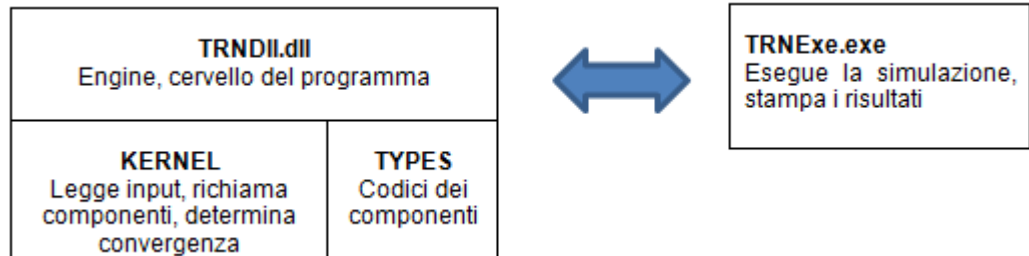


Figura 4.5. Logica dei motori simulativi di Trnsys

4.1.3. Le Type impiegate nella simulazione

- Type9 – Lettore di dati
Il lettore di dati permette di introdurre nella simulazione i dati necessari per il funzionamento dei componenti del sistema. In questo caso il lettore è stato usato per l'inserimento dei valori meteorologici delle stazioni ARPA (Agenzia Regionale per la Prevenzione e protezione Ambientale) delle varie regioni. Il lettore è in grado di interpolare i dati, di origine oraria, mediante una legge lineare, creando una funzione che fornisce in modo continuo il valore del dato richiesto.
- Type16 – Processore solare
Si occupa di interpolare i dati relativi alla radiazione globale e di simulare il moto del sole sulla volta celeste in funzione della posizione geografica della località presa in esame e del periodo dell'anno. Elabora i valori distinti di radiazione diretta e diffusa per le diverse superfici dell'edificio in base all'orientazione e l'inclinazione della superficie stessa.
- Type33 – Processore psicometrico
Riceve come input dal Type9 i valori di umidità relativa ed elabora tutti gli altri dati relativi all'umidità dell'aria (umidità assoluta, temperatura di condensazione, entalpia dell'aria,...etc.).

- **Type69 – Processore della temperatura effettiva del cielo**
Riceve in input dal Type33 la temperatura di condensazione nelle condizioni ambientali e calcola la temperatura effettiva del cielo che è utilizzata dal Type56, affrontato in seguito, per calcolare lo scambio radiativo negli infrarossi tra le superfici esterne dell'edificio e l'atmosfera, nelle ore notturne (extraflusso radiativo).
- **Type56 – Multizone Building**
È il componente che modella e simula la prestazione energetica dell'edificio diviso in zone termiche. Essendo un sistema complesso, i dati di input non vengono direttamente definiti nel file deck, ma tramite Trnbuild dove vengono specificati i dettagli della struttura dell'edificio e tutto quello che serve a definirne il comportamento energetico. Trnbuild genera poi un file edificio (.bui) che include le informazioni richieste per simulare il sistema edificio-impianto.
- **Type93 – Value data recall**
Type che permette di tenere in memoria i valori di N input dei precedenti M timestep rispetto allo step in cui è arrivata la simulazione. Tale Type è utile per aggiungere un ritardo di tempo a un sistema che soffre di instabilità di controllo.
- **Type62 – Calling Excel**
Type che richiama il motore di calcolo di Excel per eseguire elaborazioni sui dati.
- **Type65 – Graphics Component**
Utilizzato per visualizzare in grafici le variabili desiderate della simulazione mentre questa è in corso. Questa Type inoltre riporta i valori assunti in ogni timestep dalle variabili selezionate in un file di testo (.txt).

4.2.Comis

Si tratta di un software progettato nel 1996 per la modellizzazione e simulazione dei flussi d'aria in un edificio e per studiare il relativo trasporto di inquinanti. Comis modellizza l'edificio come un network di nodi di pressione, zone caratterizzate da pressione uniforme e aria perfettamente miscelata. Il calcolo dei flussi d'aria di Comis si basa sull'assunzione che queste condizioni siano raggiunte ad ogni timestep. Queste zone possono essere una stanza, un gruppo di stanze o l'intero edificio a seconda del problema da analizzare. Esse sono collegate tra loro da link detti air flow components, componenti che permettono il flusso d'aria tra le zone. Questi possono essere di quattro tipologie, ognuna governata da apposite equazioni: fessure, aperture di grandi dimensioni, condotti e ventilatori. Oltre alle zone interne viene definito l'ambiente esterno tramite dei nodi esterni collegati all'edificio. Ne risulta un network che assomiglia a un circuito elettrico con i collegamenti tra le zone che agiscono da resistenze ai flussi d'aria generati da differenze di pressione tra le zone (vedi Fig. 4.6).

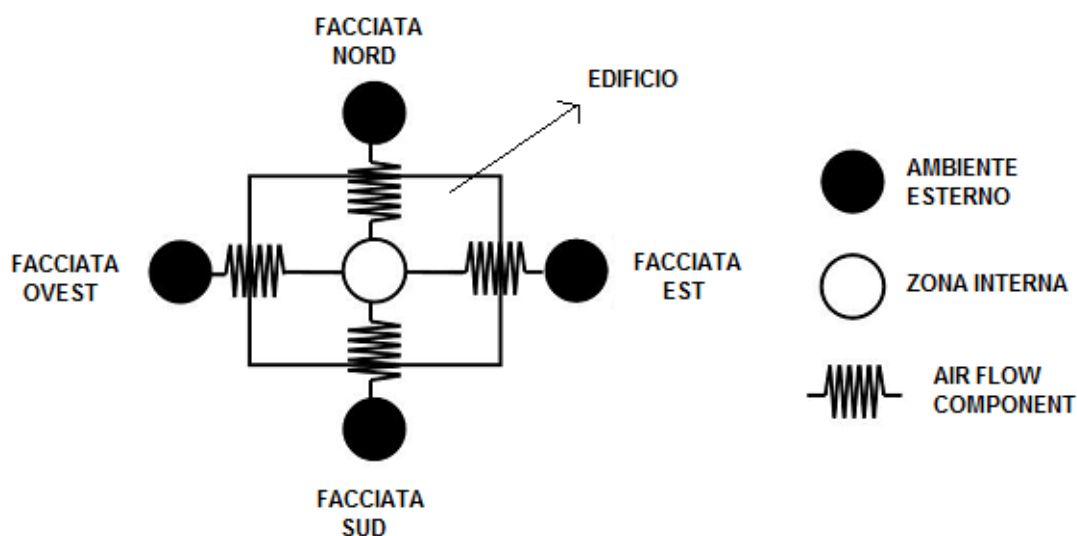


Figura 4.5. Modellizzazione in Comis

Le differenze di pressione sono generate dall'azione del vento sulla superficie esterna della struttura, dalle forze di galleggiamento (principio di Archimede) oppure dall'azione meccanica di ventilatori. Dal punto di vista matematico il network è descritto da un set di equazioni non lineari risolto dal programma tramite l'algoritmo di Newton-Raphson. Per impostare la simulazione si utilizza la stessa interfaccia grafica di Trnsys, Simulation Studio. In Fig.4.6 è riportato il

modello di un edificio, caratterizzato da una singola zona interna, realizzato tramite Simulation Studio.

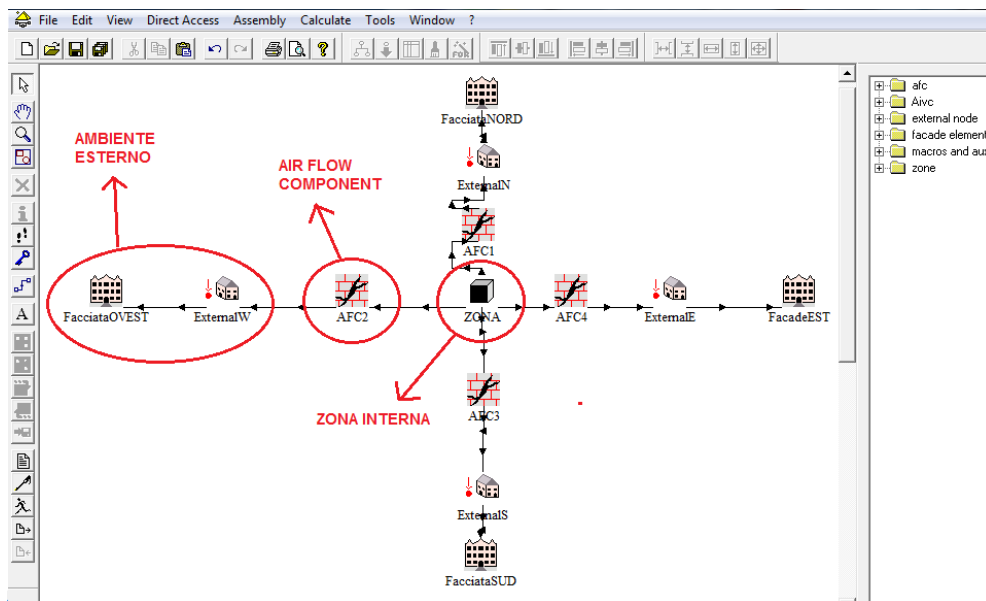


Figura 4.6. *Simulation Studio per Comis*

Per ogni modulo immesso nella simulazione bisogna definire i parametri (ad es. le dimensioni delle zone interne, i valori del coefficiente di pressione del vento per le zone esterne, le dimensioni di un'apertura, l'altezza rispetto al terreno ed altri parametri per i link). Tramite Simulation Studio inoltre vengono definiti i parametri generali della simulazione; per es. la latitudine, la longitudine e l'altezza rispetto al livello del mare dell'edificio. Simulation Studio infine crea un file .cif che è l'input al motore di simulazione di Comis.

4.2.1. Interazione tra Trnsys e Comis

Tramite un Type apposito in Trnsys, il Type157, è possibile far lavorare in parallelo i due software. È necessario costruire il modello dell'edificio sia in Trnsys sia in Comis. I parametri passati in ogni timestep da Trnsys a Comis sono le temperature dell'aria delle zone interne tramite Type56 ed i dati di velocità e direzione del vento tramite il Type9. I parametri passati da Comis a Trnsys per ogni zona sono: l'infiltrazione di aria esterna derivante dal vento e da ventilazione naturale, l'infiltrazione derivante da sistemi meccanici ed infine il flusso d'aria tra le zone. Dal punto di vista matematico l'interazione tra i due software avviene in modo iterativo (vedi figura 4.7).

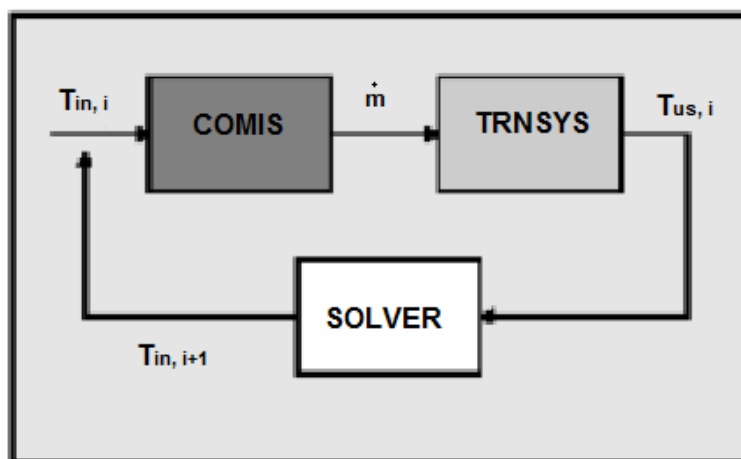


Figura 4.7. Processo interattivo di convergenza tra Comis e Trnsys

Relativamente ad una zona, ad ogni timestep, Comis calcola la portata d'aria utilizzando la temperatura dell'aria del timestep precedente ($T_{in,i}$). Dato il flusso d'aria Trnsys calcola una nuova temperatura dell'aria ($T_{us,i}$) che è utilizzata da Comis per ricalcolare la portata d'aria e così via finché si arriva a convergenza tra la temperatura in uscita da Trnsys e quella in entrata a Comis.

4.3. Il modello dell'edificio

Per l'analisi sono stati utilizzati diversi modelli di edificio. Tutti i modelli però derivano concettualmente da un modello base costituito da un edificio con un piano terra ed un sottotetto abitato, una classico edificio unifamiliare. Le dimensioni sono 10 metri di larghezza, 12 metri di lunghezza e circa 7 metri di altezza. Il tetto è di tipo a falde con pendenza di 30 gradi, struttura in latero-cemento e strato di copertura in laterizio (coppi). In Fig. 4.8 una rappresentazione schematica dell'edificio.

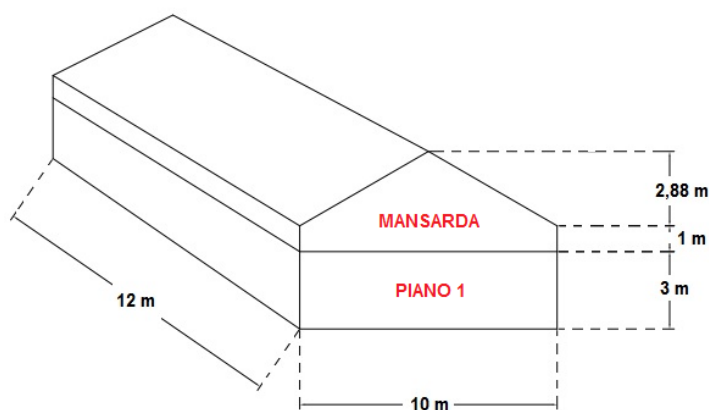


Figura 4.8. Rappresentazione schematica dell'edificio utilizzato per la simulazione

Si ipotizza che l'edificio sia ubicato in località di campagna, senza ombreggiature da altri edifici o dalla vegetazione. L'orientazione è stata scelta in modo tale che una falda sia rivolta completamente a Sud e l'altra a Nord. Per migliorare l'analisi termica l'edificio è stato diviso in quattro zone termiche; due per piano divise da un muro interno. In Fig. 4.9 è riportata la planimetria del primo piano e del sottotetto.

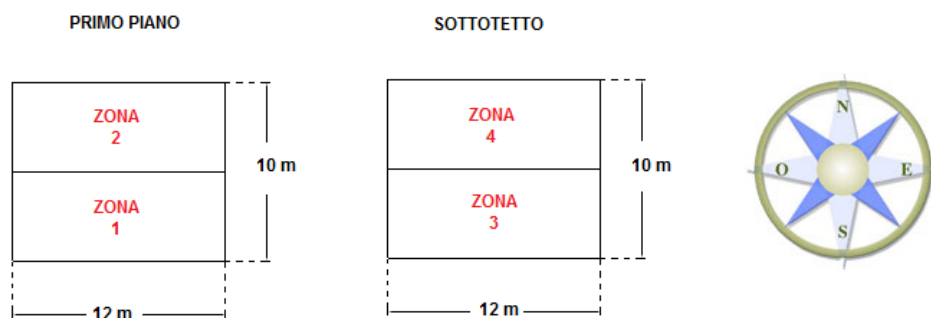


Figura 4.9. Planimetria dell'edificio

I valori di trasmittanza termica delle pareti opache dell'involucro e dei solai rispettano i limiti di legge per la zona climatica F (quella caratterizzata da un clima più freddo), quindi si tratta di un edificio molto ben isolato. In Tabella 4.1 ne sono riportati i valori in confronto a quelli limite della zona climatica F e quelli ancora più stringenti per accedere alle detrazioni in caso di ristrutturazioni.

VALORI DI TRASMITTANZA PARETI OPACHE $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$			
	VALORI DEL MODELLO	VALORI LIMITE ZONA F	VALORI PER ACCEDERE ALLE DETRAZIONI
Parete esterna	0,254	0,33	0,26
Solaio su terreno	0,288	0,32	0,28
Tetto	0,228	0,29	0,23

Tabella 4.1. Valori di trasmittanza termica delle pareti opache dell'edificio confrontate con i valori limite di legge e i valori per accedere alle detrazioni per la zona climatica F

Ogni zona termica comprende anche un certo numero di metri quadrati di foratine per simulare la capacità termica dei muri divisorii delle stanze. I coefficienti di scambio termico convettivo sono stati scelti in coerenza con quanto prescrive la norma UNI TS 11300-1:2008, quindi $7,7 \left[\frac{W}{m^2K}\right]$ per le superfici interne

e $25 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ per quelle interne. Tutte le superfici sono caratterizzate da una emissività di 0,9. Le pareti verticali esterne hanno un coefficiente di assorbimento solare di 0,3 (colore chiaro) mentre la superficie esterna della copertura ha un coefficiente di 0,6 (colore medio). Tutte le superfici interne hanno un coefficiente di 0,3 tranne i pavimenti caratterizzati da un coefficiente di 0,6. Per quanto riguarda i serramenti è stata scelta una superficie finestrata tale da rispettare i limiti di legge, che impongono una superficie finestrata (al lordo del telaio) pari almeno ad 1/12 della superficie utile di pavimento del sottotetto abitato e 1/8 per il resto dell'abitazione. La superficie utile di pavimento (al netto dello spazio occupato dalle murature interne, delle scale,...etc.) è stata stimata in 100 m² per piano. I valori di trasmittanza delle finestre sono inferiori ai limiti di legge per la zona climatica F, in Tabella 4.2 ne è riportato il raffronto.

