

ALMA MATER STUDIORUM-UNIVERSITA'DI
BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE
E IL TERRITORIO**

D. A. P. T. Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale

Tesi di laurea in
“Tecniche di analisi urbane e territoriali”

**STRATEGIE PASSIVE DI CONTROLLO
TERMICO DEGLI EDIFICI ALLA SCALA
URBANA ED EDILIZIA**

Candidato:
Danilo Pensato

Relatrice:
Prof.ssa Simona Tondelli

Correlatore:
Dott.Ing. Inti Bertocchi

Sessione I

Anno Accademico 2008-09

Indice

Introduzione e generalità.....	pag 1
Flussi di calore sensibile.....	pag 6
Fabbisogno di energia per il raffrescamento.....	pag 9
Procedura di calcolo semplificata secondo il metodo quasi-stazionario.....	pag14
Controllo del microclima nelle zone circostanti l'edificio.....	pag23
Forma e tipologia generale.....	pag31
Orientamento dell'edificio in relazione al sole.....	pag34
Chiusure opache.....	pag42
Chiusure trasparenti.....	pag78
Localizzazione e orientamento dell'edificio nel contesto urbano in relazione ai venti dominanti.....	pag90
Riferimenti bibliografici.....	pag115
Riferimenti normativi.....	pag116

Introduzione e generalità

Lo sviluppo della società in cui viviamo sta incontrando una serie di limiti sempre più evidenti: il livello dei prezzi è solo uno degli indicatori, per altro imperfetto, della crescente scarsità di importanti risorse naturali (incluse molte che sono rinnovabili solo finché il loro tasso di consumo non è troppo elevato) e della crescente difficoltà del pianeta nel ricevere gli scarti. Per contribuire a rispondere a questi problemi sono state sviluppate soluzioni tecnologiche e strategie di intervento rivolte a ridurre sensibilmente l'entità dei consumi, a parità di servizio reso. Nel caso delle abitazioni, il progresso è stato particolarmente notevole e negli ultimi dieci anni le case a bassissimo consumo si sono trasformate da esperimenti di laboratorio a beni disponibili, nel normale mercato immobiliare, a prezzi paragonabili a quelli di edifici di qualità assai inferiore.

Sono molte migliaia le abitazioni (e ora anche alcuni edifici del terziario) costruite e abitate con soddisfazione nel nord e centro Europa, che rispondono a tali requisiti energetici, e che cioè richiedono energia utile netta per riscaldamento invernale inferiore a 15 kWh (termici) per m² calpestabile all'anno. Una domanda di energia fino all' 80-90% inferiore rispetto a edifici della generazione precedente.

Mentre la diffusione di questa tipologia di edifici, caratterizzati da involucro edilizio altamente isolato e recupero di calore sull'aria evacuata, prosegue e accelera nei paesi di origine, la richiesta e la necessità di edifici di qualità e a basso consumo si diffonde anche nei paesi a climi più caldi. Risulta dunque urgente adattarne il concetto per poter garantire anche comfort estivo con simili prestazioni di basso consumo.

La stessa Direttiva Europea 2002/91/CE “Sul rendimento energetico

nell'edilizia” cita la rapida crescita dei sistemi di condizionamento estivo dell'aria come elemento di stress per i sistemi elettrici dei Paesi Europei: *“questo crea considerevoli problemi nei periodi di picco della domanda di energia elettrica, aumentandone il costo e sconvolgendo il bilancio energetico in questi Paesi. Occorre dare priorità a strategie che migliorino le prestazioni termiche degli edifici durante il periodo estivo. A questo scopo è auspicabile un ulteriore sviluppo delle tecniche di raffrescamento passivo, in particolare quelle che migliorano le condizioni di comfort interno e il microclima attorno agli edifici”*.

Il progetto ecosostenibile richiede un approccio multidisciplinare e multiscale che riconosca la complessità del processo di progettazione stessa e sappia governarla, allo scopo di raggiungere i due obiettivi generali complementari che lo caratterizzano: la *salvaguardia dell'ambiente e l'uso razionale delle risorse*. E' necessario quindi rendere l'applicazione dei principi di ecosostenibilità prassi ordinaria dell'edilizia corrente, proponendo delle soluzioni adatte al nostro ambito culturale e ambientale, che siano sostenibili anche da un punto di vista economico ed accessibili ad un vasto bacino di utenti.

Il termine “edificio passivo” è generalmente riferito a edifici in cui le condizioni di comfort (invernale e/o estivo) vengono raggiunte grazie a caratteristiche dell'involucro edilizio (forma e orientamento, isolamento termico e massa, protezioni solari etc.) e a sistemi di trasporto del calore da o verso l'ambiente circostante (aria, terreno, cielo, etc.) che non richiedono utilizzo di energia fossile o di altre fonti convenzionali. Il rapporto tra clima ed ambiente costruito è, infatti, un aspetto che da sempre ha condizionato l'architettura, sia a scala urbana, in relazione all'organizzazione dell'insediamento, all'uso del verde, etc; sia a scala edilizia, in relazione alla forma degli edifici, all'orientamento, alla distribuzione interna degli ambienti, etc. La concezione dell'involucro edilizio e le prestazioni passive delle soluzioni tecnologiche adottate e dei materiali che le compongono,

rappresenta una ulteriore risorsa per gestire le relazioni con il clima.

Pertanto, l'esperienza architettonica maturata a partire dall'antichità fino all'inizio del XX secolo ha sempre cercato di operare il controllo degli agenti climatici attraverso l'architettura. Infatti, davanti alla scarsità di risorse energetiche e alla limitazione di conoscenza tecnologica, l'unico modo in cui l'uomo poteva proteggersi dalle condizioni climatiche avverse era attraverso l'architettura stessa.

Nell'era dei combustibili fossili, durata circa 100 anni, e che oggi sta mostrando una serie di segnali di crisi, la notevole disponibilità di energia per alimentare impianti attivi di climatizzazione invernale ed estiva ha sminuito il ruolo che l'involucro edilizio ha tradizionalmente rivestito nel raggiungimento degli obiettivi di comfort e benessere ambientale: l'architettura moderna ci presenta gran parte delle realizzazioni indifferenziate rispetto al luogo e al clima locale, demandando unicamente all'impianto tecnico la facoltà di regolare le condizioni climatiche interne.

Dopo il 1973, le avvisaglie di crisi energetica hanno però catalizzato la ripresa di una progettazione architettonica che, per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili, individua come prioritaria l'azione moderatrice delle componenti edilizie. Col tempo è stata composta una ricca tavolozza di soluzioni ingegneristico-architettoniche che riscoprendo i principi della cosiddetta "progettazione passiva" o "architettura bioclimatica", intesa come quella architettura che tende ad ottimizzare le relazioni energetiche con l'ambiente naturale circostante (la parola "bioclimatica" indica la relazione esistente fra l'uomo, "bios", come soggetto utilizzatore e fruitore dell'architettura e l'ambiente esterno, inteso come il campo di forze "climatico"), si occupa del controllo dei parametri che determinano il benessere fisico ambientale mediante scelte progettuali che tendono ad assicurare un sufficiente livello di qualità, trasferendo parte delle funzioni di regolazione ambientale

all'edificio stesso.

Il progetto bioclimatico produce soluzioni architettoniche strettamente relazionate al contesto ambientale e climatico in cui si inseriscono gli edifici. Tale contesto deve essere attentamente valutato nella fase preliminare di "analisi del sito" al fine di determinare gli agenti climatici del luogo da cui è necessario proteggersi e quelli, insieme alle risorse naturali, che possono essere utilizzati direttamente nel progetto. L'edificio bioclimatico, dovendosi adattare alle caratteristiche dell'ambiente circostante cerca, pertanto, di sfruttare le brezze estive per raffrescare e ventilare gli ambienti interni; deve aprirsi al sole nella stagione invernale e proteggersi da esso in quella estiva. Il verde al suo intorno deve essere attentamente progettato per controllare l'ombreggiamento, l'evapotraspirazione e l'assorbimento della radiazione solare, la forma dell'edificio, l'orientamento delle sue aperture trasparenti, etc, devono bilanciare le esigenze di illuminazione naturale con i guadagni termici.

L'energia che deve essere fornita, o sottratta, dall'impianto di climatizzazione, al fine di mantenere condizioni di comfort termico all'interno degli spazi occupati, può essere determinata attraverso l'analisi dei flussi di calore scambiati tra l'ambiente interno e quello esterno. In relazione agli obiettivi del calcolo, tali flussi possono essere rappresentati in modelli di complessità variabile, che considerano l'edificio come un sistema termodinamico aperto, ed il suo involucro come la superficie di controllo delle continue e complesse relazioni termiche in ingresso e in uscita al sistema stesso .

I flussi termici scambiati tra ambiente interno ed ambiente esterno si modificano in relazione alle variazioni stagionali e giornaliere tipiche del clima locale (ad esempio, la radiazione solare che attraversa direttamente una superficie orizzontale trasparente, può essere caratterizzata come un flusso in ingresso rispetto l'ambiente interno, di durata compresa tra 8-16 ore, in relazione alla stagione dell'anno e frequenza giornaliera, di intensità compresa tra 0-700

W/m², in relazione all'ora del giorno e alla stagione dell'anno.) e possono essere specificati attraverso :

- la direzione di provenienza, in relazione alla quale si possono distinguere, rispetto l'ambiente interno, flussi in ingresso e flussi in uscita;
- la persistenza, che identifica la durata del flusso e la sua frequenza rispetto a cicli temporali, giornalieri o stagionali;
- l'intensità, che indica l'entità del flusso.

Ciascun flusso è regolato da fenomeni fisici e chimici, che rappresentano rispettivamente gli scambi di calore sensibile, legati alla temperatura dell'aria e delle superfici, e di calore latente, legati a processi di evapotraspirazione.

Gli scambi di calore sensibile interessano l'ambiente interno, in rapporto a quello esterno, principalmente attraverso le superfici di involucro ed i volumi d'aria scambiati, e fanno riferimento alle modalità di propagazione del calore quali la conduzione, la convezione, e l'irraggiamento.

Il calore latente è, invece, connesso al titolo, ossia al contenuto di vapore acqueo in ambiente e ai passaggi di stato da liquido ad aeriforme, e viceversa, che avvengono assorbendo o cedendo calore pur mantenendo costante la temperatura.

A seconda delle finalità, il bilancio energetico di un edificio, può essere espresso considerando tutti i termini, che rappresentano gli scambi di calore latente e sensibile, o solamente questi ultimi.

Tale semplificazione è accettata, in genere, per edifici nei quali non è previsto il controllo dell'umidità dell'aria in ambiente. In particolare, nel calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento invernale o in quello di raffrescamento estivo, qualora venga soddisfatto mediante tecniche passive.

Flussi di calore sensibile

Trascurando per semplicità concettuale l'accumulo di calore nell'aria interna e nelle strutture -pur tenendo, poi, in modo semplificato attraverso coefficienti correttivi, in debito conto l'effetto dell'inerzia termica della massa allorquando il computo è svolto su un periodo di tempo sufficientemente lungo- i flussi termici che intervengono nel bilancio di calore sensibile, possono essere raggruppati nelle categorie descritte di seguito (figura 1.) :

- *Trasferimenti di calore per differenza di temperatura*, determinati quando nell'edificio, a temperatura interna diversa rispetto a quella esterna, si ingenerano scambi di energia termica determinati da due componenti :
 - 1) trasferimenti per trasmissione, attraverso i componenti di involucro, opachi e trasparenti, rispetto l'ambiente esterno, locali adiacenti a temperatura fissa o non riscaldati e il terreno, che dipendono: dalla differenza di temperatura, dalle prestazioni in opera dei componenti (trasmittanza termica areica, ponti termici lineari, etc.), dalle dimensioni dei componenti (superficie disperdente esterna e perimetro), dall'esposizione alla radiazione solare e ai venti dominanti.
 - 2) trasferimenti di calore per ventilazione, naturale o meccanica, rispetto l'esterno, locali adiacenti a temperatura fissa o non riscaldati, che dipendono dalla differenza di temperatura, e dalla portata d'aria.

- *Apporti di calore rispetto all'ambiente interno*, che si distinguono in :
 - 1) apporti interni gratuiti, che includono qualunque calore generato da sorgenti interne diverse dal sistema di

riscaldamento; si possono per esempio menzionare gli apporti dovuti al metabolismo degli occupanti, gli apporti legati all'utilizzo di attrezzature elettriche e di apparecchi di illuminazione, variabili in funzione della potenza e della loro efficienza, e gli apporti provenienti dal sistema di distribuzione, carico e scarico, dell'acqua sanitaria. Tali apporti dipendono: dalla destinazione d'uso e affollamento degli spazi considerati, dal tipo di attività svolta dagli occupanti, loro localizzazione spaziale e presenza temporale, modalità di gestione delle risorse da parte degli utenti o di sistemi automatici.

2) apporti solari gratuiti, per effetto della radiazione solare che incide sulle pareti opache esterne, ed interne attraverso le superfici trasparenti, dipendenti essenzialmente : dall'insolazione normalmente disponibile nella località interessata, orientamento della superficie di raccolta e presenza di ombreggiature permanenti o temporanee, dalle caratteristiche di finitura dei componenti opachi di involucro (colore e rugosità), dal fattore solare dei componenti trasparenti di involucro, dalle caratteristiche di assorbimento ed accumulo delle superfici interne soleggiate, ossia le pareti, i pavimenti, e le strutture colpite direttamente dalla radiazione solare.

3) apporti da parte del sistema impiantistico, che fornisce o sottrae calore all'ambiente interno al fine di mantenere le condizioni di comfort termico richieste dagli occupanti. Tale voce consente di azzerare l'equazione del bilancio termico, variando la propria potenza, qualunque siano le condizioni esterne per le quali è stato progettato.

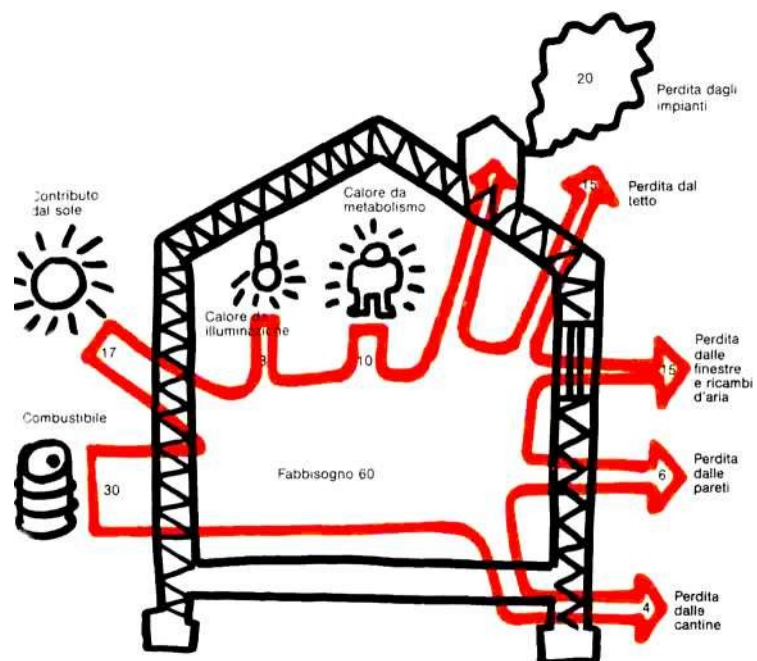


Figura 1. - Schema dei flussi di calore in ingresso e in uscita rispetto ad un edificio

Fabbisogno di energia per il raffrescamento

La necessità di controllo termico di un ambiente può essere definita come la deviazione delle condizioni esterne (determinate dal clima) rispetto alle condizioni richieste internamente all'edificio per il benessere degli occupanti e per la conservazione degli oggetti.

Il fabbisogno di energia per il raffrescamento di un edificio può essere definito come la quantità di energia necessaria al fine di mantenere condizioni confortevoli, di temperatura e umidità relativa, all'interno degli ambienti dell'edificio stesso, durante il periodo estivo, inteso non necessariamente come stagione meteorologica, ma come lasso temporale durante il quale la temperatura dell'aria interna supera quella massima della zona di comfort (26-28°C), in relazione alla località e alle caratteristiche dell'edificio e del suo intorno.

Tale fabbisogno può essere determinato sulla base del bilancio energetico descritto precedentemente, a proposito dei flussi di calore sensibile. In particolare, a livello concettuale, e a meno di correzioni apportate attraverso fattori di utilizzo delle dispersioni, risolvendo l'equazione rispetto ai termini che rappresentano il sistema impiantistico, si ottiene il carico termico di raffrescamento di un ambiente, o dell'intero edificio, definito come la potenza di calore sottratto al fine di mantenere condizioni confortevoli all'interno dello spazio considerato, dunque :

$$\mathbf{Carico\ rimosso\ da\ impianto = Apporti - Dispersioni}$$

E' facile intuire, sempre concettualmente, che la domanda di energia utile netta dell'edificio per ottenere il controllo desiderato dipende dalle caratteristiche geometriche, termiche, e ottiche dell'involucro edilizio e dai carichi interni, ovviamente, anche i

parametri climatici e microclimatici influenzano il fabbisogno energetico dell'edificio, questi, tra gli altri, sono: la temperatura dell'aria esterna, l'irradiazione solare, la velocità del vento, e la possibilità di sfruttare i pozzi e le sorgenti esterne per attingere o esportare energia.

La semplicità dell'impostazione del problema relativo al calcolo del fabbisogno di raffrescamento si scontra, tuttavia, con la sua difficoltà risolutiva, dovuta alla complessità nel considerare i fenomeni dinamici, ossia il calore accumulato nell'aria interna e nella struttura e il contributo della radiazione solare attraverso i componenti opachi, all'interno del bilancio energetico.

Tale complessità è tipica del calcolo del fabbisogno di raffrescamento, rispetto a quello del fabbisogno di riscaldamento. Durante il periodo invernale, infatti, è possibile assumere un regime stazionario giustificato dal fatto che le grandezze che rappresentano le condizioni climatiche interne ed esterne risultano pressoché costanti nel tempo, ed i flussi termici sono caratterizzati da un unico senso di provenienza, stabile per l'intera stagione. L'effetto dell'inerzia termica dell'aria e delle strutture può pertanto essere trascurato.

Durante il periodo estivo, invece, la temperatura dell'aria esterna è caratterizzata da variazioni cicliche, con escursioni termiche diurne e notturne che, se calcolate rispetto alla temperatura interna, hanno un segno opposto. Nell'arco della giornata potrà quindi verificarsi la situazione in cui la temperatura interna è superiore rispetto a quella esterna e viceversa e, come conseguenza, l'inversione di segno dei flussi termici.

Inoltre, sempre rispetto a quanto accade nel periodo invernale, si ha una diversa gestione degli spazi da parte degli occupanti che operano sulle aperture dell'involucro in modo soggettivo. Tale considerazione impone la necessità di fare riferimento ad un regime variabile nel quale, cioè, le grandezze che definiscono le condizioni al contorno del bilancio energetico di un edificio variano, tutte o in parte, nel tempo.

Il modello di calcolo relativo al fabbisogno di energia per il raffrescamento degli edifici è, quindi, di natura più complessa, in quanto non può evitare di considerare l'accumulo di energia e il comportamento dinamico delle strutture.

I modelli di calcolo semplificato, inizialmente focalizzati su consumo e comfort invernali, e successivamente estesi anche alla considerazione di consumo e comfort nei mesi estivi nei climi del sud Europa, restituiscono, a volte, risultati di dubbia attendibilità, proprio in quanto tentano di adattare i modelli del fabbisogno di riscaldamento alla stagione estiva, al fine della determinazione del fabbisogno di raffrescamento (ricavato a partire dal calcolo del carico termico in condizioni medie). Tale carenza trova giustificazione, peraltro, oltre che nella complessità del problema, anche nella mancanza di specifiche disposizioni di legge in materia: attualmente, a livello nazionale, il controllo del fabbisogno di energia degli edifici si limita a considerare la stagione invernale, trascurando quella estiva, il cui peso in termini di consumo sta crescendo in modo estremamente rapido.

A livello comunitario, quantomeno, la già menzionata Direttiva Europea 2002/91/CE "Sul rendimento energetico nell'edilizia", con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica nel settore civile e permettere la riduzione delle emissioni di gas inquinanti in atmosfera, secondo quanto disposto dall'accordo di Kyoto, affida al Comitato Europeo di Normazione (CEN) l'incarico di produrre gli standard europei, a completamento della normativa esistente, necessari per la sua attuazione.

Il termine standard non impone, al contrario di quanto a volte percepito, uno specifico insieme di soluzioni progettuali, semplicemente definisce alcuni livelli massimi di consumo e specifiche di comfort che possono essere raggiunte dal progettista/costruttore adottando le soluzioni più adatte al luogo, alla destinazione d'uso dell'edificio e alle preferenze degli utilizzatori.

Il contenuto di tali standard (ottimizzato secondo il clima

considerato) dovrebbe permettere la determinazione del fabbisogno dell'energia diversamente impiegata negli edifici d'uso civile, residenziale, e terziario, fornendo esempi di insiemi di soluzioni progettuali capaci di soddisfare i criteri energetici e di comfort dello stesso standard, e divenire un riferimento comune al fine di attuare politiche comunitarie. Ognuno degli standard propone metodologie di calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento invernale e per il raffrescamento estivo, differenziate a seconda del livello di accuratezza necessario per la fase progettuale a cui si riferisce, e appartenenti a una delle due categorie descritte di seguito :

- *metodo dinamico*, nel quale il calcolo del bilancio di calore fa riferimento a brevi periodi, tipicamente l'ora, valutando con dettaglio le interazioni tra i vari elementi che caratterizzano il comportamento termico, ed energetico reale dell'edificio;
- *metodo quasi-statico*, nel quale il calcolo del bilancio di calore è svolto su un periodo sufficientemente lungo, tipicamente il giorno tipo di ogni mese, che permette di valutare gli effetti dinamici in modo semplificato attraverso coefficienti correttivi: il fattore di utilizzo delle dispersioni termiche (η_{Disp}), in funzione dell'inerzia termica dell'edificio e del rapporto dispersioni/apporti. Infatti, poiché i periodi (generalmente diurni) in cui si generano apporti di calore all'interno dell'ambiente confinato, nell'arco della giornata, sono diversi da quelli (serali e notturni) in cui si ha un potenziale di raffrescamento microclimatico, si ha un'effettiva riduzione del fabbisogno frigorifero solamente in presenza di inerzia termica di una certa rilevanza e di elementi tecnici massivi con una superficie esposta all'aria interna. Oltre al valore di η_{Disp} -legato prevalentemente alla

capacità termica effettiva delle strutture dell'edificio a contatto diretto con l'aria interna- in ogni caso, trascurando, il metodo in esame, qualsiasi apporto (per irraggiamento solare e per trasmissione) attraverso i componenti opachi, verranno restituiti risultati tanto più realistici quanto più ci si avvicinerà a tale circostanza per mezzo di strategie progettuali relative sia all'organizzazione dell'insediamento, e, a scala edilizia, alla forma ed orientamento degli edifici e alle soluzioni tecnologiche e materiche adottate.

L'aspetto più importante, e che deve valere per entrambe le metodologie descritte, è rappresentato dalla flessibilità e dalla versatilità del modello di calcolo assunto come riferimento. Esso, infatti, deve permettere la determinazione del fabbisogno di raffrescamento e di quello di riscaldamento, in modo tale da poter essere applicato a diverse tipologie di edifici, senza limitazioni particolari tra le destinazioni d'uso civile, e in modo tale da poter calare, ovviamente, ogni progetto edilizio, nel suo specifico contesto microclimatico.

Procedura di calcolo semplificata secondo il metodo quasi-stazionario

La procedura di calcolo riportata di seguito è stata elaborata facendo riferimento al metodo quasi-stazionario proposto dalla prEN ISO 13790, *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*.

Si è già detto che nel metodo quasi-statico, si tiene conto degli effetti dinamici mediante l'introduzione di fattori di correlazione. Considerando il comportamento reale, la variazione, ed eventualmente inversione, istantanea dei flussi termici che descrivono il bilancio energetico di un edificio, determina una risposta dinamica da parte della struttura, la cui entità varia in relazione alla propria capacità termica e alle caratteristiche dello scambio termico superficiale.

Analizzando il periodo invernale, un istantaneo surplus di calore dovuto, ad esempio, alla radiazione solare che penetra all'interno dell'ambiente attraverso le chiusure trasparenti, ha l'effetto di fare aumentare la temperatura interna sopra quella di set point (la cosiddetta temperatura di set point, compresa tra i 26 e 28°C, può essere definita come la temperatura richiesta dall'utente durante il periodo di occupazione, con impianto di climatizzazione funzionante, che non può essere superata nelle ore della giornata nelle quali è richiesto il controllo delle condizioni climatiche all'interno dell'ambiente confinato, e che, nel caso in cui sia presente un impianto di climatizzazione, ne regola l'accensione). Questo surplus genera dei trasferimenti di calore extra, per trasmissione e ventilazione e l'accumulo di calore da parte della struttura dell'edificio. Viceversa, quando viene sottratto del calore, o viene a mancare una sorgente interna, come nel caso dell'apertura di una finestra o del funzionamento intermittente dell'impianto di riscaldamento, la temperatura interna diminuisce al di sotto della

temperatura di set point, con la conseguente riduzione dei trasferimenti di calore ed il rilascio di calore immagazzinato nella struttura; analogo comportamento si ha durante il periodo estivo. Il calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento, assume “fattori di utilizzo” del calore prodotto da sorgenti interne e solari, in considerazione del fatto che solo una parte di essi può essere utilizzato al fine di ridurre l'energia necessaria per il riscaldamento, mentre la restante parte conduce ad un indesiderato incremento della temperatura sopra quella di set point.

L'espressione del bilancio di energia trascurerebbe, pertanto, la parte di calore non utilizzata, che viene dispersa a causa dell'extratrasferimento di calore, per trasmissione e ventilazione, dovuto all'incremento della temperatura sopra il livello di set point.

L'effetto dell'inerzia termica in caso di intermittenza nel funzionamento dell'impianto, o spegnimento dello stesso, viene preso in considerazione introducendo degli aggiustamenti nella temperatura di set point, o correzioni nel calcolo dell'energia necessaria.

Analoga semplificazione può essere assunta anche nel calcolo del fabbisogno di raffrescamento, sostituendo il “fattore di utilizzo degli apporti” ,introdotto nel calcolo invernale, con il “fattore di utilizzo delle dispersioni”.

La procedura di calcolo proposta restituisce risultati attendibili, e confrontabili rispetto agli altri metodi, se applicata ad un periodo di calcolo tale da poter utilizzare valori medi mensili dei parametri climatici, e se non si considerano le interazioni dinamiche tra “zone termiche”.

Coerentemente con le precedenti considerazioni, il calcolo farà esclusivamente riferimento ai flussi di calore sensibile del sistema edificio.

L'edificio oggetto del calcolo può essere suddiviso in “zone termiche”, ciascuna delle quali identifica un insieme di elementi spaziali caratterizzati dalla medesima temperatura dell'aria, quindi

una “zona termica” può raggruppare più ambienti, spazialmente adiacenti, con caratteristiche termiche omogenee, e cioè :

- differenza massima tra le temperature di set point inferiore a 4°C ;
- stessa modalità di gestione del sistema di climatizzazione e/o ventilazione naturale controllata;
- simili portate d'aria di ventilazione, naturale o meccanica.

