

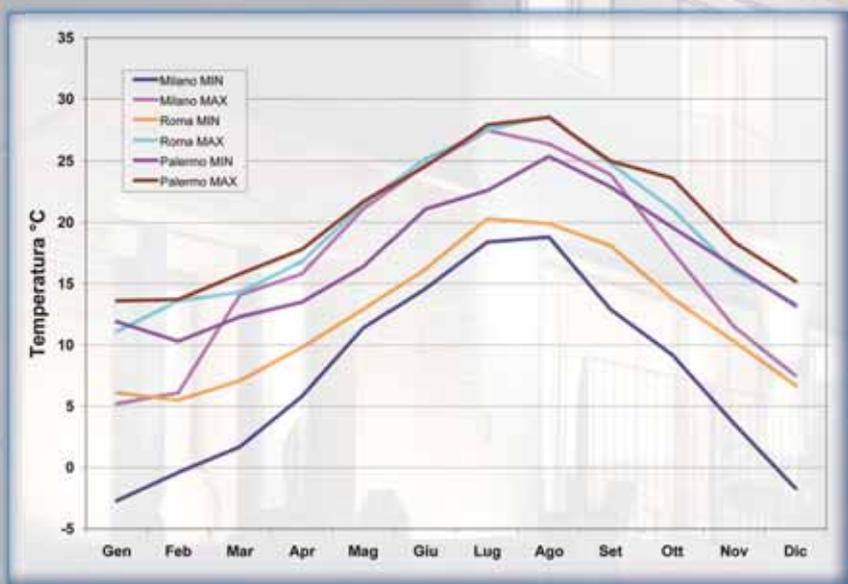
ROCKWOOL®

Passive-On
project

un progetto Europeo coordinato
da eERG-Politecnico di Milano

Passivhaus per il sud dell'Europa

Linee guida per la progettazione



Il progetto **Passive-On** (*"Marketable Passive Homes for Winter and Summer Comfort"* EIE/04/091/S07.38644, 2004-'07) è parte del programma Europeo **Intelligent Energy Europe*** gestito dalla **Executive Agency for Competitiveness and Innovation (EACI)**.



Intelligent Energy  **Europe**

*Le opinioni espresse in questo rapporto sono quelle degli autori e non necessariamente riflettono quelle della Commissione Europea.

Questo rapporto è stato prodotto da end use Efficiency Research Group (www.eerg.it) del Politecnico di Milano, in particolare da Prof. Lorenzo Pagliano (Direttore eERG), Ing. Salvatore Carlucci, Ing. Tommaso Toppi, Ing. Paolo Zangheri.



Sommario

1. Il concetto di Passivhaus e la sua evoluzione per il sud Europa

1.1 Introduzione	pag 3
1.2 Progettazione di edifici passivi a basso consumo	pag 5
1.3 Lo Standard Passivhaus e la sua estensione	pag 6
1.4 Energia e comfort	pag 9

2. Strategie passive di controllo termico degli edifici

2.1 Introduzione	pag 11
2.2 Controllo del microclima e riduzione dei carichi	pag 13
2.2.1 Controllo del microclima nelle zone circostanti l'edificio	pag 14
2.2.2 Forma e tipologia generale	pag 15
2.2.3 Orientamento	pag 16
2.2.4 Schermatura solare da strutture circostanti e propria	pag 16
2.2.5 Albedo	pag 17
2.2.6 Elettrodomestici e illuminazione	pag 18
2.3 Controlli termici passivi	pag 20
2.3.1 Isolamento termico	pag 20
2.3.2 Ponti termici	pag 23
2.3.3 Inerzia termica	pag 24
2.3.4 Trasmittanza termica, trasmittanza visibile e fattore solare delle finestre	pag 25
2.3.5 Ombreggiatura	pag 27
2.3.6 Infiltrazioni e tenuta all'aria	pag 29
2.3.7 Ventilazione	pag 30
2.3.8 Sistemi di recupero del calore	pag 32
2.3.9 Zone cuscinetto	pag 33
2.3.10 Altre strategie passive per la rimozione del calore in estate	pag 34