VALORI DI TRASMITTANZA PER LE CHIUSURE TRASPARENTI $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$		
	VALORI DEL MODELLO	VALORI LIMITE ZONA F
Finestra comprensiva di infissi	~1,8	2
Vetro	1,27	1,3

Tabella 4.2. *Trasmittanza termica delle finestre in confronto con i limiti di legge*

Si tratta di un doppio vetro 4-16-4 mm con camera riempita di argon e fattore solare di 0,59; il telaio è in legno con trasmittanza di 2,27 $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$ e rappresenta il 15% dell'intera finestra. Per simulare la presenza di schermature mobili è stato supposto un fattore di schermatura pari al 20% medio durante tutto l'anno dovuto alle tapparelle a cui si aggiunge quello delle schermature mobili interne (tendaggi leggeri di colore chiaro). Per questa tipologia di schermatura stata seguita la norma UNI TS 11300 adattandola ad una simulazione dinamica. Essi creano un fattore di schermatura di circa il 38% e vengono utilizzati da Maggio a Settembre quando sulla finestra vi è un irraggiamento superiore a 300 $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Infiltrazioni esterne e ventilazione sono stati regolati a 0,6 volumi d'aria all'ora. Gli impianti di riscaldamento e raffreddamento sono stati configurati in modo tale che il primo mantenga una temperatura superiore a 20 °C ed il secondo una temperatura inferiore a 26 °C ed una umidità relativa inferiore al 60%. La potenza delle due macchine è lasciata libera così da analizzare i carichi termici necessari per mantenere le condizioni di comfort. Per quanto riguarda gli apporti di calore

interni si è fissato un valore totale pari a 450 W, avendo l'abitazione una superficie maggiore di 170 m².

4.4. Modellizzazione dei canali di ventilazione

Il sistema di ventilazione nel tetto è composto dai due canali, uno sulla falda Sud e l'altro su quella Nord, realizzati tramite una intercapedine tra lo strato isolante e lo strato di copertura. Ogni canale presenta un'apertura lungo la linea di gronda da cui entra l'aria. Questa fluisce attraverso il canale e sfocia nel colmo ventilato in cui le due portate d'aria si mischiano, per poi uscire da due aperture con grandezza uguale a quelle di entrata. In Fig. 4.10 ne è riportata una rappresentazione schematica.

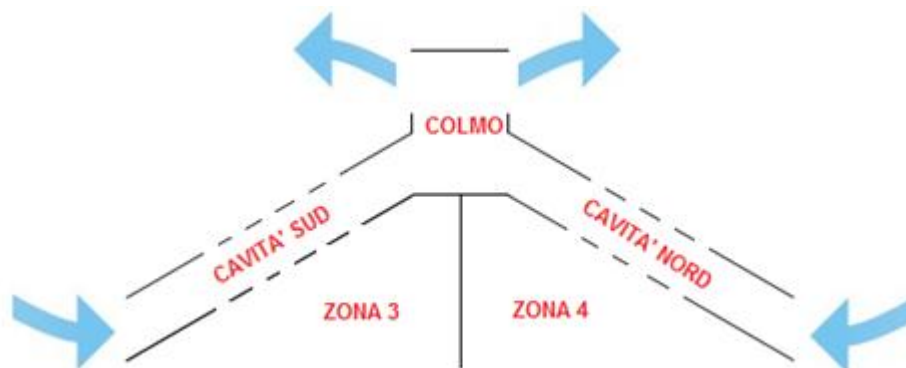


Figura 4.10. Rappresentazione schematica del modello di ventilazione del tetto

Sia in Trnsys che in Comis, quindi, sono state create tre zone, due corrispondenti alle cavità Sud e Nord ed una per il colmo. Lo strato costituente il tetto è stato suddiviso in due sottostrati, quello superiore a contatto con l'ambiente esterno composto da soli coppi e quello adiacente alla zona del sottotetto composto da tutti gli altri strati che compongono il tetto. Per i coefficienti di pressione del vento sulle facciate dell'edificio sono stati impostati i valori riportati in Fig. 4.11. Questi sono stati ottenuti da studi empirici e valgono per edifici di forma quadrata e di altezza non elevata (fino a tre piani).

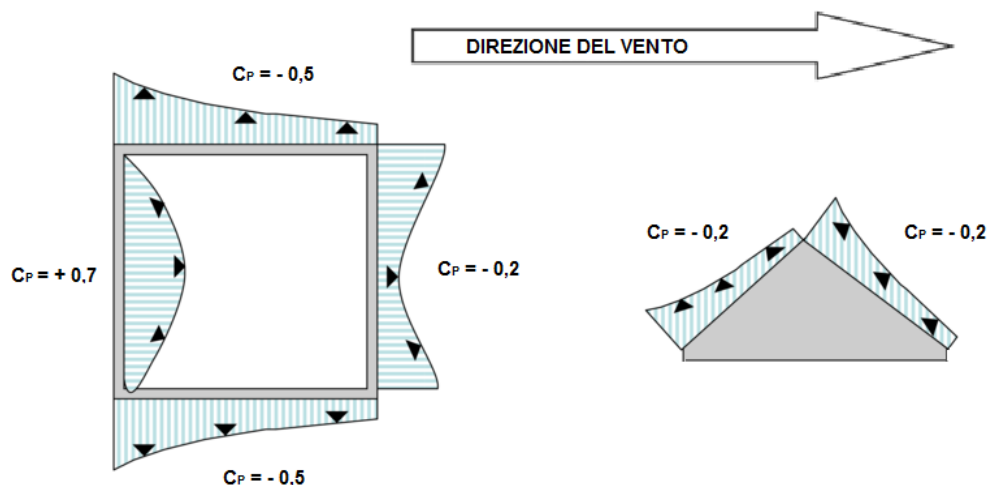


Figura 4.11. Valori del coefficiente di pressione del vento per le diverse superfici esterne dell'edificio (Martin W. Liddament 1986)

Per quanto riguarda i coefficienti di convezione all'interno delle cavità è stata utilizzata la relazione di B.J. Brinkworth (2000) quando il flusso di aria nelle cavità si può supporre laminare e la correlazione di Gnielinski quando è turbolento.

4.5. Dati meteorologici

I dati meteorologici orari necessari per la simulazione sono: temperatura ambiente, umidità relativa, radiazione solare globale sul piano orizzontale e velocità del vento. Sono stati usati i dati climatici UNI-CTI che fanno parte del progetto di revisione della norma UNI 10349. Rappresentano l'anno tipo che consiste in 12 mesi caratteristici, scelti statisticamente da un database di dati meteorologici di un periodo di più di 10 anni. Anche la direzione del vento è un parametro necessario per la simulazione. Questo non è fornito con l'anno tipo quindi sono stati presi i dati dell'anno 2011, forniti dall'ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente).

4.6. Analisi dei risultati

In questa prima simulazione sono state confrontate le prestazioni termiche, con e senza ventilazione, del modello base posizionato a Milano. La simulazione inizia il 1 Gennaio e termina il 31 Dicembre con step di un'ora, per un totale di 8760 ore. Nella Tabella 4.3 sono riportati i risultati:

	RISCALDAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RISCALDAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]
TETTO CALDO	4891	975	6408	991
TETTO VENTILATO	4893	969	6400	921
DIFFERENZA	2	6	8	70

	TOTALE RISCALDAMENTO [kWh]	TOTALE RAFFRESCAMENTO [kWh]
TETTO CALDO	11300	1967
TETTO VENTILATO	11294	1890
DIFFERENZA	6	77
DIFFERENZA %	0.05%	4%

Tabella 4.3. *Fabbisogni termici per i modello con e senza ventilazione, suddivisi per i due piani, con relative differenze¹²*

Si ha quindi un consumo minore per il riscaldamento di 6 kWh termici, dato trascurabile rispetto al totale, e un miglioramento di 77 kWh termici per il raffrescamento estivo. Il fabbisogno termico per il raffrescamento quindi grazie alla ventilazione diminuisce del 4%. In Tabella 4.4 è riportato il comportamento differenziato delle due zone del sottotetto.

	RAFFRESCAMENTO ZONA 3 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 4 [kWh]
TETTO CALDO	555	436
TETTO VENTILATO	506	415
DIFFERENZA	49	21
DIFFERENZA %	9%	5%

Tabella 4.4. *Fabbisogni termici per i modello con e senza ventilazione, Suddivisi per le due zone del sottotetto, e relative differenze*

Si nota come gli effetti della ventilazione sono più importanti nella zona termica del sottotetto rivolta a Sud. Come vedremo successivamente ciò è dovuto alla maggiore insolazione su tale falda.

Nella Tabella 4.5 sono riportati per ogni mese i coefficienti convettivi medi per le superfici inferiore e superiore delle due cavità e le velocità media dell'aria al loro interno.

¹² Le differenze che comportano un peggioramento del fabbisogno termico nel passaggio da tetto caldo a tetto ventilato sono riportate in rosso.

Cavità SUD												
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
CC sup $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	3.55	3.91	3.89	4.25	4.00	3.92	4.03	3.95	3.90	3.60	3.83	3.61
CC inf $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	3.21	3.72	3.88	4.13	3.80	3.72	3.63	3.72	3.64	3.22	3.44	3.22
Vel aria $[m/s]$	0.41	0.50	0.54	0.62	0.54	0.51	0.52	0.51	0.49	0.45	0.53	0.41

Cavità NORD												
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
CC sup $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	2.87	3.12	2.88	3.11	3.24	3.32	3.33	2.98	2.89	2.65	2.98	3.21
CC inf $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	2.55	2.78	2.87	2.89	3.08	3.02	3.02	2.69	2.54	2.45	2.55	2.71
Vel aria $[m/s]$	0.29	0.32	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.25	0.26	0.28	0.30	0.33

Tabella 4.5. Valori medi per ogni mese dei coefficienti di convezione della superficie inferiore e di quella superiore per le due cavità e velocità dell'aria al loro interno

Togliendo il raffrescamento e lasciando variare le temperature interne sono state trovate le differenze tra i modello con e senza ventilazione riportate in Tabella 4.6.

	ZONA SOTTOTETTO A SUD				
	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE
SENZA VENTILAZIONE	23.03	28.96	29.14	28.01	25.11
CON VENTILAZIONE	22.79	28.68	28.88	27.79	24.98

	ZONA SOTTOTETTO A NORD				
	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE
SENZA VENTILAZIONE	22.68	28.68	28.87	27.56	24.46
CON VENTILAZIONE	22.56	28.55	28.68	27.43	24.40

Tabella 4.6. Differenze di temperatura nelle zone componenti il sottotetto tra le soluzioni con e senza ventilazione nei mesi estivi, senza accendere l'impianto di raffrescamento.

4.6.1. Effetti del vento

Per analizzare gli effetti del vento sul sistema di ventilazione è stato confrontato il modello base con lo stesso modello ma con velocità del vento nulla durante tutto l'anno. In Tabella 4.7 ne sono riportati i risultati.

	RISCALDAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RISCALDAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]
TETTO VENTILATO CON VENTO	4893	969	6401	920
TETTO VENTILATO SENZA VENTO	4893	970	6399	960
DIFFERENZA	0	1	2	40
		TOTALE RISCALDAMENTO [kWh]	TOTALE RAFFRESCAMENTO [kWh]	
TETTO VENTILATO CON VENTO		11294	1890	
TETTO VENTILATO SENZA VENTO		11290	1930	
DIFFERENZA		2	40	
DIFFERENZA %		0.02%	2.6%	

Tabella 4.7. Confronto tra fabbisogni termici con e senza considerare il vento

Senza il vento quindi si ha un leggero miglioramento delle prestazioni termiche invernali, comunque trascurabile, ed un peggioramento di quelle estive provocando un aumento del fabbisogno di raffrescamento di 40 kWh termici. Considerando che il miglioramento relativo alla ventilazione è di 77 kWh termici, il vento quindi ha un effetto relativamente importante nel migliorare le prestazioni estive. Tale effetto sarà analizzato più dettagliatamente nei prossimi paragrafi.

4.6.2. Analisi delle giornate invernali

Per capire i flussi d'aria all'interno delle cavità è stato utilizzato il modello base con vento nullo, per analizzare i flussi della sola ventilazione naturale. Inizialmente sono state prese quattro giornate di gennaio per analizzare il comportamento invernale¹³. Dal Grafico 4.1 si può notare come nelle ore diurne l'aria entra nelle cavità, le percorre ed esce dalle aperture poste nella zona di uscita. Il flusso d'aria presente nella cavità Nord è marginale rispetto a quello della cavità Sud.

¹³ Per l'analisi delle giornate fredde non è stato usato il Type92 in quanto, soprattutto di inverno, nel breve periodo sfalsa i risultati. Nell'arco di un anno invece porta a valori quasi uguali di fabbisogno termico. Vedi appendice.

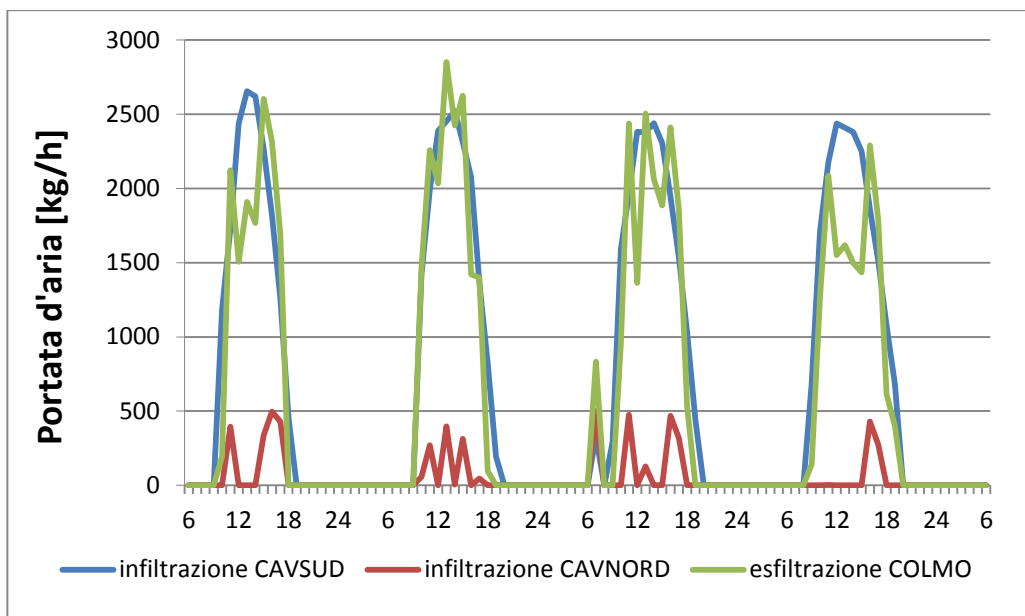


Grafico 4.1. *Flussi d'aria nelle ore diurne nei giorni invernali*

Dal prossimo grafico, invece, si nota che nelle ore serali e notturne l'aria compie il flusso inverso, entra dalle aperture superiori della zona del colmo, percorre dall'alto in basso le cavità ed esce dalle aperture inferiori.