Qualora vengano identificate più zone termiche, il calcolo deve essere ripetuto per ciascuna di esse; a discrezione del progettista, e/o in relazione ai singoli casi, tale calcolo potrà considerare o meno gli scambi termici tra le zone confinanti, facendo riferimento alla casistica di massima che segue, che rimane coerente con quanto già suggeriva la norma UNI 832. (relativa al calcolo invernale) :

- se la zona adiacente è climatizzata (naturalmente e/o meccanicamente) con la medesima modalità di gestione, la temperatura di riferimento sarà quella di set point della zona stessa, e, poiché lo scarto tra le temperature di set point delle zone è inferiore ai 4°C, è sufficiente considerare una zona termica equivalente con temperatura media delle zone ;
- se, invece, la zona termica adiacente non è controllata climaticamente, ma le due zone continuano ad avere un comportamento simile, si può assumere che le chiusure interessate abbiano un comportamento adiabatico, trascurando gli scambi di calore tra zona e zona ;
- ancora con zona termica adiacente non controllata, ma tenendo conto dell'effetto di isolamento termico offerto dalla zona non climatizzata, rispetto all'ambiente esterno, occorre considerare le chiusure confinanti con resistenza termica equivalente.

Il confine di una zona termica è definito dalle chiusure che separano lo spazio interno dall'ambiente esterno, da zone termiche adiacenti o dal terreno, distinte in relazione al tipo, alle prestazioni termofisiche, all'orientamento, e all'inclinazione. L'area delle chiusure può essere determinata facendo riferimento alle dimensioni interne nette, a quelle intermedie, o esterne lorde, purchè specificate e mantenute coerenti durante l'intero calcolo. E' possibile, grazie alle assunzioni e semplificazioni di cui si è accennato, trasporre in una formula, l'equazione prima enunciata in forma concettuale:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_{App} - \eta_{Disp} \dot{Q}_{Disp}$$

\dot{Q}_H : quantità di calore sensibile che deve essere rimosso dall'impianto attivo al fine di mantenere condizioni di comfort all'interno della zona termica durante il giorno tipo di ciascun mese;

\dot{Q}_{App} : apporti gratuiti di calore sensibile all'ambiente interno, nel periodo di calcolo(24 h);

\dot{Q}_{Disp} : dispersioni di calore sensibile verso l'ambiente esterno, locali adiacenti a temperatura fissa o non riscaldati e il terreno, nel periodo di calcolo ;

η_{Disp} : fattore di utilizzo delle dispersioni termiche, nel periodo di calcolo.

Per ciascun periodo di calcolo, e per ciascuna zona termica, occorre raffrescare ulteriormente -rispetto all'utilizzo di sola ventilazione naturale controllata e/o altre strategie passive- prevedendo l'impiego di sistemi ibridi (naturali e meccanici), o meccanici, quando $\dot{Q}_H > 0$.

Occorre precisare, infatti, che il termine passivo, non esclude l'uso di un ventilatore o di una pompa, quando la loro applicazione può innalzare la prestazione. Questo termine enfatizza l'utilizzazione di sorgenti di raffrescamento naturali, o pozzi di calore, per l'esportazione di calore fuori dall'edificio e, se è necessario, fornire energia per attuare il sistema, allora il sistema di trasferimento di calore è a basso costo e semplice, e il rapporto tra l'energia consumata e l'energia di raffrescamento ottenuta è piuttosto basso. La “progettazione passiva” è quindi un termine generale, usato per definire un approccio strategico alla progettazione che, primariamente si affidi allo sfruttamento delle risorse climatiche locali per assolvere alle esigenze energetiche dell'edificio. La progettazione dell'architettura bioclimatica tende al raggiungimento delle condizioni di benessere all'interno dell'edificio e dell'ambiente costruito minimizzando l'utilizzo degli impianti di climatizzazione.

Non è corretto demandare unicamente agli impianti meccanici il controllo del benessere fisico ambientale. Questo, infatti, è determinato dalla mediazione che il sistema edificio-impianto opera tra la realtà climatica esterna e microclima interno. Tale mediazione è tanto più efficace quanto più è grande l'azione esercitata dall'edificio piuttosto che dall'impianto meccanico. Un sommario delle principali variabili di progetto su cui agire è fornito nella tabella seguente.

<i>Controllo del microclima nelle vicinanze dell'edificio</i>	<i>Superfici e spazi urbani "freschi": Limitare "effetto canyon" attraverso il controllo delle "superfici urbane" in termini di emissività ed effetto albedo, e la morfologia delle sezioni stradali</i>
	<i>Uso della vegetazione e dell'acqua</i>
<i>Controllo dei carichi interni</i>	<i>Uso dell'illuminazione naturale</i>
	<i>Sistemi di illuminazione artificiale efficienti</i>
	<i>Apparecchiature elettriche efficienti</i>
<i>Forma e tipologia dell'edificio</i>	<i>Rapporto superficie su volume</i>
	<i>Orientamento</i>
<i>Strutture opache</i>	<i>Isolamento termico</i>
	<i>Inerzia termica</i>
	<i>Posizione relativa di isolamento e massa</i>
	<i>Caratteristiche superficiali (assorbanza ed emissività)</i>
	<i>Ombreggiamento delle superfici</i>
<i>Strutture trasparenti</i>	<i>Dimensioni ed orientamento</i>
	<i>Caratteristiche termiche e ottiche vetri (trasmissione termica, fattore solare)</i>
	<i>Sistemi di ombreggiamento esterni</i>
<i>Ventilazione</i>	<i>Pressione del vento sull'edificio</i>
	<i>Influenza aerodinamica tra edifici</i>
	<i>Ventilazione di comfort "ambientale"</i>
	<i>Ventilazione notturna "strutturale"</i>

In varie condizioni climatiche il microclima delle zone immediatamente circostanti l'edificio può essere influenzato dalla forma e orientamento dello stesso, dalle caratteristiche delle sue superfici esterne, dal modo in cui gli edifici sono raggruppati, dalla vegetazione circostante, etc.

La progettazione di sito può influenzare in modo significativo le condizioni di benessere termico dei futuri utenti e, quindi, i consumi energetici prevedibili per il loro raggiungimento. Ciò è particolarmente vero nel caso di insediamenti costituiti da edifici il cui carico termico è prevalentemente involucro-dipendente, quali gli edifici residenziali o terziari di servizio alla residenza. Infatti, contrariamente agli edifici del terziario specializzato, o, industriali, in cui gran parte del carico termico di condizionamento deriva dagli apporti termici interni, negli edifici con carico termico involucro-dipendente il fabbisogno di raffrescamento è legato prevalentemente agli apporti termici esterni. Questi ultimi, nell'architettura bioclimatica, possono essere controllati non solamente a livello dell'involucro, ma anche prima che raggiungano l'involucro stesso, ovvero con una progettazione di sito opportunamente orientata.

Il controllo termico attuato con una combinazione delle altre strategie e tecnologie menzionate, adattate al clima, al tipo di edificio, alla sua destinazione d'uso (e dunque ai carichi interni prevedibili), viene definito “controllo termico passivo”.

Tecnologie e strategie che richiedono energia da fonti convenzionali (per esempio di origine fossile) anziché da pozzi e sorgenti di energia nell'ambiente circostante l'edificio, costituiscono gli strumenti di un “controllo termico attivo”.

Comunque, da una parte abbiamo determinate condizioni ambientali esterne, e dall'altra gli obiettivi specifici di benessere interno, che possono essere raggiunti attraverso la mediazione del “sistema edificio- impianto”. La mediazione del sistema edificio(controllo passivo), impianto(controllo attivo), dipende lei stessa dall'entità dei così detti interventi passivi, ovvero di quanto la combinazione

tra orientamento e caratteristiche morfologiche-dimensionali(ad esempio il rapporto superficie/volume), distributive e tecnologico-costruttive sono in grado di modificare l'azione degli agenti climatici che concorrono a determinare il microclima interno.

Il raggiungimento del benessere termico dovrebbe avvenire basandosi su una gestione razionale dell'energia, al fine di ridurre la dipendenza dal combustibile fossile e il conseguente inquinamento dell'aria, inoltre, anche se sono oggi disponibili tecnologie di regolazione “attiva” ambientale dei sistemi di climatizzazione molto sofisticate, queste non sufficienti a competere con i sistemi di climatizzazione “passiva” o naturale, non solo per quanto attiene i consumi energetici e l'impatto ambientale, ma anche in relazione alle capacità di adattarsi alle condizioni soggettive dell'utente.

Recenti studi hanno dimostrato, infatti, che l'uomo non ama la monotonia, tanto meno negli ambienti interni, ma ricerca costantemente il cambiamento; un clima artificiale mantenuto costante finisce ,quindi, con l'offrire meno “benessere”, poiché non permette all'utente di intervenire direttamente sui parametri di comfort per modificarli in funzione delle esigenze soggettive.

Un approccio alla progettazione che preveda l'utilizzo prevalente di tecnologie di raffrescamento naturale o passivo è pertanto il più idoneo -entro certi limiti di variazione delle variabili climatiche- a conseguire condizioni di comfort reali.

Negli interventi volti alla sostenibilità ambientale, si prevede pertanto, che si applichino nella successione le seguenti scelte :

- scelte di controllo del microclima;
- scelte di “controllo termico passivo”e riduzione dei carichi interni;
- infine, se ancora necessario, scelte di “controllo termico attivo”.

Una corretta successione e integrazione di questi due (o tre a seconda dei casi) passi è un percorso progettuale che conduce a

mantenere gli ambienti interni nella fascia di comfort prescelta con una ridotta domanda di energia per gli impianti attivi. Si noti che (figura 2.) in queste condizioni, è maggiormente probabile soddisfare l'intera richiesta di energia con fonti rinnovabili.

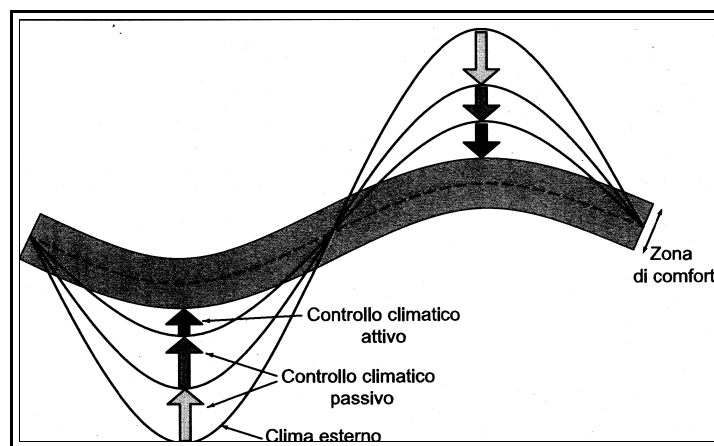


Figura 2. - Controllo termico passivo, attivo e zona di comfort

Nei paragrafi che seguono vengono descritte nel dettaglio, dapprima le caratteristiche all'esterno dell'edificio, inclusa la sua superficie esterna, e il tema delle relazioni fra clima e ambiente costruito, poi verranno trattati nello specifico gli elementi che compongono l'involucro edilizio e alcune strategie passive per importare o esportare energia termica da e verso l'edificio mettendolo in contatto con le sorgenti o pozzi presenti nell'ambiente circostante.

Un corretto approccio metodologico, in prima analisi, deve definire gli obiettivi di progetto riguardo alle esigenze di benessere, in relazione ai modelli d'uso, alle attività previste all'interno degli ambienti, e alle caratteristiche (termiche, strutturali, etc.) all'interno dell'edificio stesso, incluse le apparecchiature, non solo elettriche, che "generano" energia termica (cioè trasformano energia elettrica in energia termica).

Contemporaneamente è indispensabile una attenta analisi dei dati contestuali e l'individuazione dei dati climatici di progetto. Su tali basi verranno, poi, operate le scelte progettuali.

Controllo del microclima nelle zone circostanti l'edificio

La posizione, forma e disposizione reciproca degli edifici, assieme ad altri elementi come la vegetazione e l'acqua, contribuiscono a determinare il microclima nella zona circostante.

Inoltre, le aree urbane, particolarmente se di grandi dimensioni come le aree metropolitane, hanno un effetto rilevante sul clima, tanto da produrre un vero e proprio clima locale specifico: il *clima urbano*. Esso si differenzia in relazione a due strati d'aria: la “chioma” d'aria urbana, a scala microclimatica, e la “cupola” d'aria urbana, a scala topoclimatica.

La “chioma” d'aria urbana è rappresentata dal volume d'aria compreso tra le strutture edilizie della città fino all'altezza dei tetti, mentre la “cupola” d'aria urbana è il volume d'aria sovrastante la città e le cui condizioni termofisiche sono influenzate dalla struttura urbana nel suo complesso. La cupola d'aria corrisponde allo strato limite urbano, relativo all'influenza della crosta urbana sui flussi d'aria (esso può raggiungere i 600 m in città densamente edificate).

All'interno della chioma urbana avvengono gli scambi termici che, con l'assorbimento graduale della radiazione solare e in relazione alle caratteristiche dei materiali, delle superfici e della loro geometria, producono condizioni microclimatiche specifiche distinte da quelle dell'ambiente circostante. Il confine superiore della chioma d'aria urbana varia con il variare dell'altezza degli edifici, ma può anche essere influenzato dalla velocità del vento: i venti forti penetrano più profondamente di quelli deboli all'interno del tessuto urbano, al di sotto del livello dei tetti, abbassando, quindi, il confine superiore della chioma d'aria.

Lo strato d'aria superiore, cioè la cupola d'aria urbana, quella porzione dello strato limite planetario le cui caratteristiche sono

influenzate dalla presenza, al confine inferiore dello strato stesso, di un'area urbana, ha una maggiore omogeneità nelle sue proprietà termofisiche, pur interagendo continuamente con lo strato inferiore nello sviluppo di quel fenomeno tipico delle grandi aree metropolitane contemporanee denominato *isola urbana di calore*.

Un'analisi del microclima nella chioma urbana è importante, seppur di difficile esecuzione per via della complessità dei fenomeni che si sviluppano a scala microclimatica in relazione all'eterogeneità e variabilità degli stessi, in quanto esso è quello più direttamente influente sul comfort termico e sull'uso energetico degli edifici.

L'ammontare complessivo di radiazione solare che raggiunge la superficie esterna di una cupola d'aria urbana è, sostanzialmente, identica a quella incidente su un'area di campagna di pari estensione. In aree urbane densamente edificate, la dinamica di assorbimento e riflessione della radiazione solare è piuttosto complessa e dipende dalle dimensioni degli edifici, dalla geometria delle sezioni stradali e dal trattamento (in particolare, il colore) delle superfici.

L'ammontare complessivo di radiazione solare che raggiunge i tetti di una città è funzione dell'estensione dell'area coperta dagli edifici, mentre la percentuale di radiazione che viene riflessa verso l'atmosfera può variare di molto in relazione al colore delle coperture: dall'80%, nel caso di manti di copertura bianchi, al 20%, nel caso di tetti piani con impermeabilizzazione bituminosa. Lo stesso campo di variazione caratterizza la radiazione totale riflessa dalle pareti verticali degli edifici, che dipende anch'essa dal colore delle superfici. La parte di radiazione riflessa dalle pareti verso il cielo, invece, ha un intervallo di variazione molto più ridotto, per effetto dei meccanismi di riflessione-assorbimento multiplo che si innescano tra le facciate e il sedime stradale degli edifici urbani (figura 3.)

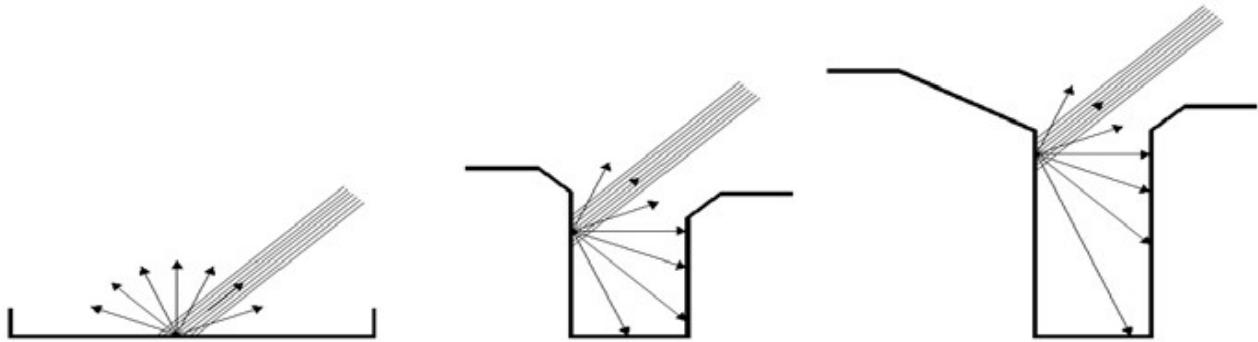


Figura 3. - Riflessione dell'irraggiamento solare in un contesto urbano, in relazione al variare della morfologia lungo una sezione verticale.

Alla fine di tale processo, solamente una piccola parte della radiazione che colpisce le pareti degli edifici di una città densamente costruita viene riflessa verso il cielo, mentre la maggior parte viene riassorbita dalle pareti stesse -a prescindere dal loro colore- per essere rilasciata ,prevalentemente nelle ore notturne, sotto forma di radiazione ad onde lunghe (infrarosso). L'intensità della perdita di calore per reirraggiamento all'infrarosso da una superficie verso il cielo, dipende dalla porzione di cielo che tale superficie “vede”. La parete verticale di un edificio isolato, non ostruita, vede la metà della semisfera celeste vista da una superficie orizzontale in terreno aperto. Nel caso di edifici urbani, la porzione di cielo vista si riduce ulteriormente per effetto delle ostruzioni reciproche degli edifici. L'ammontare complessivo di radiazione infrarossa emessa dalla chioma urbana è comparabile a quello emesso dalla campagna aperta. In un area densamente costruita, tuttavia, analogamente a quanto avviene per gli scambi radiativi ad onde corte (radiazione solare), la maggior parte della radiazione emessa viene riassorbita dalle pareti e dai tetti, determinando quindi un effetto di raffreddamento dell'aria vicina al suolo relativamente insignificante. Le proprietà dei materiali predominanti in termini di emissività ed effetto albedo, danno luogo al cosiddetto “effetto canyon”. L'emissione in termini di radiazione infrarossa uscente da parte delle superfici urbane rimbalza su analoghe superfici a causa dell'assetto geometrico delle città, come in un gioco di specchi, rimanendo a lungo

intrappolata tra le facciate degli edifici ed il fondo stradale prima di venire rilasciata nell'atmosfera.

In terreno aperto e vegetato, inoltre, una parte rilevante della radiazione solare assorbita viene convertita in calore latente, durante il processo di evapo-traspirazione delle foglie, mentre solamente una piccola parte si trasforma in calore sensibile che produce un aumento di temperatura. Al contrario, nelle zone densamente edificate, la maggior parte della radiazione solare assorbita si trasforma in calore sensibile, dando luogo a un sensibile aumento della temperatura dell'aria.

Il meccanismo di riduzione, vicino al suolo, delle perdite radiative nello spettro dell'infrarosso è uno dei fattori determinanti -insieme, e forse in misura superiore, al cambiamento dei meccanismi di assorbimento della radiazione solare- nella formazione della cosiddetta isola di calore urbana. Ciò viene evidenziato dal fenomeno di massimo incremento urbano della temperatura, rilevato, infatti, nelle notti serene, quando sono comuni differenze di 5°C, ma si sono riscontrati anche rialzi di 8 – 10°C, il che, di conseguenza, penalizza notevolmente l'efficacia di dissipazione di un sistema di raffrescamento ventilativo notturno della massa, mentre durante il giorno, le differenze di temperatura tra il centro urbano e la campagna circostante la città non superano, generalmente, 1 – 2°C.

Un profilo esemplificativo dell'andamento della temperatura dell'aria nella chioma urbana, in periodo estivo, lungo una sezione longitudinale attraversante un territorio urbano ed extra-urbano tipico, è rappresentato in figura 4.

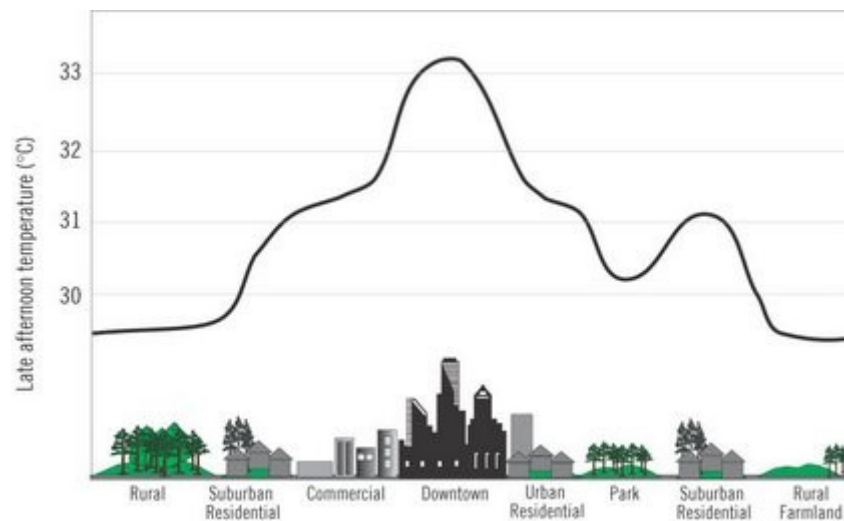


Figura 4.

In ambito scientifico si tende a considerare il fenomeno delle urban heat islands come avente un impatto irrilevante o di modesta entità sui trend climatici globali. Tali valutazioni non ci devono però indurre a minimizzare la portata delle trasformazioni climatiche negli ambienti nei quali viviamo imponendoci una diversa pianificazione delle città. L'effetto noto come "isola di calore" deve essere mitigato, per mezzo di un'adeguata progettazione (layout urbano) delle superfici esterne e delle aree circostanti: si pensi ad agglomerati molto densi con strade strette per offrire la minor superficie possibile all'irradiazione solare e con superfici bianche per ridurre l'assorbimento, come quelli rinvenibili in molti paesi a clima caldo-secco, quando predomina l'esigenza di controllo solare sulla potenzialità del vento, considerate le elevate temperature dell'aria, di raffrescare gli spazi urbani e gli edifici, o ancora disposizioni molto più spaziate ed edifici sopraelevati e permeabili al vento, tipiche dei climi caldo-umidi, che consentono la massima circolazione d'aria, quando diventano prioritarie le esigenze di una efficace ventilazione. Il fenomeno si esplica, dunque, in termini generali in un aumento delle temperature medie dell'aria e della temperatura media radiante delle superfici che si mantiene sia nelle ore diurne che notturne. Fra le molteplici cause che generano un'isola di calore, oltre alle differenze nello scambio radiativo globale netto tra città e campagna aperta, derivanti dai

meccanismi sopra descritti (in particolare il ridotto tasso di raffrescamento radiativo durante la notte), vi è la concentrazione di usi energetici (l'immissione di calore artificiale generato da impianti industriali, impianti di condizionamento e riscaldamento, frigoriferi, mezzi di trasporto e altre fonti di calore aggiuntivo legate, in generale, alle attività antropiche), l'uso di colorazioni "scure" dei muri e delle pavimentazioni (le proprietà dei materiali predominanti in termini di conducibilità e capacità termica determinano un maggiore assorbimento di energia solare: le pareti degli edifici o l'asfalto delle strade possono, ad esempio, raggiungere, durante la stagione estiva, temperature fino a 90°C e oltre), grandi superfici cementate e asfaltate con scarsa presenza di vegetazione e di specchi d'acqua (minore evaporazione dal suolo delle aree urbane, rispetto alla campagna aperta). Gli interventi volti alla diminuzione dell'effetto "isola di calore" in aree urbane, oltre a ricercare il compromesso ottimale tra orientamento, geometria e distanza tra edifici (densità planimetrica), in relazione al sole e al vento, devono porre maggiore attenzione ai materiali utilizzati per l'involucro esterno dell'edificio e per la pavimentazione degli spazi pubblici (strade, marciapiedi, parcheggi, etc...), che devono permettere la riduzione delle temperature superficiali e la riduzione dei carichi solari nel condizionamento degli spazi chiusi, includendo "pareti verdi", giardini pensili e "tetti verdi".

In un contesto di global warming in cui le estati urbane sono sempre più a rischio, non possiamo permetterci il lusso di ignorare il fatto che una parete inverdita possa avere una temperatura invernale superiore di 5°C e una estiva di 30°C inferiore rispetto a una parete tradizionale, oppure che sempre, una parete inverdita può ridurre la dispersione di calore di un edificio del 38% permettendo un enorme risparmio energetico (l'uso di rampicanti sulle facciate consente buone riduzioni dell'assorbimento della radiazione solare in estate e una riduzione delle dispersioni per convezione in inverno). Per le coperture degli edifici è consigliata

la realizzazione di tetti verdi, con lo scopo, tra l'altro, di ridurre gli effetti dovuti all'insolazione sulle superficie orizzontali. Secondo uno studio dell'Università di Singapore, solo cambiando il colore della facciata dei palazzi da scuro a chiaro la temperatura della stessa può scendere di ben 6°C permettendo un risparmio energetico nelle abitazioni di circa il 9%. Altro esempio di controllo del microclima circostante l'edificio, è l'uso del verde, delle fontane e di specchi d'acqua in cortili ombrosi per preraffrescare l'aria grazie all'evaporazione, prima della sua captazione e circolazione nell'ambiente confinato, finalizzata ad incrementare la dispersione del calore, in regime estivo, per ventilazione naturale controllata, che è funzione della differenza di temperatura tra l'aria interna e quella esterna di rinnovo. Il ricorso al verde dovrà essere progettato e quantificato in modo da produrre effetti sul microclima dell'area mitigando i picchi di temperatura estivi grazie all'evapotraspirazione ed inoltre consentire l'ombreggiamento per controllare l'irraggiamento solare diretto sugli edifici e sulle superfici circostanti durante le diverse ore del giorno. Lo stesso studio rilevava, inoltre, l'enorme effetto mitigante esercitato dalla presenza di parchi con differenze della temperatura dell'aria anche di 5°C tra le diverse zone dell'isola di Singapore. Sempre questo studio, infine, rilevava come gli appartamenti situati nelle zone prospicienti i parchi avessero un consumo medio di energia inferiore di circa il 10% data la loro minore necessità di climatizzazione.

Nelle zone mediterranee per mitigare le alte temperature estive, questi accorgimenti possono essere ripresi ed elaborati nella progettazione di un insediamento (case monofamiliari o condomini), dove la presenza di vegetazione e acqua permetta una riduzione di temperatura rispetto ad una situazione in cui tutte le superfici siano artificiali e ad alta assorbanza solare (asfalto, cemento, etc.).

Concludendo possiamo dunque affermare che una più attenta pianificazione degli spazi urbani, con il contributo ,ad esempio,

della bioedilizia, associata all'utilizzo di tecnologie che consentano un maggiore risparmio energetico possa avere potenzialmente enormi effetti mitiganti nell'ordine di grandezza di alcuni gradi ovvero tali, in molti casi, da controbilanciare localmente il trend positivo globale previsto per i prossimi decenni.