3. Modelli di Passivhaus ottimizzati per tre climi Italiani

3.1	Contesto climatico	pag 36
3.2	Modello base	pag 38
3.2.1	Geometria dell'edificio	pag 39
3.2.2	Componenti costruttivi	pag 41
3.2.3	Carichi interni	pag 42
3.2.4	Strategie di riscaldamento e raffrescamento	pag 43
3.2.5	Tasso di ricambio d'aria	pag 45
3.2.6	Prestazioni energetiche	pag 46
3.3	Analisi di ottimizzazione	pag 47
3.3.1	Analisi di ottimizzazione sulla permeabilità dell'involucro edilizio	pag 47
3.3.2	Analisi di ottimizzazione sull'isolamento dell'involucro: le superfici trasparenti	pag 48
3.3.3	Analisi di ottimizzazione sull'isolamento dell'involucro: le superfici opache	pag 49
3.3.3.1	Milano	pag 50
3.3.3.2	Roma	pag 52
3.3.3.3	Palermo	pag 53
3.4	Modelli ottimizzati	pag 56
3.5	Analisi di sensitività	pag 57
3.5.1	Variazione Superficie vetrata	pag 57
3.5.2	Variazione rapporto S/V	pag 58
3.5.3	Variazione orientamento	pag 59
3.5.4	Variazione della strategia di controllo della radiazione solare	pag 60
3.5.5	Variazione della strategia di ventilazione notturna	pag 61
3.5.6	Variazione del tasso di ricambio d'aria e dell'efficienza del recuperatore	pag 63
3.6	Analisi di comfort	pag 64

1. Il concetto di Passivhaus e la sua evoluzione per il sud Europa

1.1 Introduzione

Lo sviluppo della società in cui viviamo sta incontrando un insieme 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 allo Standard Passivhaus, nella sua versione originale, 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 sulle prestazioni energetiche degli edifici¹ 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 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 trasporto² 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 termine (o standard) "Passivhaus" non si sostituisce a questo concetto generale e non impone (al contrario di quanto a volte percepito) uno specifico insieme di soluzioni progettuali. Al contrario 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.

Lo Standard Passivhaus, inizialmente focalizzato su consumo e comfort invernali, è stato esteso dai partner del progetto europeo Passive-On³ anche alla considerazione di consumo e comfort nei mesi estivi nei climi del Sud Europa.

Le analisi condotte da questo gruppo di ricerca coordinato da eERG (end-use Efficiency Research Group) del Politecnico di Milano, delineano edifici ottimizzati per i climi del Sud Europa e che soddisfano questa nuova, più completa, definizione di *Passivhaus*.

In particolare, da eERG sono stati sviluppati modelli di Passivhaus ottimizzati per tre climi Italiani (Milano, Roma e Palermo) che forniscono un esempio di un insieme di soluzioni progettuali capaci di soddisfare i

¹Direttiva 2002/91/CE "Sul rendimento energetico nell'edilizia" – Gazzetta ufficiale delle Comunità Europee (4 gennaio 2003).

²Givoni, Baruch: Passive and low energy cooling of buildings, John Wiley, New York, 1994.

³Per maggiori informazioni si veda il sito internet: www.eerg.it

criteri energetici e di comfort del nuovo Standard *Passivhaus* esteso.

Queste soluzioni se confrontate con la loro controparte nord-europea, si caratterizzano per:

- un elevato isolamento termico, con livelli differenziati per clima e per elemento costruttivo (tetto, pareti e superfici a contatto col terreno);
- un livello di tenuta all'aria che può essere leggermente inferiore, soprattutto nelle località più a sud;
- finestre e altre superfici trasparenti dotate di protezioni solari fisse e mobili capaci di intercettare completamente la radiazione solare diretta;
- in estate, ventilazione notturna naturale in alcuni locali e nel vano scale e ventilazione meccanica in altri, per ottimizzare la rimozione del calore e il comfort acustico;
- un eventuale impianto (passivo o attivo) per assolvere alle necessità di raffrescamento residue.

Questa pubblicazione sintetizza le strategie e i risultati più significativi, con cui è possibile orientarsi per impostare la necessaria progettazione di dettaglio per ogni specifico contesto e richieste del committente.



Figura 1.1: Esempio di Passivhaus del Centro Europa.

1.2 Progettazione di edifici passivi o a basso consumo

L'era dei combustibili fossili a basso costo, durata circa 100 anni, sta mostrando una serie di segnali di crisi. In questo lasso di tempo 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.

Dal 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 riscopre i principi della cosiddetta "progettazione passiva".

Come già definito nell'introduzione, il termine "passivo" si riferisce ad edifici in cui le condizioni di comfort (invernale e/o estivo) vengono raggiunte grazie a caratteristiche ottimizzate dell'involucro edilizio e a sistemi di trasporto del calore (pompe o ventilatori) da o verso l'ambiente circostante, che non richiedono l'utilizzo di energia fossile o di altre fonti convenzionali.

Adottiamo qui la definizione classica di Givoni⁴, a proposito del raffrescamento passivo:

"il termine "passivo" (...) non esclude l'uso di un ventilatore o una pompa quando la loro applicazione può innalzare la prestazione. Questo termine enfatizza la 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 (...)", definizione che può essere estesa anche ad altre funzioni assolte dall'edificio, come ad esempio il comfort termico invernale e l'illuminazione.