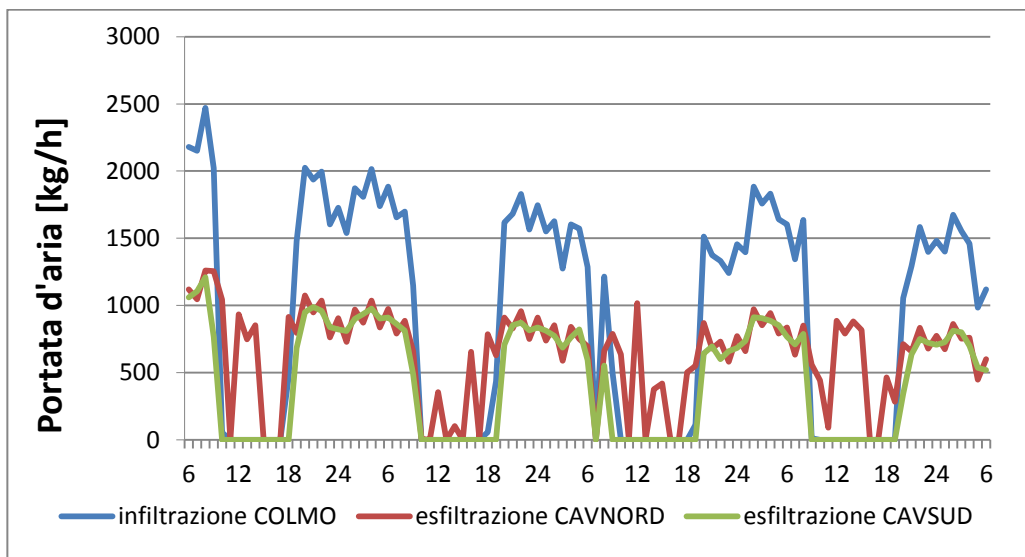


Grafico 4.2. *Flussi d'aria nelle ore serali e notturne nei giorni invernali*

Ciò deriva dalle temperature nelle cavità e dalla temperatura esterna. Nel Grafico 4.3 sono riportate le temperature dell'aria esterna e quelle dell'aria all'interno delle cavità.

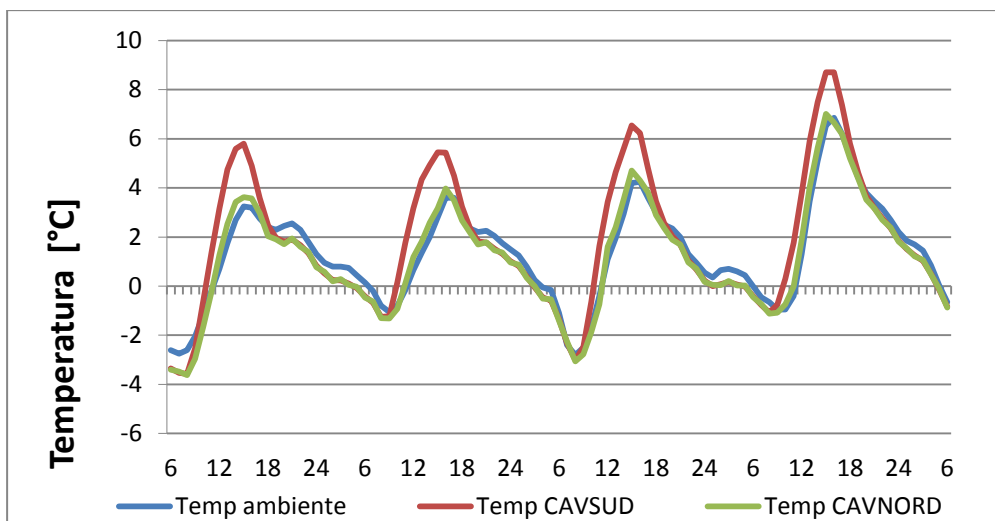


Grafico 4.3. Andamento delle temperature dell'aria nelle cavità e dell'aria esterna nelle giornate invernali

Dalle 8 alle 19 di sera circa le temperature dell'aria nelle cavità sono superiori rispetto alla temperatura esterna in quanto l'aria è riscaldata dall'irraggiamento solare sulla copertura. Ciò innesca l'effetto camino. Dato che l'irraggiamento incidente sulla falda Sud è molto maggiore rispetto a quello sulla falda Nord il flusso d'aria è molto maggiore sulla cavità Sud. Dopo le 19 le temperature nelle cavità calano rapidamente, per via dell'extraflusso radiativo verso la volta celeste, e scendono sotto la temperatura esterna. L'aria al loro interno, più densa di quella esterna, esce dalle aperture inferiori, attirando quindi aria più calda dalle aperture superiori.

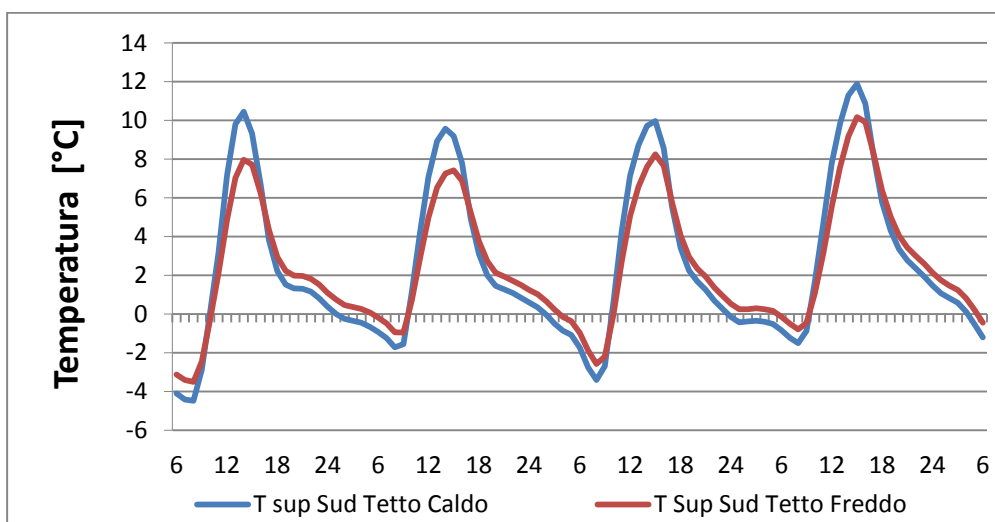


Grafico 4.4. Confronto per la falda Sud tra le temperature della superficie superiore dello strato di isolante tra i modelli con e senza ventilazione.

Nel Grafico 4.4 è confrontata la temperatura della superficie superiore dello strato di isolante del modello senza ventilazione e di quello con ventilazione¹⁴. Si può notare che nella cavità Sud, per gli effetti spiegati prima, la ventilazione in inverno comporta un peggioramento del fabbisogno nelle ore di maggior irraggiamento ed un miglioramento nelle ore notturne. Nella cavità Nord invece si ha un effetto positivo durante tutte le ore del giorno. Ciò è dovuto al fatto in questa cavità nelle ore diurne l'aria rimane pressoché ferma mentre in quelle notturne l'aria fluisce dall'alto al basso facendo entrare nella cavità calore sensibile. L'effetto complessivo nell'intera stagione di riscaldamento sul fabbisogno termico, anche vedendo la simulazione annua, è neutro. Il grafico sottostante mostra le differenze di dispersione di calore¹⁵ rispetto al modello senza ventilazione. Le differenze positive indicano un miglioramento delle prestazioni per il modello con ventilazione.

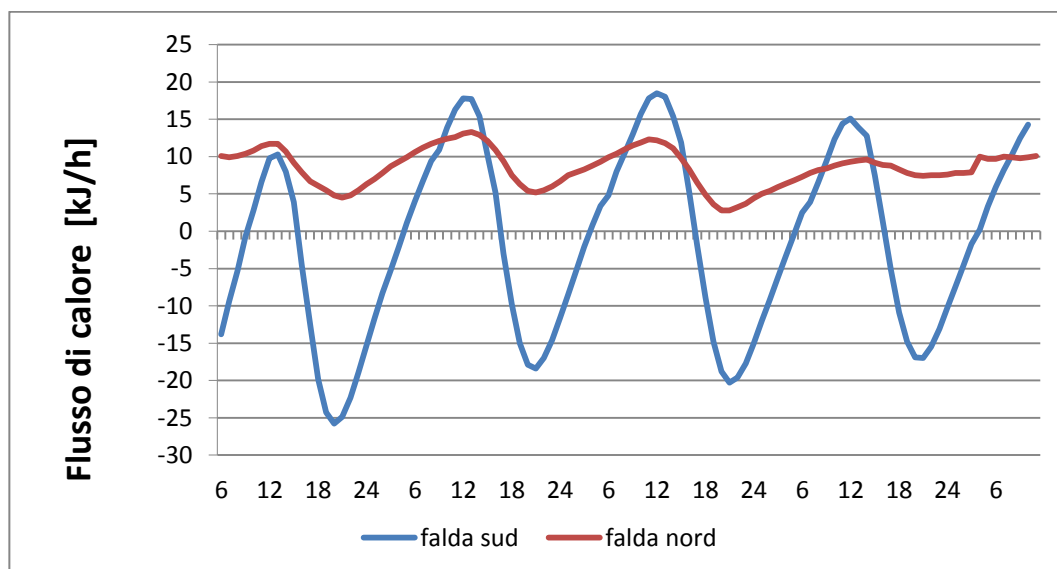


Grafico 4.5. Differenziale di dispersioni di calore tra il modello con e senza ventilazione

Si denota come l'effetto del maggior flusso d'aria delle ore diurne che asporta calore sensibile dalle cavità si sposti, in termini di peggioramento delle prestazioni per il modello ventilato, nelle ore serali. Ciò è dovuto all'inerzia termica del tetto.

¹⁴ Per quanto riguarda il modello con ventilazione la superficie corrisponde a quella inferiore della cavità, mentre per il modello senza ventilazione è stata presa la temperatura della superficie dei coppi a contatto con l'esterno ed è stata ricavata la temperatura della superficie superiore dello strato di isolante tramite la formula della conduzione.

¹⁵ Come calore disperso è stato preso il flusso di calore derivante da convezione e radiazione sull'infrarosso che attraversa la superficie interna del tetto della zona termica.

4.6.3. Analisi giornate estive

È stata effettuata la stessa analisi del paragrafo precedente per delle giornate di fine Luglio ed inizio Agosto. Il grafico 4.6. rappresenta il flussi d'aria dalle aperture inferiori verso il colmo.

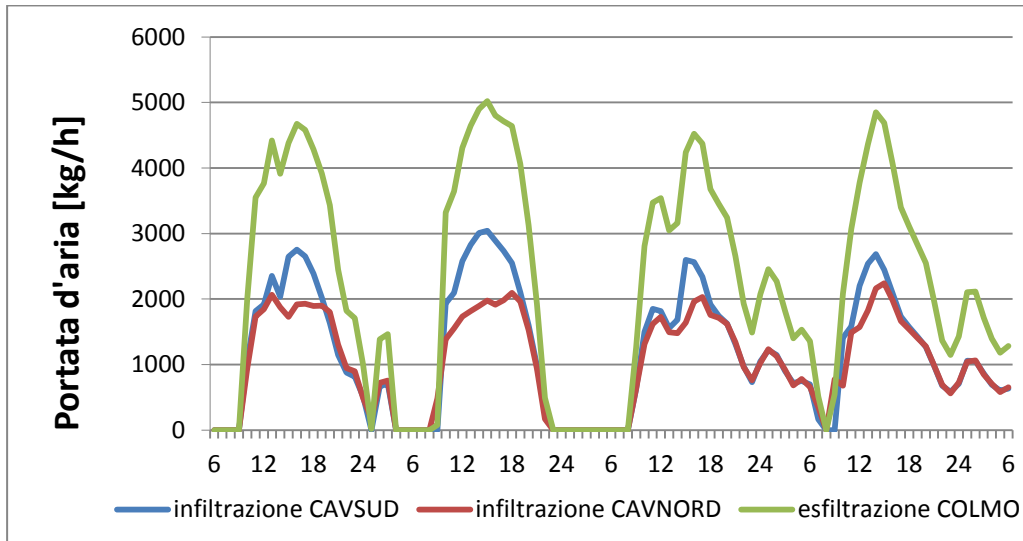


Grafico 4.6. Flussi d'aria nelle ore diurne nei giorni estivi

Si può notare come la portata d'aria che fluisce nelle cavità nelle ore diurne sia maggiore nei mesi estivi. In certe giornate l'effetto camino si prolunga anche nelle ore notturne.

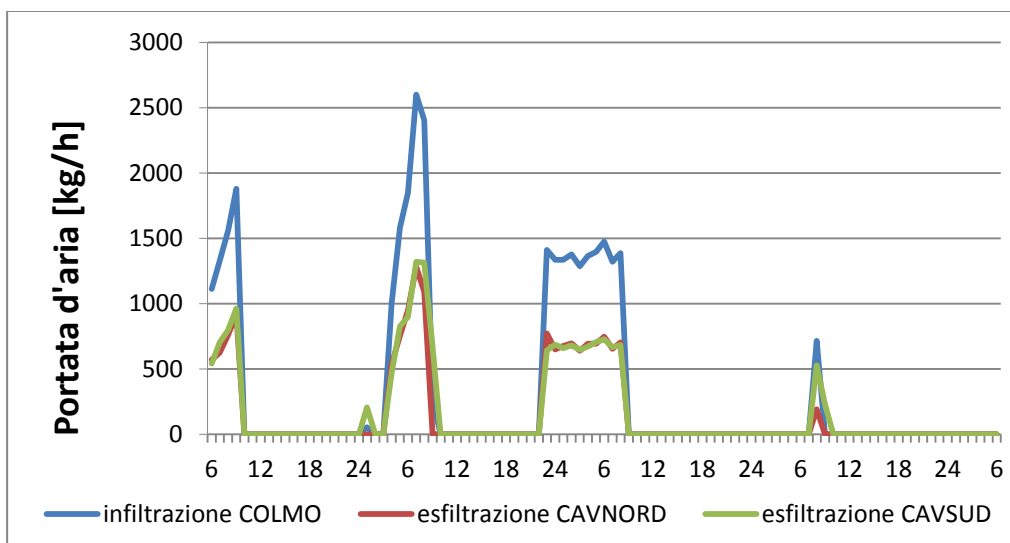


Tabella 4.7. Flussi d'aria nelle ore serali e notturne nei giorni estivi

Dal Grafico 4.7. si denota che per quanto riguarda il flusso d'aria inverso, che si aveva nelle ore notturne delle giornate invernali, si presenta in maniera molto meno marcata in quelle estive.

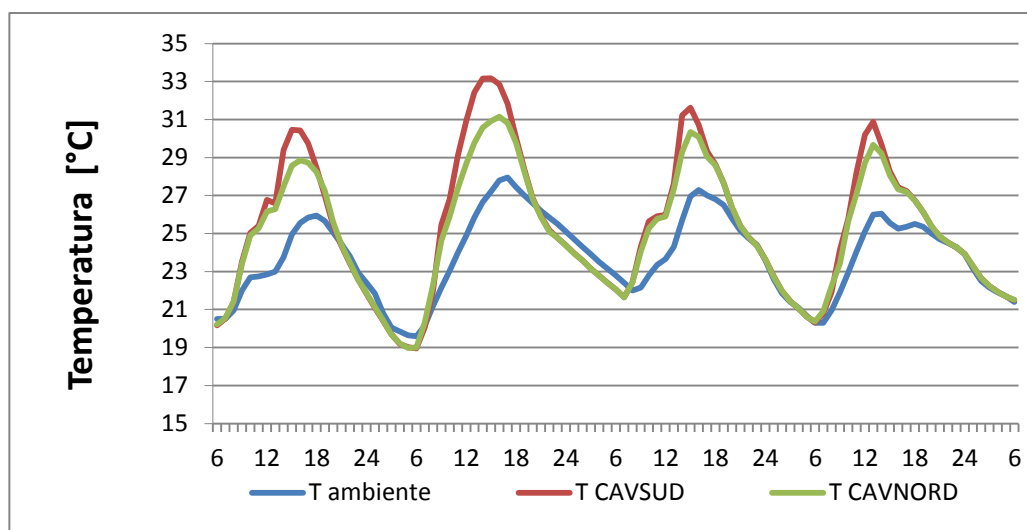


Grafico 4.8. Andamenti della temperatura esterna e di quella dell'aria nelle due cavità.

Il maggior flusso d'aria estivo deriva dalla maggior differenza di temperatura tra l'aria nelle cavità e quella esterna (vedi Grafico 4.8) che a sua volta deriva dalla maggior radiazione incidente sulle falde nelle ore diurne. A differenza delle giornate invernali in cui il flusso d'aria nella cavità Nord era quasi nullo, nelle giornate estive il flusso d'aria in questa cavità è rilevante. Ciò deriva dal fatto che in estate il sole è molto più alto sull'orizzonte, quindi è elevato l'irraggiamento sulla falda nord. Nel Grafico 4.9 è riportata la comparazione tra la portata d'aria di infiltrazione nella cavità Sud con e senza vento.