Forma e tipologia generale

La forma o la tipologia generale degli edifici viene definita da tutti i componenti dell'involucro edilizio che separano gli spazi chiusi dall'ambiente esterno. Nelle abitazioni singole possiamo distinguere, dal punto di vista qualitativo, tra case indipendenti, abbinata e a schiera. La differenza sta nel modo in cui si relazionano le diverse unità residenziali in ciascun caso; le case indipendenti non dispongono di pareti in comune, quelle abbinata dispongono soltanto di una parete in comune, mentre le case a schiera di due o più.

- Al crescere della superficie esposta crescono le dispersioni di energia verso l'esterno in inverno e i guadagni termici indesiderati in estate.
- Al crescere del volume crescono la massa e l'energia che essa può accumulare, contribuendo a smorzare le oscillazioni termiche.

Un parametro che quindi descrive importanti caratteristiche termiche dell'edificio è il rapporto superficie disperdente/volume controllato o “ rapporto S/V “. A parità di volume, il fabbisogno energetico di un edificio, in entrambe le stagioni, decrescere progressivamente con il decrescere della superficie disperdente (superficie che delimita verso l'esterno oppure verso ambienti non controllati, il volume controllato). Dal punto di vista energetico sono preferibili valori limitati di tale rapporto, ottenibili mediante l'impiego di forme regolari e compatte, dimensioni elevate (meglio un condominio che una villa singola) ed estese superfici comuni con altre abitazioni (meglio una casa a schiera in posizione centrale che di testa).

8 VOLUMI 48 FACCE S/V = 6

8 VOLUMI 36 FACCE S/V = 4,5

8 VOLUMI 24 FACCE S/V = 3

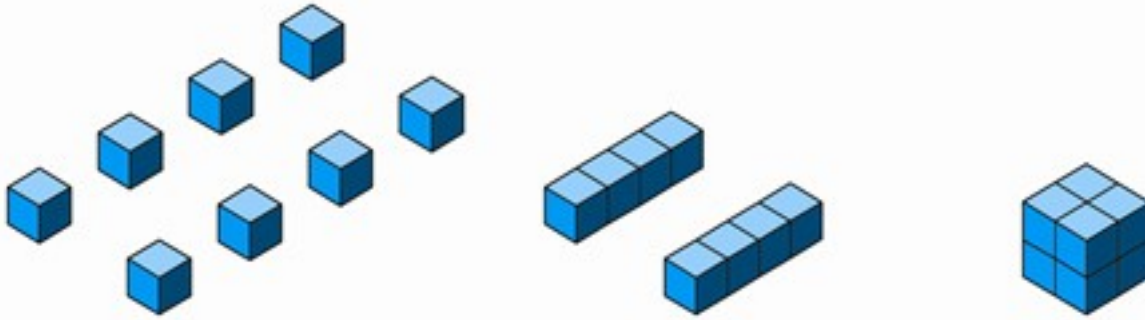


Figura 5. - Variazione del rapporto S/V. Un edificio passivo deve essere il più possibile compatto; a parità di volume, un edificio in linea presenta una superficie esterna maggiore rispetto a un edificio cubico; maggiore superficie di contatto con l'esterno comporta maggiori guadagni termici solari indesiderati, considerando la stagione estiva per cui tale fattore va necessariamente controllato.

La progettazione di un nuovo edificio deve garantire un basso rapporto S/V:

- Nel caso di edifici ad uso residenziale si richiede che tale valore non sia superiore a 0,6; per tutti gli altri edifici si richiede che il rapporto S/V non superi 0,4.

In definitiva, sarà sia resa minima o trascurabile, nel termine relativo agli apporti (Θ_{APP}) dell'equazione del bilancio energetico dell'edificio, la quota parte d'apporto solare di calore sensibile verso l'interno per trasmissione attraverso i componenti opachi, incluso quello generato dalla radiazione diretta incidente sulla superficie muraria esterna, sia ottimizzato il contenimento delle oscillazioni istantanee della temperatura dell'ambiente controllato rispetto a quella di set point.

In caso contrario, questi scostamenti momentanei non smorzati, determinerebbero una parziale efficienza nell'utilizzo delle dispersioni di calore nella stagione estiva e nello sfruttamento di tutto il calore prodotto da sorgenti interne e solari in inverno. Ma ancor prima, è opportuno notare che se l'area complessiva delle superfici di raccolta della radiazione solare assume valori significativi nei confronti del volume, il modello restituisce risultati di dubbia attendibilità. Le simulazioni effettuate in regime stazionario consentono di indagare solo parzialmente le reali prestazioni di un edificio perché partono dall'assunto che la

variazione periodica delle temperature e il contributo della radiazione solare attraverso i componenti opachi, possono essere trascurati, al fine di poter utilizzare dati climatici molto aggregati (valori medi mensili).

Orientamento dell'edificio in relazione al sole

La localizzazione degli edifici, in relazione al sole, all'interno di un lotto influenza le condizioni di comfort in ambiente confinato e, dunque, di consumo energetico degli edifici, soprattutto se questi sono prevalentemente involucro-dipendenti. Pertanto si deve privilegiare, durante tutte le stagioni, il rapporto tra l'edificio e l'ambiente allo scopo di migliorare il microclima interno.

L'edificio va progettato per sfruttare al meglio il percorso del sole, ma anche, e in particolar modo ai climi temperati, la presenza di vento; i fronti maggiormente esposti al vento vanno riparati durante i periodi freddi, mentre nella stagione estiva il vento può contribuire a dissipare il calore in eccesso e migliorare il comfort interno.

Nei climi temperati, le esigenze di raffrescamento e di riduzione del carico termico solare riguardano solamente il periodo estivo, con picchi di domanda che, generalmente, non vanno oltre i due mesi subito dopo il solstizio.

Il criterio di localizzazione in funzione del comfort estivo, deve, pertanto essere subordinato all'esigenza di non compromettere la possibilità di utilizzo della radiazione solare durante il periodo freddo, molto più lungo.

La radiazione solare interviene, direttamente in due modi negli scambi di energia che coinvolgono i componenti di involucro esterno dell'edificio.

Da un lato, le superfici vetrate sono attraversate da un flusso di energia termica e luminosa, che penetra direttamente negli ambienti interni, e che rappresenta una quota significativa all'interno del termine relativo agli apporti (\dot{Q}_{APP}) nell'equazione del bilancio dei flussi di calore; dall'altro, le superfici opache -pur avendo

caratteristiche tali da poter trascurare gli apporti solari per irraggiamento diretto attraverso essi- assorbono la radiazione solare, determinando un incremento della temperatura superficiale che modifica le funzioni di trasferimento termico tra ambiente interno ed esterno.

Gli effetti prodotti da tali scambi termici hanno carattere variabile e valenza positiva o negativa, a seconda della stagione dell'anno, in relazione alle condizioni dell'ambiente interno e al comfort degli occupanti.

Quando la radiazione, emessa dalla sorgente solare, incide sulle superfici di involucro di un edificio, origina dei flussi termici che influenzano il bilancio termico dello stesso. Ciascuno di tali flussi può essere caratterizzato come segue :

- è ciclico, secondo un periodo giorno-notte, con valori di intensità decrescenti rispetto al mezzogiorno solare;
- varia di intensità durante l'arco dell'anno;
- su una superficie comunque inclinata e orientata, incide secondo angoli diversi ad ogni istante.

La radiazione solare che penetra negli ambienti interni determina, dunque, un incremento della temperatura delle superfici e, indirettamente, dell'aria, producendo, pertanto, effetti diversi a seconda del periodo dell'anno: in inverno costituisce un apporto gratuito al riscaldamento, in estate diventa un carico termico indesiderabile.

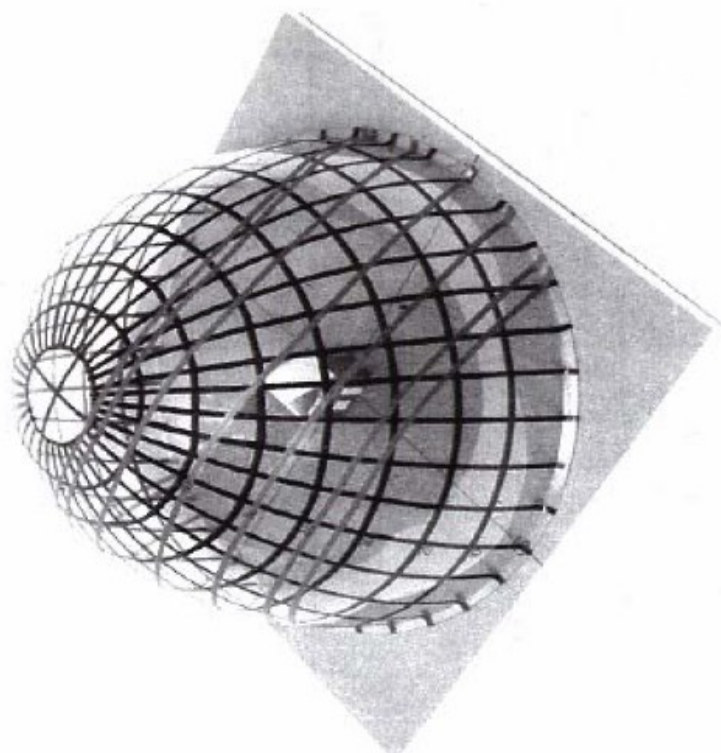
L'incremento della temperatura non è, tuttavia, l'unico effetto provocato dalla radiazione solare su un edificio. In relazione all'ambiente interno ed agli occupanti, si possono verificare: discomfort delle persone, qualora colpite direttamente; danno ad oggetti ed arredi, che possono scolorirsi sotto l'azione diretta della componente ultravioletta; discomfort visivo dovuto ad abbagliamento o a livelli di illuminamento non desiderati e poco costanti nel tempo.

Criteri per la localizzazione di un insediamento, e degli edifici che ne fanno parte, in funzione del controllo della radiazione solare

(protezione estiva, esposizione invernale) necessitano di strumenti analitici di valutazione del soleggiamento, corredati da strumenti grafici che tengano conto dell'effetto delle caratteristiche orografiche e topografiche (ostruzioni presenti e quelle previste dal progetto) sui tempi di esposizione in un punto di un sito, o di un edificio, alla radiazione solare nell'arco del giorno-tipo di ogni mese (e dell'intero anno). L'analisi del soleggiamento di sito compiuta, in fase metaprogettuale, attraverso gli strumenti grafici del metodo "Diacronico", fornisce, dunque, non solo utili indicazioni per la collocazione e lo sviluppo planivolumetrico dell'edificio, infatti, nel caso in cui si prevedano sistemi schermanti, essa permette, inoltre, di individuare in modo immediato le chiusure trasparenti che, durante la stagione estiva, si trovano in condizioni critiche e devono quindi essere oggetto di particolari attenzioni. (F_{ombr})

Le carte solari, individuate per le diverse latitudini, rappresentano la proiezione su un piano orizzontale del percorso apparente del sole sulla volta celeste, nel giorno tipo di ogni mese.

Figura 6.



L'osservatore è situato al centro, la circonferenza esterna individua l'orizzonte, le circonferenze intermedie concentriche rappresentano le altezze solari ora per ora, le radiali indicano gli angoli azimutali ora per ora, gli archi di cerchio indicano le proiezioni orizzontali delle traiettorie dei percorsi solari calcolati per il 21 di ogni mese, le linee ortogonali a queste ultime sono tracciate in corrispondenza della posizione del sole per ogni ora di ogni mese.

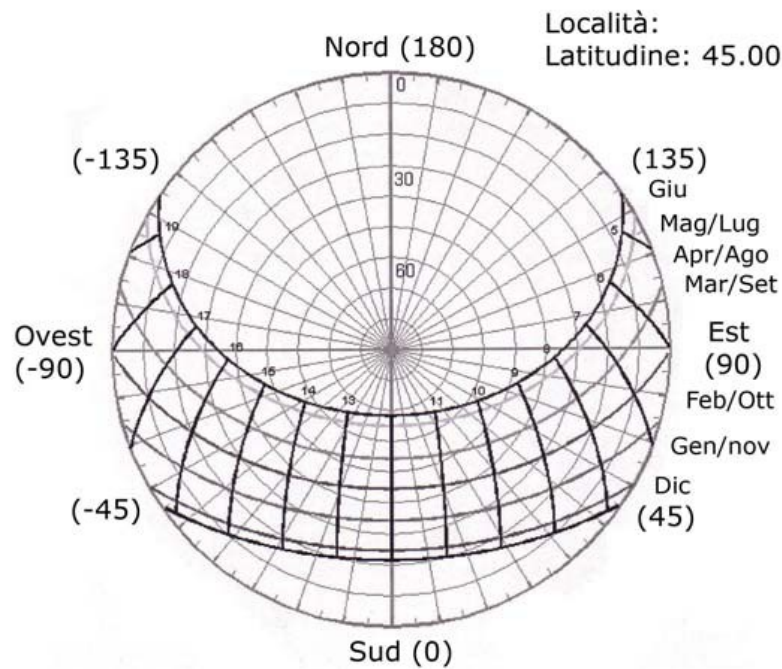


Figura 7.

Dalle carte è possibile risalire: alla posizione del sole; alla durata del soleggiamento; all'inclinazione dei raggi solari alle diverse ore.

Si osserva come, alle medie latitudini e nel periodo estivo, i versanti più irraggiati nell'arco della giornata sono quelli esposti ad Est e ad Ovest, quindi quello a Sud. La disposizione di un edificio secondo un asse longitudinale Est-Ovest, con le facciate più estese a Sud e a Nord, cioè una forma con asse principale lungo la direttrice Est-Ovest, con una tolleranza di 45° e con le interdistanze fra edifici contigui all'interno dello stesso lotto tali da garantire nelle peggiori condizioni stagionali (21 dicembre) il minimo ombreggiamento possibile sulle facciate, favorisce l'ingresso della radiazione solare nei mesi invernali e ne riduce

l'accesso durante i mesi estivi permettendo, inoltre, di effettuare in modo relativamente facile il controllo della radiazione che penetra attraverso le superfici vetrate.

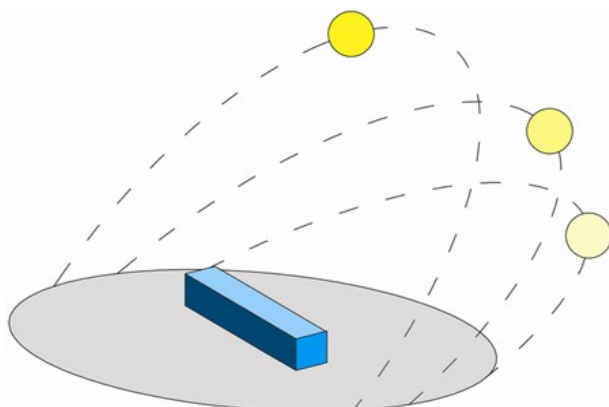


Figura 8.

Le maggiori aperture dovrebbero essere collocate sul fronte Sud, poiché in inverno esse captano la maggiore quantità di radiazione (quando il sole è basso sull'orizzonte) mentre in estate la radiazione può essere facilmente schermata attraverso un attento studio degli sporti e l'introduzione di schermature temporanee. Le superfici che godono di un maggiore soleggiamento invernale (quindi quelle orientate da Sud-Ovest a Sud-Est) si possono proteggere più facilmente in estate, dal momento che l'altezza solare nelle ore centrali della giornata è maggiore: un semplice oggetto orizzontale posizionato sopra superfici vetrate orientate a Sud e correttamente dimensionato riesce ad impedire alla radiazione solare diretta di incidere su tale superficie quando, in estate, il sole è alto, mentre la lascia penetrare in inverno, quando il sole è più basso sull'orizzonte; le superfici vetrate a Est ed Ovest richiederanno particolare cura nella schermatura poiché investite dal sole basso delle ore mattutine e serali (per questi orientamenti sono da preferire schermi o oggetti verticali).

A parità di altre condizioni, l'irraggiamento del versante Sud aumenta con il diminuire della sua inclinazione, mentre diminuisce con il diminuire dell'inclinazione nei versanti Est ed Ovest. Per le facciate verticali, inoltre, in estate l'orientamento a Sud è quello che riceve una minore radiazione solare (per una località situata ad

una latitudine di 45° Nord una facciata a sud riceve globalmente 1624 Wh/m², mentre una facciata orientata ad Ovest o ad Est riceve globalmente 2570 Wh/m² giorno).

Il versante Nord, con l'avvicinarsi del solstizio estivo, è irraggiato nella prima parte della mattinata e nel tardo pomeriggio, e tanto più quanto minore è l'inclinazione della superficie. Ovviamente la facciata a Nord avrà di preferenza una superficie vetrata ridotta, dal momento che le finestre costituiscono l'elemento debole dell'involucro isolato.

Comunque, il versante su cui si registrano, a parità di altre condizioni, temperature dell'aria, o meglio "temperature sole-aria" più elevate -e quindi un maggiore discomfort potenziale- è quello Ovest, in quanto irraggiato nelle ore pomeridiane, durante le quali si raggiungono anche i massimi picchi della temperatura dell'aria esterna.

La densità planimetrica di un'area urbana può avere sia effetti positivi che negativi sulle condizioni di comfort all'esterno e all'interno degli edifici, a seconda della direzione lungo la quale l'incremento di densità avviene. Aumentare la densità planimetrica significa, infatti, diminuire la distanza tra gli edifici; se tale decremento avviene lungo l'asse Est-Ovest, le pareti orientate verso questi due punti cardinali -quelle, cioè, che ricevono più radiazione solare nell'arco della giornata estiva- risultano più ombreggiate. Ciò determina -se la ventilazione non viene impedita dal diminuire della distanza o se può essere, comunque, effettuata dai lati Nord e Sud- un miglioramento delle condizioni di comfort. La distanza ottimale tra edifici lungo la direzione Est-Ovest, alle medie latitudini, è di circa un quinto l'altezza degli edifici, con un minimo determinato da considerazioni funzionali e d'uso del suolo. Si consideri che anche una distanza di due metri può consentire un adeguato utilizzo del flusso di vento nell'apertura tra gli edifici. Nel caso si abbia una ventilazione passante efficace dalla parete Nord a quella Sud, la distanza tra edifici lungo l'asse Est-Ovest può essere eliminata del tutto, delineando, cioè, la configurazione

di edifici in linea o a schiera, con asse longitudinale Est-Ovest. Il decremento della distanza tra edifici lungo l'asse Nord-Sud ha, invece, effetti prevalenti sulle condizioni microclimatiche invernali, in quanto riduce, in questo periodo, la possibilità di irraggiamento sul fronte Sud. Alle latitudini qui considerate, tale distanza non può essere minore di 1,5 – 2 volte l'altezza dell'edificio più a Sud.

Quando sono prioritarie le esigenze di controllo solare rispetto ad una ventilazione ,inefficace, degli spazi aperti e degli edifici qualora avvenga con aria immessa più calda dell'aria del sito, l'aumento della densità di occupazione del terreno incrementa la superficie complessiva dei tetti, aumentando di conseguenza (soprattutto se la superficie è bianca: in tal caso, infatti, la quota di calore disperso di notte può superare il calore assorbito durante il giorno; l'aria così raffreddata, se i tetti hanno forme che non lo impediscono, può penetrare a livello stradale, portando a più bassi valori di temperatura vicino al suolo) il reirraggiamento notturno nell'infrarosso verso la volta celeste e, quindi, il raffrescamento della città. L'effetto più negativo dell'alta densità urbana, la riduzione della velocità del vento al suolo è ininfluente considerate le elevate temperature dell'aria; la ventilazione è desiderabile solamente nelle ore serali e notturne -periodo nel quale anche una lieve brezza ha effetti di raffrescamento corporeo- e, pertanto, si dovranno adottare soluzioni alla scala edilizia, in relazione al comportamento che gli elementi strutturali devono avere al fine di mantenere condizioni di comfort ottimali negli ambienti interni evitando il surriscaldamento dell'aria, che consentano di ottimizzare il raffrescamento passivo ambientale/strutturale anche con bassa velocità del vento.

Durante le fasi del progetto occorre, pertanto, operare una funzione di controllo solare, che può essere definito come l'esclusione temporanea o permanente, parziale o completa, della radiazione solare dalle superfici edilizie e dagli spazi interni ed esterni all'edificio.

Le scelte relative al controllo solare fanno riferimento ad un complesso quadro di esigenze-requisiti: in particolare, si devono conciliare le esigenze di riscaldamento con quelle di raffrescamento, seppur di carattere opposto, e raggiungere condizioni di comfort termico e visivo.

Le componenti di involucro interessate sono tutte quelle che definiscono il contorno del sistema edificio, delimitando l'ambiente interno da quello esterno.

Di seguito saranno trattate in modo separato le chiusure opache e quelle trasparenti.

Chiusure opache

La radiazione solare che colpisce una superficie opaca, in funzione delle caratteristiche di finitura superficiale, viene in parte riflessa e in parte assorbita. La quota assorbita provoca un incremento della temperatura della superficie esterna, il cui effetto può essere considerato facendo riferimento ad una temperatura fittizia dell'aria esterna (la temperatura “sole-aria” θ_{sa}) che, in assenza di scambi radiativi, porterebbe ad uno scambio termico superficiale equivalente a quello reale.

$$\theta_{sa} = \theta_e + (\alpha_s \cdot I) / h_e \quad ; \quad \theta_{sa} \geq \theta_e$$

θ_e , temperatura dell'aria esterna, [°C]

α_s , coefficiente di assorbimento della radiazione solare,

I , irradianza (istantanea) solare globale incidente sulla parete, [W/m²]

h_e , coefficiente di scambio termico liminare esterno, [W/(m²K)]

Considerando il bilancio termico del sistema edificio, rispetto all'ambiente interno, l'effetto della radiazione solare si può manifestare in due modi:

- in inverno, quando la temperatura superficiale rimane inferiore a quella interna, determina un'attenuazione del flusso termico per trasmissione e la conseguente riduzione delle dispersioni di calore;
- in estate e nelle stagioni intermedie, quando la temperatura superficiale raggiunge, nell'arco della giornata, valori superiori a quelli interni, origina un flusso termico di verso opposto rispetto alle dispersioni e determina un incremento degli apporti gratuiti.

Il controllo degli apporti solari attraverso le chiusure opache risulta, pertanto, necessario ai fini della riduzione del carico termico estivo; in particolare, ai nostri climi, esso deve essere previsto per le chiusure superiori (coperture inclinate o piane), rispetto a quelle verticali, a causa della maggior incidenza della radiazione solare nei periodi caldi. Alcune modalità di controllo solare, operato agendo su:

- un'adeguata progettazione delle superfici e spazi esterni finalizzata a contenere l'aumento della temperatura dell'aria e delle temperature radianti delle superfici urbane;
- l'analisi dei periodi di soleggiamento;
- la dimensione e la forma delle superfici di involucro;

sono già state descritte contestualmente alla definizione del modello di calcolo, relativo al fabbisogno di energia per il raffrescamento, assunto come riferimento per la rappresentazione del sistema edificio. Per quanto detto, inoltre, si può osservare che, nella stagione estiva, la variazione dei flussi termici che descrivono il bilancio energetico di un edificio determina una risposta dinamica (apporto per trasmissione), da parte delle chiusure opache dell'involucro che separano gli spazi chiusi dall'ambiente esterno, la cui entità varia in relazione alle proprie capacità termiche e alle caratteristiche dello scambio termico superficiale; ciò, nel metodo quasi-statico può essere realisticamente trascurato, validando il modello, solo quando si ha a che fare con involucro, non solo dotato di idonee caratteristiche di finitura superficiale e isolamento termico, ma soprattutto capace di abbattere la temperatura del flusso del calore al proprio interno e di ritardarne il passaggio, così da fungere da vero e proprio volano termico. Questo è quanto accade efficacemente ad una soluzione che, oltre a distinguersi per: forma con asse longitudinale principale lungo la direttrice Est-Ovest, e impiego di forme regolari e compatte (modesto rapporto S/V), deve essere caratterizzata, fondamentale, da elementi strutturali dotati di massa termica elevata nei confronti di sollecitazioni termiche

dall'esterno.

Pertanto, di seguito si analizzeranno le strategie che possono essere perseguite ai fini del controllo solare, attraverso le chiusure opache, il quale può essere operato, agendo su:

- la finitura delle superfici esterne, ossia il materiale, il colore, e la rugosità;
- l'isolamento termico dei componenti opachi;
- l'inerzia termica del componente opaco;
- la realizzazione di una discontinuità tra gli strati nella parte esterna della chiusura, tramite l'interposizione di un'intercapedine d'aria ventilata;
- l'ombreggiatura delle chiusure verticali (pareti perimetrali).

Finitura delle superfici esterne: La temperatura raggiunta dalla superficie di un elemento di involucro opaco esposto al sole è funzione dell'entità della radiazione solare e delle caratteristiche di scambio termico della superficie stessa. Il controllo di tale temperatura, ai fini della riduzione del carico termico degli ambienti interni nella stagione estiva può, pertanto, essere attuato attraverso la scelta degli elementi tecnici esterni che costituiscono la chiusura opaca. Il tipo di finitura influenza gli scambi termici radiativi e convettivi tra la superficie e l'ambiente esterno. In particolare, a seconda del materiale, del colore e della rugosità della superficie, variano le seguenti grandezze termofisiche:

- coefficiente di assorbimento della radiazione solare α_s , definito come il rapporto tra la quantità di energia radiante assorbita e quella totale incidente nell'intero spettro della radiazione solare, da cui dipende il riscaldamento della superficie esposta al sole; in genere, superfici scure e rugose sono caratterizzate da valori più alti rispetto a superfici chiare e lisce;

- emissività ϵ , definita come il rapporto tra la quantità di radiazione emessa, nello spettro dell'infrarosso, dalla superficie considerata e la quantità di radiazione emessa da un corpo nero nelle stesse condizioni, da cui dipende la capacità di dissipare calore, irraggiandolo verso le superfici esterne e la volta celeste, con conseguente riduzione della temperatura superficiale; in genere, superfici scure e rugose sono caratterizzate da valori più alti rispetto a superfici chiare e lisce;
- coefficiente di scambio termico convettivo, in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria e quella della superficie: se la prima è inferiore rispetto alla seconda, si ha una cessione di calore e viceversa; da questa grandezza dipende la capacità, da parte della superficie, di cedere o assorbire calore con l'aria esterna; le superfici lisce, in genere, sono caratterizzate da valori minori rispetto a quelle rugose.

La tabella 1. può essere utile al fine di orientarsi nella scelta del tipo di finitura della superficie esterna: essa riporta i valori caratteristici del coefficiente di assorbimento della radiazione solare α_s , e dell'emissività ϵ , per alcuni dei materiali di tipico impiego in edilizia. La variazione cromatica e la finitura, più o meno liscia può, tuttavia, determinare differenze considerevoli rispetto a tali valori di riferimento.

<i>Descrizione/ composizione</i>	α_s	ϵ , a 300 K
<i>Mattone rosso</i>	0,63	0,93
<i>Calcestruzzo</i>	0,60	0,88
<i>Marmo quasi bianco</i>	0,40	0,88
<i>Piastra in metallo nero</i>	0,92	0,10
<i>Vernice nera</i>	0,96	0,96

<i>Vernice bianca (ossido di zinco)</i>	0,16	0,93
<i>Tegole(rosse)per tetto asciutte</i>	0,65	0,85
<i>Tegole(rosse)per tetto umide</i>	0,88	0,91
<i>Acciaio finito a specchio</i>	0,41	0,05
<i>Acciaio arrugginito</i>	0,89	0,92
<i>Pietra rosacea</i>	0,65	0,87
<i>Legno</i>	0,59	0,90

Tabella 1. - Proprietà di alcuni materiali opachi nei confronti della radiazione solare.