La "progettazione passiva" è quindi un termine generale, usato per definire un approccio strategico alla progettazione che, primariamente, si affida allo sfruttamento delle risorse climatiche locali per assolvere alle esigenze energetiche dell'edificio.

Questo approccio progettuale è già stato tradotto in numerose realizzazioni, che si distinguono sensibilmente in funzione dei contesti climatici in cui sono inserite e che includono sempre più spesso alcune soluzioni di raffrescamento passivo.

⁴Givoni, B. (1991). Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems. Energy and Buildings, 17, 177-199.

1.3 Lo Standard Passivhaus e la sua estensione

Nel 1991 Wolfgang Feist e Bo Adamson applicarono l'approccio progettuale passivo ad una casa a Darmstadt, con l'obiettivo di fornire, per il clima tedesco, un caso studio di abitazione a basso consumo energetico e costo ragionevole. Il progetto risultò convincente sia in termini di consumo energetico che di comfort interno, tanto che le stesse soluzioni furono applicate anche in una seconda costruzione a Groß-Umstadt nel 1995.

Nel 1998, basandosi sulle esperienze condotte, Feist codificò il progetto passivo delle case di Darmstadt e Groß-Umstadt nello **Standard Passivhaus** che, fondamentalmente, proponeva:

- un limite sul fabbisogno energetico di riscaldamento;
- un requisito di qualità (livello di comfort termico);
- un limite sul consumo di energia primaria per tutti gli usi finali (riscaldamento degli ambienti, elettrodomestici e illuminazione, acqua calda).

L'insieme di sistemi di controllo termico passivo attuati in questi primi edifici e nei successivi (ottimo isolamento delle parti opache, riduzione a livelli minimi dei ponti termici, adozione di finestre e telai a bassa trasmittanza termica, involucro con tenuta d'aria elevata, sistema di ventilazione meccanica e recupero di calore ad alta efficienza sull'aria in uscita) è stato in seguito generalmente associato allo Standard.

Per i climi dell'Europa Centrale, questo insieme di strategie ha comportato la possibilità di semplificare il sistema di distribuzione dell'energia necessaria per il riscaldamento. Si distribuisce aria calda attraverso un sistema di ventilazione meccanica, già presente per le necessità di rinnovo dell'aria interna non garantito dalle infiltrazioni (la permeabilità all'aria dell'involucro è molto limitata) e mediante un recuperatore di calore si eleva la temperatura dell'aria esterna in ingresso estraendo energia dall'aria viziata in uscita.

L'ulteriore aumento di temperatura necessario a fornire sufficiente energia agli ambienti può essere ottenuto con vari sistemi (una stufa a legna, un impianto solare, una pompa di calore, ecc.), comunque di bassa potenza. Questa semplificazione del sistema di riscaldamento concorre, congiuntamente ai bassi consumi di energia, a rendere queste case attraenti anche dal punto di vista economico, oltre che ambientale.

La definizione di uno standard semplice e la raccomandazione di un insieme di tecnologie e scelte costruttive capaci di soddisfarlo, è stato probabilmente uno dei maggiori fattori di successo del concetto.

A differenza della Germania, in cui i professionisti del settore e larga parte dei consumatori riconoscono come "casa passiva" un edificio certificato Passivhaus e dove è stato sviluppato un mercato in continua espansione, in altre zone d'Europa l'applicabilità di questo Standard non è ancora stata testata.

Nel Sud Europa, inoltre, la maggior parte degli architetti e dei progettisti riconosce come "casa passiva" un edificio costruito secondo i principi meno definiti della progettazione passiva. Molti professionisti del settore infatti potrebbero non considerare opportuno associare questo generico attributo a uno specifico standard edilizio che, tra l'altro, propone un sistema di ventilazione meccanica.

Per analizzare le barriere di cui si è accennato e valutare una possibile estensione dello Standard *Passivhaus*, è nato il progetto *Passive-on*, finanziato dal programma *Intelligent Energy Europe* della Comunità Europea. Tra le altre azioni intraprese, il consorzio di ricercatori che vi ha partecipato, in accordo con il *Passivhaus Institut* tedesco, ha formulato una proposta di adattamento dello Standard alle condizioni che caratterizzano il contesto del Sud Europa. In tabella 1.1 si confrontano schematicamente i criteri progettuali che contraddistinguono i due Standard.



Figura 1.2 *Passivhaus* di Cherasco (CN).