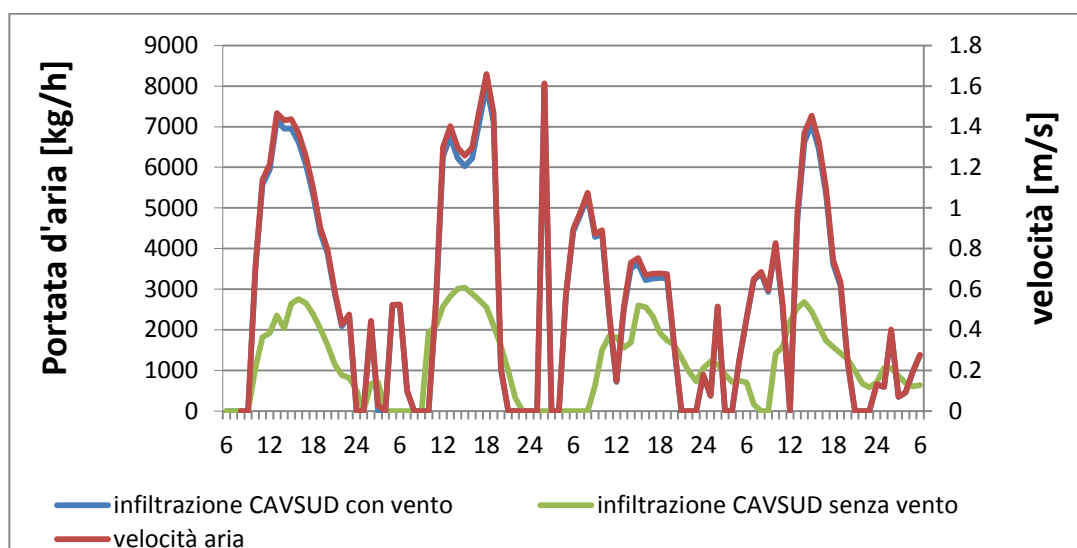


Grafico 4.9. Flussi d'aria nelle cavità considerando il vento

In queste quattro giornate estive il vento ha una velocità media di 2.4 m/s con direzione media di 185° , quindi da Sud. Dal grafico si può notare che il vento ha causato un importante aumento del flusso d'aria nella cavità Sud. Inoltre si innescano flussi ascendenti anche in ore della giornata in cui, per la sola ventilazione naturale non vi sarebbero. Le velocità dell'aria all'interno della cavità¹⁶ passano dai 0,5 m/s di punta nel modello con sola ventilazione naturale, coerente con quanto visto nel Capitolo 3, fino a punte di 1,5 m/s. Nella cavità Nord i flussi sono pressappoco uguali al modello senza vento.

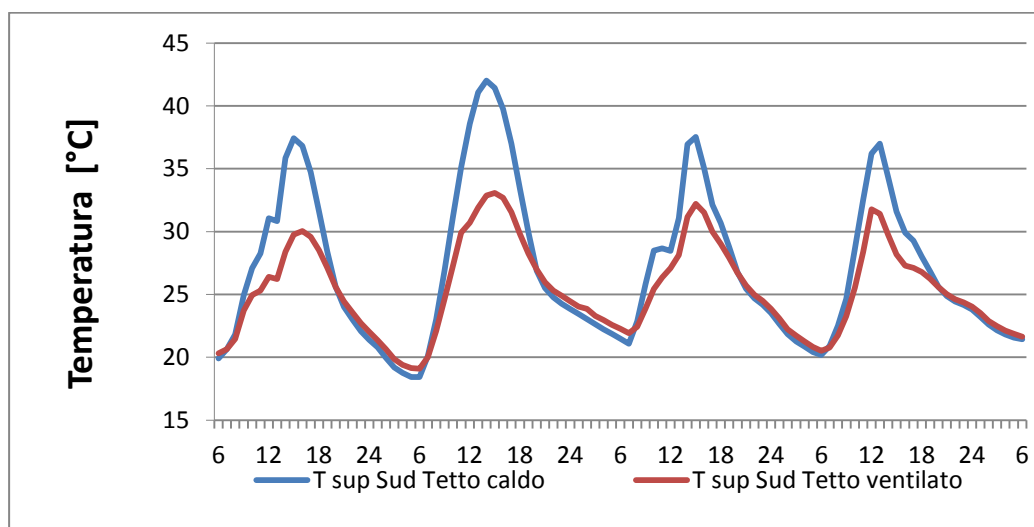


Grafico 4.10. Confronto, per la falda Sud, tra le temperature superiori dello strato isolante tra i due modelli

Nel Grafico 4.10 sono confrontate la temperatura della superficie superiore dello strato isolante della falda Sud del modello senza ventilazione e quella del modello con ventilazione¹⁷. La ventilazione porta a grandi vantaggi nelle ore del giorno con maggiore irraggiamento solare in quanto abbassa le temperature superficiali e quindi il calore entrante nell'abitazione. Nelle ore notturne l'effetto camino diminuisce per l'effetto di raffreddamento del tetto dovuto all'extraflusso radiativo verso la volta celeste, ma rimane comunque presente. Nel grafico 4.11 sono confrontate le stesse temperature per la falda Nord.

¹⁶ Nel grafico sono state indicate solo le velocità dell'aria che fluisce dal basso verso l'alto.

¹⁷ Dal Grafico 4.10 in poi i grafici dell'analisi delle giornate estive sono effettuati considerando gli effetti del vento.

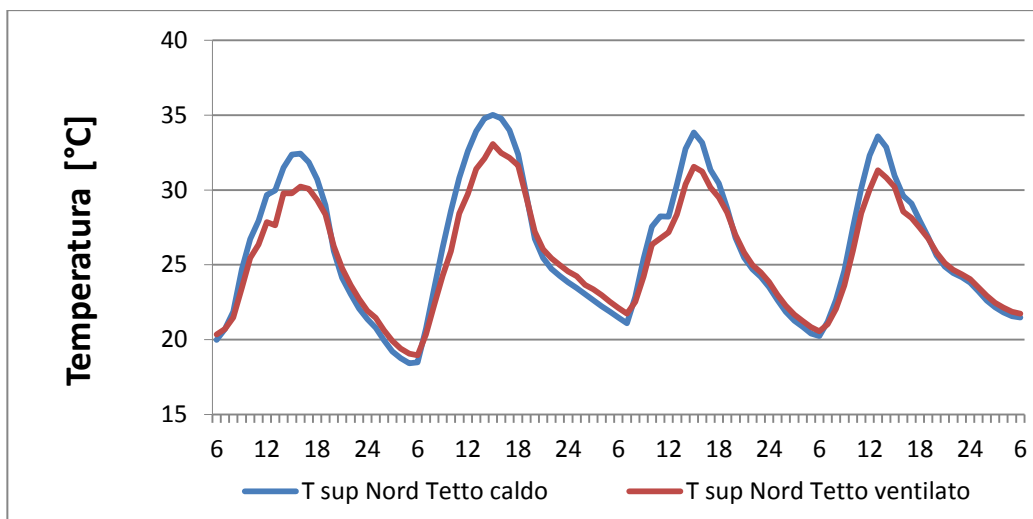


Grafico 4.11. Confronto, per la falda Nord, tra le temperature superiori dello strato isolante tra i due modelli

Infine il Grafico 4.12 indica, per le due falde le differenze tra il modello con e senza ventilazione del flusso di calore entrante attraverso la superficie interna del tetto. Una differenza positiva indica migliori prestazioni per il modello con ventilazione. Si denota che in estate il modello con ventilazione in estate si comporta meglio di quello senza ventilazione durante tutto l'arco della giornata con picchi nelle ore a più alto irraggiamento. Come per le giornate invernali i vantaggi vengono sfasati dall'inerzia del tetto.

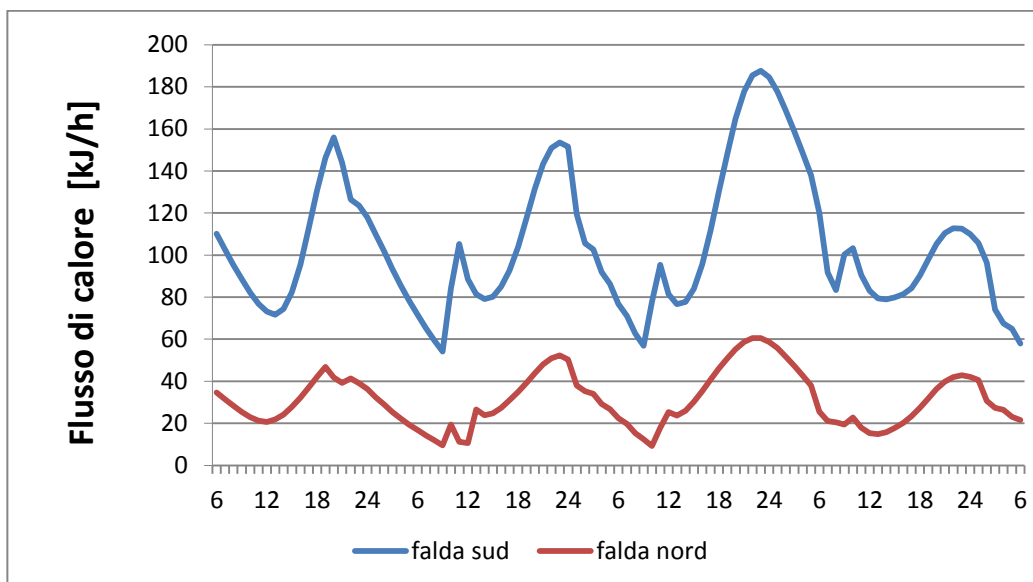


Grafico 4.12. Differenziale di calore entrante nella relativa zona termica tra il modello con e senza ventilazione nelle due falde.

4.6.4. Variazione della pendenza del tetto

Sono state fatte variare, per diverse inclinazioni del tetto, le altezze delle aperture di colmo nel modello su Comis, a parità di modello su Trnsys in modo tale da poter confrontare i risultati tra loro. I valori di fabbisogno di raffrescamento rimangono pressoché invariati, mentre quelli di raffrescamento sono riportati in Tabella 4.8.

Pendenza	Carico di raffrescamento
30°	1890
35°	1882
40°	1878
45°	1874

Tabella 4.8. *Carico di raffrescamento al variare della pendenza del tetto, a parità di superficie*

Vi è un miglioramento delle prestazioni all'aumentare della pendenza delle cavità. Il miglioramento marginale si riduce all'aumentare della pendenza.

4.6.5. Variazione dello spessore delle cavità

È stato fatto variare lo spessore delle cavità, modificando i modelli sia in Comis che in Trnsys. Anche in questo caso i fabbisogni termici di raffrescamento risultano invariati. I risultati sono indicati in Tabella 4.9.

spessore [cm]	Carico di raffrescamento
3	1916
6	1897
10	1890
15	1882

Tabella 4.9. *Carico di raffrescamento al variare dello spessore delle cavità*

Il miglioramento marginale delle prestazioni estive diminuisce all'aumentare dello spessore. Da questi dati si evince che non conviene superare i 10 cm di spessore.

4.6.6. Variazione dell'orientazione dell'edificio

È stata variata l'orientazione dell'edificio in modo tale che le due falde puntino ad Est ed ad Ovest. I risultati sono riportati in tabella:

	RISCALDAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 1 + ZONA 2 [kWh]	RISCALDAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]	RAFFRESCAMENTO ZONA 3 + ZONA 4 [kWh]
TETTO CALDO	4917	996	6361	964
TETTO VENTILATO	4916	990	6343	899
DIFFERENZA	1	5	17	65
	TOTALE RISCALDAMENTO [kWh]	TOTALE RAFFRESCAMENTO [kWh]		
TETTO CALDO	11277	1960		
TETTO VENTILATO	11259	1889		
DIFFERENZA	18	70		
DIFFERENZA %	0.16%	3.6%		

Tabella 4.10. Differenze dei fabbisogni termici tra il modello con e senza ventilazione, con orientazione delle falde a Est e a Ovest

4.6.7. Variazione del grado di isolamento termico

Le analisi precedenti si basano su un edificio con un isolamento tale da avere trasmittanze migliori di quelle prescritte dalla normativa per la zona climatica F. Ricordando che Milano si trova in zona climatica E, in questo paragrafo sono state analizzate le prestazioni della ventilazione all'aumentare delle trasmittanze di pareti, pavimenti e tetto. I vari modelli confrontati sono riportati in Tabella 4.11.

	PARETE		PAVIMENTO		TETTO	
	Trasmittanza $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	Spessore di isolante [cm]	Trasmittanza $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	Spessore di isolante [cm]	Trasmittanza $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	Spessore di isolante [cm]
Mod. base	0,254	10	0,288	10	0,228	12
F	0,33	7	0,32	8,9	0,29	8,9
E	0,34	6,7	0,33	8,5	0,3	8,5
E+	0,36	6	0,36	7,5	0,32	7,6
E++	0,4	5,3	0,4	6,6	0,36	6,6
E+++	0,43	4,9	0,43	6,2	0,4	6,2

Tabella 4.11. Varianti di valori delle trasmittanze per le strutture opache dell'involucro confrontate nell'analisi

Dal Grafico 4.13 si denota che le prestazioni della ventilazione aumentano quando l'edificio è meno isolato. In inverno l'effetto della ventilazione resta neutro.

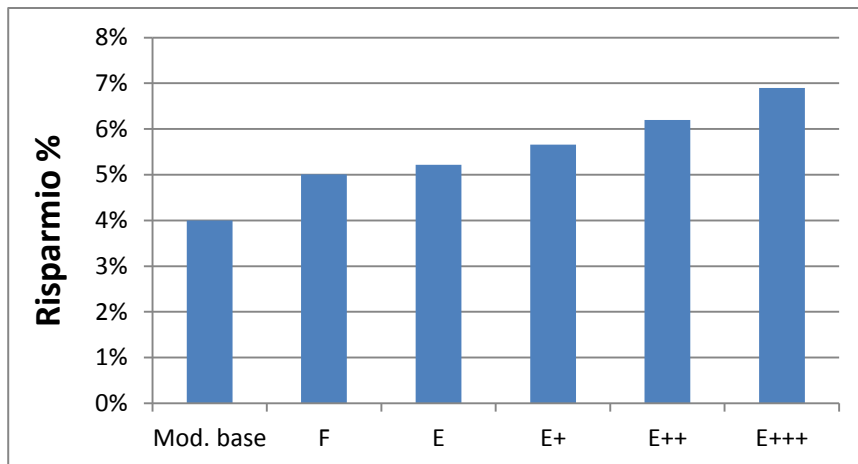


Grafico 4.13. Andamento del risparmio del fabbisogno termico estivo dovuto alla ventilazione al variare del grado di isolamento dell'edificio.

4.6.8. Analisi degli effetti delle schermature

In estate l'energia termica derivante dall'irraggiamento solare che entra dalle finestre ha un'importanza primaria nella quantificazione del fabbisogno termico di raffrescamento. Nel Grafico 4.14 è riportato l'andamento del carico di raffrescamento e la prestazione della ventilazione al variare della percentuale di schermatura¹⁸.

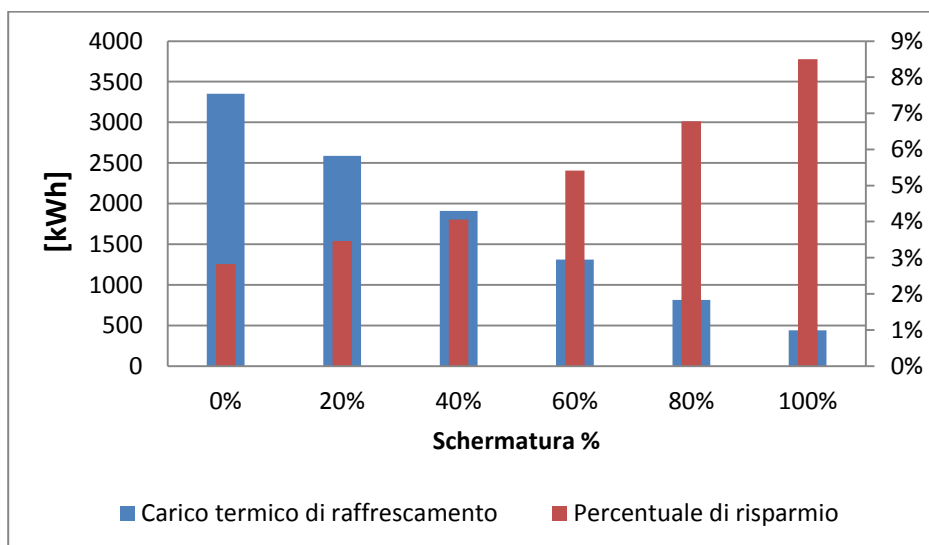


Grafico 4.14. Andamento del carico di raffrescamento e della prestazione della ventilazione al variare della percentuale di schermatura

¹⁸ Vedi appendice.

4.6.9. Variazione della posizione geografica

Sono stati inseriti nel modello i dati metereologici di Milano, Padova, Bologna, Roma, Napoli e Palermo. Il grado di isolamento dell'edificio è stato fatto variare in base al limite normativo della zona climatica di appartenenza. In Tabella 4.12 i risultati, TV rappresenta il tetto ventilato e TC una struttura senza ventilazione.