Il colore delle superfici esterne, per quanto detto, determina la quantità di radiazione solare che sarà assorbita da quelle superfici. E' possibile utilizzare colori differenti per il tetto e per ciascuna facciata, in base all'orientamento della stessa, scegliendo colori chiari o il bianco almeno per le superfici più esposte a radiazione solare diretta. Tutto ciò con lo scopo di ridurre le temperature superficiali estive dei componenti edilizi e dunque la quantità di energia trasferita verso l'interno dell'edificio. Particolari necessità estetiche possono essere una limitazione all'impiego di questa tecnica. Sono però ora disponibili rivestimenti e pitture "selettivi" che, pur non essendo necessariamente chiare (sono anzi disponibili in una larga gamma di colori), sono in grado di riflettere una grande frazione della parte infrarossa della radiazione solare. Questa tecnica va considerata negli edifici caratterizzati da grandi superfici opache rivolte a Est o a Ovest e può avere effetti importanti per i tetti degli edifici a uno o due piani. E' inoltre necessario tenere conto del fatto che questa tecnica può avere un effetto negativo sul fabbisogno di riscaldamento, che risulterà più elevato in quanto i guadagni termici attraverso le superfici opache dovuti alla radiazione solare diminuiranno. Rispetto ai guadagni solari garantiti dalle superfici vetrate questa perdita, dati gli elevati livelli di isolamento, potrebbe però non essere significativa.

Isolamento e inerzia termica: Tipicamente, l'involucro di un edificio si compone di elementi edilizi contraddistinti da materiali molto diversi tra loro. Vetri (chiusure trasparenti), telai degli infissi, porte, pareti, solette, etc sono rappresentati da diversi valori di conduttanze termiche che, disposte in parallelo, governano i flussi energetici entranti e uscenti dall'ambiente confinato. Ogni componente edilizio è poi costituito da strati di diversi materiali, le cui proprietà termiche, disposte in serie, controllano i flussi di calore che attraversano il componente stesso. Indicatore comunemente utilizzato per riassumere il comportamento termico di un edificio è la trasmittanza termica delle sue superfici disperdenti **U** [W/m²K], definita come il flusso termico che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C.

L'adozione di materiali isolanti in grado di ridurre la trasmittanza degli elementi costruttivi è una delle strategie passive fondamentali per ridurre i consumi di riscaldamento. Per questo motivo l'attenzione del legislatore italiano è rivolta ad una valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio con riferimento, però, al solo fabbisogno di energia primaria limitato alla climatizzazione invernale. (Tabella 2.)

Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache verticali [W/m ² K]			
Zona Climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m ² K)
E	0,46	0,37	0,34

Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate – coperture [W/m ² K]			
Zona Climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m ² K)
E	0,43	0,32	0,30

Valori limite della trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate – pavimenti verso locali non riscaldati o verso l'esterno [W/m ² K]			
Zona Climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m ² K)
E	0,43	0,38	0,33

Tabella 2. - Desunta dal decreto legislativo del 29.12.2006,n.311, “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n.192, recante attuazione della Direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia”.

Al contrario, Paesi climaticamente a noi vicini, quali Spagna e Portogallo, hanno introdotto un sistema di verifica anche sui fabbisogni energetici estivi, che in molti casi superano di gran lunga quelli relativi alla fase invernale. In via transitoria, in attesa di decreti attuativi e delle promesse “linee guida”, le prestazioni energetiche sono espresse dal legislatore italiano in termini di indice di prestazione energetica invernale (kWh/m² anno) e in termini di valore limite per la trasmittanza termica **U** [W/m²K] delle chiusure perimetrali, come mostrato nella tabella. La problematica estiva è pertanto rinviata a successivi provvedimenti normativi e alla disponibilità di metodi di calcolo non ancora di facile applicazione e, soprattutto, condivisi.

Per il momento, ci si limita, sempre in via transitoria, a chiedere la valutazione di sistemi schermanti, verificare in relazione alla zona climatica e alla insolazione estiva la massa superficiale delle pareti opache **M_s** (in determinati casi maggiore di 230 kg/m²), favorire la ventilazione naturale degli edifici.

La massa termica esprime la massa superficiale espressa in kg/m² delle chiusure -verticali, orizzontali e/o inclinate- opache di involucro dell'edificio, ed influisce direttamente sul comportamento dinamico della parete in relazione allo sfasamento dell'onda termica dovuta agli apporti termici solari e all'irraggiamento termico; per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, **I_{m,s}**, sia maggiore o uguale a 290 W/m², il valore della massa superficiale **M_s** delle chiusure opache verticali, orizzontali o inclinate deve essere superiore a 230 kg/m².

Si ammette, inoltre, che possano essere prodotte giustificazioni su base di calcolo atte a dimostrare le prestazioni energetiche in periodo estivo, evidenziando che l'obiettivo è quello di contenere le variazioni di temperatura negli ambienti interni in funzione dell'irraggiamento solare e delle oscillazioni delle temperature esterne. Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale delle pareti opache previsti, possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti interni in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare.

Pur riconoscendo la difficoltà di diffondere e applicare metodi di verifica delle prestazioni energetiche in regime dinamico, questo non giustifica il fatto che né le norme transitorie, né quanto si sta elaborando per la formulazione delle "linee guida" considerino nel dettaglio le caratteristiche dell'inerzia termica dell'involucro, esprimibili (nei confronti dell'interno) in termini di sfasamento **S_r** ed attenuazione **fa** delle oscillazioni di temperatura esterna da parte delle strutture opache dell'edificio; proprietà termofisiche, queste, di cui, come s'è accennato, si deve necessariamente tener conto nelle analisi e nelle valutazioni energetiche soprattutto nel contesto climatico italiano, e con particolare riferimento al periodo estivo.

L'inerzia termica di una chiusura opaca, nei confronti di una variazione esterna di temperatura o flusso di calore, assume una maggiore importanza nella stagione di raffrescamento, rispetto a quella di riscaldamento. Durante il periodo estivo, infatti, a causa della variabilità delle condizioni climatiche dell'ambiente interno e di quello esterno, il comportamento termico di un componente opaco di involucro non può prescindere da una valutazione di carattere dinamico.

La capacità della struttura edilizia di contenere queste oscillazioni può essere utilmente rappresentata dagli indicatori prestazionali

“sfasamento” termico S_f , espresso in ore, ed “attenuazione” o smorzamento fa , coefficiente adimensionale, valutabili in base alle norme tecniche UNI EN ISO 13786. Tali caratteristiche possono essere rispettivamente definite come la capacità a ritardare, e a ridurre, l'effetto di una sollecitazione, flusso termico o variazione di temperatura, tra le due facce del componente stesso. Se si considera, ad esempio, il flusso termico generato dalla radiazione solare che incide sulla superficie esterna di un componente opaco, si può affermare che esso raggiungerà la superficie opposta, ossia quella interna, con un certo ritardo temporale, per effetto dello sfasamento, e con intensità ridotta per effetto dell'attenuazione.

Sulla base dei valori assunti da tali parametri si definisce la seguente classificazione:

S_f	fa	Prestazioni	Classe prestazionale
$S_f > 12$	$fa \leq 0,15$	<i>Ottima</i>	I
$12 \geq S_f > 10$	$0,15 fa \leq 0,30$	<i>Buona</i>	II
$10 \geq S_f > 8$	$0,30 fa \leq 0,40$	<i>Sufficiente</i>	III
$8 \geq S_f > 6$	$0,40 fa \leq 0,60$	<i>Mediocre</i>	IV
$6 \geq S_f$	$0,60 < fa$	<i>Cattiva</i>	V

Tabella 3. - Classi prestazionali della struttura edilizia di contenimento delle oscillazioni della temperatura degli ambienti interni in funzione dell'irraggiamento solare.

- Il requisito si ritiene soddisfatto quando l'edificio raggiunge una classe di prestazione non inferiore alla classe **III**, così come indicata nella tabella 3.

Tale configurazione permette dunque, di ridurre la potenza del flusso termico e farlo giungere sulla superficie interna nelle ore più fresche (notturne), quando può essere facilmente dissipato attraverso la ventilazione degli ambienti. In caso contrario, cioè con massa termica inadeguata, e conseguentemente con una combinazione di valori di S_f ed fa tali da configurare una

classe prestazionale insufficiente, questi scostamenti momentanei non smorzati della temperatura degli ambienti nei confronti del livello di set point, dovuti ad oscillazioni nella temperatura “sole-aria”, non solo determinerebbero un decremento nell'efficienza delle dispersioni di calore nella stagione estiva, che utilizzando il metodo quasi-statico, si tradurrebbero, pur trascurandosi tali apporti, in una ulteriore riduzione (rispetto all'unità) del fattore di utilizzo delle dispersioni del calore per trasmissione attraverso l'involucro e ventilazione (η_{Disp}), ma ancor prima il modello restituirebbe risultati di dubbia attendibilità. Attenendosi a queste disposizioni di massima, quantomeno, aumenta la probabilità che il metodo quasi-statico, applicato al calcolo estivo, restituisca risultati confrontabili con altri metodi: durante la stagione estiva, infatti, gli apporti solari sulla parete opaca, che di solito vengono trascurati nei calcoli stazionari (in stagione invernale, e di riflesso in quella estiva adattandone il procedimento), potrebbe altrimenti, e in particolare su quelle superfici dove è maggiormente incidente la radiazione solare nei periodi caldi, assumere un significativo contributo nel bilancio energetico. Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece, permettono un'analisi molto più realistica e completa, valutando nel dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e dalla ventilazione naturale strutturale, che hanno ripercussioni sulle prestazioni termiche sia in regime invernale, sia in quello estivo.

Le prescrizioni attualmente presenti nella normativa specifica, se pure meritorie di porre l'attenzione sull'effetto della massa superficiale sulle prestazioni energetiche e di comfort nel periodo estivo, appaiono riduttive e poco adeguate anche rispetto allo stato delle conoscenze attuali sul comportamento termodinamico delle pareti di involucro; fenomeni che, in particolare, il settore del laterizio ha recentemente fatto oggetto di studi, peraltro presi in considerazione anche in recenti strumenti di certificazione energetica ambientale.

Al fine di ottimizzare le prestazioni dell'involucro, durante il periodo estivo, occorre progettare chiusure opache con idoneo comportamento termico, e cioè :

- controllare spessore, densità e calore specifico dei materiali impiegati, tali grandezze definiscono la capacità termica, specifica o per unità di superficie, di un elemento edilizio (il prodotto della massa di un componente edilizio, in kg, per il calore specifico, fornisce la capacità termica del componente), che è una caratteristica che indica l'energia termica immagazzinata nella parete per ogni grado di aumento della sua temperatura media.

Si tratta di una grandezza apprezzabile per il contenimento dei consumi energetici e il mantenimento delle condizioni di comfort, tanto in inverno quanto in estate. La capacità termica, infatti, determina una attenuazione e uno sfasamento del flusso termico che attraversa la soluzione dell'involucro tra l'ambiente esterno e l'ambiente interno. La presenza di strutture con elevata capacità termica (per esempio murature in mattoni pieni o solette in calcestruzzo) contribuisce, assieme all'isolamento (Il flusso di calore entrante è legato alla trasmittanza **U** della chiusura), a smorzare le oscillazioni di temperatura dell'aria esterna che avvengono nell'arco della giornata, in modo che vengano trasmesse all'ambiente interno attenuate e ritardate. In funzione dello sfasamento dell'onda termica e del fattore di attenuazione, nel periodo estivo è possibile calcolare la temperatura superficiale interna e il flusso termico entrante in rapporto alla temperatura superficiale esterna sulla parete (quest'ultima in funzione della temperatura dell'aria esterna ad una data ora, della irradianza solare e del colore della superficie esterna della parete).

- qualora non sia possibile sfruttare la capacità termica, risulta in ogni caso più efficace agire direttamente sull'isolamento, posizionando adeguatamente l'isolamento termico, rispetto alla sequenza di strati interno-esterno. (A parità di trasmittanza e massa superficiale due pareti costituite ,quindi degli stessi materiali, e con l'unica differenza nella posizione dello strato isolante -isolata sul lato interno una, sul lato esterno, l'altra- presentano diversi valori di sfasamento ed attenuazione, mostrando come la soluzione isolata sul lato esterno -con **S_f** maggiore ed **fa** minore rispetto all'altra, presenta dunque migliori prestazioni di contenimento delle oscillazioni della temperatura degli ambienti interni in funzione dell'irraggiamento solare.) Attualmente sono allo studio materiali a transizione di fase adatti all'utilizzo in edilizia, per esempio inglobati in alcune pareti o strutture.

Questo si traduce sostanzialmente in una riduzione della richiesta di energia ed in un aumento delle condizioni di comfort termico, poiché la temperatura superficiale (e quindi quella radiante) risulta essere minore di quella dell'aria nei momenti di picco giornalieri. Il requisito di inerzia termica, con riferimento al periodo estivo, formulato come il comportamento che le pareti di involucro devono avere al fine di mantenere condizioni di comfort ottimali negli ambienti interni, evitando il surriscaldamento dell'aria, può essere soddisfatto agendo sui sopracitati parametri progettuali.

In figura 9. sono descritte le caratteristiche termiche di pareti multistrato con elementi forati in laterizio, al fine di verificare, contemporaneamente alla trasmittanza termica **U** e alla massa superficiale **M_s** ,le prestazioni di inerzia termica (**S_f** ed **fa**).



Soluzione A

Spessore (cm) 32,0; Massa superficiale (kg/m²) 160,0; Massa superficiale compreso intonaco (kg/m²) 240,0;
Trasmittanza (W/m²K) 0,39; Sfasamento (h) 10,1; Attenuazione (%) 32,0



Soluzione B

Spessore (cm) 37,0; Massa superficiale (kg/m²) 160,0; Massa superficiale compreso intonaco (kg/m²) 240,0;
Trasmittanza (W/m²K) 0,37; Sfasamento (h) 11,20; Attenuazione (%) 24,0



Soluzione C

Spessore (cm) 42,0; Massa superficiale (kg/m²) 310,0; Massa superficiale compreso intonaco (kg/m²) 390,0;
Trasmittanza (W/m²K) 0,72; Sfasamento (h) 13,0; Attenuazione (%) 16,0



Soluzione D

Spessore (cm) 39,0; Massa superficiale (kg/m²) 251,0; Massa superficiale compreso intonaco (kg/m²) 331,0; Trasmittanza (W/m²K) 0,37; Sfasamento (h) 11,80; Attenuazione (%) 22,0



Soluzione E

Spessore (cm) 41,0; Massa superficiale (kg/m²) 310,0; Massa superficiale compreso intonaco (kg/m²) 390,0; Trasmittanza (W/m²K) 0,31; Sfasamento (h) 15,47; Attenuazione (%) 9,0

Figura 9. - Mentre le soluzioni C, D ed E presentano dei valori di massa superficiale adeguati alle richieste normative, ovvero superiori a 230 kg/m², le soluzioni A e B, con massa superficiale inferiore a 230 kg/m², possono essere utilizzate nelle località in cui il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale (I_{ms}), nel mese di massima insolazione estiva, è inferiore a 290 W/m² (comunque una percentuale significativa del nostro Paese) o, in alternativa, dovranno essere documentate e certificate come soluzioni equivalenti alle prime. La trasmittanza termica presenta valori compresi fra 0,31 W/m²K (soluzione E) e 0,72 W/m²K (soluzione C): quest'ultima stratificazione non è pertanto conforme agli specifici disposti normativi in nessuna zona climatica. Pur tuttavia, la soluzione C e la corrispondente con isolante in intercapedine (soluzione E) presentano il miglior comportamento di inerzia termica con uno sfasamento,rispettivamente,di 13,0 e 15,47 ore e una attenuazione del 16 e 9%,collocandosi nelle fasce più alte di qualità per le prestazioni termiche.

La soluzione completamente in elementi forati (8,0+12,0 cm) e intercapedine isolata offre prestazioni di trasmittanza termica che, nel caso di assenza di una intercapedine d'aria e per uno spessore complessivo di soli 32,0 cm (soluzione A), ne limita l'uso a partire dal 2010 alle sole zone climatiche A, B e C; peraltro, con uno spessore di 37,0 cm e intercapedine d'aria (soluzione B) si presenta come conforme in qualsiasi zona climatica, ad eccezione della zona F. Sotto il profilo della inerzia termica,entrambe le soluzioni (A e B) presentano, in tutti e due gli spessori, un buon sfasamento (10,10 e 11,20 ore),mentre meno efficaci risultano sotto il profilo della attenuazione, pur se con valori soddisfacenti (32 e 24%). La soluzione mista, forato più elemento pieno (soluzione D), presenta una buona resistenza termica (0,37 W/m²K),un buon sfasamento (11,80 ore) e una discreta attenuazione (22%).

Oltre alla capacità dei materiali di attenuare e ritardare l'ingresso in ambiente dell'onda termica dovuta alla radiazione solare incidente sull'involucro edilizio, un'elevata inerzia termica delle superfici interne, come già detto a proposito dell'efficacia nell'utilizzo delle dispersioni, permette di accumulare l'energia dovuta agli apporti solari ed endogeni.

A seguito dei flussi termici entranti attraverso le chiusure (principalmente attraverso le vetrate), e generati dalle sorgenti interne, le pulsazioni termiche risultanti in ambiente possono essere governate dalla presenza delle masse interne a contatto con l'aria dell'ambiente.

È proprio questo il ruolo dell'inerzia ambientale (si è soliti riferirsi all'indice di inerzia ambientale).

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

- moderazione delle fluttuazioni di temperatura all'interno dell'ambiente dovute alle variazioni cicliche dei flussi termici entranti;
- spostamento temporale dei picchi di domanda del sistema di raffrescamento ventilativo ambientale/strutturale in ore notturne in cui l'aria esterna è più fresca e l'uso degli ambienti provoca condizioni di carico meno gravose, grazie all'accumulo di energia nella massa dell'edificio.

Ciò detto, preme sottolineare come, riferendosi al comportamento ambientale, la capacità termica che contribuisce sia soprattutto quella che compete alle superfici interne a contatto con l'aria dell'ambiente. La presenza all'interno dell'involucro termico isolato di materiali ad elevato calore specifico [kJ/kgK] , vale a dire materiali in grado di assorbire elevate quantità di energia termica quando la loro temperatura aumenta, ha un effetto importante sul bilancio energetico dell'edificio.

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

Posizionando l'isolamento sul lato interno di una chiusura se ne separa la massa termica dal contatto diretto con l'ambiente.

In questo modo esso sarà portato a regime molto più rapidamente da un eventuale impianto di climatizzazione, così come si allontanerà velocemente dalle condizioni di equilibrio raggiunte, una volta che l'impianto sarà spento.

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

La massa posta in contatto termico con l'aria interna (cioè non separata da questa attraverso pannelli isolanti, o comunque controsoffitti, pavimenti rialzati, etc) può avere importanti effetti positivi sia in estate, sia in inverno. Nei climi più freddi, o comunque nella stagione invernale, la capacità termica risulta in grado di immagazzinare il calore proveniente dalla radiazione solare giornaliera, cedendola nelle ore serali e notturne mitigando l'ambiente. Nei climi caldi, o comunque nella stagione estiva, può essere utilizzata per limitare la temperatura massima diurna dell'aria interna in quanto la massa assorbirà energia termica dall'aria con relativamente piccoli aumenti di temperatura (le strutture dotate di elevata capacità termica accumulano calore durante il giorno e lo rilasciano durante le ore notturne). Questo effetto può essere migliorato esponendo la struttura ad alta capacità termica ad un flusso d'aria fresca proveniente dall'esterno, durante la notte.

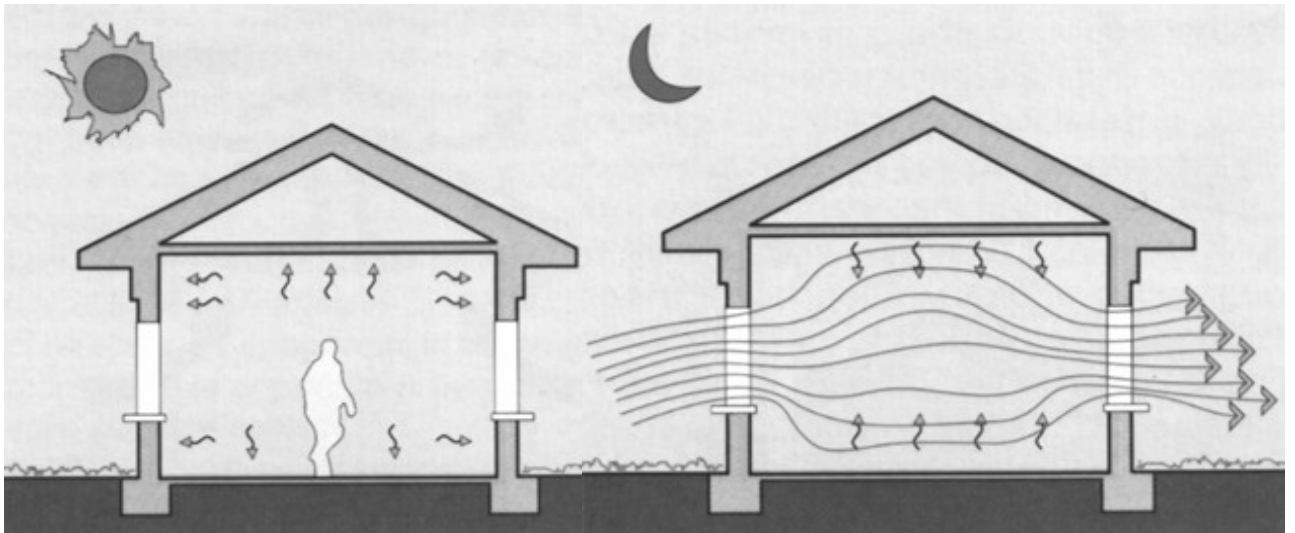


Figura 10. - Aumento dell'energia interna della massa termica durante il giorno, per via degli apporti solari ed endogeni. Rilascio di parte dell'energia interna della massa termica negli ambienti, e dissipazione attraverso la ventilazione notturna.

L'energia termica accumulata dalla massa durante il giorno viene (almeno in parte) asportata, e la massa termica risulta preraffreddata per il giorno successivo. Negli edifici residenziali, tuttavia, ciò può a volte risultare difficile a causa di limitazioni di utilizzo dello spazio. Ciononostante, è possibile applicare ventilazione notturna con l'impiego di dispositivi di apertura automatica di bocchette o finestre, aperture protette a livelli elevati, e una progettazione che favorisca il movimento dell'aria. Con questo processo è possibile mantenere le temperature interne sensibilmente al di sotto delle temperature ambientali esterne diurne durante il periodo estivo. L'effetto di raffrescamento offerto dalla massa termica associata alla ventilazione notturna funziona al meglio nei luoghi in cui vi è una apprezzabile escursione giorno-notte della temperatura dell'aria esterna.

La tecnica del raffrescamento ventilativo strutturale consiste nell'introduzione di un flusso d'aria esterna in ambiente confinato nel periodo serale e notturno -quando la temperatura dell'aria stessa è inferiore a quella interna- tramite aperture posizionate in modo tale da indurre un flusso lambente superfici interne di strutture massive (strati interni delle pareti perimetrali, partizioni interne, solai, pavimenti), che siano stati in grado di accumulare calore durante il giorno. La partizione interna di un edificio più

idonea ad essere raffrescata con sistema di ventilazione notturna è il solaio; l'aria, riscaldata dalle attrezzature, dalle persone e dal sole attraverso i vetri a livelli più vicini al pavimento sale, infatti, per differenza di densità, trasportando il calore accumulato e trasferendolo per convezione alla superficie del soffitto. Lo strato superficiale del solaio deve avere, quindi, caratteristiche di inerzia termica (capacità termica areica ed effusività) tali da consentire l'accumulo del calore prodotto durante il giorno, nell'ambiente considerato, e la sua dissipazione notturna.

Occorre precisare che, utilizzando il metodo di calcolo semplificato del fabbisogno termico di raffrescamento mensile, basato su un approccio quasi-stazionario, non è possibile distinguere, dal punto di vista della valutazione prestazionale, il contributo del raffrescamento ventilativo strutturale, da quello ambientale. Peraltro, l'efficacia di quest'ultimo, relativa all'abbassamento della temperatura dell'aria in un ambiente confinato, per effetto dell'introduzione di aria più fredda dall'esterno, è di tipo istantaneo in assenza di un volano termico qual'è l'inerzia: un flusso naturale d'aria entrante di giorno, periodo in cui la radiazione solare colpisce l'involucro (superfici opache e trasparenti) e contemporaneamente si genera calore endogeno per via dell'utilizzo di apparecchiature elettriche e acque sanitarie, non ha né l'entalpia, né il tempo, di raffreddare l'aria interna prima che questa si sia riscaldata nuovamente per effetto del calore presente all'interno dell'ambiente.

Riepilogando, al fine di limitare il fabbisogno per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti (esigenza che trova peraltro riscontro anche nelle disposizioni legislative attualmente in vigore), è opportuno verificare il comportamento “inerziale” della chiusura, valutandone, anche solo in termini di classi prestazionali, sfasamento ed attenuazione, e la posizione relativa di isolamento e massa, collocando lo strato isolante all'esterno delle chiusure di elementi spaziali con elevata produzione di calore endogeno;

inoltre, poiché le tecniche di controllo dell'inerzia termica ambientale e degli apporti endogeni interagiscono anche con la distribuzione degli elementi spaziali non perimetrali e con le partizioni interne, è opportuno collocare la massa termica prevalente -con superficie interna esposta- negli elementi di confine con elementi spaziali in cui si ha elevata produzione di calore endogeno, con preferenza per le partizioni orizzontali (solai). Nel caso di edifici massivi, allora, la restituzione dell'energia accumulata fa in modo che la tecnica di raffrescamento ventilativo ambientale/strutturale possa avere un potenziale di raffrescamento efficace che determina una reale riduzione del fabbisogno frigorifero, la quale viene valutata nel metodo quasi-statico per il calcolo delle dispersioni del calore, discriminandone il contributo alla riduzione del fabbisogno stesso, attraverso il calcolo della capacità termica effettiva dello strato massivo efficace degli elementi tecnici esposti all'aria interna, quello, cioè, in cui avviene uno scambio significativo di calore, sia in apporto, sia in rilascio, e il cui spessore, variabile con il tipo di materiale e con le condizioni termocinetiche di scambio convettivo, dai 6 ai 10 cm, viene espressamente indicato dalla prEN ISO 13790 al fine di considerare la capacità termica che viene normalmente coinvolta nei cicli termici diurni.