		Riscaldamento [kWh]	Raffrescamento [kWh]
Milano (E)	TC	12833	1954
	TV	12806	1856
	Diff.	27	98
	Diff. %	0,2%	5%
Padova (E)	TC	12964	1471
	TV	12957	1383
	Diff.	7	88
	Diff. %	0,1%	5,9%
Bologna (E)	TC	10153	2408
	TV	10134	2314
	Diff.	19	94
	Diff. %	0,2%	3,9%
Roma (D)	TC	10044	2888
	TV	10021	2749
	Diff.	23	139
	Diff. %	0,2%	4,8%
Napoli (C)	TC	7205	2960
	TV	7249	2758
	Diff.	-44	202
	Diff. %	-0,6%	6,8%
Palermo (B)	TC	5336	4061
	TV	5324	3885
	Diff.	12	176
	Diff. %	0,2%	4,4%

Tabella 4.12. Variazione dei fabbisogni termici al variare della posizione geografica

Il risparmio sul fabbisogno termico estivo aumentano tendenzialmente spostandosi in zone climatiche più calde. Ciò deriva dal fatto che l'irraggiamento solare è mediamente più elevato e l'isolamento degli edifici è minore. In termini percentuali per tutte le località il risparmio è di circa il 5%. Le differenze che riguardano la stagione invernale sono insignificanti.

4.6.10. Tetto ventilato e comfort termico

Il benessere termoigrometrico può essere definito come lo stato di neutralità termica, in cui il soggetto non sente né caldo né freddo. È una sensazione soggettiva che dipende da una serie di fattori che interferiscono fra loro. Le percezioni sensoriali si sovrappongono provocando un effetto “sinergico” che dà origine alla sensazione di benessere. I principali fattori da cui dipende sono la temperatura dell’aria a bulbo secco, l’umidità relativa, la temperatura media radiante e la velocità relativa dell’aria interna. La valutazione di tale stato soggettivo può essere oggettivata e quantificata mediante l’utilizzo di indici integrati che tengono conto sia fattori microclimatici ambientali, sia del dispendio energetico (dispendio metabolico, MET) connesso all’attività lavorativa, sia della tipologia di abbigliamento (isolamento termico, CLO) comunemente utilizzato. Tra i suddetti indici quello che con maggiore precisione rispecchia l’influenza delle variabili fisiche e fisiologiche sopracitate sul comfort termico è il PMV (Predicted Mean Vote). Esso deriva dall’equazione del bilancio termico il cui risultato viene rapportato ad una scala di benessere psicofisico ed esprime il parere medio sulle sensazioni termiche di un campione di soggetti alloggiati nel medesimo ambiente. Dal PMV è derivato un secondo indice denominato PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) che quantifica percentualmente i soggetti comunque "insoddisfatti" in rapporto a determinate condizioni microclimatiche. La norma ISO - DIS 7730 (1983) suggerisce per lo stato di comfort termico valori di PMV compresi tra + 0,5 e - 0,5, cui corrisponde una percentuale di insoddisfatti delle condizioni termiche (PPD) inferiore al 10% (vedi Tabella 4.13).

PMV	PPD%	VALUTAZIONE AMBIENTE TERMICO
3	100	Molto caldo
2	75,7	Caldo
1	26,4	Leggermente caldo
+0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
+0,5<PMV<-0,5	<10	Benessere termico
-0,85	20	Ambiente termicamente accettabile
-1	26,8	Fresco
-2	76,4	Freddo
-3	100	Molto freddo

Tabella 4.13. scala di valutazione dell’ambiente termico

Il PMV nelle giornate più calde della stagione estiva a Milano è risultato variare tra 1 e 1,6 ed il PPD tra il 30% ed il 60%. Il modello con copertura ventilata ha evidenziato un PMV mediamente più elevato di 0,08 rispetto a quello del modello senza ventilazione ed un PPD maggiore di 4 punti percentuali. L'analisi è stata effettuata con impianti spenti, un valore di tasso metabolico impostato a 1,2 MET (attività sedentaria), un valore di resistenza termica degli indumenti di 0,3 CLO (pantaloncini corti e maglietta) ed un valore di velocità relativa dell'aria di 0,1 m/s.

4.6.11. Chiusura delle cavità nella stagione invernale

Se le aperture per la circolazione dell'aria vengono chiuse con appositi sistemi mobili nella stagione invernale, si favorisce il contenimento dei consumi energetici in quanto la lama di aria stagnante, che si viene a creare sotto la copertura, possiede ottime caratteristiche di coibentazione termica. Infatti, in queste condizioni, essa ha una conducibilità termica teorica di 0,026 $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$, anche se a causa di piccoli fenomeni conduttivi e radiativi è leggermente superiore. Sono stati valutati i risparmi energetici derivanti da questa soluzione al variare del grado di isolamento dell'edificio (vedi Grafico 4.15).

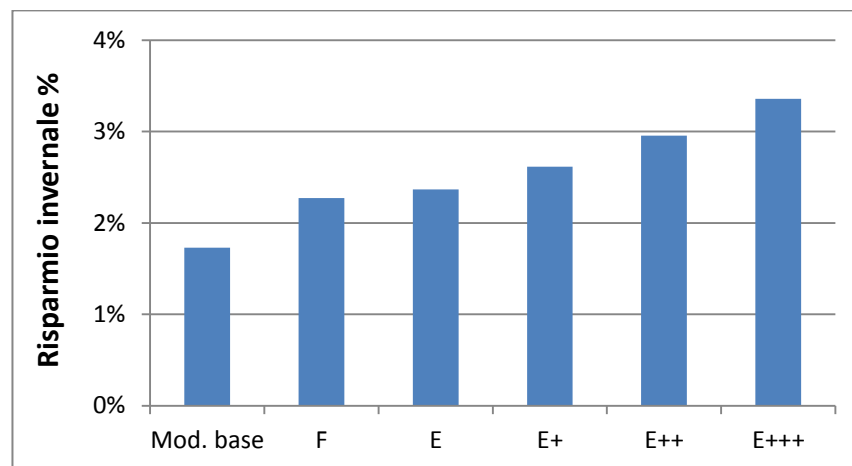


Grafico 4.15. Risparmio energetico invernale chiudendo le cavità, in funzione del grado di isolamento della struttura.

Nel Grafico 4.16 è rappresentato il risparmio energetico in funzione dello spessore dell'intercapedine, considerando un grado di isolamento dell'edificio pari al limite normativo per la zona climatica E.

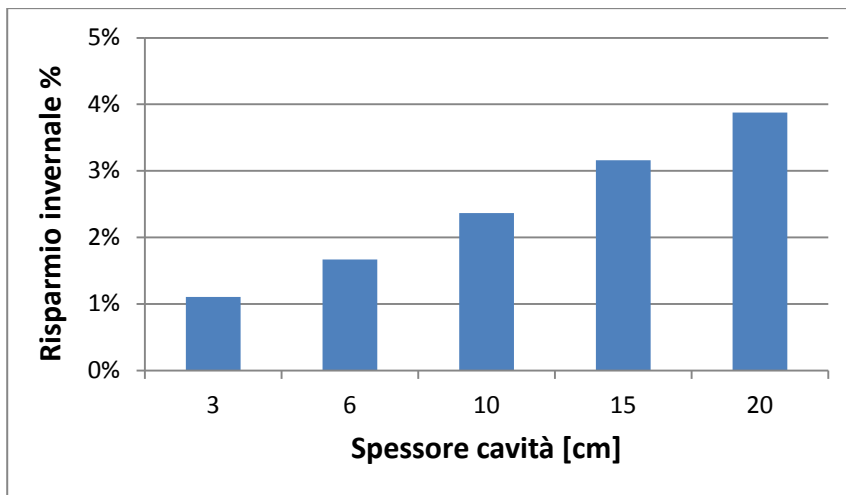


Grafico 4.16. *Risparmio percentuale sul fabbisogno termico di riscaldamento al variare dello spessore della cavità.*

Bisogna considerare che questa soluzione è impiegabile solo per coperture continue. Le classiche coperture in coppi o tegole infatti, data l'elevata permeabilità all'aria, continuerebbero a presentare rilevanti moti convettivi.

APPENDICE CAPITOLO 4

Descrizione dettagliata del modello

4A.1. Descrizione edificio in Trnbuild

In tabella 4A.1 sono riportati le pareti dell'involucro utilizzate per la costruzione del modello e le loro stratigrafie.

Nome in Trnsys e relativa descrizione	Stratigrafia	Spessore [m]	Conducibilità $\left[\frac{W}{m K}\right]$	Capacità specifica $\left[\frac{kJ}{kg K}\right]$	Densità $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
MURPORT Muro portante	Intonaco interno	0,02	0,35	0,91	1200
	Mattoni forati	0,08	0,3	0,84	800
	Isolante (polistirene)	0,1	0,033	0,9	35
	Mattoni portanti	0,2	0,5	0,91	1050
	Intonaco esterno	0,02	0,9	1,09	1800
DIVISINT Muro divisorio interno	Malta e gesso	0,015	0,3	0,34	600
	Mattoni forati	0,08	0,3	0,92	1400
	Malta e gesso	0,015	0,3	0,34	600
MUROINT Muro interno, più pesante rispetto a divisint	Malta e gesso	0,015	0,3	0,34	600
	Mattoni forati	0,08	0,3	0,84	800
	Intercapedine	0,04	0,26	1	1
	Mattoni forati	0,08	0,3	0,84	800
	Malta e gesso	0,015	0,3	0,34	600
PAVSUTERR Pavimento su terreno	Piastrelle	0,012	1	0,84	2300
	Sottofondo in calcestruzzo	0,04	0	0,88	2200
	Isolante (polistirene)	0,1	0,033	0,9	35
	Calcestruzzo	0,2	0,9	0,88	1800
SOLAIOINTER Solaio tra due piani	Piastrelle	0,02	1	0,84	2300
	Massetto	0,05	0,9	0,9	1800
	Isolante (polistirene)	0,05	0,033	0,9	35
	Solaio	0,220	0,8	0,88	250
	Intonaco interno	0,015	0,35	0,91	1200
TETTOINCL Tetto inclinato	Intonaco interno	0,02	0,35	0,91	1200
	Solaio	0,2	0,8	0,88	250
	Massetto	0,04	0,9	0,9	1800
	Massetto di pendenza	0,07	0,4	0,92	900
	Isolante (polistirene)	0,12	0,033	0,9	50
	Guaina	0,003	0,17	1,47	1200
	Coppi	0,02	2	1,26	2700

Tabella 4A.1. Pareti dell'involucro e relative stratigrafie

Come finestra è stata utilizzata la INS2_AR_2 con codice identificativo 2002 della libreria base di Trnsys. In Tabella 4A.2 sono riportate le specifiche della finestra:

Trasmittanza vetro $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	1,27
Fattore solare vetro %	59,1
Telaio %	15
Trasmittanza telaio $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	2,27
coefficiente liminare esterno $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	90
coefficiente liminare interno $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$	27,7

Tabella 4A.2. Specifiche finestra

Le dimensioni e la planimetria dell'edificio sono descritte nella seguente figura :

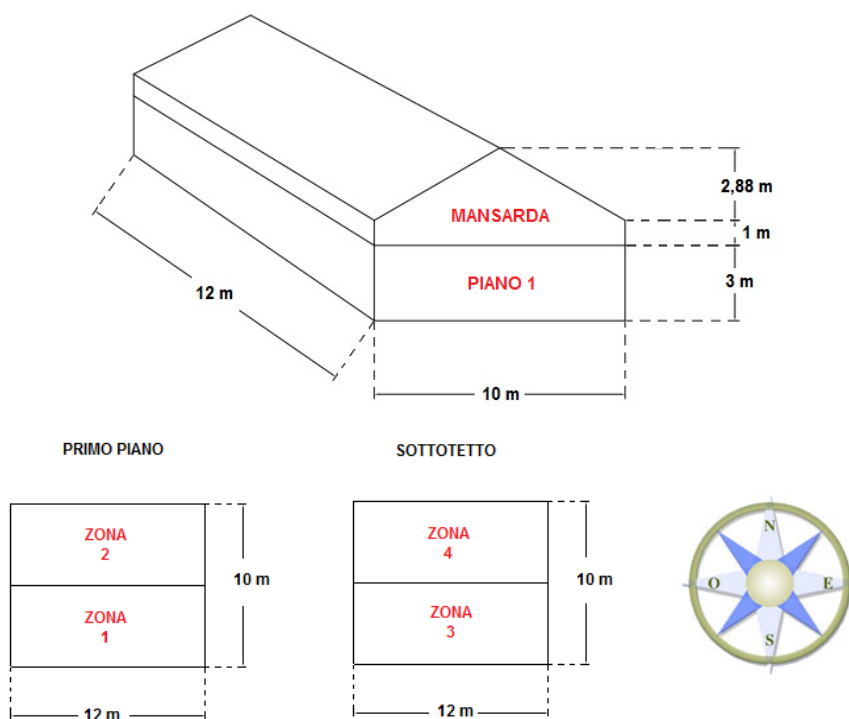


Figura 4A.1. Dimensioni e planimetria edificio

La pendenza del tetto nel modello base è di 30°. Viene definito modello tetto caldo la variante senza ventilazione e tetto freddo quella che prevede ventilazione del tetto. Lo spessore delle cavità di ventilazione nel modello base tetto freddo è di 10 cm. È stato impostato un importo di calore interno fisso di 112 W per ogni zona termica, per complessivi 450 W. Le due zone termiche del piano inferiore sono uguali per entrambi i modelli. In Tabella 4A.3 è riportata la composizione delle zone termiche relative al primo piano:

ZONA 1 Vol: 180 m ³				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
MURPORT	15	Esterno	Est	1,5
MURPORT	36	Esterno	Sud	3,6
MURPORT	15	Esterno	Ovest	1,5
DIVISINT	15	Interno		
MUROINT	36	Adiacente con ZONA 2		
PAVSUTERR	60	Confina con terreno		
SOLAIOINTER	60	Adiacente con ZONA 3		

ZONA 2 Vol: 180 m ³				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
MURPORT	15	Esterno	Est	1,5
MURPORT	36	Esterno	Nord	3,6
MURPORT	15	Esterno	Ovest	1,5
DIVISINT	15	Interno		
MUROINT	36	Adiacente con ZONA 1		
PAVSUTERR	60	Confina con terreno		
SOLAIOINTER	60	Adiacente con ZONA 4		

Tabella 4A.3. *Composizione delle zone termiche del primo piano*

Al primo piano la superficie finestrata rappresenta il 10% della superficie delle pareti esterne. Il totale è 13,2 m² di superficie finestrata rispetto ai 12 m² che vanno rispettati come minimo di legge (calcolato come 1/8 di 100 m² di superficie utile di pavimento). Le pareti DIVISINT sono state inserite per simulare la presenza di pareti divisorie per le stanze. Le orientazioni impostate su Trnbuild sono solo dei nomi a cui viene assegnato un numero identificativo a seconda dell'ordine in cui sono inserite nella scheda Project (vedi Figura 4A.2). Successivamente, in Simulation Studio tramite il Type 16, ogni orientazione identificata dal proprio numero viene definita tramite azimuth ed inclinazione.

No.	Orientation
1	NORTH
2	SOUTH
3	EAST
4	WEST
5	INCLUSUD
6	INCLNORD
7	HORIZONTAL

Figura 4A.2. *Numeri identificativi delle orientazioni usate*

Per quanto riguarda il sottotetto i modelli differiscono. In tabella 4A.4 è riportata la composizione delle zone termiche del sottotetto per il modello tetto caldo:

ZONA 3 Vol: 206,6 m3				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
MURPORT	12,22	Esterno	Est	0,72
MURPORT	12,22	Esterno	Ovest	0,72
MURPORT	12	Esterno	Sud	
DIVISINT	7,22	Interno		
MUROINT	46,64	Adiacente con ZONA 4		
SOLAIOINTER	60	Adiacente con ZONA 1		
TETTOINCL	69,28	Esterno	Sud inclinato	2,77

ZONA 4 Vol: 206,6 m3				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
MURPORT	12,22	Esterno	Est	0,72
MURPORT	12,22	Esterno	Ovest	0,72
MURPORT	12	Esterno	Nord	
DIVISINT	7,22	Interno		
MUROINT	46,64	Adiacente con ZONA 3		
SOLAIOINTER	60	Adiacente con ZONA 2		
TETTOINCL	69,28	Esterno	Nord inclinato	2,77

Tabella 4A.4. Composizione zone del sottotetto nel modello senza ventilazione

La superficie finestrata della mansarda è di 8,42 m² rispetto ad un minimo di legge di 8,33 m² (calcolato come 1/12 di 100 m² di superficie utile di pavimento). Il fattore di vista del cielo per le pareti esterne (frazione dell'emisfero celeste visto dalla superficie) è stato impostato a 0,5 per le pareti verticali; mentre per quelle oblique, dato l'angolo di pendenza β , è stata usata la seguente formula:

$$FVS = \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

Tale parametro è usato da Trnsys per gli scambi radiativi sugli infrarossi tra le superfici esterne dell'edificio ed il cielo. Per ogni zona sono stati impostati il parametro di infiltrazione INFNAT (configurato con un valore costante di 0,6 Vol/h), quello relativo al riscaldamento HEAT001 (configurato con un set point di temperatura di 20 °C) e quello del raffreddamento COOL001 (set point a 26 °C e umidità relativa al 60%). Sono stati definiti 6 variabili di input a Trnbuild (ESF1,

ESF2, ESF3, ESF4, ESF5, ESF6) che rappresentano i fattori di schermatura delle finestre relativi alle sei orientazioni (l'orientazione orizzontale non ha finestre). Per ogni finestra, quindi, è stata assegnata la variabile relativa alla propria orientazione.

Per quanto riguarda il modello tetto freddo sono state aggiunte tre ulteriori zone (vedi Fig. 4A.3):

- CAVSUD : per modellizzare l'intercapedine tra falda Sud del tetto ed il manto di copertura in coppi.
- CAVNORD : per modellizzare l'intercapedine tra falda Nord del tetto ed il manto di copertura in coppi.
- COLMO : per modellizzare il colmo ventilato in cui i due flussi d'aria provenienti dalle due cavità si mischiano e fuoriescono dalle aperture sul colmo. Quest'ultima zona non è indispensabile ma è stata inserita per analizzare in modo migliore i flussi d'aria nelle cavità.

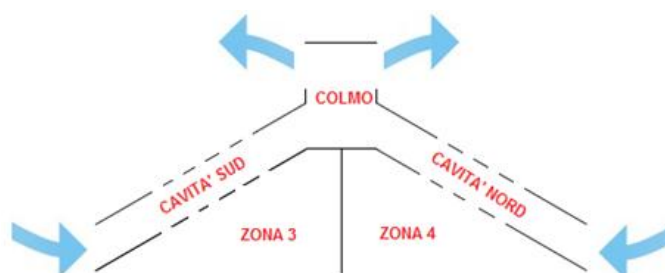


Figura 4A.3. Modellizzazione canali di ventilazione

Nella tabella 4A.5 è riportata la composizione delle zone termiche del sottotetto per il modello tetto freddo:

ZONA 3 Vol: 206,6 m3				
Tipologia parete	Superficie [m²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m²]
MURPORT	12,22	Esterno	Est	0,72
MURPORT	12,22	Esterno	Ovest	0,72
MURPORT	12	Esterno	Sud	
DIVISINT	7,22	Interno		
MUROINT	46,64	Adiacente con ZONA 4		
SOLAIOINTER	60	Adiacente con ZONA 1		
MURPORT	2,87	Esterno	Sud Inclinato	2,77
TETTOINCL_SUD	66,51	Adiacente con CAVSUD		

ZONA 4 Vol: 206,6 m ³				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
MURPORT	12,22	Esterno	Est	0,72
MURPORT	12,22	Esterno	Ovest	0,72
MURPORT	12	Esterno	Nord	
DIVISINT	7,22	Interno		
MUROINT	46,64	Adiacente con ZONA 3		
SOLAIINTER	60	Adiacente con ZONA 2		
MURPORT	2,87	Esterno	Nord Inclinato	2,77
TETTOINCL_NORD	66,51	Adiacente con CAVNORD		

Tabella 4A.5. Composizione zone del sottotetto nel modello con ventilazione

In giallo sono riportate le pareti che variano rispetto al modello tetto caldo. Al blocco TETTOINCL utilizzato nel modello tetto caldo è stato tolto lo strato relativo al manto di copertura in laterizio. Per simulare la superficie finestrata di 2,77 m² presente nella falda è stata aggiunta una parete esterna fittizia, di tipologia MURPORT, con superficie di 2,87 m² per alloggiare appunto una finestra di 2,77 m² (la discrepanza tra superficie parete e della finestra deriva dal fatto che 0,1 m² è la differenza minima di superficie tra parete e finestra che Trnbuild permette di impostare). La superficie finestrata è stata quindi tolta dal computo di quella del tetto, che scende ad una superficie di 66,51 m². Invece di utilizzare lo stesso blocco TETTOINCL per entrambe le falde sono stati creati due blocchi con stessa stratigrafia (TETTOINCL_NORD e TETTOINCL_SUD), ognuno dei quali adiacente alla relativa cavità. Questo per poter poi impostare un diverso coefficiente di convezione tra le due cavità. Nella successiva tabella sono indicate le composizioni delle cavità di ventilazione del modello tetto freddo:

CAVSUD Vol: 6.65 m ³				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
TETTOINCL_SUD	66,51	Adiacente con ZONA 3		
DIVISINT	0,58	Esterno	Est	
DIVISINT	0,58	Esterno	Ovest	
SOLOCOPPI SUD	66,51	Esterno	Sud Inclinato	
MURPORT	0,1	Adiacente con COLMO		

CAVNORD Vol: 6.65 m ³				
Tipologia parete	Superficie [m ²]	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata [m ²]
TETTOINCL_NORD	66.51	Adiacente con ZONA 4		
DIVISINT	0,58	Esterno	Est	
DIVISINT	0,58	Esterno	Ovest	
SOLOCOPPINORD	66.51	Esterno	Nord Inclinato	
MURPORT	0,1	Adiacente con COLMO		

Tabella 4A.6. *Composizione zone del sottotetto nel modello con ventilazione*

Per es. nella cavità Sud le 2 superfici che la richiudono inferiormente e superiormente sono rispettivamente TETTOINCL_SUD, adiacente alla ZONA 3 del sottotetto, e SOLOCOPPINORD che è a contatto con l'esterno. Quest'ultimo è costituito da un solo strato, il manto di copertura in laterizio (coppi). Poi vi sono le due chiusure laterali a Est ed a Ovest. Infine vi è una parete di tipologia MURPORT adiacente alla zona COLMO. Si tratta di una parete fittizia, infatti ha una superficie di 0,1 m², la cui utilità verrà analizzata in seguito. Le dimensioni delle cavità sono: 10 cm di spessore, 5,77 m di lunghezza di falda e 11,59 m di linea di colmo¹⁹. Si ipotizza che nelle aperture di entrata ed uscita dell'aria dalle cavità gli scambi termici con l'esterno siano trascurabili, quindi non sono state messe nella modellizzazione.

Infine viene riportata in tabella la composizione della zona COLMO:

COLMO Vol: 0,60 m ³				
Tipologia parete	superficie	Categoria	Orientazione	Superficie finestrata
MURPORT	0,1	Adiacente con CAVSUD		
MURPORT	0,1	Adiacente con CAVNORD		
S_COLMO	2,23	Esterno	Orizzontale	

Tabella 4A.7. *Configurazione zona di Colmo*

Questa zona, che rappresenta il colmo ventilato, è stata modellizzata come una camera dalla sezione rettangolare che segue interamente la lunghezza della linea di colmo. Le dimensioni sono di circa 18 cm di larghezza e 26 cm di altezza. Oltre alle due pareti fittizie adiacenti alle due cavità è stata messa la parte superiore della camera costituita dal blocco S_COLMO (composto da uno strato interno di lamiera di acciaio e da uno strato esterno di coppi). Viene ipotizzato

¹⁹ I 12 metri meno lo spazio relativo alla superficie finestrata.

che tutte le altre superfici della camera abbiano scambi termici trascurabili. Per realizzare la ventilazione nelle cavità sono state create 3 variabili in input a Trnbuild nominate INFCAVSUD, INFCAVNORD, INFCOLMO e messe come infiltrazione rispettivamente alle zone CAVSUD, CAVNORD, COLMO. Rappresenteranno l'aria in Vol/h, con temperatura esterna, entrante nelle zone, calcolata da Comis. Per meglio comprendere i movimenti complessivi nelle cavità sono stati messi anche gli accoppiamenti dei flussi d'aria tra le zone, detti valori di coupling in Trnbuild. Anche quest'ultimi verranno calcolati da Comis. Si avranno quindi altre 4 variabili in input: COUPSUDCOLMO, COUPNORDCOLMO, COUPCOLMOSUD e COUPCOLMONORD e sono appunto i flussi d'aria tra le zone; per esempio per la prima variabile la prima parola COUP significa coupling, la seconda SUD rappresenta la zona di origine dell'aria cioè CAVSUD, la terza COLMO è la zona in cui arriva l'aria). Queste 4 variabili saranno messe nell'apposito riquadro nelle impostazioni delle pareti fittizie in comune tra le 3 zone.

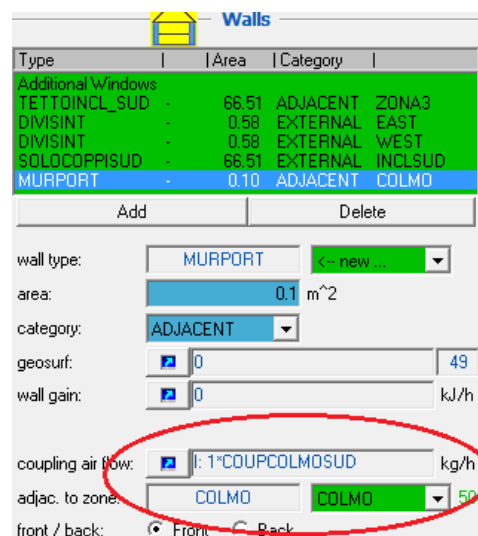


Figura 4A.4. Posizionamento variabili di coupling in Trnbuild

In figura 4A.4, ad es., la variabile COUPCOLMOSUD è stata impostata nella schermata Walls relativa alla zona CAVSUD. Rappresenta il flusso d'aria in kg/h che dalla zona COLMO entrerà nella zona CAVSUD alla temperatura dell'aria della zona COLMO. Per quanto riguarda i coefficienti di convezione delle superfici interne delle cavità, nel menù Wall Type Manager sono state impostate, per le relative superfici, quattro variabili di input (CC_TINCL_NORD, CC_TINCL_SUD, CC_SOLOCOPPI_SUD, CC_SOLO_COPPI_NORD).

4A.2. Configurazione di Simulation Studio

In questo paragrafo verrà descritta la simulazione vera e propria, iniziando con la parte in comune relativa al modello che prevede ventilazione e quello senza.

4A.2.1. Parte in comune della simulazione

Ogni Type avrà dei parametri da impostare ed altri da lasciare al valore di default.

- **TYPE9**: legge i dati metereologici da un file .txt da selezionare sulla scheda External Files. Il file .txt deve essere creato con i valori in colonna separati da uno spazio.

Parametri da impostare:

Parametro n°3 “No. of values to read”: rappresenta il numero di valori che il type deve leggere. È da impostare a 3 per il modello tetto caldo che sono Temperatura [C°], umidità relativa [%] e radiazione globale sul piano orizzontale [$\frac{W}{m^2}$]); nel modello tetto caldo va impostata a 5 in quanto ai primi tre valori si aggiungono la velocità [m^2] e la direzione del vento in gradi.

Parametri n°5-6-7 e multipli: per ogni tipologia di dato da leggere viene chiesto se deve essere interpolato, se gli va aggiunto un fattore moltiplicativo o additivo. Tutti i dati vanno interpolati, a parte la radiazione globale che viene interpolata dal Type16; inoltre gli va aggiunto un fattore moltiplicativo di 3,6 per convertirla in [$\frac{kJ}{h m^2}$], unità di misura utilizzata da Trnsys.

- **TYPE16**: riceve in input da Type9 la temperatura, l'umidità relativa, la radiazione globale sul piano orizzontale, il numero dello step da processare ed il precedente.

Parametri da impostare:

Parametro n°5 “Latitude”: latitudine, in gradi decimali, in cui è posizionato l'edificio.

Parametro n°7 “Shift in solar time”: Type9 lavora in tempo solare locale, in cui mezzogiorno è definito come l'istante in cui il sole si trova alla massima altezza sull'orizzonte. A causa dell'eccentricità della terra e dei fusi orari, questo differisce con l'ora locale. Dato che i dati forniti dall'ARPA sono in ora

locale questo parametro rappresenta la differenza in gradi decimali tra i due tempi (1 hr = 360/24°). Si può stimare tramite la seguente formula:

$$SST = L_{UTC} - L_E \quad ,$$

con:

SST : Shift in solar time

L_{UTC} : Longitudine Ovest della zona geografica di fuso orario in cui è posizionato l'edificio. Per l'Italia, avente fuso orario UTC+1, il valore è -15 °.

L_E : Longitudine Ovest in cui è posizionato l'edificio

Nella scheda input devono essere definite le orientazioni impostate su Trnbuild. Per ogni orientazione identificata dal proprio codice saranno impostate in gradi la pendenza e l'azimut. Il valore di quest'ultimo è 0° per le superfici rivolte a Sud, 180° per quelle a Nord, 90° per quelle ad Ovest e 270° per quelle ad Est.

- *TYPE33*: riceve come input dal Type9 i valori di umidità relativa ed elabora tutti gli altri dati relativi all'umidità dell'aria (umidità assoluta, temperatura di condensazione, entalpia dell'aria,...etc.). Sono stati lasciati i valori dei parametri di default.
- *TYPE69*: riceve in input dal Type33 la temperatura di condensazione nelle condizioni ambientali, dal Type9 la temperatura ambiente e dal Type16 la radiazione diffusa e diretta sul piano orizzontale. Calcola la temperatura effettiva del cielo, che è utilizzata dal type56 per calcolare lo scambio radiativo negli infrarossi tra le superfici esterne dell'edificio e l'atmosfera nelle ore notturne (extraflusso radiativo). L'unico parametro da impostare è l'altitudine rispetto al livello del mare.
- *TYPE56* : Riceve come input la temperatura ambiente e l'umidità relativa dal Type9, la temperatura del cielo dal Type 69, e per ogni orientazione la radiazione globale, quella diretta e l'angolo di incidenza di tale radiazione dal Type 16.

In figura 4A.5 è riportata questa parte della simulazione:

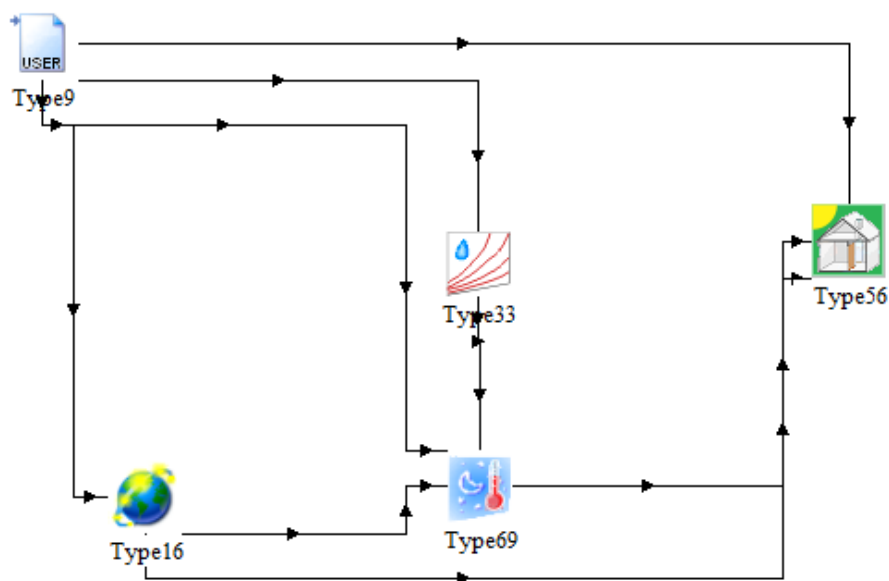


Figura 4A.5. Parte di simulazione indispensabile per il Type56

SCHERMATURE

In Transys il parametro per definire una schermatura è l'external shading factor, definito come rapporto tra l'energia termica bloccata dalla schermatura e l'energia incidente sulla finestra. Dato che l'energia solare entrante dalle finestre ha un peso molto importante nella definizione dei fabbisogni termici, si è cercato di simulare un utilizzo efficiente delle schermature mobili. Il criterio utilizzato si basa su due tipologie di schermature mobili, tapparelle e tendaggi. Per quanto riguarda le tapparelle si è utilizzato un valore medio per tutto l'anno di 0,2 di external shading factor (ESF_{tap}). Per i tendaggi è stata presa in considerazione la norma UNI/TS 11300. Secondo questa norma il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili dipende dal fattore solare del blocco finestra più schermatura (definito come rapporto tra l'energia termica globalmente trasmessa dalla lastra e quella incidente su di essa) e dalla frazione di tempo in cui la schermatura è utilizzata.