In ogni caso, una valutazione globale dell'effetto dell'isolamento termico che includa anche il fabbisogno dovuto alla climatizzazione in periodo estivo, va fatta attentamente, trattando in modo separato l'isolamento delle diverse componenti edilizie. Curare l'isolamento termico delle diverse componenti dell'involucro edilizio, attraverso cui avvengono tutti gli scambi climatici fra esterno ed interno, non è più concepibile solo come predisporre una semplice barriera isolante dotata di bassa trasmittanza, per tutti gli elementi massivi del sistema edificio, che delimitano l'ambiente interno controllato climaticamente, da quello esterno, da locali adiacenti non climatizzati, e il terreno, ma piuttosto un "filtro selettivo", dotato della capacità di annettere e/o

respingere gli effetti indotti dalle condizioni ambientali esterne. L'edificio, secondo le sue caratteristiche morfologiche, dimensionali, distributive e tecnico-costruttive, stabilisce pertanto un rapporto con l'ambiente esterno tale da produrre notevoli alterazioni alle condizioni di comfort interno. Se progettato secondo un corretto approccio riconducibile ai principi dell'architettura sostenibile, l'involucro edilizio dovrebbe, rispetto al problema termico invernale, ad esempio, disperdere poco calore e captare energia solare nelle ore diurne e nei periodi caldi; al contrario, è chiamato a respingere, nel periodo estivo, la radiazione solare e cedere calore, quando necessario. A differenza di climi tipicamente più freddi, come quelli dell'Europa centro-settentrionale, il clima temperato dell'Europa meridionale propone la sfida, sotto questo aspetto, più difficile: progettare soluzioni che sappiano rapportarsi bene tanto con il freddo quanto con il caldo. Per comprendere il ruolo giocato dall'isolamento, attraverso la trasmittanza dei componenti opachi d'involucro, nel comportamento termico del sistema edificio come risposta alle condizioni ambientali esterne, è opportuno analizzare, anche solo concettualmente per ora, come interviene tale grandezza (**U**) nelle formule che quantificano gli apporti e le dispersioni di calore sensibile all'interno dell'equazione relativa al bilancio energetico dell'edificio. Trascurando gli apporti gratuiti per trasmissione diretta della radiazione solare attraverso i componenti opachi, in quanto parzialmente compensati dalle dispersioni, sempre per irraggiamento, dell'edificio verso la volta celeste, occorre considerare lo scambio termico secondario della parete opaca verso l'interno. Come detto, la quota parte del flusso termico, generato dalla radiazione solare incidente, assorbita dalla superficie esterna dell'involucro, provoca un incremento della temperatura della superficie esterna schematizzabile in un incremento fittizio (o comunque locale) della temperatura dell'aria esterna: la temperatura "sole-aria". Valutando gli effetti dinamici, i

trasferimenti di calore sensibile per trasmissione attraverso i componenti opachi avvengono, istante per istante, per differenza di temperatura tra l'aria interna e quella "sole-aria" esterna alla zona che si vuole controllare, si considerano positivi quando si tratta di dispersioni verso l'esterno, e sono direttamente proporzionali alla differenza di temperatura $(\theta_i - \theta_{sa})$, alla trasmittanza (**U**) di ciascuna superficie di chiusura, ed alla lunghezza e trasmittanza dei ponti termici presenti (il trasferimento termico per trasmissione non avviene soltanto nei normali elementi di un edificio come pareti o tetto, ma anche negli angoli, nei bordi, nelle giunzioni: il ponte termico è il punto di una costruzione che presenta un flusso termico maggiore rispetto alle parti vicine -difatti, nei punti in cui il flusso di calore attraverso una delle superfici esterne dell'edificio non è perpendicolare alla superficie stessa, il flusso risulta incrementato- oppure, più semplicemente, quando il comportamento termico di una parte dell'edificio differisce da quello delle parti circostanti. Esempi tipici sono rappresentati dai balconi e da tutte le parti costruttive isolate in modo inappropriato. Si parla di ponti termici geometrici e ponti termici costruttivi: i primi sono quelli che si presentano negli angoli, in coincidenza di variazione di direzione delle strutture e degli elementi aggettanti; i secondi si manifestano invece nei punti in cui materiali ad alta conducibilità termica penetrano in un elemento strutturale che presenta una maggiore coibentazione: balconi in calcestruzzo senza isolamento, architravi non coibentati, pilastri in calcestruzzo che attraversano la muratura perimetrale. Alla base di un ponte termico quindi c'è sempre un difetto progettuale o di realizzazione che provoca modifiche al flusso termico monodimensionale, incrementando le dispersioni di calore in inverno, e ,di conseguenza gli apporti per scambio termico secondario della parete verso l'interno, in estate. I ponti termici generano inoltre una riduzione delle temperature delle superfici interne in inverno, aumentando quindi il rischio di condensa e di formazione di muffe.

La loro riduzione, quindi, migliora il comfort e la qualità dell'aria interna, oltre a ridurre i consumi energetici.)

In inverno, il “contributo sole-aria” all'incremento di temperatura dell'aria esterna, è meno incidente, inoltre, rimanendo tale temperatura inferiore a quella interna, un suo incremento determina un'attenuazione delle dispersioni di calore, dunque un effetto benefico: ciò spiega perché il metodo di calcolo quasi-statico, relativo al fabbisogno di riscaldamento, commette un errore accettabile quando considera il valore medio mensile della temperatura dell'aria esterna nel calcolo delle dispersioni attraverso l'involucro. Durante la stagione estiva, invece, la temperatura “sole-aria” della superficie colpita dalla radiazione solare, per via della sua maggior irradianza (contributo “sole aria” non più trascurabile) può raggiungere nell'arco della giornata valori superiori a quelli interni, e, come conseguenza, l'inversione di segno, rispetto alle dispersioni, dei flussi termici, originando un incremento degli apporti gratuiti che il metodo quasi statico non prende in considerazione in quanto fa riferimento alla temperatura media dell'aria esterna durante il mese considerato che si mantiene mediamente, appunto, al di sotto di quella interna (supponendo che tutto il contributo della radiazione solare assorbita venga reirraggiato all'infrarosso verso le superfici esterne e la volta celeste).

La verosimiglianza dei risultati di un calcolo stazionario, è pertanto subordinata alle prestazioni dell'involucro opaco descritte, nel non originare e trasmettere all'interno il flusso termico imputabile all'effetto sole-aria.

Le dispersioni di calore sensibile sono calcolate, facendo riferimento al metodo “quasi-stazionario” proposto dalla prEN ISO 13790, come somma dei trasferimenti termici, per differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno, locali adiacenti a temperatura fissa o non riscaldati e il terreno; per ciascun periodo considerato, si ha:

$$\Theta_{Disp} = \Theta_T + \Theta_v \quad [MJ]$$

dove:

Θ_T trasferimenti di calore per trasmissione attraverso le chiusure opache e trasparenti;

Θ_v trasferimenti di calore per infiltrazione, ventilazione naturale o meccanica.

I trasferimenti di calore sensibile per trasmissione avvengono per differenza di temperatura e possono essere calcolati attraverso la seguente relazione, in modo analogo per componenti trasparenti e componenti opachi.

$$\mathbf{H}_T = \sum_{[j=1 \leftrightarrow n]} (\mathbf{A}_j \cdot \mathbf{U}_j) + \sum_{[k=1 \leftrightarrow n]} (\mathbf{L}_k \cdot \mathbf{\Psi}_k)$$

$$\Theta_T = \mathbf{H}_T \cdot \tau \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

dove, per ciascuna superficie di chiusura, j , e ciascun ponte termico lineico, k :

\mathbf{H}_T fattore di trasferimento termico per trasmissione
[W/K];

\mathbf{A} area della chiusura [m²];

\mathbf{U} trasmittanza termica areica [W/m²K];

\mathbf{L} lunghezza del ponte termico lineico [m];

$\mathbf{\Psi}$ trasmittanza termica lineica del ponte termico lineico [W/mK];

θ_i ; θ_e temperatura media dell'aria rispettivamente interna (quella scelta come set-point) ed esterna alla zona termica (si considerano esterni alla zona termica i locali adiacenti, a temperatura fissa o variabile, il terreno e l'ambiente esterno), nel giorno tipo del mese considerato [°C];

τ durata del periodo di tempo considerato, 24h, espressi in [s].

Isolamento del basamento: Già a 3 – 5 metri di profondità, la temperatura del terreno oscilla in modo limitato e tende alla temperatura media annua dell'aria esterna (per le nostre latitudini circa 10-12°C). Questa sua proprietà lo rende una risorsa termica naturale (sorgente o pozzo, in funzione della stagione) variamente sfruttabile. Per quanto riguarda l'involucro edilizio, durante il periodo di riscaldamento le dispersioni termiche che attraversano gli elementi adiacenti al suolo (basamenti) sono sempre inferiori a quelle che contraddistinguono le pareti e i tetti, anche se caratterizzati da resistenze termiche paragonabili. Il loro isolamento quindi può essere a volte ridotto.

In estate invece, all'isolamento del basamento è in genere connesso un effetto negativo avvertibile in edifici di bassa elevazione: all'aumentare delle temperature e dei carichi interni l'impossibilità di scaricare calore verso un pozzo a bassa temperatura può rappresentare una limitazione sempre più significativa.

Nel caso siano presenti locali interrati non riscaldati (ad esempio cantine) è possibile applicare l'isolante all'intradosso del soffitto del seminterrato, in questo caso, anche le eventuali scale che collegano il seminterrato con gli ambienti riscaldati devono essere accuratamente isolate.

Si osserva che invece collocando l'isolante sopra lo strato strutturale si ha una riduzione della massa termica efficace dell'ambiente confinato.

Come regola generale, quando la fase di riscaldamento è energeticamente preponderante rispetto a quella di raffrescamento, risulta indispensabile isolare adeguatamente le componenti che poggiano sul terreno per raggiungere il requisito sulla domanda di riscaldamento.

Mentre nei climi freddi (centro-nord Europa) gli svantaggi estivi che ne derivano sono solitamente trascurabili, nelle aree più calde, del sud dell'Europa un elevato isolamento del basamento può comportare riduzioni sui livelli di comfort interno. Al crescere del numero di piani fuori terra, l'influenza del basamento risulta

sempre più limitata, e quindi le scelte circa il suo isolamento sempre meno determinanti al fine del contenimento del fabbisogno globale dell'edificio.

Isolamento delle pareti: L'isolamento delle chiusure verticali e orizzontali opache, rappresenta un elemento importante per la riduzione del fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento e per il raffrescamento estivo. Può essere ottenuto accoppiando ai materiali costituenti la costruzione, dei materiali che hanno una notevole resistenza al passaggio del calore, i cosiddetti, isolanti. In inverno, un buon isolamento, ovvero una bassa trasmittanza dell'insieme di strati costituenti le pareti perimetrali, insieme alla riduzione dei ponti termici, limita le perdite di calore e, aumentando le temperature delle superfici interne, riduce un importante causa di discomfort locale, l'asimmetria radiante dovuta a pareti fredde e i danni che possono essere provocati dalla condensazione del vapore acqueo (crepe, muffe), inoltre, sempre in inverno, poiché le superfici interne dei muri esterni di un edificio male isolato sono generalmente più fredde, rispetto a quelle di un edificio ben isolato, la temperatura dell'aria di un edificio ben isolato può essere mantenuta al di sotto di quella di un edificio mal isolato, pur mantenendo livelli di comfort termico.

A differenza dell'isolamento del basamento, quello delle pareti perimetrali ha sempre un effetto positivo: durante le calde ore estive riduce i flussi di calore verso l'interno, inclusi quelli generati dalla radiazione solare incidente sulla superficie esterna. Attenzione va posta nel posizionamento del materiale isolante:

1) Isolamento dall'esterno - isolamento a cappotto

Comunemente noto come "cappotto" consiste nell'applicazione, sull'intera superficie esterna verticale dell'edificio, di pannelli isolanti che vengono poi coperti da uno spessore sottile, protettivo, di finitura realizzato con particolari intonaci.

ESTERNO

INTERNO

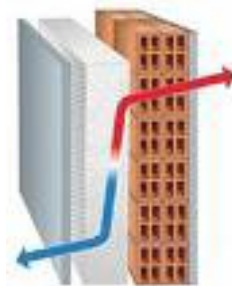


Figura 11. - Isolamento a cappotto.

- Isola in modo continuo e uniforme, consente l'eliminazione totale dei "ponti termici" (è possibile ridurre gli effetti a valori trascurabili.) Una soluzione a cappotto non migliora soltanto la qualità della muratura termica, ma rende anche non necessari i calcoli degli effetti dei ponti termici, a condizione che le dispersioni termiche vengano calcolate utilizzando le dimensioni esterne dell'edificio.

Maggiore risparmio energetico (legato anche alla maggiore capacità dell'edificio di trattenere il calore), un maggiore comfort termico e l'eliminazione di muffe sulle superfici interne delle abitazioni, originate dalla condensa in corrispondenza dei ponti termici; ad esempio, applicando su una muratura in mattoni pieni un pannello isolante di spessore pari a 8 cm si ottiene un dimezzamento della trasmittanza;

- Protegge le pareti esterne dagli agenti atmosferici;
- Rende più stabili le condizioni termo-igrometriche della struttura degli edifici;
- Aumenta l'inerzia termica delle pareti perimetrali.

L'installazione delle finestre richiede una cura particolare: gli effetti dei ponti termici possono essere ridotti al minimo installando la finestra nel piano del rivestimento isolante, anziché in quello della parete portante e coprendo parte del telaio con altro materiale coibente. Tuttavia, a causa della variazione di spessore del rivestimento isolante, vi è di norma un ponte termico residuo in corrispondenza della giunzione della finestra con la parete.

2) Isolamento dall'esterno - facciata ventilata

La facciata ventilata, realizzata per mezzo della posa di elementi modulari su apposite sottostrutture fissate ad una certa distanza dalla parete verticale, della quale costituiscono la finitura esterna, sfrutta la ventilazione della camera d'aria che così si viene a creare fra l'isolante ed il rivestimento esterno. Quest'ultimo può essere costituito da elementi di varia natura: lapidei, terrecotte, metallici, plastici, conglomerati cementizi fibrorinforzati, ceramici.

Le pareti ventilate sono progettate e realizzate per dar luogo, nell'intercapedine aperta alla base ed in sommità, ad un flusso d'aria ascendente azionato dalla prevalenza naturale dovuta alla differenza di temperatura fra l'aria presente nell'intercapedine e quella presente in ingresso della stessa, detto "effetto camino", che permette la dissipazione del calore accumulato dagli elementi esterni.

- La parete ventilata attiva al suo interno un movimento d'aria ascendente utilizzando il calore radiante proveniente dall'esterno;
- Il movimento dell'aria consente di evitare che si formi del vapore acqueo dall'interno diminuendo così la possibilità che si verifichino condensazioni interstiziali;
- Lo strato isolante posto tra l'elemento strutturale e l'intercapedine ventilata è continuo, pertanto elimina i ponti termici;

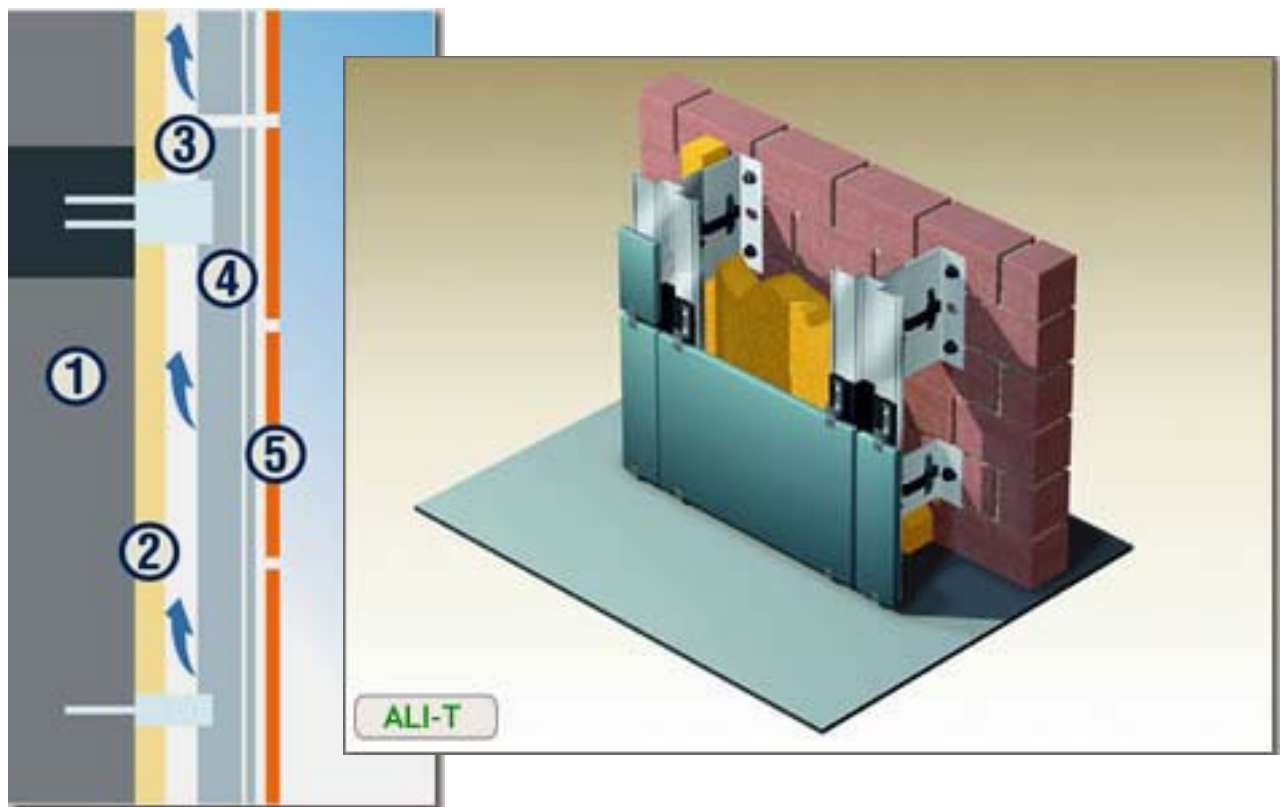


Figura 12. - La stratificazione funzionale della facciata ventilata risulta composta da:
 1)strato di supporto murario; 2)strato di isolamento; 3)strato di ventilazione;
 4)struttura portante; 5)strato di finitura esterno (rivestimento).

Comportamento d'inverno: la camera d'aria consente la protezione della parete dalle azioni combinate di precipitazioni e vento, pertanto lo strato di isolamento rimane sempre asciutto.

Contemporaneamente lo strato di isolante, consente una riduzione della trasmittanza e la sua continuità elimina i ponti termici.(un buon isolamento delle pareti perimetrali ha sempre un effetto positivo, anche in estate.)

Comportamento nella stagione estiva: l'effetto combinato della riflessione del rivestimento superficiale, che limita l'incremento della temperatura della superficie esterna, e della ventilazione dell'intercapedine consentono una riduzione del carico termico dovuto all'irraggiamento solare, in quanto la radiazione solare viene intercettata, ed il calore dissipato attraverso la ventilazione. Inoltre, lo strato di ventilazione diminuisce il possibile degrado degli strati funzionali causato dall'umidità esterna e dagli shock termici.

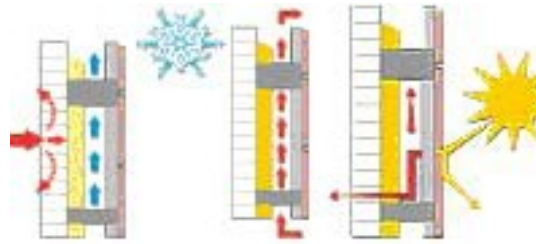


Figura 13. - L'effetto combinato della riflessione del rivestimento superficiale e della ventilazione naturale dell'intercapedine nelle ore più fresche.

Isolamento del tetto: Nella costruzione di un edificio il tetto è uno degli elementi più importanti, serve a proteggere dagli agenti atmosferici, dal caldo, dal freddo, dall'inquinamento acustico. Per riuscire a soddisfare tutte le funzioni che gli vengono richieste, il tetto deve rispondere a diversi requisiti, che spesso vengono messi in secondo piano ma che invece influiscono sulle funzioni che deve assolvere per favorire il comfort abitativo. Come nel caso delle pareti, ma in modo quantitativamente più significativo, l'isolamento della copertura di un edificio riduce sia le trasmissioni invernali verso l'esterno, che quelle estive verso l'interno. L'isolamento viene fatto per contribuire alla resistenza termica globale della copertura, ossia *offrire resistenza* all'attraversamento di calore in modo da ridurre le dispersioni di energia. La corrente termica si muove sempre nella direzione del gradiente di temperatura ovvero dagli ambienti più caldi verso quelli più freddi, con un'intensità proporzionale alla differenza di temperatura e alle caratteristiche del mezzo che attraversa. Ciò significa che ogni volta che in un'abitazione la temperatura all'interno è di 20°C mentre all'esterno è inferiore, l'aria calda tenderà a fuoriuscire se non viene interposto uno strato isolante. (E' importante sapere che durante il periodo invernale, il 20% del calore si disperde attraverso la copertura.)

Lo stesso fenomeno avviene in estate: se consideriamo che la temperatura interna ideale possa essere di 25°C, ogni volta che la temperatura esterna è superiore il calore tende a penetrare se non viene interposto uno strato isolante.

In estate, i tetti, che più degli altri componenti edilizi sono esposti

alla radiazione solare diretta, se non opportunamente isolati contribuiscono in maniera significativa all'aumento delle temperature all'interno degli ambienti confinati.

In caso di tetti inclinati supportati da travi in legno, è preferibile ridurre i ponti termici posizionando il materiale isolante tra la struttura portante e le tegole.

In caso di coperture in cemento armato è preferibile aumentare la massa termica efficace isolando esternamente, in questo modo si migliorano anche le prestazioni, in termini di sfasamento ed attenuazione: la semplice valutazione della trasmittanza termica della copertura non basta a caratterizzare una buona coibentazione estiva.

In pratica occorre valutare anche lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda termica che attraversa la copertura. Infatti intercorre un certo tempo tra il momento in cui si verifica la massima temperatura sulla superficie esterna e quello in cui tale picco (attenuato) si manifesta sulla superficie interna.

Tale intervallo temporale si definisce "sfasamento" o ritardo dell'onda termica. Un valore accettabile dello sfasamento è di norma superiore alle otto ore.

Nei nostri climi la temperatura massima estiva esterna della falda del tetto si verifica verso le ore 14. Il picco di temperatura si verifica sulla superficie interna con otto ore di ritardo, cioè alle 22, momento in cui è possibile ventilare gli ambienti con aria esterna che a quell'ora è più fresca.

Diverso è il caso di uno sfasamento di 2 ore. In questo caso infatti e cioè verso le ore 16, l'aria esterna è ancora notevolmente calda e viene a mancare il raffrescamento notturno.

Nelle mansarde o nei locali all'ultimo piano, la superficie radiante è molto ampia essendo costituita dall'intero soffitto e può incidere quindi in maniera decisiva sul comfort del corpo umano.

Risulta pertanto essenziale realizzare una coibentazione che unisca ad una buona attenuazione, un ottimale sfasamento. Questo effetto si può ottenere utilizzando materiali che possiedono un elevato

calore specifico e massa volumica, assicurando ottime condizioni di benessere d'estate grazie allo sfasamento dell'onda termica mediamente di 9 ore e un ottimo isolamento invernale.

In ogni caso è indispensabile proteggere il materiale coibente con membrane impermeabili ed è possibile introdurre uno strato di ventilazione sotto le tegole o i coppi capace di asportare in estate l'energia termica immagazzinata.

1) Tetto in legno ventilato

Fino a qualche tempo fa venivano ignorate, nelle abitazioni civili, alcune caratteristiche nella costruzione del tetto, perché veniva usato frequentemente il laterizio, negli ultimi tempi c'è stata la piena rivalutazione del legno che, abbinato a suoi complementi, ha portato notevoli migliorie negli edifici sotto l'aspetto formale e funzionale.

La ventilazione è un concetto all'avanguardia nella costruzione dei tetti con isolamento termico in falda. Questo sistema di costruzione del tetto serve a migliorare la sicurezza, la traspirazione, l'isolamento e la ventilazione dell'edificio a favore di un notevole risparmio energetico e un'economia di manutenzione.

Spostando le nostre considerazioni al modo più semplice di costruire del passato, possiamo osservare che nei vecchi edifici del settecento e successivi il tetto ventilato era comunque presente.

Il sottotetto spesso non praticabile, dove non si stava neanche in piedi, aveva delle piccole finestre strette, di forma rettangolare, allineate alle altre finestre per la larghezza ma molto più basse (40-50centimetri). Esso fungeva da camera d'aria e nelle stagioni calde le piccole finestre venivano lasciate aperte appunto per svolgere una funzione di raffrescamento del tetto, sfruttando la circolazione d'aria, meglio se con aperture contrapposte.

Nel tetto in legno ventilato viene predisposta "una camera d'aria" che ne agevola la ventilazione e grazie ad una sua corretta circolazione in entrata e in uscita impedisce la formazione di umidità, limitando l'effetto condensa.

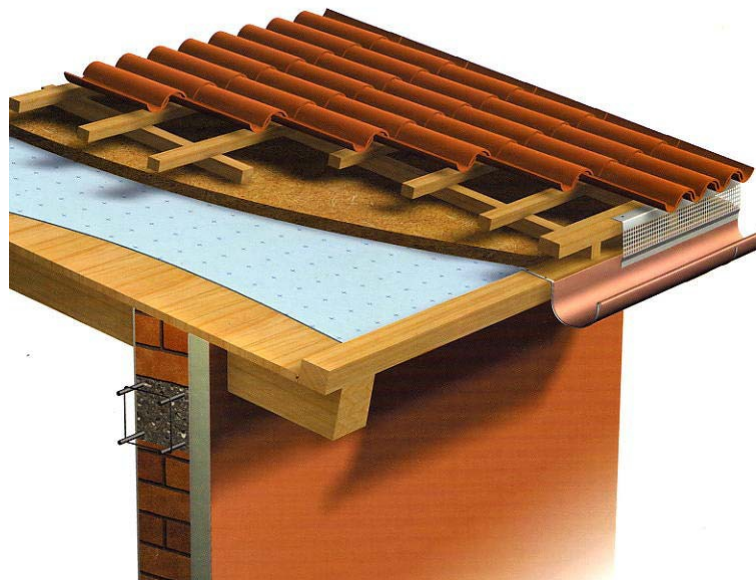
La “condensa” o il ristagno di acqua negli strati della copertura è uno dei fattori principali che causano il deterioramento dei componenti (manto, scempiato etc.) e pertanto, solo con un miglioramento della traspirazione e dell’isolamento si possono ridurre i costi di manutenzione. Trovare un tetto in laterizio la cui costruzione rispetti la dinamica di ventilazione è assai raro. Infatti, solitamente, il canale in cui l’aria dovrebbe circolare e, quindi produrre tale ventilazione, è soffocato dal cemento che fissa il coppo di colmo alla struttura portante.

Un tetto in legno ventilato deve soddisfare diversi requisiti:

- l’isolamento, durante l’estate, il caldo non passa perché viene espulso prima che il calore esterno possa arrivare agli ambienti sottostanti;
- lo smaltimento del vapore acqueo, che dagli ambienti sottostanti normalmente tende a salire;
- la distribuzione del calore, che durante l’inverno sale dall’alloggio producendo umidità;
- evitare che vi siano infiltrazioni di acqua, provocate dalla pioggia, o semplicemente dall’assorbimento delle tegole nel corso del tempo e nel susseguirsi dei fenomeni atmosferici.