- Fattore solare finestra con schermatura attiva (G_{tot}): è stato ricavato utilizzando l'applicazione online ShadeCalc realizzato dall'Assites (associazione italiana tende, schermature solari e chiusure tecniche oscuranti). Immettendo i valori che caratterizzano termicamente il vetro della finestra e scegliendo come tendaggio un tessuto con peso medio (460 gr/m^2) e colore bianco si ricava un G_{tot} di 0,37. Un tale tendaggio

quando utilizzato garantisce una trasmissione luminosa del 21%. Per ricavare l'external shading factor relativo al tendaggio a partire dal G totale e dal G del solo vetro si utilizza la formula seguente:

$$ESF_{te} = 1 - \frac{G_{tot}}{G_f} = 0,38 \quad .$$

Dato che già il 20% dell'energia termica incidente è bloccata dalle persiane, l'external shading factor relativo al tendaggio agisce sul restante 80%. In definitiva quando i tendaggi sono utilizzati l'external shading factor è:

$$ESF_{tot} = EST_{tap} + ESF_{te}(1 - ESF_{tap}) = 0,5 \quad .$$

- Frazione di tempo in cui la schermatura è utilizzata: secondo la norma, va ricavato per ciascun mese e per ciascuna esposizione come rapporto tra la somma dei valori orari di irradianza maggiori di 300 W/m² e la somma di tutti i valori orari di irradianza del mese considerato. Non è stata usata tale regola alla lettera in quanto: la norma è pensata per un'analisi termica statica; prevede l'utilizzo delle schermature anche nei mesi invernali dove invece è necessario far entrare più radiazione solare possibile per contenere i fabbisogni termici di riscaldamento. È quindi stato usato il criterio che i tendaggi vengono utilizzati soltanto da Maggio a Settembre, quando sul componente finestrato vi è un irraggiamento incidente superiore ai 300 W/m².

In definitiva, per ogni orientazione, si ha:

DA MAGGIO A SETTEMBRE (rad inc<300 W/m²)	
External Shading Factor	0,2

DA MAGGIO A SETTEMBRE (rad inc>300 W/m²)	
External Shading Factor	0,5

RESTO DELL'ANNO	
External Shading Factor	0.2

Per realizzare tale algoritmo è stato utilizzato in Simulation Studio il Type 33 che richiama Excel. I parametri da impostare sono numero di input e di output ed il file Excel da aprire. Ogni step della simulazione tale Type riceverà input da altri

Type, farà dei calcoli sul file Excel e restituirà degli output da utilizzare da altri Type. Il file Excel che type33 va ad aprire deve contenere delle celle nominate “Inp1”, “Inp2”,...,“InpN”, a cui ad ogni step assegnerà il valore relativo degli N input, e delle celle nominate “Out1”, “Out2”,...,“OutM” in cui andrà a leggere i valori relativi agli M output.

In questo caso gli input sono 7, il primo è “time of next read” dal type 9 e gli altri 6 sono i valori di radiazione globale incidente sulle 6 orientazioni. Gli output sono 6 e rappresentano gli external shading factor per le sei orientazioni da dare in input al Type56. L’algoritmo creato, per ogni orientazione e per ogni timestep, controlla tramite il valore “time of next read” se lo step in questione è tra maggio e settembre. In caso negativo assegna un ESF di 0,2 mentre in caso positivo controlla se la radiazione incidente su quella orientazione è maggiore di 300 W/m² ed in caso positivo assegna un ESF di 0,5 altrimenti assegna un ESF di 0,2. In figura 4A.6 questa parte della simulazione:

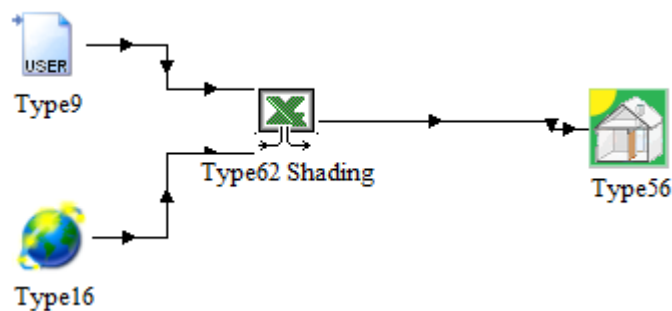


Figura 4A.6. Parte della simulazione relativa alle schermature mobili

4A.2.2. Configurazione di Comis

Per creare il modello su comis bisogna definire, le zone, le facciate ed i collegamenti tra le zone e tra zone e facciate.

- Zone: sono state inserite tre zone: cavità Sud, cavità Nord e zona di colmo. I parametri da definire per ogni zona sono altezza, larghezza, profondità.
- Facciate: sono state inserite 4 facciate, 1 per ogni apertura, in quanto caratterizzate da diversi valori del coefficiente di pressione del vento. I valori immessi per tale parametro sono riportati in Tabella 4A.8.

Direzione del vento	Facciata inferiore a Sud	Facciata superiore a Sud	Facciata inferiore a Nord	Facciata superiore a Nord
Nord	-0,2	-0,2	0,7	-0,2
Est	-0,5	-0,2	-0,5	-0,2
Sud	0,7	-0,2	-0,2	-0,2
Ovest	-0,5	-0,2	-0,5	-0,2

Tabella 4A.8. Valori di pressione del vento immessi nella simulazione

Per valori intermedi di direzione del vento i coefficienti di pressione del vento vengono interpolati da Comis.

- Collegamenti: per simulare le aperture inferiori e superiori delle cavità e le aperture che collegano è stato utilizzato un collegamento di tipo LVO (large vertical opening) di tipo 1. Normalmente viene utilizzato in Comis per modellizzare una finestra ma lasciando a 1 il parametro Actual Value l'LVO rappresenta una finestra aperta, equivalente ad una apertura. Altri parametri da settare sono le dimensioni dell'apertura e l'altezza da terra²⁰. Comis calcola il coefficiente di scarico (rapporto tra flusso ideale tramite l'orifizio e flusso reale) al variare della geometria dell'apertura e delle condizioni del vento.

In figura 4A.7 il modello completo:

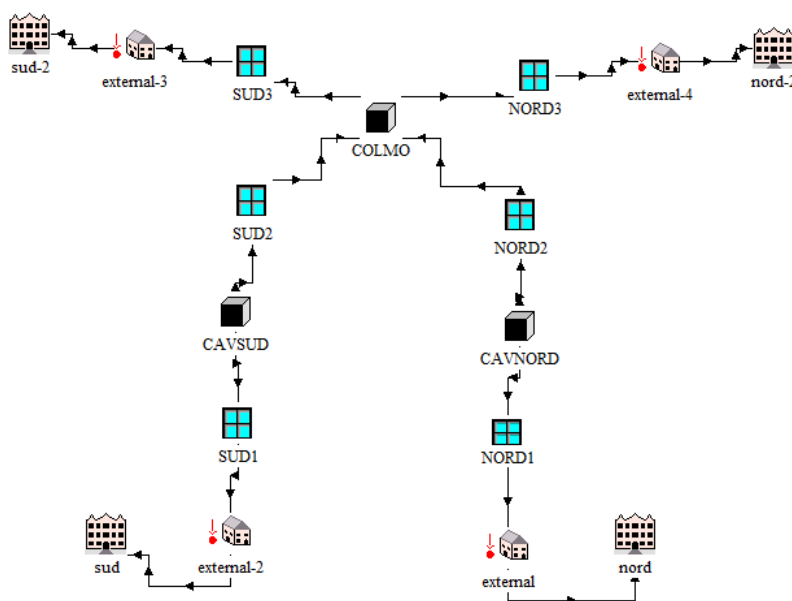


Figura 4A.7. Modello della simulazione in Comis

²⁰ Come altezza da terra si considera la base dell'apertura.

Le zone in Comis sono state dimensionate in modo diverso da quelle in Trnsys.

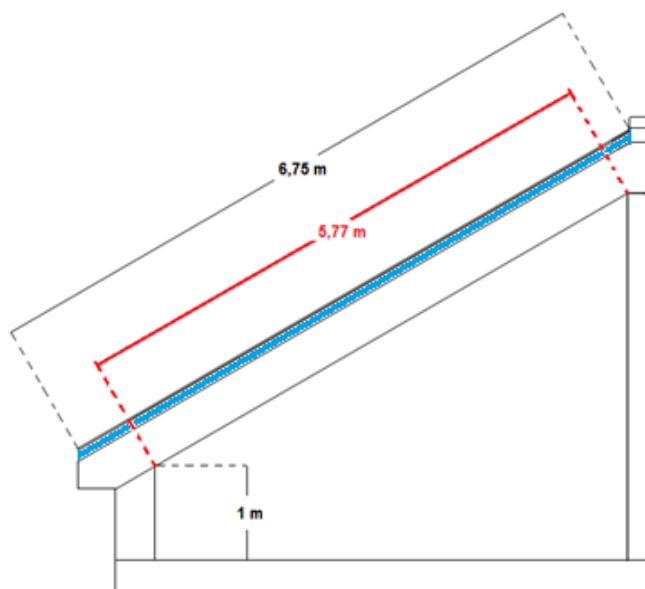


Figura 4A.8. Sezione trasversale, rispetto alla linea di colmo, di una zona del sottotetto

In Fig. 4A.8 è riportata la sezione trasversale di una zona del sottotetto e della relativa falda del tetto. Per come è strutturato Trnbuild nel modello tetto caldo esso considera come parete esterna soltanto la superficie a contatto con la zona termica interna (In Fig. 4A.8 i confini ipotizzati da Trnbuild sono le quote rosse). Ipotizzando un cornicione che esce di 40 cm rispetto alla muratura, dalla figura si nota che in realtà la lunghezza di falda è maggiore. In Comis quindi le zone relative alle due cavità sono dimensionate su tale lunghezza di falda.

Una volta fatto girare Comis tramite Simulation Studio viene generato un file .cif che contiene tutte le informazioni del modello.

In Trnsys si può accedere al motore simulativo di Comis tramite il Type157. In tale Type bisogna prima di tutto indicare il file .cif da usare per la simulazione. Come input riceverà la temperatura ambiente, la velocità e la direzione dal vento dal Type9, l'umidità assoluta dal Type33, le temperature delle zone CAVSUD, CAVNORD e COLMO dal Type56. Come output fornirà ad ogni timestep i valori di infiltrazione nelle tre zone in Vol/h ed i 4 valori di coupling tra le zone in kg/h. I valori di coupling vanno direttamente in input al Type56 mentre per quanto riguarda i valori di infiltrazione, prima di andare in input al Type56, passano tramite un Type Calcolatrice che permette la conversione tra i Vol/h con il dimensionamento della cavità in Comis ai Vol/h relativi al dimensionamento della

cavità di Trnsys. Type 157 inoltre fornisce i valori di esfiltrazione per le tre zone in Vol/h, non utilizzati in Trnsys²¹.

Dato che la simulazione aveva problemi di arrivare a convergenza in alcuni timestep, per rendere il sistema più dinamicamente robusto è stato utilizzato il Type93 che passa a Comis come input le temperature dell'aria delle tre zone ,costituenti la struttura di ventilazione, relative ad un timestep precedente. È stato opportunamente verificato che nella simulazione annuale l'uso di questo Type non porta a significative variazioni dei fabbisogni termici (0,1% circa).

Infine in Fig. 4A.9 è riportata la parte di simulazione in Trnsys relativa a Comis:

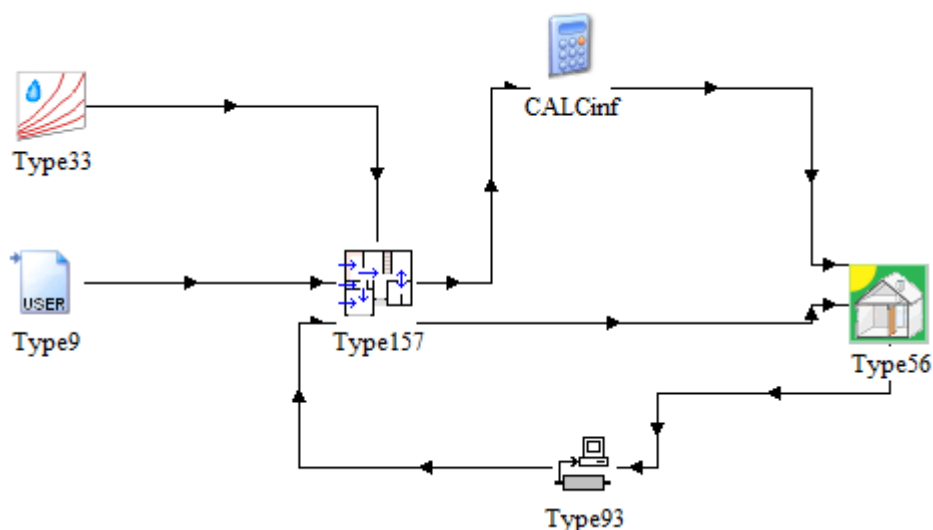


Figura 4A.9. Parte della simulazione relativa a Comis

4A.2.3. Calcolo dei coefficienti di convezione

In Trnsys è possibile variare solo la parte convettiva dei coefficienti liminari di una superficie, mentre la parte radiativa viene calcolata autonomamente considerando una emissività fissa di 0,9. Nelle cavità agisce la convezione naturale dovuta alle forze di Archimede e la convezione forzata dovuta alla pressione del vento. Si ipotizza che i flussi siano sempre concordi.

²¹ Trnsys assume che se entra un certa massa d'aria in una zona termica, e non passa ad altre zone tramite coupling, un quantitativo uguale esce dalla zona.

Per valutare la natura del flusso di aria è stata utilizzata la mappa fornita da Metais e Eckert (1964) riportata in Fig. 4A.10. Con la geometria e le differenze di temperatura del problema in esame il valore di Rayleigh, calcolato sul rapporto tra diametro idraulico e lunghezza della cavità, è nell'ordine di 10^4 . Considerando che Reynolds varia tra 10^3 e 10^4 , la natura del flusso è laminare con convezione mista per Reynolds minori di 4000 e turbolento con convezione forzata per Reynolds maggiori di 4000.

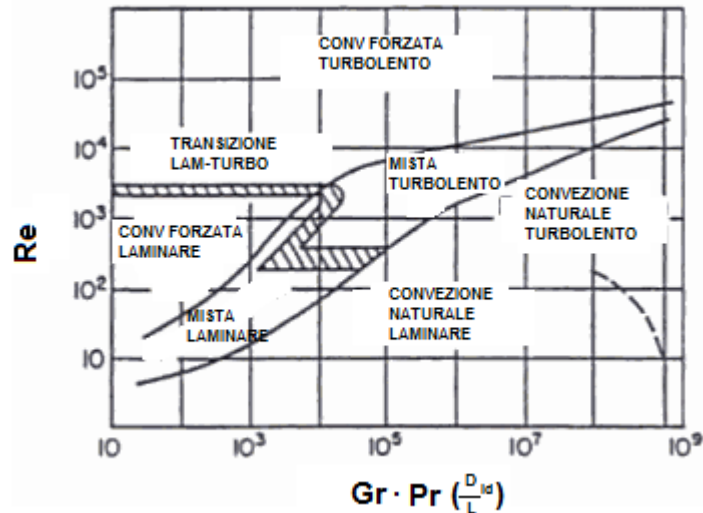


Figura 4A.10. Regime del flusso in condizioni di coesistenza di convezione forzata e naturale

Convezione mista con flusso laminare ($Re < 4000$)

Sono state utilizzate le relazioni fornite da B.J. Brinkworth (2000). Il numero di Nusselt viene approssimato con la formula seguente:

$$Nu_{D_{id}} = 5,385 + \frac{0,015}{L^+}$$

Da Nusselt è possibile calcolare il coefficiente di convezione:

$$h_c = \frac{\lambda Nu_{D_{id}}}{D_{id}}$$

con

$h_c \left[\frac{W}{m^2K} \right]$: coefficiente convettivo

$\lambda \left[\frac{W}{mK} \right]$: conducibilità dell'aria (0,026 $\left[\frac{W}{mK} \right]$)

D_{id} [m] : diametro idraulico (dati W e D, rispettivamente la larghezza e lo spessore della cavità, vale $\frac{2 \cdot W \cdot D}{w + D}$)

L^+ rappresenta la lunghezza caratteristica calcolata tramite la seguente equazione:

$$\frac{Gr_{D_{id}} \sin(\theta)}{Pr} (L^+)^3 + \frac{\Delta p_w D_{id}^4}{\rho v^2 L^2} (L^+)^2 - 48L^+ - 0,837 = 0$$

Può essere risolta tramite il metodo di Newton-Raphson.

Si ha:

Gr : numero di Grashof

Pr : numero di Prandtl

θ : Angolo di inclinazione della cavità

$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$: densità dell'aria

$\nu_c \text{ [m}^2\text{s]}$: viscosità cinematica

$L \text{ [m]}$: lunghezza cavità

$\Delta p_w \text{ [Pa]}$: differenza di pressione nella cavità derivante dalla pressione del vento nelle aperture pari a $C_{pi} \left(\frac{\rho v_w^2}{2} \right) - C_{ps} \left(\frac{\rho v_w^2}{2} \right)$. Sono state prese solo le differenze di pressione che comportano un flusso di aria ascendente. I coefficienti di pressione intermedi sono stati interpolati linearmente.

Il numero di Grashof è stato calcolato tramite la formula seguente:

$$Gr = \frac{g \beta d^3 (|T_s - T_m|)}{\nu_c}$$

dove:

$g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ = accelerazione di gravità ($9,8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$)

$\beta \text{ [K]}$ = coefficiente di espansione volumetrico, approssimabile in $\frac{1}{T_m}$

$\nu_c \text{ [m}^2\text{s]}$ = viscosità cinematica

T_s, T_m = rispettivamente temperatura della superficie e temperatura media del fluido.

Il numero di Prandtl è stato calcolato invece con la formula:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

con

$c_p \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$: calore specifico a pressione costante ($1005 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$)

$\mu \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$: viscosità dinamica

La viscosità dinamica, quella cinematica e la densità dell'aria sono state calcolate con le seguenti formule:

$$\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_m}{288,15} \right)^{1,5} \frac{(288,15 + 110)}{T_m + 110} \quad .$$

$$v_c = \frac{\mu}{\rho} \quad .$$

$$\rho = \frac{101325 - 10 \cdot AL}{287 \cdot T_m} \quad .$$

AL è l'altitudine della località in cui è ubicato l'edificio.

Convezione forzata con flusso turbolento ($Re > 4000$)

Per il calcolo del numero di Nusselt è stata impiegata la correlazione di Gnielinski:

$$Nu_{D_{id}} = \frac{(f/8)(Re_{D_{id}} - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad ,$$

Il fattore di frizione f è stato calcolato tramite la relazione di Swamee–Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D_{id}} + \frac{5,74}{Re_{D_{id}}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad ,$$

con ε rugosità del condotto (0,005 m).

Tale algoritmo è stato implementato in Simulation Studio tramite due Type62, uno per ogni cavità. Ognuno riceve come input la temperatura dell'aria nella zona, la velocità e direzione del vento dal Type9, la temperatura della superficie inferiore e di quella superiore dal Type56, l'infiltrazione e l'esfiltrazione nella zona dal type157. Ad ogni timestep apre un file Excel che esegue l'algoritmo e manda come input al Type56 i due coefficienti di convezione della zona. In Fig. 4A.11 questa parte del modello:

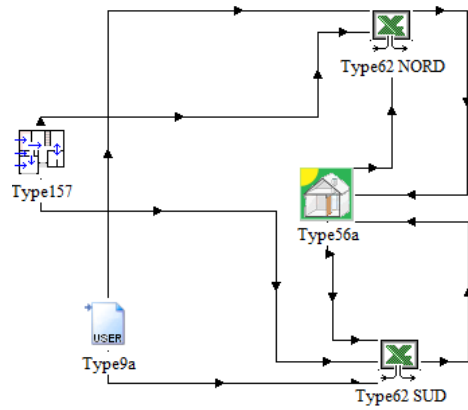


Figura 4A.11. Parte della simulazione relativa al calcolo dei coefficienti di convezione delle cavità

Infine il modello completo in Fig 4A.12:

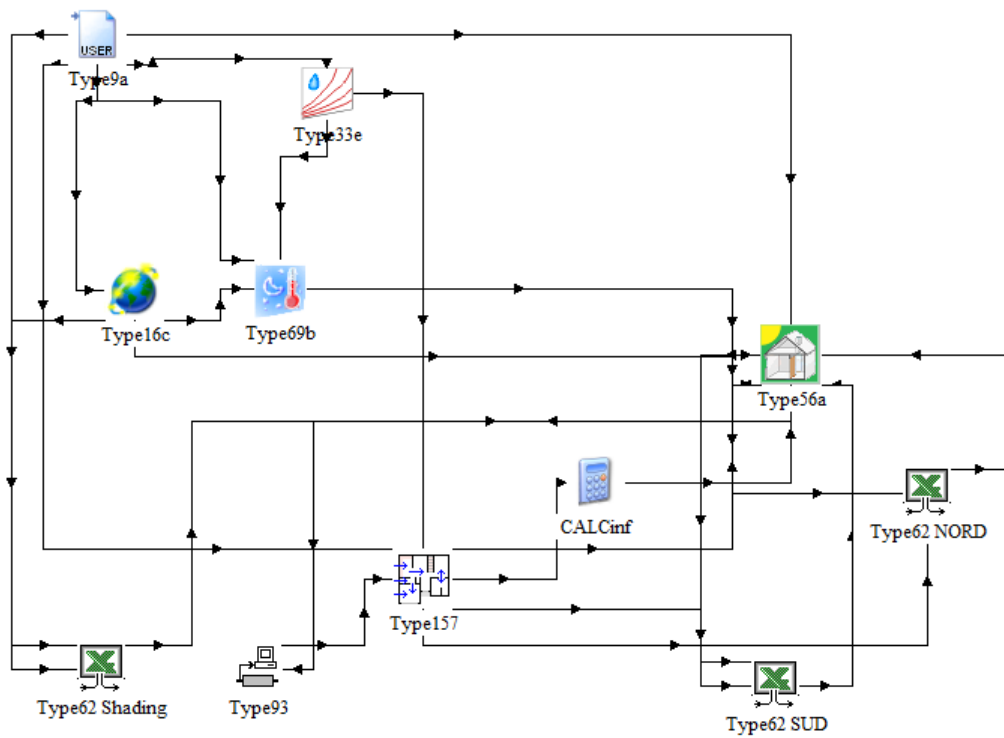


Figura 4A.12. Modello completo della simulazione

4A.3. Modello semplificato

Essendo il modello base di una certa complessità è stato configurato un modello della massima semplicità per confrontarne i risultati. Questo modello è uguale al modello base per quanto riguarda le quattro zone termiche dell'abitazione. Nel sistema di ventilazione del tetto invece è stata tolta la zona di Colmo. I valori di infiltrazione e dei coefficienti di convezione sono stati immessi direttamente su Trnbuild, quindi tutta la parte della simulazione relativa a Comis ed al calcolo dei coefficienti di convezione viene eliminata. Il modello semplificato ha due varianti, SSF e SSV. Nel modello SSF l'infiltrazione è stata considerata fissa durante tutta la giornata ad un valore di 600 Vol/h per ogni cavità. Tale valore corrisponde ad una velocità dell'aria nelle cavità di 1,1 m/s con l'aria alla temperatura di 28 °C. I coefficienti di convezione delle superfici delle cavità sono stati posti ad un valore fisso di $10 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$, corrispondenti alla velocità dell'aria di 1,1 m/s, alla temperatura dell'aria di 28 °C ed alla differenza di temperatura tra aria e superficie di 1 °C. Nel modello SSV nelle ore diurne (dalle 7 alle 19) i valori di velocità dell'aria ed i coefficienti di convezioni sono gli stessi del modello SSF. Nelle altre ore del giorno la velocità dell'aria è nulla ed i coefficienti di convezioni sono di $2 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$. In tabella 4A.9 sono riportati i risultati:

	TOTALE RAFFRESCAMENTO [kWh]
Mod Base	1890
SSF	1860
SSV	1855

Tabella 4A.9. Confronto tra modello base e modelli semplificati

CONCLUSIONI

In relazione all'utilizzo crescente di tecniche costruttive passive per migliorare le prestazioni termiche dell'involucro dell'edificio in questo lavoro è stato studiato il comportamento del tetto ventilato. Una ricerca nella letteratura tecnica ha evidenziato che l'instaurarsi sotto falda di una portata d'aria permette di contenere il flusso di calore che attraversa il tetto dal 10% al 30%, a seconda dello spessore dell'intercapedine e dell'inclinazione della copertura. Tramite una simulazione svolta con il software Trnsys si è ricercato l'effettiva convenienza delle coperture ventilate, verificando il fabbisogno energetico estivo ed invernale di un edificio di riferimento rispetto ad una struttura non ventilata. La simulazione è stata effettuata su una abitazione di riferimento di 240 m² di superficie lorda, costituita da un piano più mansarda. I risultati mostrano che nella stagione invernale la ventilazione non comporta particolari variazioni sul fabbisogno termico. Nelle ore diurne l'irraggiamento sulle falde del tetto provoca un moto ascensionale di aria nelle intercapedini di ventilazione, che asporta calore dalla struttura peggiorando le performance termiche della copertura. Però tale moto è di lieve entità. Inoltre, il relativo peggioramento delle prestazioni è compensato dal comportamento del tetto ventilato nelle ore notturne in cui, a causa del flusso radiativo verso la volta celeste che raffredda la copertura, si instaura un flusso di aria discendente che "riscalda" la struttura. Se nella stagione invernale le aperture per la circolazione dell'aria vengono chiuse con appositi sistemi mobili, si favorisce il contenimento dei consumi energetici. Infatti la lama di aria stagnante, che si viene a creare sotto la copertura, possiede ottime caratteristiche di coibentazione termica. I risultati indicano che questa soluzione, a seconda dello spessore dell'intercapedine, può portare a risparmi che variano dal 2% al 4% del fabbisogno termico. Considerando un edificio di vecchia costruzione con trasmittanze superiori del 30% ai limiti odierni di legge, le prestazioni salgono con risparmi che vanno dal 3,3% al 5,5%. Bisogna considerare però che questi valori si basano sull'ipotesi che all'interno delle cavità vi sia aria stagnante. Ciò può essere parzialmente raggiunto solo con coperture continue in quanto le classiche coperture in coppi o tegole, data l'elevata permeabilità all'aria, continuerebbero a presentare rilevanti moti convettivi. Per quanto riguarda la stagione estiva le analisi effettuate hanno mostrato che, per uno spessore di intercapedine di 10

cm, si ha una diminuzione del fabbisogno di raffrescamento tra l'8% ed il 12% relativamente alla mansarda. Considerando l'edificio nel suo complesso tale riduzione percentuale è circa dimezzata per ogni piano aggiuntivo oltre la mansarda di cui esso è composto. La prestazione è influenzata principalmente da tre fattori: spessore dell'intercapedine, pendenza del tetto e grado di isolamento dell'involucro dell'edificio. I risultati indicano che sopra i 6 cm di spessore delle cavità le differenze diventano trascurabili, mentre spessori minori comportano prestazioni sensibilmente inferiori. Il contributo della ventilazione aumenta all'aumentare della pendenza del tetto; comunque le differenze tra 30° e 45° di pendenza (range tipico per i tetti) sono marginali. Il fattore principale è risultato essere il grado di isolamento dell'edificio con la prestazione che passa dall'8% per un edificio caratterizzato da trasmittanze inferiori a quelle limite di legge al 14% per un edificio con trasmittanze del 30% superiori al limite di legge. Per quanto riguarda la zona climatica in cui è collocato l'edificio si hanno vantaggi maggiori nelle località più calde. Il risparmio ottenibile con la ventilazione varia dai 90 kWh, per la zona climatica E, ai 200 kWh per le zone climatiche C e B. In termini percentuali sul totale del fabbisogno il risparmio è di circa il 5% per tutte le località. Tali risultati indicano che la ventilazione da sola non è sufficiente a garantire il comfort termico degli spazi abitati del sottotetto senza l'ausilio di un impianto di raffrescamento. Nella zona climatica di Milano i risparmi sul fabbisogno termico, per l'abitazione presa a riferimento, è di circa 100 kWh termici. Considerando un impianto di raffrescamento con EER (Energy Efficiency Ratio) pari a 2,5 ed un prezzo dell'energia elettrica di 0,24 €/kWh, il risparmio stagionale è di circa 10 € su una spesa totale per il raffrescamento di 190 €. Tali prestazioni non sono sufficienti a giustificare una spesa aggiuntiva per l'implementazione della ventilazione a scapito di una struttura non ventilata. Se però l'implementazione comporta spese aggiuntive irrisorie (per esempio soluzioni costruttive quali doppia listellatura o pannelli strutturali componibili) la ventilazione può essere un utile accorgimento, anche considerando il fatto che comporta l'aumento della vita utile degli strati costituenti il tetto. Infatti essa limita le escursioni termiche e mantiene analoghe caratteristiche igrometriche tra la superficie superiore e quella inferiore dello strato di copertura in laterizio e diminuisce le temperature di esercizio dello strato di isolante. Per beneficiare di questi vantaggi comunque sono sufficienti pochi centimetri di intercapedine. La simulazione è stata eseguita tenendo conto anche degli effetti del vento. L'influenza di questa variabile sui risultati è di difficile quantificazione a causa della sua natura aleatoria; comunque il vento è risultato essere un fattore

importante in quanto aumenta i flussi di aria all'interno delle cavità ed in certe condizioni rende il moto turbolento.

I valori di risparmio estivo riportati sono relativamente deludenti; ciò deriva dal fatto che dati gli attuali limiti di legge molto stringenti riguardanti il grado di isolamento dell'involucro dell'edificio, il parametro principale che influenza il carico termico di raffrescamento è l'irraggiamento solare attraverso le finestre. Si ha infatti un carico termico di raffrescamento che varia da 480 kWh per finestre completamente schermate durante tutta la stagione estiva a 3400 kWh per finestre non schermate. Un ulteriore approfondimento su questi temi può essere lo studio dell'applicazione della ventilazione nelle pareti verticali degli edifici, soprattutto per le facciate a Sud che, essendo maggiormente esposte all'irraggiamento solare, garantirebbero benefici più rilevanti.

BIBLIOGRAFIA

A. Lauria, 2002 "*I manti di copertura in laterizio*", Ed. Laterservice

A. Gagliano, F. Patania, F. Nocera, A. Ferlito, A. Galesi, 2011 "*Thermal performance of ventilated roofs during summer period*", Energy and Buildings 49, p. 611-618

A. Weber, M. Koschenz, S. Holst, M. Hiller "*TRNFLOW: Integration of COMIS into TRNSYS TYPE 56*", EMPA, TRANSSOLAR

B.J. Brinkworth, 2000 "*A procedure for the routine calculation of laminar free and mixed convection in inclined ducts*", International Journal of Heat and Fluid Flow 2, p. 456-462

D. Ababsa, S. Bougoul, 2012 "*Numerical Study of Natural Ventilation through a Roof Cavity for Reduction of Solar Heat gain*", Energy Procedia 18, p. 974-982

Helmut E. Feustel , 1998 "*Comis: An International Multizone Air-Flow and Contaminant Transport Model*", Lawrence Berkeley National Laboratory, Report LBNL-42182

S.A. Klein et al., 2000. "*TRNSYS - A TRaNsient SYstem Simulation Program - Reference Manual*". Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison

L. Susanti, H. Homma, H. Matsumoto, 2010 "*A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building*", Energy and Buildings 43, p. 211-218

L. Susanti, H. Homma, H. Matsumoto, Y. Suzuki, M. Shimizu, 2007 "*A laboratory experiment on natural ventilation through a roof cavity for reduction of solar heat gain*", Energy and Buildings 40, p. 2196-2206

M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni, 2005 "*Energy analysis of ventilated and microventilated roofs*", Solar Energy 79, p. 183-192

M. D'Orazio, C. Di Perna, P. Principi, A. Stazi, 2007 "*Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance*", Energy and Buildings 40, p. 911-916

M. D'Orazio, C. Di Perna, E. Recanatini, 2010 "*Manti di copertura in laterizio: soluzioni per il comfort termoigrometrico*", manuale realizzato dall'Universita` politecnica delle Marche

M. D'Orazio, D. Dogana, 2007 "*Comportamento igrometrico delle coperture in laterizio*", Costruire in laterizio 116, p. 54-59

N.M. Guirguisaa, A.A. Abd El-Azizb, M.M. Nassief, 2007 "*Study of wind effects on different buildings of pitched roofs*", Desalination 209, p. 190-198

S.P. Sukhatme, 2005 "*Textbook Of Heat Transfer – Fourth Edition*" 2005, Universities Press, p. 220

T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt, 2002 "*Introduction to Heat Transfer - 6th Edition*", Johnwiley & Sons Inc., p. 562-597

W. Miller, M. Keyhani, T. Stovall, A. Youngquist, 2007 "*Natural Convection Heat Transfer in Roofs with Above-Sheathing Ventilation*", Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IX, ASHRAE THERM X

ShadeCalc: Applicazione Online realizzata dall'Associazione italiana tende, schermature solari, chiusure tecniche oscuranti,
<http://hostinglinux.assites.it/index2.php>