L'efficacia della ventilazione in una copertura ad elementi discontinui dipende essenzialmente dalla portata e dalla velocità del flusso d'aria e quindi dall'effetto camino che si viene a creare nel sottotegola. Maggiore sarà il flusso d'aria, maggiore sarà la capacità di sottrarre calore e vapore al sottotegola. Sono ancora insufficienti le informazioni relative alle prestazioni termiche di tale sistema di copertura. La conoscenza di dati quantitativi sull'incremento dell'isolamento termico e sull'aumento dell'inerzia termica del pacchetto di copertura, consentirebbe di adottare tale sistema con maggior consapevolezza in considerazione anche della maggior durata, dei costi di realizzazione e di manutenzione inferiori agli altri sistemi in uso ed alla luce di un possibile risparmio energetico, di giustificarne il maggior utilizzo. Anche per progettare una copertura occorre stabilire un rapporto

col clima locale dando priorità alla valutazione della posizione del fabbricato rispetto al sole, e, ovviamente rispetto all'azione del vento per avere il massimo apporto energetico in inverno e la maggiore climatizzazione naturale in estate. Tutto ciò premesso seguono alcuni esempi e metodologie per la realizzazione di una copertura ventilata. **Figura 14.**



LO STRATO DI VENTILAZIONE

Lo strato di ventilazione può essere posto tra il manto di copertura (le tegole) e lo strato immediatamente sottostante. Deve inoltre essere a contatto con l'ambiente esterno, tramite le aperture di entrata (linea di gronda) e di uscita (linea di colmo). Ovviamente perché ci sia questo strato di ventilazione l'aria non deve essere ostruita né in entrata (malta in linea di gronda) né in uscita (colmo cementato). Lo strato di ventilazione va previsto in fase di progettazione. Dati rilevanti per il dimensionamento del canale di ventilazione sono:

1. pendenza della falda
2. lunghezza della falda o del canale di ventilazione
3. differenza di temperatura tra interno ed esterno del canale di ventilazione
4. umidità
5. vento

IL CANALE DI VENTILAZIONE

L'efficacia della ventilazione dipende dalla velocità del flusso d'aria all'interno del canale di ventilazione. La corrente d'aria infatti si muove:

- a) per differenza di pressione originata dal vento tra le aperture di entrata e di uscita
- b) per differenza di temperatura dell'aria tra interno ed esterno del canale di ventilazione

La corrente d'aria viene invece rallentata dall'attrito dell'aria sulle superfici all'interno del canale di ventilazione e dalle strettoie orizzontali delle aperture lungo le linee di gronda e di colmo.

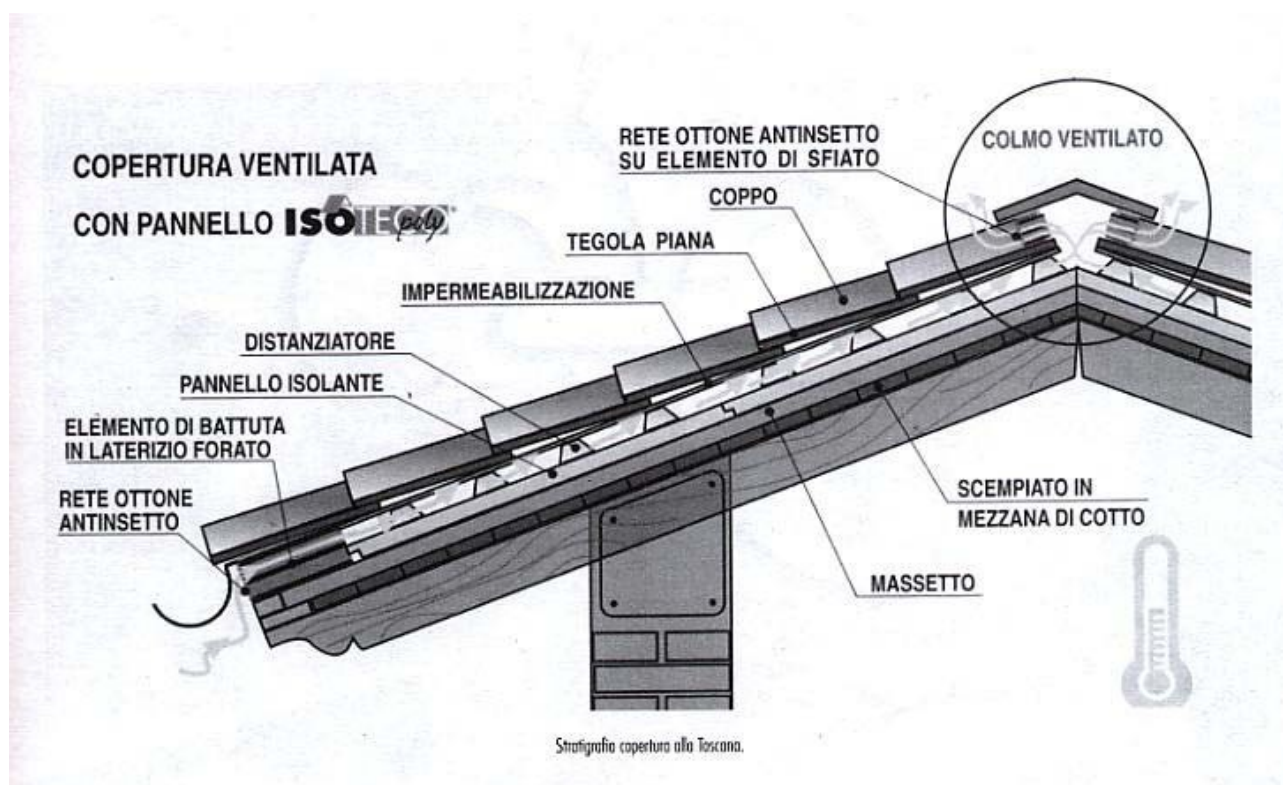


Figura 15.

LA SPINTA SCENSIONALE TERMICA

Se l'aria all'interno del canale di ventilazione è più calda di quella esterna si verifica una spinta ascensionale data dalla differenza di densità tra aria calda interna e aria fredda esterna e si innesca quindi una corrente nel canale di ventilazione. Nell'intercapedine l'aria riceve calore:

- dagli strati sottostanti nel periodo in cui l'abitazione viene riscaldata
- dallo strato soprastante per effetto dell'energia solare assorbita dal manto di copertura quando il sole splende.

Una copertura ventilata affinché possa svolgere la sua funzione di aerazione del sottotetto dovrà rispettare alcuni principi costruttivi relativi al dimensionamento della “camera d’aria”, in funzione della dimensione della falda, della sua inclinazione (più il tetto è inclinato, maggiore sarà la velocità dell'aria) e della posizione rispetto al sole ed al vento.

A tale scopo possono essere utili, oltre alla sperimentazione, alcune norme UNI e quegli accorgimenti in fase di progettazione riferiti a specifici parametri.

Alle nostre latitudini, per i tetti a falda con pendenza dal 18 al 20%, risulta evidente che minore è la pendenza maggiore dovrà essere la camera d’aria, come pure maggiore lunghezza dovrà corrispondere ad una più ampia camera di aerazione.

<i>Pendenza</i>	<i>Lunghezza falda</i>	<i>Spessore Camera Ventilazione</i>
18%	5 m	5 cm
36%	5 m	5 cm
18%	15 m	10 cm
36%	15 m	6 cm

<i>Pendenza</i>	<i>Lunghezza falda</i>	<i>Aperture ENTRATA aria</i>
18%	5 m	50 cm²
36%	5 m	48 cm²
18%	15 m	150 cm²
36%	15 m	144 cm²

<i>Pendenza</i>	<i>Lunghezza falda</i>	<i>Aperture USCITA aria</i>
18%	5 m	60 cm²
36%	5 m	58 cm²
18%	15 m	180 cm²
36%	15 m	174 cm²

Tabella 4. - Desunte dalle Norme UNI . UNI 8178 -Estratto 6 STRATO DI BARRIERA AL VAPORE. UNI 9460 - Estratto- 1.3.4 Copertura con elemento termoisolante, con strato di Ventilazione. U32035110/9.3.1 - Estratto VENTILAZIONE.

Chiusure trasparenti

Gli effetti della radiazione solare che attraversa le chiusure esterne trasparenti sono più evidenti rispetto a quelle opache: i problemi relativi al comfort e ai consumi energetici per il raffrescamento sono più rilevanti, ma nel contempo, sono più consistenti gli apporti gratuiti che possono essere sfruttati nel periodo invernale. L'energia solare che incide su una superficie trasparente si suddivide, in funzione delle proprietà ottico-solari del componente, in tre parti: energia trasmessa direttamente, riflessa e assorbita. Quest'ultima viene riemessa sotto forma di calore, in parte all'interno e in parte all'esterno dell'ambiente.

Da un punto di vista termico, la quota di radiazione solare che attraversa il componente trasparente viene -da parte delle superfici interne colpite- in parte assorbita ed in parte riflessa; il riscaldamento di tali superfici determina un successivo innalzamento della temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente, secondo uno sfasamento temporale legato alle caratteristiche della struttura.

La funzione di controllo solare attraverso le chiusure esterne trasparenti interessa, quindi, la quantità di radiazione incidente, la conseguente quota trasmessa e quella assorbita ed accumulata dalle superfici all'interno.

In fase di progetto, i parametri coinvolti, sui quali occorre intervenire attraverso una scelta accurata, sono:

-da un punto di vista geometrico-

- l'area della chiusura esterna trasparente;
- l'esposizione alla radiazione solare, cioè l'inclinazione e l'orientamento;
- la posizione rispetto l'ambiente interno, ossia la collocazione in pianta e l'altezza dal pavimento.

-secondo le proprietà termofisiche e ottico-solari-

- la trasparenza alla radiazione, alle varie lunghezze d'onda, espressa dai fattori di trasmissione solare e di trasmissione luminosa, anche in relazione all'impatto visivo e all'integrazione architettonica;
- la resistenza termica del componente trasparente e del relativo telaio;
- le caratteristiche di assorbimento e di accumulo delle superfici interne soleggiate.

-legati all'utilizzo di schermi-

- la tipologia e le caratteristiche delle schermature, quali la geometria e la tecnologia, il tipo di gestione, il materiale e la finitura, anche in relazione all'impatto visivo e all'integrazione architettonica e tecnologica.

Caratteristiche geometriche: Il dimensionamento (area) di una chiusura trasparente fa riferimento, simultaneamente, alle esigenze di: illuminazione naturale -prescritte sulla base del valore minimo del fattore medio di luce diurna- ; igiene -imposte dai regolamenti edilizi, attraverso un rapporto minimo dell'area aeroilluminante rispetto la superficie di calpestio- ; riduzione del fabbisogno energetico stagionale.

Definita la superficie minima in funzione dei vincoli normativi edilizi, l'area di una chiusura trasparente ha un valore ottimale, oltre il quale un ulteriore incremento della superficie produrrebbe un aumento del fabbisogno termico. Tale valore, utile al fine dell'ottimizzazione dei consumi energetici di un edificio non è, tuttavia di facile determinazione, in quanto implica, per ciascun caso esaminato, il calcolo del fabbisogno annuale di riscaldamento, raffrescamento e di illuminazione degli ambienti e il confronto tra differenti configurazioni, in termini di area ed orientamento.

L'area di una chiusura trasparente, infatti, influenza, in modo più o meno significativo, diversi termini rappresentanti gli scambi di

calore sensibili nella espressione del bilancio energetico di un edificio in entrambe le stagioni: oltre agli apporti per trasmissione diretta della radiazione solare, e scambio termico secondario della vetrata verso l'interno, l'area di un componente trasparente -il quale se non si adottano particolari materiali e modalità costruttive è caratterizzato da conduttività termica relativamente alta- influisce direttamente sulle dispersioni di calore invernali attraverso gli infissi, e nel caso di chiusure permeabili all'aria (chiusure trasparenti in modalità d'apertura) ,il valore dell'area netta d'apertura agisce sulla portata d'aria di rinnovo realizzabile attraverso la ventilazione naturale controllata, e quindi le relative dispersioni.

L'inclinazione del piano su cui giace la chiusura trasparente influenza l'angolo di incidenza della radiazione solare e, di conseguenza, la porzione trasmessa all'interno, che è massima quando la direzione dei raggi solari rispetto al piano stesso è ortogonale.

Secondo le dinamiche terra-sole, alle nostre latitudini l'inclinazione verso il cielo, ovvero prossima all'orizzontale, aumenta la raccolta della radiazione solare estiva rispetto a superfici verticali che, viceversa ne privilegiano l'ingresso nel periodo invernale. Se si considera, inoltre, la variazione di intensità in funzione della stagione, in termini generali si può concludere che le superfici orizzontali sarebbero da evitare. Così, ad esempio, i lucernari che sono utili per far penetrare la luce in ambienti profondi, rappresentano un elemento vulnerabile che può essere sostituito da cleristori, ossia finestrature sul piano verticale di tetti a shed o similari.

La scelta dell'orientamento del piano su cui giace la chiusura trasparente, determina la capacità di collezione solare della stessa. Essa, pertanto, deve far riferimento a considerazioni di carattere spazio-temporale che mettono in relazione, nell'arco della giornata e delle stagioni dell'anno, la possibilità di ingresso della radiazione solare all'interno degli ambienti, con la presenza di

individui e le esigenze legate alla tipologia di attività svolta. Analizzando, come in figura 16. i profili annuali dell'energia solare media giornaliera incidente su una superficie avente diversa inclinazione, da quella orizzontale a quella verticale, e orientamento, per la località in esame, si nota, ad esempio, alla nostra latitudine, che la parete verticale orientata a sud è caratterizzata da una maggiore incidenza della radiazione solare globale, dal periodo autunnale a quello primaverile, rispetto agli altri orientamenti verticali, mentre mantiene valori costanti in estate, e maggiori di quelle orientate a est e ovest; per tale ragione risulta essere preferibile rispetto a queste ultime.

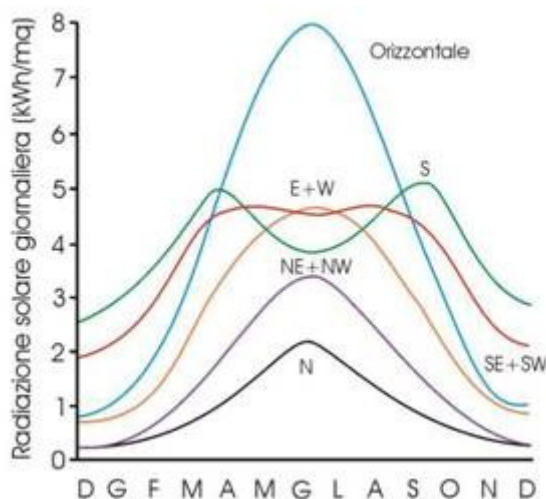


Figura 16. - Profili annuali dell'irraggiamento medio giornaliero per differenti orientamenti e angoli di inclinazione della superficie di captazione per le latitudini dell'Italia centro-settentrionale.

In generale, la collocazione delle chiusure trasparenti in relazione all'orientamento, può far riferimento alle seguenti indicazioni:

- a nord, sono preferibili laddove la radiazione solare è mal tollerata ed è invece auspicata un'illuminazione naturale costante nell'arco della giornata; gli apporti solari risultano pressochè trascurabili;
- a sud, si possono prevedere anche ampie superfici vetrate, per le quali gli apporti stagionali sono ottimizzati, offrendo

le migliori condizioni per il guadagno termico, in inverno, e per l'esclusione della radiazione solare, in estate;

- a est e ovest, sono da prevedere con superfici di dimensioni limitate, per gli elevati apporti di energia in estate. Tra queste le più problematiche sono quelle verso ovest, perché irraggiate nel pomeriggio, durante il quale si registrano anche le massime temperature dell'aria esterna, e pertanto, in assenza di massa termica esposta all'aria interna, in grado di accumulare buona parte di questo calore, e di restituirlo, con un opportuno sfasamento temporale, nelle ore più fresche, quando può essere dissipato grazie alla ventilazione notturna degli ambienti, un flusso d'aria naturale entrante nel pomeriggio, a causa della sua elevata temperatura, non è in grado di raffrescare l'aria interna.

La posizione delle chiusure trasparenti rispetto all'ambiente interno (che, qualora permeabili all'aria in modalità d'apertura, deve soddisfare, contemporaneamente, anche i requisiti per contribuire ad innescare un flusso di ventilazione naturale efficace) in pianta e in sezione (altezza dal pavimento), e la sua collocazione rispetto alla disposizione degli arredi, influenza la proiezione della radiazione solare sulle superfici interne. Pur considerando le differenze stagionali, le aperture alte permettono la penetrazione della radiazione solare più in profondità.

Utilizzando gli angoli solari, azimutali, e angolo di elevazione, è possibile descrivere geometricamente il fascio di raggi, individuare le superfici interne colpite dalla radiazione stessa ed, eventualmente, tracciare dei profili di soleggiamento stagionali, utili al fine di collocare oggetti ed arredi che risultano particolarmente sensibili all'effetto dei raggi ultravioletti. Considerazioni analoghe possono essere fatte rispetto alla sola componente luminosa che può distribuirsi uniformemente e raggiungere punti più o meno profondi.

Trasmittanza termica, trasmittanza visibile e fattore solare delle finestre: Le perdite di calore invernali attraverso gli infissi (finestre, porte di comunicazione con l'esterno, etc) sono proporzionali alla loro trasmittanza termica U [W/m^2K] ed al salto di temperatura tra aria interna ed esterna. In un clima invernale rigido sarà fondamentale avere valori molto bassi di trasmittanza dell'infisso, cioè sia del telaio che della parte vetrata. A causa della conduttività termica relativamente alta del vetro -una lastra chiara di vetro singola con uno spessore di 4mm, come indicato in tabella 00, ha una trasmittanza termica pari a $5,8 W/m^2K$ - una finestra con una lastra di vetro singola costituisce un punto estremamente debole nell'involucro isolante di un edificio. La ricerca tecnologica, tuttavia, permette oggi di realizzare industrialmente prodotti con ottime prestazioni, così come si può vedere dalla tabella 6 . Un vetro singolo offre inoltre, una protezione debole contro i rumori esterni; l'uso di due lastre di vetro separate da una intercapedine d'aria riduce la trasmittanza all'incirca di un fattore due, inoltre la cavità chiusa consente l'utilizzo di gas all'interno della cavità (tipicamente Argon e Krypton) caratterizzati da conduttività ancora minori rispetto all'aria. I vetri doppi con rivestimento basso emissivo raggiungono valori relativamente bassi di trasmittanza poiché tale rivestimento agisce sullo scambio termico per radiazione riducendolo in modo considerevole rispetto ad un vetro chiaro. La scelta dovrebbe pertanto orientarsi verso componenti ad alta resistenza termica che, oltre a ridurre gli scambi termici, garantiscono anche un maggior comfort interno attraverso una maggiore uniformità della temperatura operante. Altro vantaggio della scelta di infissi a bassa trasmittanza è il fatto che in inverno la temperatura della faccia interna è più elevata che per un vetro di qualità termica inferiore. Questo implica la riduzione dei rischi di condensazione superficiale e delle correnti d'aria fredda che si generano a causa della superficie fredda del vetro; in generale aumenta la

temperatura media radiante dell'ambiente e la simmetria radiante, il che migliora il comfort, anche mantenendo la temperatura dell'aria leggermente più bassa. Secondo il Dlgs 192/05 e il suo aggiornamento Dlgs 311/06, all'Allegato C, per gli edifici nuovi e per gli ampliamenti e ristrutturazioni di oltre 1.000 m², è obbligatorio intervenire sull'involucro edilizio in modo da rispettare i seguenti valori di trasmittanza termica U (validi per la Zona Climatica di Bologna) :

Valori limite della trasmittanza termica U delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi [W/m ² K]			
Zona Climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m ² k)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m ² k)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m ² k)
E	2,8	2,4	2,2

Valori limite della trasmittanza centrale termica U dei vetri [W/m ² K]			
Zona Climatica	Dall'1 gennaio 2006 U (W/m ² k)	Dall'1 gennaio 2008 U (W/m ² k)	Dall'1 gennaio 2010 U (W/m ² k)
E	2,4	1,9	1,7

Tabella 5.

Al tempo stesso la ragion d'essere delle porzioni trasparenti dell'involucro è quella di fornire luce naturale e contatto visuale con l'esterno. In inverno, inoltre, consentono all'energia solare di penetrare all'interno dell'edificio, riducendo in questo modo la quantità di energia utile netta da fornire con altri mezzi. Questo può avere degli effetti collaterali negativi in estate quando i guadagni solari costituiscono viceversa un aggravio al carico di raffrescamento, e la temperatura potenzialmente elevata delle superfici vetrate può essere fonte di discomfort locale.

Oltre a garantire valori bassi di trasmittanza termica, che, come si è detto, sono necessari ai fini del risparmio energetico dell'edificio sia in inverno che in estate, occorre valutare altri due principali parametri per caratterizzare e scegliere i vetri adatti al clima, orientamento, e specifico edificio.

Il fattore solare è una grandezza che esprime la caratteristica di permeabilità di un componente trasparente rispetto alla radiazione

solare. Esso rappresenta la frazione di energia solare che entra in ambiente, ossia la parte trasmessa e quella assorbita e riemessa in ambiente per adduzione, rispetto a quella totale incidente. In linea con quanto indicato nella normativa Uni En 410, il fattore solare si riferisce al fattore di trasmissione dell'energia solare totale, calcolato come la somma del fattore di trasmissione solare diretta e del fattore di scambio termico secondario della vetrata verso l'interno, esprimendo, in maniera adimensionale la caratteristica dell'elemento trasparente di trasmettere calore verso l'ambiente interno. Maggiore è il valore del fattore solare, maggiore è la quantità di energia raggiante incidente trasmessa verso l'interno, ovviamente valori bassi implicano bassi guadagni solari. Si indica con la sigla **g**, il suo valore caratteristico è desumibile dalle schede tecniche dei componenti trasparenti ed assume un valore compreso tra 0 e 1.

Un vetro chiaro semplice con uno spessore di 4mm, ad esempio, ha un **g** pari a 0,85.

La tabella 6 riporta, per alcuni tipi di componenti trasparenti, i corrispondenti valori del fattore solare.

Nel caso di edifici con un rapporto tra superficie delle chiusure opache verticali e delle chiusure trasparenti inferiori al 50% è obbligatorio garantire la riduzione dell'apporto di calore per irraggiamento solare attraverso le superfici vetrate mediante il controllo del fattore solare **g** delle vetrate, così come in tutti i casi di superfici vetrate orizzontali o inclinate. Tale condizione è altresì praticabile per le superfici vetrate verticali, in alternativa alle soluzioni che garantiscono la schermatura delle aperture trasparenti rivolte verso sud.

Il requisito non si applica nel caso di componenti vetrate (verticali, inclinate, o orizzontali) utilizzate nell'ambito di sistemi di captazione dell'energia solare (serre, etc) appositamente progettati per tale scopo, purché ne sia garantito il corretto funzionamento in regime estivo.

Il requisito si intende soddisfatto quando il valore del fattore solare **g** della componente vetrata dei serramenti esterni (finestre, porte-finestre, luci fisse) risulti inferiore o uguale a determinati valori che sono funzione dell'inclinazione della superficie trasparente; pertanto per una

- chiusura orizzontale superiore , **g ≤ 0,50**
- chiusura inclinata , **g ≤ 0,55**
- chiusura verticale , **g ≤ 0,60**

Il fattore di trasmissione luminosa **FL** è una grandezza definita in modo analogo al fattore solare, ma con riferimento al solo intervallo del visibile rispetto all'intero spettro della radiazione solare (frazione di luce solare incidente trasmessa all'interno dell'edificio). Valori elevati migliorano la disponibilità di luce naturale negli interni. La scelta di questo fattore ha conseguenze indirette sul controllo solare in quanto i suoi valori sono correlati a quelli del fattore solare, ma con preferenza di scelta opposta: nel calcolo del fattore medio di luce diurna è, infatti, preferibile un'elevata trasparenza, non però nell'ambito del controllo solare. Il valore caratteristico è desumibile dalle schede tecniche dei componenti trasparenti, ed assume un valore compreso tra 0 e 1. Un vetro chiaro semplice con uno spessore di 4mm, ha, ad esempio, un **FL** pari a 0,9.

La tabella 6 riporta per alcuni tipi di componenti trasparenti, i corrispondenti valori del fattore di trasmissione luminosa.

<i>Tipo di componente</i>	U [W/m ² K]	g	FL
<i>Lastra singola</i>			
<i>Vetro chiaro, 4mm</i>	5,8	0,85	0,9
<i>Vetro chiaro, 8mm</i>	5,7	0,8	0,87
<i>Vetro riflettente, argento, 6mm</i>	5,1	0,4	0,32
<i>Vetro colorato, bronzo, 8mm</i>	5,7	0,49	0,33
<i>Vetro camera</i>			
<i>Vetro chiaro+chiaro,4-15-4</i>	2,7	0,76	0,81
<i>Vetro chiaro+chiaro B.E.4-15-4 (aria)</i>	1,5	0,75	0,8
<i>Vetro chiaro+chiaro B.E.4-15-4 (argon)</i>	1,3	0,75	0,8
<i>Vetro chiaro+riflettente 8-12-8 (aria)</i>	2,8	0,38	0,47

Tabella 6. - Valori di trasmittanza termica, fattore solare e fattore di trasmissione luminosa per alcuni tipi di componenti trasparenti. Fonte: Manuale del vetro, Saint Gobain Glass, 2000.

Sono disponibili vetri cosiddetti “a controllo solare” composti di uno strato di vetro esterno la cui faccia interna è rivestita con una sottilissima deposizione metallica (coating) capace di impedire l'ingresso di una larga frazione della energia solare incidente. Questi vetri consentono di ridurre problemi di eccessivi guadagni solari in estate riducendo, per contro, i guadagni solari in inverno e la frazione di luce naturale che filtra attraverso di essi. Più utili per la riduzione dei guadagni solari, senza penalizzare l'illuminazione naturale, nel contesto delle abitazioni, possono essere i vetri “selettivi” (figura 17.), che riflettono la maggior parte dell'infrarosso vicino (cioè la parte termica della radiazione solare) ma sono molto trasparenti alla luce (cioè la parte visibile dello spettro solare -tra 380 e 780 nm circa-). Il grado di selettività si descrive col rapporto tra trasmittanza visibile e fattore solare.

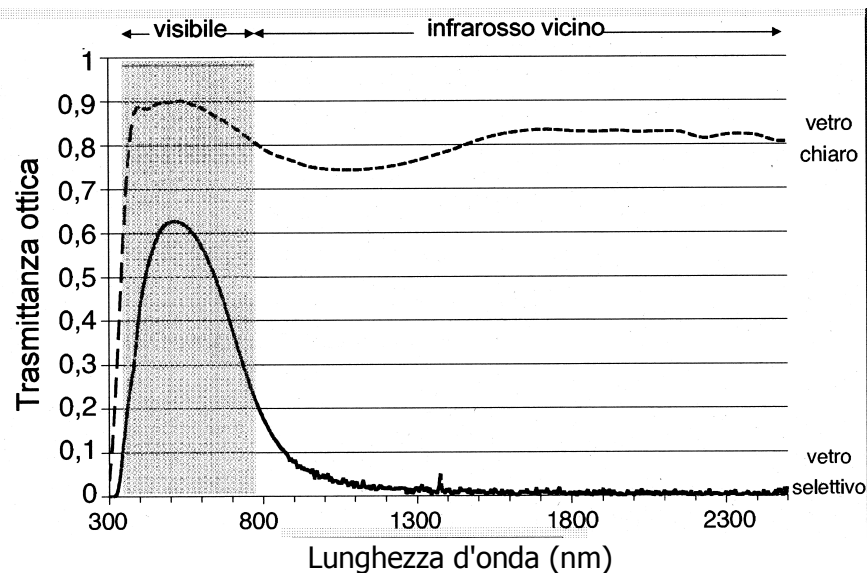


Figura 17. - Trasmittanza visibile di un vetro chiaro e di un vetro selettivo a confronto; si noti che il vetro selettivo è opaco alla parte termica della radiazione solare (infrarosso vicino).

Gli apporti gratuiti di calore sensibile, per la zona dell'edificio e per il periodo considerato (24h) , sono calcolati, secondo quanto indicato dalla prEN ISO 13790, come somma degli apporti solari attraverso le chiusure trasparenti e degli apporti endogeni:

$$\Theta_{App} = \Theta_I + \Theta_S \quad [MJ]$$

dove

Θ_I apporti gratuiti di calore sensibile dovuti alle sorgenti interne, nel periodo considerato;

Θ_S apporti gratuiti di calore per trasmissione della radiazione solare attraverso le superfici vetrate, nel periodo considerato.

La determinazione degli apporti gratuiti per trasmissione della radiazione solare, con riferimento alle chiusure trasparenti, può essere fatta attraverso la seguente espressione:

$$\Theta_S = \sum_{[j=1 \leftrightarrow n]} A_{s j} \cdot I_j$$

dove, per ciascuna esposizione j :

I energia totale della radiazione solare globale, ovvero, l'irraggiamento medio giornaliero, nel giorno tipo del mese in esame, in funzione dell'orientamento ed inclinazione della superficie di captazione, alla data latitudine $[MJ/m^2]$;

A_s area effettiva complessiva delle superfici di raccolta [m²].

L'area effettiva complessiva è determinabile come somma dell'area effettiva di ciascuna chiusura, avente identica esposizione:

$$\mathbf{A}_s = \sum_{[i=1 \leftrightarrow n]} \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{g}_i$$

dove, per ciascuna chiusura *i* :

A area totale [m²] ;

F coefficiente di correzione dovuto all'ombreggiatura, è dato da: **F = (1 - F_{ombr})**

F_{ombr} rappresenta il fattore di ombreggiamento dovuto all'orografia del territorio, alla presenza di edifici, alberi o schermi in prossimità della chiusura considerata.

Utilizzando il metodo Diacronico, **F_{ombr}** può essere determinato, per ciascun giorno tipo dei mesi di raffrescamento, calcolando il rapporto tra le ore (corrispondenti alle tacche delle curve dei percorsi solari) durante le quali il componente trasparente risulta ombreggiato per effetto dello schermo, orografia, presenza di edifici, alberi, etc, e quelle totali, per l'esposizione che si sta considerando, in assenza di ostruzioni, determinando quindi un valore medio del periodo. (A rigore dovrebbero essere considerate solamente le ore per le quali i raggi solari risultano ortogonali alla superficie e trascurate quelle con angoli di incidenza elevati.) ;

g fattore solare del componente vetrato.

*Localizzazione e orientamento dell'edificio nel contesto urbano in
relazione ai venti dominanti*

Se per valutare gli effetti (apporti) dovuti all'irradiazione solare si può procedere, come detto, per via qualitativa utilizzando semplicemente i punti cardinali Nord, Sud, Est, Ovest, e le direzioni secondarie, quando, invece ci si appresta a valutare i trasferimenti (dispersioni) di calore sensibile per ventilazione, in particolare quella passante da vento, risulterà necessario, per definire i coefficienti di pressione in corrispondenza delle aperture collocate sulla superficie esterna delle chiusure, valutare l'orientamento in modo quantitativo, determinando l'angolo di incidenza del vento in funzione degli angoli di direzione del vento, e azimutale (angolo esistente tra la perpendicolare alla parete sopravento e la direzione nord) misurati in senso orario dal semiasse Nord. I flussi d'aria attraverso un edificio sono generati dal differenziale di pressione che si stabilisce tra due o più aperture, per effetto sia del vento, sia del gradiente termico. L'orientamento delle facciate dell'edificio in relazione all'esposizione ai venti dominanti, influenza, attraverso i coefficienti di pressione, il valore della portata d'aria da ventilazione naturale controllata passante, generata dal vento, ed in ultima analisi, le dispersioni di calore sensibile per differenza di temperatura tra l'aria interna, e quella di rinnovo, che è funzione diretta di tale portata proveniente dall'esterno dell'ambiente controllato.

Tale differenziale di pressione dipende, per quanto riguarda i flussi generati dal vento, principalmente, dalla variazione dei parametri caratteristici dell'aria: velocità e direzione prevalente del vento. Preliminarmente al calcolo delle portate d'aria, vanno dunque definiti i parametri che caratterizzano la variazione dei campi di

velocità e pressione attorno e tra edifici aggregati all'interno di una maglia urbana.

La velocità del vento, costante nel flusso indisturbato, diminuisce progressivamente con l'avvicinarsi al suolo per effetto dell'attrito tra aria e superficie.

Lo spessore d'atmosfera, all'interno del quale tale decremento avviene, si chiama strato limite(δ) e il decremento di velocità del vento segue un profilo che dipende dalla rugosità del terreno.

In figura 18. sono riportati i profili di velocità del vento in tre condizioni tipo di rugosità del terreno, o equivalentemente, in condizioni caratterizzate da differenti altezze dello strato limite.

Nota la velocità del vento($\mathbf{v}(\mathbf{z}_{sm})$), in un certo istante, e ad una determinata altezza, ricavata dai dati anemometrici, registrati alla stazione meteorologica più vicina al sito considerato è possibile determinare la velocità del vento ($\mathbf{v}(\mathbf{z}_{se})$) [m/s], nel medesimo istante, in un punto dell'involucro edilizio (nel metodo di calcolo presentato, si considera l'altezza di gronda dell'edificio), tramite la seguente equazione nella quale il pedice “sm” sta ad indicare i parametri caratteristici della stazione meteorologica di riferimento, mentre il pedice “se” quelli relativi al sito dell'edificio in esame.

$$\mathbf{v}(\mathbf{z}_{se}) = \mathbf{v}(\mathbf{z}_{sm}) \cdot \left(\frac{\delta_{sm}^{\mu_{sm}}}{z_{sm}} \right) \cdot \left(\frac{z_{se}}{\delta_{se}^{\mu_{se}}} \right)$$

valori standard dei parametri μ (esponente del profilo di velocità del vento, caratteristico della rugosità del terreno) e δ sono presentati in tabella 7.

Tipo di rugosità del terreno	μ	δ
Pianura aperta con poche costruzioni basse e sparse	0,12	270 m
Terreno pianeggiante con ostruzioni sparse (alberi, casupole)	0,26	330 m
Terreno corrugato con ostacoli più alti di un piano fuori terra	0,34	390 m
Area suburbana a media densità edilizia	0,38	450 m
Area urbana centrale a alta densità edilizia	0,45	510 m

Tabella 7. - Parametri caratteristici del profilo di velocità del vento, per vari tipi di rugosità del terreno.

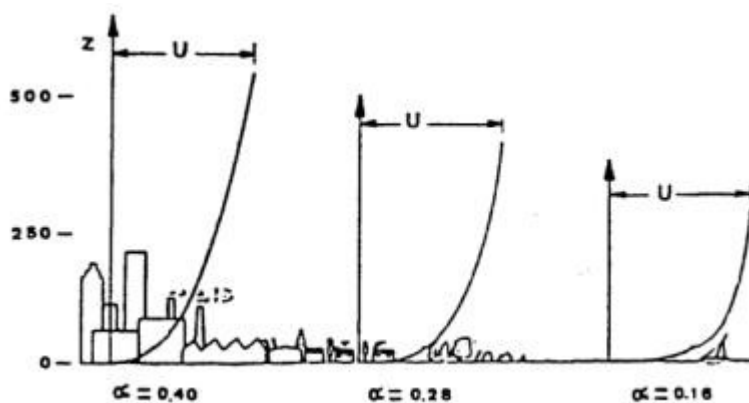


Figura 18. - Profili altimetrici della velocità relativa del vento, al variare dell'altezza dello strato limite, ovvero della configurazione del terreno.

Già a scala topoclimatica, dunque, l'influenza della crosta urbana sui flussi d'aria, cioè, la riduzione della velocità del vento in area ad alta densità edilizia rispetto alla campagna aperta circostante, determina un aumento di temperatura dell'isola di calore urbana, diminuendo la potenzialità del vento di raffreddare gli spazi urbani e gli edifici.

Le forze motrici del flusso d'aria necessario per indurre raffreddamento ventilativo sono il vento e il gradiente termico, utilizzate in modo intenzionale e controllato. La movimentazione controllata dei flussi d'aria, necessaria per ottenere il raffreddamento, è determinata dalla differenza di pressione che si stabilisce -per effetto del vento e/o della differenza di temperatura dell'aria tra esterno ed interno- tra due aperture, una d'ingresso,

l'altra d'uscita, dell'aria. Affinchè la ventilazione sia efficace per il raffrescamento si deve realizzare un flusso passante, vale a dire tra aperture collocate su chiusure diverse di un edificio, o ad altezze diverse della stessa parete esterna (la ventilazione a lato singolo -attuata con una sola apertura o aperture sulla stessa parete esterna alla stessa altezza- è di tipo pulsante, provocata quasi esclusivamente dalle variazioni istantanee di direzione del vento e, quindi, non adeguata a determinare le portate necessarie per il raffrescamento) .

Si definisce ventilazione passante orizzontale il flusso d'aria che attraversa uno o più locali, con immissione e uscita dell'aria da aperture collocate su pareti opposte o adiacenti (ma non complanari), collocate alla stessa altezza dal piano di pavimento (in caso di altezze differenti, si aggiunge al vento la componente verticale effetto camino). La localizzazione delle chiusure in senso orizzontale, lungo il perimetro dell'edificio, influenza pertanto, la ventilazione passante generata dal vento e deve essere rapportata alla direzione del vento stesso. La localizzazione verticale delle chiusure esterne permeabili influisce sulla ventilazione passante, modificandone sia la direzione di flusso -quando esso è generato prevalentemente dal vento- (figura 19.), sia la portata -quando il flusso è innescato da effetto camino-.

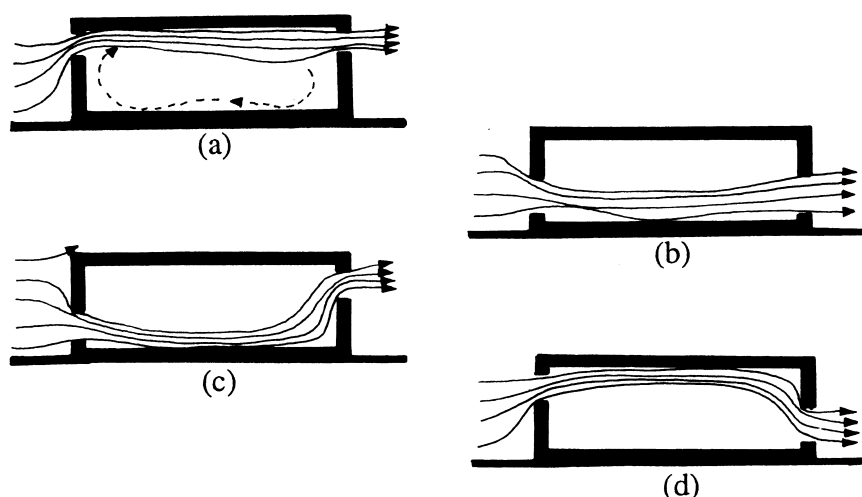


Figura 19. - Nel caso di ventilazione da vento, la collocazione verticale delle chiusure di ingresso e uscita è determinante in relazione allo scopo del movimento d'aria :se l'obiettivo è il raffrescamento corporeo, le chiusure devono essere collocate ad altezza d'uomo (b); se l'obiettivo è il raffrescamento della massa, la chiusura d'ingresso (e non necessariamente anche quella d'uscita) deve essere posizionata vicino alla massa da raffrescare, ovvero vicino al soffitto (a) (d) o al pavimento (c)

Nei camini di ventilazione, quando il flusso è innescato da gradiente termico, la localizzazione delle chiusure in senso verticale influenza il movimento dell'aria; la forza estrattiva è generata dal differenziale di pressione (si instaura un flusso ascendente di aria entrante esterna, a temperatura minore di quella interna, che riscaldandosi all'interno dell'ambiente, sale per differenza di densità nel vano che funziona da camino di ventilazione, e ingenera depressione sulla chiusura d'uscita del flusso) dipendente prevalentemente, dalla distanza verticale e area tra le aperture di ingresso e uscita del flusso, oltre che dalla relazione tra i livelli di temperatura dell'aria, esterno ed interno. Per quanto riguarda la ventilazione passante combinata -da vento e per effetto camino- si deve assolutamente evitare che i due fattori entrino in conflitto tra loro, in altre parole che l'aria uscente per effetto del gradiente di densità si contrapponga ad un flusso in entrata prodotto dal vento; ciò si evita collocando l'apertura più alta, d'uscita del flusso, in posizione sottovento, rispetto alla direzione prevalente. L'utilizzo di finestre a torrino sul tetto, o di altra apertura d'estrazione dell'aria che sfrutti il meccanismo Bernoulli-Venturi al fine di aumentare l'effetto di suzione del flusso, prodotto dal camino termico, consente un'azione sinergica dei due effetti, inducendo una zona di depressione in prossimità del colmo del tetto. (figura 20.) Tali sistemi sono particolarmente adatti in condizioni di vento prevalente relativamente costante, nel periodo caldo, nonché in situazione di contesto urbano ad alta densità edificata, in cui risulta difficile utilizzare aperture ordinarie (finestre) collocate a livello del vano per l'immissione di aria, soprattutto ai primi piani fuori terra.

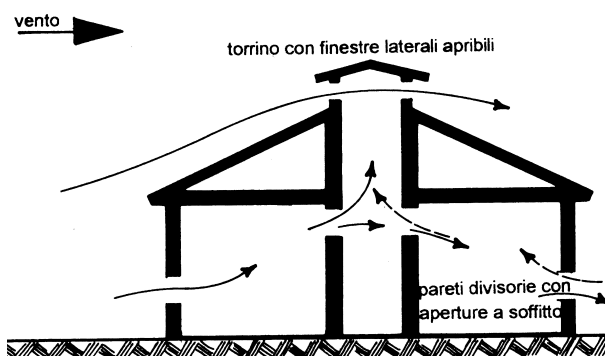


Figura 20. - Utilizzo di finestre a torrino sul tetto ,per incrementare, senza l'ausilio di ventilatori, la ventilazione naturale ad estrazione favorita dall'effetto camino: si incrementano i flussi d'aria entrante ed uscente da un edificio.

A rigore, per determinare i gradienti di pressione che si ingenerano dall'effetto dinamico del vento, attraverso le aperture, necessari per realizzare l'immissione di aria fresca esterna e l'estrazione di aria interna viziata, è necessario conoscere, oltre alla pressione totale esercitata sulla facciata di un edificio, in un determinato punto a data altezza, incrementata, o diminuita rispetto a quella atmosferica per effetto del vento (Il flusso d'aria causato dal vento intorno e sopra un edificio, inoltre, determina delle zone nelle quali la pressione dinamica è superiore o inferiore a quella esistente nella corrente d'aria indisturbata), anche il valore della pressione all'interno dell'ambiente confinato.

Nel caso di edifici multizona di una certa complessità (ovvero con molte aperture e percorsi di flusso) risulta necessario ricorrere a modelli a rete per il calcolo della pressione interna e dei flussi d'aria, che risolvono le equazioni di bilancio di massa (uguaglianza dei flussi entranti ed uscenti) in ogni nodo, utilizzando processi iterativi. In edifici monozona dal punto di vista aerodinamico -la "zona aerodinamica" è qui intesa come uno spazio volumico in cui le eventuali partizioni non alterano in modo significativo le differenze di pressione tra interno ed esterno e, quindi, le portate d'aria entranti ed uscenti dallo spazio stesso- o comunque assumibili come tali, la pressione interna può essere determinata, con un livello di approssimazione sufficiente per verifiche a livello di progettazione preliminare, assumendo che la pressione interna di riferimento sia pari alla pressione atmosferica esterna.

Ciò equivale a dire che il flusso generato dal vento sia funzione esclusivamente della differenza tra le pressioni esterne sul lato sopravvento e quelle sul lato sottovento. Le differenze di pressione sono positive nei lati dell'edificio sopravvento, dando luogo a ingressi di aria all'interno, e negative nei lati sottovento dando luogo a uscite di aria. Sugli altri lati dell'edificio le differenze di pressione possono essere positive o negative in funzione dell'angolo di incidenza del vento rispetto alle superfici verticali od orizzontali.

La portata d'aria realizzabile è proporzionale all'area netta di apertura, all'angolo di incidenza del vento sul piano dell'apertura e alla differenza di pressione tra le due aperture.

Tale differenza è massima per aperture collocate, rispettivamente, quella d'ingresso dell'aria sul lato sovrappressione, e quella d'uscita, sul lato in depressione (generalmente, ciò accade quando le aperture sono collocate su pareti opposte), con angolo d'incidenza del vento compreso tra la perpendicolare e 30° .

L'efficacia della ventilazione dipende, altresì, dalla profondità del vano libero in rapporto all'altezza del vano stesso e dell'eventuale presenza di partizioni, che aumentano la resistenza al flusso, riducendo ulteriormente la portata d'aria.

La portata d'aria da ventilazione naturale controllata, passante, generata dal vento, può essere calcolata con procedure differenziate più o meno semplificate, in relazione alla tipologia distributiva degli elementi spaziali considerati.

In un elemento spaziale singolo, con due chiusure esterne permeabili (all'aria) collocate su facciate opposte, con area netta d'apertura **A₁** e **A₂**, e con coefficienti di pressione sulla superficie esterna delle chiusure stesse, rispettivamente **C_{p1}** e **C_{p2}**, il differenziale di pressione tra le due chiusure, generante il flusso, è dato dalla seguente espressione:

$$\Delta p_{(\text{vento})} = 0,5 \cdot \rho_o \cdot v^2(z_{se}) \cdot (C_{p1} - C_{p2}) \quad (\text{Pa})$$

ed il flusso d'aria attraverso la zona avrà portata:

$$q_{(\text{vento})} = C_d \cdot A \cdot v(z_{se}) \cdot (C_{p1} - C_{p2})^{1/2} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

- ρ_o : densità dell'aria esterna pari circa a $1,2 \text{ kg/m}^3$ a 20°C
- $A = (A_1 + A_2)/2$ nel caso di più aperture, collocate sulla parete sovrappressione e/o su quella sottopressione, si sommano le rispettive aree nette e se ne fa la media, inoltre in tale evenienza, i valori dei coefficienti di pressione sono sostituiti dai valori medi dei coefficienti delle chiusure, rispettivamente, di una e dell'altra parete.
- C_d : coefficiente di scarico dovuto al passaggio di un flusso di fluido non ideale attraverso orifici a spigolo vivo. Tale coefficiente varia con il rapporto tra le dimensioni perpendicolare e longitudinale dell'apertura, rispetto alla direzione di flusso. Un coefficiente pari a 1 significa conservazione dell'energia e della massa al passaggio attraverso le aperture, ovvero il caso ideale. Un valore universalmente accettato di questo coefficiente è, per un serramento verticale esterno, 0,5, ma può arrivare fino a 0,65; si attribuisce, invece, convenzionalmente, un valore di 0,9 per le aperture interne.
- C_{p1} e C_{p2} : I coefficienti di pressione in funzione: della quota della chiusura considerata, dell'angolo di incidenza del vento, della configurazione geometrica, e dei relativi rapporti dimensionali di un corpo di fabbrica, nonché dell'orientamento dello stesso rispetto alla direzione del vento prevalente (media nei mesi non invernali, in quanto in questi ultimi la forza motrice dominante della ventilazione naturale è l'effetto camino), influenzano la portata d'aria

potenziale da ventilazione naturale passante in modo indiretto: essi determinano, infatti, variazioni relative (rispetto alla pressione dinamica di riferimento in flusso indisturbato), tra un punto e l'altro dell'involucro edilizio, della pressione esercitata dal vento sullo stesso. Tali variazioni sono descritte dal coefficiente di pressione **C_p** definito come il rapporto tra la pressione totale (statica + dinamica) esercitata su un punto dell'involucro e quella dinamica, misurata o calcolata ad un' altezza di riferimento (generalmente l'altezza di gronda dell'edificio), in flusso indisturbato. Il coefficiente di pressione può essere: positivo, ed indica un incremento della pressione rispetto a quella atmosferica, con forza esercitata verso l'interno dell'edificio; negativo, ed indica un decremento della pressione con forza esercitata verso l'esterno. Se la determinazione della pressione viene effettuata in corrispondenza di aperture, nel primo caso si avrà un flusso d'aria entrante, nel secondo un flusso d'aria uscente. Nel caso di edificio isolato di dimensione limitata (non più di due piani fuori terra, e con rapporti L/H e $W/H \leq 2$) i valori di **C_p** sono quelli medi di facciata, desumibili dalla tabella 8.

La determinazione dell'angolo di incidenza del vento sulla facciata sopravento e delle posizioni reciproche delle facciate laterali sottovento, per il calcolo del **C_p**, dipende dalle relazioni tra le coordinate angolari dell'edificio e del vento come indicato in figura 21.

$1,5 < H/W \leq 6$	$1 < L/W \leq 1,5$	A	$-1,6 \cdot \Theta/90 + 0,8$
		B	$-0,55 \cdot \Theta/90 - 0,25$
		C	$1,6 \cdot \Theta/90 - 0,8$
		D	$0,55 \cdot \Theta/90 - 0,8$
	$1,5 < L/W \leq 4$	A	$-1,2 \cdot \Theta/90 + 0,7$
		B	$-0,1 \cdot \Theta/90 - 0,4$
		C	$1,5 \cdot \Theta/90 - 0,7$
		D	$0,6 \cdot \Theta/90 - 0,7$

Tabella 8. - Formule per il calcolo del coefficiente di pressione medio di facciata, in funzione dei rapporti di forma dell'edificio, assimilato ad un parallelepipedo. L lunghezza, W larghezza, H altezza, Θ angolo d'incidenza del vento sulle facciate, A facciata sopravento $\Theta \leq 45^\circ$, B facciata sottovento opposta, C facciata laterale verso la direzione del vento, D facciata laterale lontana dalla direzione del vento (fig. 22.)

Nel caso di ventilazione passante attraverso chiusure permeabili, esterne e interne, collocate sulle pareti di vani adiacenti in serie, lungo la direzione di flusso, tra due facciate esterne opposte, (figura 22.) la portata d'aria da vento può essere calcolata tramite la seguente espressione, che non tiene conto delle perdite di moto dovute all'attrito :

$$q_{(\text{vento})} = v(z_{se}) \cdot \left(\frac{C_{p+} - C_{p-}}{1/(C_{d1} \cdot A_1)^2 + 1/(C_{d2} \cdot A_2)^2 + \dots + 1/(C_{dn} \cdot A_n)^2} \right)^{1/2}$$

- C_{p+} : coefficiente di pressione del vento sull'apertura d'ingresso dell'aria, o medio sulla facciata sopravento ;
- C_{p-} : coefficiente di pressione del vento sull'apertura d'uscita dell'aria , o medio sulla facciata sottovento ;
- i pedici $1, 2, \dots, n$, indicano le varie aperture.

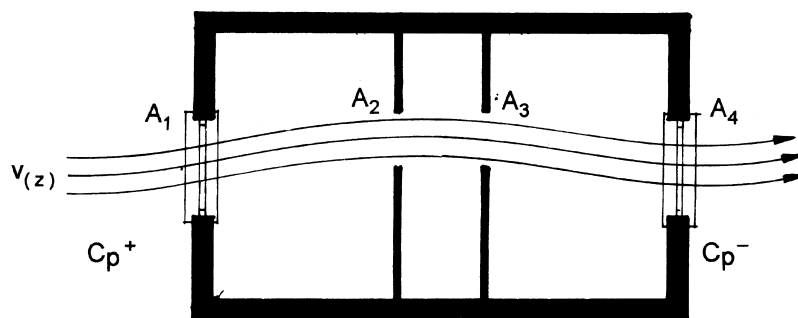


Figura 22. - Parametri per il calcolo semplificato della portata d'aria attraverso aperture e vani in serie, nel caso di ventilazione passante da vento, i segni + e - indicano, rispettivamente, sovrappressione e depressione.

- Nel caso in cui il vento sia obliquo, rispetto alla facciata in cui sono collocate le chiusure permeabili sopravvento, l'area netta **A** di apertura delle chiusure stesse deve essere ridotta di un fattore pari al coseno dell'angolo d'incidenza del vento.
- Il coefficiente di scarico **Cd** di ogni apertura dipende dalle seguenti caratteristiche :
 - 1) posizione dell'apertura sulla parete e rapporto tra area netta dell'apertura **A** e area totale della parete **A_{parete}** (o area della sezione trasversale al flusso del vano comprendente l'apertura stessa **A_{trasv}**) ;
 - 2) rapporto tra le dimensioni dell'apertura **LA/HA** e dimensioni della sezione trasversale al flusso **L_{trasv}/H_{vano}** del vano comprendente l'apertura ;
 - 3) rapporto tra i valori netti delle aree di apertura di uscita **A_u**, e di ingresso **A_i**, dell'aria.

In tabella 9. sono indicati valori tipici di **Cd** per aperture sia in chiusure esterne, sia in partizioni interne.

La formula per il calcolo della portata d'aria da vento può essere applicata -tenendo conto del livello di approssimazione richiesto- anche a vani in sequenza, collocati lungo percorsi di flusso non lineari (ad esempio con spostamenti laterali, diagonali, perpendicolari, deviazioni a gomito, etc.). In tal caso, si tiene conto della maggiore resistenza del flusso attraverso l'introduzione di ulteriori coefficienti da applicare

al valore di C_d (solo nel caso si presentino tali deviazioni) con valori che vanno da 0,5 a 0,9 a seconda del tipo di interruzione di sequenza del flusso incontrata.

<i>Aperture d'ingresso dell'aria e intermedie</i>		<i>Aperture d'uscita dell'aria</i>	
<i>Caratteristiche geometriche</i>	C_d	A_u / A_i	C_d
<i>Piccole aperture al centro di pareti sottili con $A < 0,1A_{parete}$</i>	0,5 ↔ 0,65	0,1	0,63
<i>Aperture al centro di pareti con $0,1A_{parete} \leq A \leq 0,2A_{parete}$ $L_A/H_A \cong L_{trasv}/H_{vano}$</i>	0,65 ↔ 0,7	0,2	0,64
<i>Aperture $0,1A_{parete} \leq A \leq 0,2A_{parete}$ e un lato in comune con una delle superfici del vano (ad es una porta)</i>	0,7 ↔ 0,8	0,4	0,67
<i>Aperture con $A \cong A_{trasv}$</i>	0,8 ↔ 0,9	0,6	0,71
		0,8	0,81
		1	1

Tabella 9. - Valori tipici del coefficiente di scarico.

La localizzazione degli edifici (che formano la maglia urbana) influenza il potenziale raffrescamento prodotto dal vento all'interno degli edifici stessi, in relazione alla loro forma volumetrica e al loro orientamento. Questi, infatti, determinano le dimensioni della scia prodotta (Figura 23.) quando il flusso d'aria incontra un ostacolo e, quindi, la variazione del campo di velocità e di pressione nella via e attorno agli edifici. Dai dati in Tabella 4. risulta che nel determinare l'ingombro della scia prodotta da un edificio isolato, posto lungo un flusso di vento, e, dunque, i coefficienti di pressione, non sono tanto importanti le dimensioni effettive dell'edificio, quanto le dimensioni relative dello stesso. Le dimensioni della scia hanno, a loro volta, effetti non solo sulla portata d'aria -la quale aumenta con la profondità di scia- e, quindi, sulla potenzialità di raffrescamento all'interno dell'edificio, ma anche sulla velocità del vento a valle dell'edificio, o di qualche altra barriera.

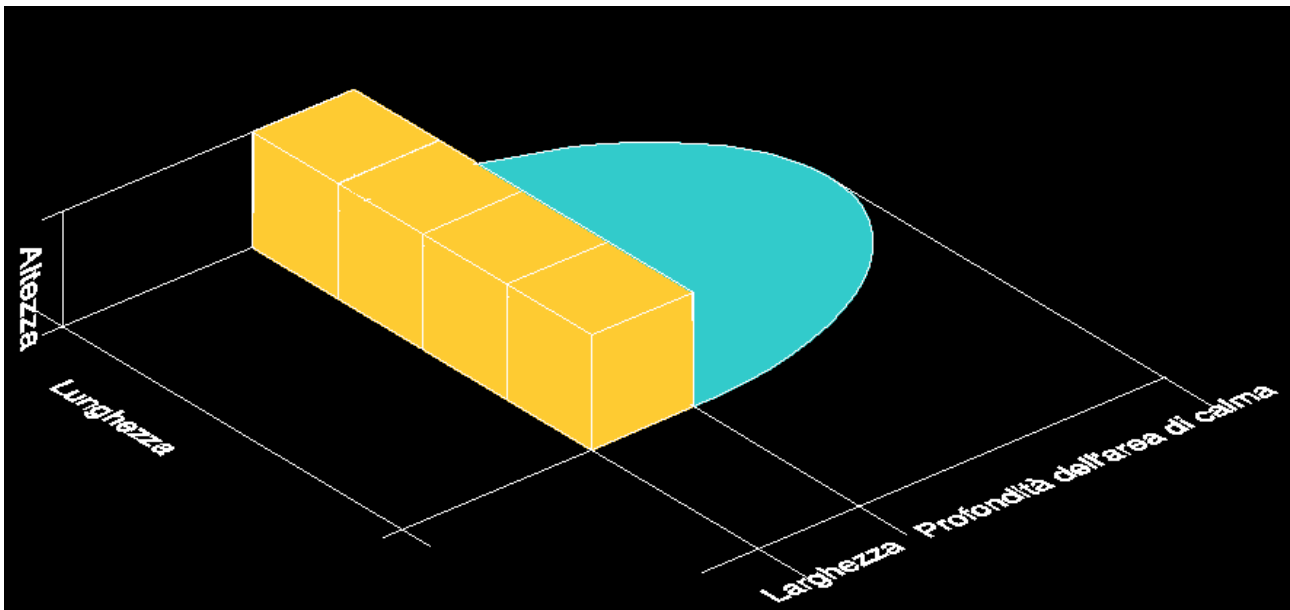


Figura 23

A titolo esemplificativo, si consideri che tale scia (intesa come la porzione del volume d'aria, a valle dell'ostacolo, in cui la velocità si riduce in modo consistente, a meno del 30% della velocità in flusso indisturbato, pertanto caratterizzata dal fatto che il movimento dell'aria al suo esterno è simile a quello in flusso libero, mentre all'interno si hanno condizioni di calma, inoltre al confine tra flusso libero e scia, detto “bolla di separazione”, si riscontra una sostanziale turbolenza, derivata dal trasferimento di moto che avviene tra scia e flusso libero) ha una profondità planimetrica variabile da 3 a 8 volte l'altezza dell'ostacolo stesso, in funzione delle caratteristiche di permeabilità (dalla permeabilità nulla delle pareti solide a valori fino al 70% per barriere vegetali senza foglie) e, nel caso di corpi solidi, della forma geometrica e dei rapporti dimensionali (altezza, lunghezza e larghezza). Quando si considerano più edifici raggruppati, dunque, essi producono una modificazione del campo di flusso d'aria che li attraversa dipendente dalla collocazione e dall'altezza relativa, reciproche, degli edifici stessi, nonché dalla densità con cui essi sono collocati sul territorio. La velocità del vento attorno e tra gli edifici di una città varia considerevolmente, in funzione del rapporto tra direzione del vento e allineamento delle vie. Considerando il tracciato urbano di tipo ortogonale a maglia aperta,

ovvero con edifici in linea, quando la direzione del vento è parallela ad uno dei due assi, si stabiliscono due diversi modelli di comportamento: a) nelle vie parallele alla direzione del vento, la riduzione della velocità dovuta all'attrito con le pareti della via, rispetto a quella in flusso libero (sopravento agli edifici), è minima e si può avere addirittura un aumento della velocità del vento, negli spazi tra le testate degli edifici, se la via è perpendicolare all'allineamento degli edifici stessi; b) le vie perpendicolari alla direzione del vento sono caratterizzate da una notevole riduzione della velocità, dovuta all'effetto barriera.

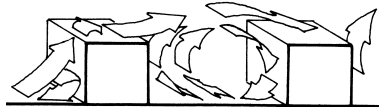
Se la direzione del vento è diagonale alla maglia urbana, e gli edifici sono di media altezza, con un rapporto di confrontanza $h/d = 2$, si verificano condizioni molto diverse sui due lati della via: sul marciapiede sottovento si avvertirà una velocità molto maggiore che su quello sopravvento, per effetto dell'incanalamento di flusso e della sua accelerazione agli angoli delle vie.

In relazione alla complessità e alla stocasticità della dinamica dei venti in un tessuto urbano, gli studi sperimentali sistematici in camera del vento condotti su tale fenomeno utilizzano generalmente modelli con dimensioni e layout parametrizzabili e, quindi, modulari. Nel caso di edifici di altezza simile e disposti in modo relativamente regolare, su tracciato a maglia ortogonale, si possono verificare tre tipi di regime di flusso in funzione della loro densità planimetrica:

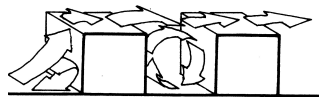
regime di flusso da ostacolo isolato, quando gli edifici sono così distanti gli uni dagli altri da produrre, sul flusso d'aria, effetti simili a quelli di un edificio isolato; scia e bolla di separazione si sviluppano completamente attorno ad ogni edificio ed il riattaccamento della bolla al suolo avviene prima che l'edificio più prossimo possa esserne raggiunto;



regime di flusso a scie interferenti, quando gli edifici sono abbastanza ravvicinati da non permettere, alla bolla di separazione associata ad ognuno di essi, di svilupparsi completamente; si ha, quindi, interferenza tra le scie dei diversi edifici, con aumento delle zone di turbolenza;



regime di flusso pseudo-laminare, quando gli edifici sono così vicini tra di loro da creare vortici d'aria stabili, negli spazi interstiziali ortogonali alla direzione del vento, ed un flusso pressoché laminare al di sopra dei tetti, quasi come se essi appartenessero ad una superficie piana unica su cui scivola il flusso d'aria.



La distribuzione planimetrica di un insieme di edifici deve essere tale, dal punto di vista del raffrescamento ventilativo, da evitare i regimi di flusso a scia interferente, o quelli pseudo-laminari, che inducono una riduzione significativa della velocità del vento a valle della fila di edifici che incontra per prima il vento. Ciò implica una distanza tra gli edifici considerevole, che, soprattutto in aree urbane, può essere eccessivamente penalizzante rispetto al volume costruibile. In alternativa, si può ottenere un risultato soddisfacente per la ventilazione, a parità di densità volumetrica, collocando gli edifici a scacchiera o in diagonale rispetto alla direzione del vento. Se la densità di edificazione richiesta non consente di evitare una eccessiva riduzione della velocità del vento con alcuna delle configurazioni planimetriche sopra prospettate, l'unica soluzione possibile per garantire un'efficace raffrescamento ventilativo è lo sviluppo in verticale della volumetria, con altezze

diversificate tra gli edifici. In ogni caso, sono da evitare situazioni che potrebbero causare condizioni di discomfort ai pedoni, quali l'eccessiva vicinanza degli edifici a livello di testata, che provoca una brusca accelerazione del flusso di vento per effetto Venturi. Per le analisi specifiche, si possono utilizzare diagrammi desunti da sperimentazioni effettuate in galleria del vento su modelli modulari di edifici. Studi sperimentali in camera del vento sono stati condotti per valutare l'effetto dell'altezza degli edifici e dello spazio tra di essi, in un tessuto urbano a maglia ortogonale, con vento perpendicolare all'allineamento degli edifici. Da tali studi si è rilevato che, se gli edifici sono allineati in parallelo, la variazione della distanza tra gli edifici e, quindi, della densità planimetrica dell'area, non ha significativi effetti sulla riduzione della velocità dell'aria negli spazi interstiziali. Tale fenomeno è dovuto al fatto che la prima linea di edifici devia il flusso verso l'alto, lasciando gli edifici successivi in "ombra di vento", e determinando quindi un regime di flusso, tra i tre sopra descritti per gli edifici aggregati, di tipo *pseudo-laminare*.

In tabella 10 sono riportate le percentuali di riduzione della velocità del vento, negli spazi tra nove linee di edifici di diversa altezza e distanza, con la presenza, o meno, di una via centrale intersecante perpendicolarmente gli edifici stessi. In generale, la velocità media del vento negli spazi protetti, misurata ad un'altezza del modello corrispondente nella realtà, a 5m del suolo, è risultata essere del 30% quella in flusso libero (sopravento agli edifici), alla stessa altezza.

Distanza tra Edif. (m)	Altezza Edifici (m)	Spazi tra le file di edifici															
		1-2		2-3		3-4		4-5		5-6		6-7		7-8		8-9	
		C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I	C	I
	12	41	26	30	28	26	16	22	19	22	18	19	16	16	16	13	14
12	24	38	25	28	24	26	24	23	24	18	20	21	20	19	21	15	17
	36	30	54	25	41	16	26	17	17	13	15	10	13	11	12	13	13
	12	35	31	28	29	25	22	20	24	19	23	17	22	16	20	-	-
24	24	62	36	45	27	34	25	28	21	27	21	25	21	23	22	-	-
	36	54	67	49	53	35	35	29	29	23	24	18	23	20	24	-	-
	12	40	41	33	37	28	32	24	28	24	26	24	28	-	-	-	-
36	24	60	51	40	31	31	30	25	25	24	32	22	36	-	-	-	-
	36	66	81	45	55	32	44	26	35	25	41	26	47	-	-	-	-

Tabella 10. - Velocità relativa del vento (% rispetto alla velocità in flusso libero) negli spazi interstiziali tra 9 file di edifici, continui C, o intersecati da una via centrale I, misurata a 5m dal suolo.

La presenza della via centrale produce effetti in una piccola porzione degli spazi tra gli edifici, all'incrocio con la via stessa. Tale effetto è maggiore, e si fa sentire più in profondità nello spazio interstiziale, quanto più alti sono gli edifici e tanto maggiore è la loro distanza reciproca, come si evince dal confronto tra i valori delle colonne C ed I.

Esperimenti ulteriori, effettuati su modelli a griglia urbana ortogonali in cui sono stati inseriti, tra gli edifici in linea paralleli, alcuni edifici a torre, di diversa altezza, hanno dimostrato che questi ultimi producono l'effetto di diminuire il decremento di velocità del vento negli spazi interstiziali: in media, la velocità relativa del vento, rispetto al flusso libero, che è, come si è visto, del 30%, nel caso di edifici della stessa altezza, varia dal 50 al 60% (in relazione all'altezza), nel caso dell'inserimento delle torri.

Fatta una valutazione dimensionale del campo di flusso d'aria modificato dalla presenza di edifici che ostacolano il vento, in funzione della loro densità planimetrica, collocazione, forma e orientamento, per tener conto degli effetti del campo di flusso

modificato sulla ventilazione e il raffrescamento interni ad un edificio, si ricorre ancora una volta ai coefficienti di pressione. Il coefficiente di pressione dipende, infatti, oltre che dai parametri sopraelencati (rapporti di forma dell'edificio, angolo di incidenza del vento sulla facciata considerata, posizione dell'elemento in esame sulla facciata stessa), anche, e in misura significativa, dalla densità urbana dell'area immediatamente circostante l'edificio in esame, nonché dall'altezza dell'edificio stesso in rapporto agli edifici circostanti.

La distribuzione dei coefficienti di pressione sull'involucro di un edificio al variare dei parametri sopra citati viene fatta sperimentalmente attraverso prove su modelli condotte in camera del vento, predisposte per simulare gli effetti su un edificio dello strato limite territoriale. Da tali esperimenti, basati su misure del C_p al variare di diversi parametri ambientali e geometrici, sono state ricavate curve di correlazione, basate sull'analisi statistica di migliaia di dati sperimentali, che descrivono tali effetti, rendendo disponibili modelli per il calcolo automatico dettagliato dei coefficienti di pressione su un edificio.

L'effetto della riduzione della velocità del vento negli spazi interstiziali urbani sul benessere termico dei cittadini è sinergico a quelli prodotti dall'isola di calore; diminuendo, cioè, la potenzialità del vento di raffrescare gli spazi urbani e gli edifici, si incrementa ulteriormente l'incremento di temperatura della chioma urbana rispetto alla campagna aperta. Tale incremento è, dunque, tanto maggiore quanto più è ventilata la zona in cui è localizzata la città. Dai risultati delle sperimentazioni sopra accennate, si ricava una considerazione in qualche modo contro-tendenza rispetto alla linea di sviluppo urbano "in orizzontale" che ha caratterizzato, e caratterizza tuttora, le città italiane: un incremento di densità urbana può produrre effetti benefici sul raffrescamento complessivo della città, diminuendo gli effetti dell'isola di calore urbana, purchè si sviluppi in altezza e non planimetricamente.

Generalmente, più alta è la densità urbana di un'area, minore è la sua potenzialità di ventilazione, tuttavia quest'ultima dipende anche dalla configurazione tipologica e distributiva degli edifici. Per una data densità del costruito, le migliori condizioni di ventilazione urbana ed edilizia e, quindi, le migliori condizioni di comfort, si ottengono con una distribuzione della volumetria in edifici a torre, opportunamente distanziati gli uni dagli altri. Tale configurazione infatti determina il trasferimento del momento di inerzia, che il vento acquista ai piani alti della torre, al livello del terreno, con conseguente aumento della velocità del vento al suolo e mescolamento dell'aria vicino al terreno con l'aria più fredda proveniente dall'alto, oltre a migliorare le condizioni di comfort per gli abitanti, che, con tale configurazione, vivono in maggior numero ai piani alti degli edifici e, quindi, risentono dei benefici effetti dei diminuiti valori, rispetto al suolo, della temperatura dell'aria.

Il buon orientamento dell'edificio è un prerequisito importante in tutte le aree climatiche. Nella localizzazione dei corpi di fabbrica residenziali, sia rispetto agli edifici esistenti, sia rispetto agli edifici in progetto, si deve tener conto dell'influenza aerodinamica di un corpo rispetto all'altro.

In particolare, si deve fare in modo che le facciate degli edifici residenziali in cui sono collocate, in prevalenza, le chiusure esterne permeabili (finestre apribili o griglie di ventilazione) non siano coperte -o lo siano in minima parte- dalla scia di ostacoli posti sopravento lungo la direzione prevalente del vento (nei mesi non invernali).

Tuttavia non si è sempre liberi di poter realizzare la conformazione migliore a causa di limitazioni esterne quale, ad esempio le caratteristiche del tessuto urbano. In questi casi è necessario adottare altri metodi per compensare il più possibile l'effetto di un orientamento non adeguato.

Il controllo dei flussi d'aria fa riferimento all'influenza della morfologia urbana ed edilizia, e delle barriere artificiali e vegetali,

sulla dinamica dei flussi d'aria generati dal vento, negli spazi esterni, preesistenti e di progetto, del sito in esame.

Riferendosi a spazi esterni, e a dinamiche altamente variabili come quella del vento, il termine “controllo” comprende, qui, operazioni che influenzano i parametri caratteristici dei flussi d'aria -direzione e velocità- senza, tuttavia, poterne determinare i valori voluti. L'obiettivo generale di tale operazione è quello di utilizzare la risorsa climatica (esterna) vento per agevolare il raggiungimento di condizioni di benessere termico negli spazi interni. Se l'edificio da costruirsi deve essere inserito in un ambito già edificato, la localizzazione ottimale è quella che espone l'edificio stesso ai venti dominanti estivi, proteggendolo da quelli invernali. Ciò è possibile in quanto, generalmente, queste due direzioni di vento non coincidono.

Tali considerazioni, così come ogni valutazione derivante da analisi sperimentali necessariamente astratte, hanno carattere generale e vanno commisurate con la realtà specifica in cui si opera. Il grado di complessità di quest'ultima è, a tuttoggi, difficilmente simulabile. Le informazioni qui riportate possono, tuttavia, rappresentare un utile strumento per la comprensione del fenomeno microclimatico urbano e per aumentarne le possibilità di controllo. Preliminarmente all'individuazione delle strategie più appropriate per il sito specifico, si rende, dunque, necessaria un'analisi accurata del regime dei venti.

Tale analisi si deve basare su una serie di operazioni raggruppabili nelle seguenti fasi :

- reperimento di dati sulla ventosità -velocità media e massima, direzione prevalente, in mesi tipo, rappresentativi delle stagioni- riferiti alla stazione meteorologica più vicina al sito in esame;
- correzione di tali dati, sulla base di correlazioni empiriche, per tenere conto delle condizioni geomorfologiche specifiche del sito;
- valutazione di tipo qualitativo, sulla base di risultati di studi

parametrici sperimentali, dei flussi d'aria attorno agli edifici, esistenti e di progetto, al fine di determinare le zone degli spazi esterni esposte, e quelle protette, rispetto alle direzioni del vento stagionali prevalenti.

Sulla base dei risultati delle operazioni summenzionate, il controllo dei flussi d'aria ai fini del benessere termico può essere attuato, principalmente, attraverso le seguenti azioni progettuali e tecnologiche :

- localizzazione, rapporti di confrontanza e geometria appropriata, degli edifici che compongono il contesto in progetto (tenendo conto anche degli effetti d'accelerazione della velocità dell'aria, causati da strettoie e vicinanza di spigoli);
- barriere artificiali e/o naturali (filari d'alberi, siepi, macchie arbustive), con funzione di protezione;
- deviatori artificiali e/o naturali (filari d'alberi), con funzione d'incanalamento;
- movimentazione del terreno, con funzione di protezione (avvallamento) e accelerazione (dosso).

Utilizzando il metodo di calcolo semplificato del fabbisogno termico dettato dalla prEN ISO 13790, basato su un approccio quasi stazionario, è possibile valutare il potenziale di raffrescamento della ventilazione naturale controllata, utilizzando valori medi mensili della portata d'aria. Questi possono essere determinati, per una determinata zona termica, utilizzando le procedure descritte, sulla base dei valori medi mensili (media nel giorno tipo di ogni mese) dei parametri climatici da cui dipende il calcolo: velocità e direzione del vento, per i flussi da vento; temperatura dell'aria esterna e interna (per quest'ultima si utilizza il valore di set-point), per i flussi da gradiente termico.

I dati di riferimento, da modificare sulla base delle caratteristiche microclimatiche naturali ed artificiali del sito considerato (riduzione della velocità del vento a causa dell'alta densità urbana,

incremento urbano della temperatura nelle notti serene) possono essere desunte da diverse fonti, dalle cui caratteristiche dipende il livello di dettaglio con cui può essere determinato il valore medio della portata d'aria.

I trasferimenti di calore sensibile per ventilazione (dispersioni se l'aria entrante è più fresca di quella interna) avvengono per differenza di temperatura e possono essere calcolati attraverso le seguenti relazioni:

$$\mathbf{H}_{v,m} = \rho_o \cdot c_a \cdot \tau \cdot f_{u,m} \cdot q_{tot,m}$$

$$\Theta_v = \sum_{[m=1 \leftrightarrow n]} [\mathbf{H}_{v,m} \cdot (\theta_i - \theta_{e,m})]$$

dove, per ciascun ambiente m, da cui proviene il flusso d'aria:

H_v fattore di trasferimento termico per ventilazione [W/K] ;

ρ_o densità dell'aria esterna pari circa a 1,2 kg/m³ a 20°C ;

c_a calore specifico dell'aria [J/(kgK)] ;

τ durata del periodo di tempo considerato, 24h, espressi in [s] ;

f_u fattore di utilizzo del sistema di ventilazione naturale controllata, al fine di tenere conto di una possibile discontinuità nell'utilizzo della VNC, durante il giorno. (un flusso d'aria che attraversa una o più zone di un edificio, determina un trasferimento di calore sensibile in entrata, cioè un apporto, o in uscita, dispersione, a seconda che la temperatura dell'aria entrante sia superiore o inferiore a quella dell'ambiente interno) Viene espresso come frazione dell'unità, ed è rappresentativo della quota, del tempo complessivo, in cui il sistema è utilizzato nel mese considerato. Si deve tener conto, tuttavia, che tale fattore non

è in grado di stimare gli effetti qualitativi del sistema di raffrescamento; ad esempio, un fattore 0,5 che indica un utilizzo della VNC per metà della giornata, tenderà a sopravvalutare gli effetti se essa opera solamente nelle ore diurne, a sottovalutarli se opera nelle ore notturne ;

q_{tot} portata d'aria di rinnovo [m³/s] ;

θ_i ; θ_e temperatura di set-point dell'aria interna, e temperatura media dell'aria di rinnovo (quella della zona termica da cui proviene il flusso o dell'ambiente esterno) nel giorno tipo del mese considerato [°C] .

Il fattore di utilizzo delle dispersioni, η_{Disp} , introdotto al fine di tenere conto degli effetti dinamici della struttura, dipende dal rapporto dispersioni/apporti e dall'inerzia termica dell'edificio. Per ciascun mese, o stagione, e ciascuna zona termica considerata, può essere calcolato attraverso la procedura indicata dalla prEN ISO 13790, descritta di seguito:

- Calcolo del rapporto dispersioni/apporti, λ

$$\lambda = \Theta_{Disp} / \Theta_{App}$$

- Calcolo della capacità termica effettiva, C

$$C = \sum_{[i=1 \leftrightarrow n]} [\sum_{[j=1 \leftrightarrow n]} (\rho_{i,j} \cdot c_{i,j} \cdot d_{i,j} \cdot A_j)] \quad [J/K]$$

dove, per ciascuno strato j, di ciascun elemento i :

ρ densità del materiale [kg/m³] ;

c capacità termica specifica del materiale [J/(kgK)] ;

d spessore dello strato [m] ;

A superficie dell'elemento della zona termica [m²] .

La somma deve essere fatta per tutti gli strati di ciascun elemento, a partire dalla superficie interna fino al primo strato isolante, alla mezzeria dell'elemento stesso, e comunque considerando uno spessore massimo di 10cm (al fine di considerare la capacità termica che viene normalmente coinvolta nei cicli termici diurni).

- Calcolo della costante di tempo, **τ**

$$\tau = C / (H_T + H_V) \quad [s]$$

- Calcolo del fattore di utilizzo delle dispersioni, **η_{Disp}**

$$a = a_o + \tau / \tau_o$$

se $\lambda < 0$ $\eta_{Disp} = 1$

se $\lambda = 1$ $\eta_{Disp} = a / (1 + a)$

se $\lambda > 0 ; \lambda \neq 1$ $\eta_{Disp} = (1 - \lambda^a) / (1 - \lambda^{a+1})$

dove:

a parametro numerico che dipende dalla costante di tempo della zona termica ;

a_o parametro numerico di riferimento, desunto dalla tabella ;

τ_o costante di tempo di riferimento [s] , desunto dalla tabella. .

<i>Tipo di edificio</i>	a_o	τ_o
<i>Edificio raffrescato per più di 12 ore per giorno</i>	1	15
<i>Edificio raffrescato per meno di 12 ore per giorno</i>	0,8	15

Riferimenti bibliografici

- Grosso, M.** , Il raffrescamento passivo degli edifici in zona a clima temperato, *Maggioli editore*, Rimini, 2008
- Grosso, M.** , Il raffrescamento passivo degli edifici, *Maggioli editore*, Rimini, 1997
- A. Mingozi**, “Elementi di metodo per la progettazione ecosostenibile a scala insediativa ed edilizia”, “Clima ed ambiente costruito”, in *AA.VV.*, *Guida alla casa ecologica*, Maggioli Editore, Rimini, 2003
- Givoni, B.** , Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. *Energy and Buildings*, 1991.
- Corrado V. , Fabrizio E.** , Applicazioni di termofisica dell'edificio e climatizzazione, *Clut*, Torino, 2005
- Olgyay, V.** , Progettare con il clima, *Franco Muzio Editore*, Padova, 1981
- Raimondo, L.** “Determinazione del fabbisogno di raffrescamento”, in *Grosso, M.*, *Il raffrescamento passivo degli edifici in zone a clima temperato*, Maggioli, San Arcangelo di Romagna (RN), 2008.
- Baratta, A. Venturi, L.** “Prestazioni termiche di pareti perimetrali in regime dinamico”, *Costruire in laterizio* ,Faenza (marzo-aprile 2008)
- Boeri, A.** “Protezione passiva del calore solare” , *Geoinforma*, Rimini 2007
- L. Agnoletto**, “Involucro edilizio e comportamento energetico”, *Studioemme editore*, Vicenza 1997.
- Campioli, A. Ferrari, S. Lavagna, M.** “Gli involucri edilizi e il rendimento energetico degli edifici”, *Costruire in laterizio* ,Faenza (novembre-dicembre 2006)
- Gargari, C.** “Laterizio: energia e qualità dell'abitare”, *Costruire in laterizio* ,Faenza (luglio-agosto 2006)
- Manuale del vetro**, Saint Gobain Glass, 2000.
- Medola, M.** “Prestazioni termiche dell'involucro edilizio” , *Costruire in laterizio* ,Faenza (luglio-agosto 2007)

Grosso, M., “La risorsa vento per la qualità dell'aria e il benessere”, in *Ambiente costruito*, Maggioli Editore, San Arcangelo di Romagna (RN), 2008.

Piardi, S., “La simulazione del movimento dell'aria” , in *La qualità ambientale degli edifici*, Maggioli Editore, San Arcangelo di Romagna (RN), 2008.

<http://www.rockwool.it/download/pubblicazioni/passivhaus+per+il+sud+dell'europa>

Riferimenti normativi

Comune di Bologna, Settore Ambiente e verde urbano,”Programma Energetico Comunale” ottobre 2007

Regione E.R. “Atto di indirizzo e coordinamento sui requisiti di rendimento energetico...”*requisito 6.4 dell'allegato 3* , Bologna 2008

prEN ISO 13790, *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.*

UNI EN ISO 13786

UNI 832.

UNI En 410

UNI 8178 -Estratto 6 *STRATO DI BARRIERA AL VAPORE.*

UNI 9460 - Estratto- 1.3.4 *Copertura con elemento termoisolante, con strato di Ventilazione.*

U32035110/9.3.1 - Estratto *VENTILAZIONE.*

decreto legislativo del 29.12.2006,n.311, “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n.192, recante attuazione della **Direttiva 2002/91/CE**, relativa al rendimento energetico nell’edilizia”.