Standard <i>Passivhaus</i> originario:	
<p>Critério di riscaldamento</p>	<p>la domanda di energia utile netta per il riscaldamento ambientale non superiore ai 15 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno</p>
<p>Critério di energia primaria</p>	<p>la domanda di energia primaria per tutti i servizi energetici, inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricit� per l'abitazione e gli ausiliari, non superiore ai 120 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno</p>
<p>Tenuta all'aria</p>	<p>l'involucro edilizio dovrebbe presentare un risultato del test di pressurizzazione (a 50 Pa), non superiore a 0.6 h⁻¹, secondo la EN 13829</p>
<p>Critério di comfort invernale</p>	<p>in inverno, la temperatura operativa nelle stanze pu� essere mantenuta sopra i 20°C, entro i limiti energetici summenzionati</p>
<p>Critério di verifica</p>	<p>Tutti i valori di richiesta energetica sono calcolati secondo il Passive House Planning Package (PHPP) e si riferiscono alla superficie netta abitabile</p>

Standard Passivhaus esteso:	
<p>Critero di riscaldamento</p>	<p>la domanda di energia utile per il riscaldamento ambientale non superiore ai 15 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno</p>
<p>Critero di raffrescamento</p>	<p>la domanda di energia sensibile utile per il raffrescamento ambientale non superiore ai 15 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno</p>
<p>Critero di energia primaria</p>	<p>la domanda di energia primaria per tutti i servizi energetici, inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricità per l'abitazione e gli ausiliari, non superiore ai 120 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno</p>
<p>Tenuta all'aria</p>	<p>se una buona qualità dell'aria ed un alto comfort termico sono raggiunti per mezzo di un sistema di ventilazione meccanica, l'involucro edilizio dovrebbe presentare un risultato del test di pressurizzazione (a 50 Pa), non superiore 0.6 h⁻¹, secondo la EN 13829. Per località con temperature di progetto invernali esterne superiori a 0°C, un risultato del test di pressurizzazione pari a 1.0 h⁻¹ dovrebbe essere sufficiente.</p>
<p>Critero di comfort invernale</p>	<p>in inverno, la temperatura operativa nelle stanze può essere mantenuta sopra i 20°C, entro i limiti energetici summenzionati</p>
<p>Critero di comfort estivo</p>	<p>nelle stagioni calde ed umide, la temperatura operativa deve rimanere nell'intervallo di comfort definito dalla norma EN 15251. Inoltre, se viene utilizzato un sistema di raffrescamento attivo la temperatura operativa può essere mantenuta sotto i 26 °C.</p>
<p>Critero di verifica</p>	<p>Tutti i valori di richiesta energetica sono calcolati secondo la versione aggiornata del Passive House Planning Package (PHPP 2007) e si riferiscono alla superficie netta abitabile</p>

Questi criteri, specie in relazione al fabbisogno per raffrescamento, saranno rivisti allorquando si sarà maturata una maggiore esperienza di costruzioni secondo lo Standard *Passivhaus* esteso.

1.4 Energia e comfort

Ovviamente l'uso dell'energia è un mezzo, non un fine. Gli edifici nascono e si evolvono per fornire un ambiente confortevole in cui abitare e/o lavorare.

Nel Sud Europa, anche se spesso risulta necessario riscaldare le abitazioni in inverno, di frequente l'esigenza predominante è quella di assicurare benessere durante la stagione calda. Come già discusso, lo Standard *Passivhaus* è stato recentemente rivisto e uno dei cambiamenti principali rispetto alla definizione originaria, è stato l'introduzione di requisiti espliciti sulle condizioni di comfort interno nel periodo estivo. Il nuovo Standard fornisce un marchio di qualità globale delle abitazioni che non è offerto da altri sistemi di certificazione energetica.

In base allo Standard *Passivhaus* esteso è ora necessario garantire che le temperature estive interne, più specificamente le temperature operative, si mantengano negli intervalli definiti dalla recente norma EN 15251⁵.

La norma propone due trattazioni distinte per il comfort termico estivo, a seconda della strategia di raffrescamento adottata.

Se il comfort estivo è ottenuto mediante un sistema di raffrescamento meccanico, le temperature interne devono rispettare i limiti di comfort derivanti dal modello di Fanger o del "Voto Medio Previsto" (valido all'interno di ben specificati intervalli di temperature, umidità, velocità dell'aria).

In edifici senza sistema di raffrescamento meccanico, l'intervallo di temperatura è determinato tramite il modello denominato "adattivo".

Se si valuta il comfort estivo, si può considerare il miglioramento di comfort ottenibile, a parità di temperatura operativa, aumentando la velocità dell'aria tramite ventilazione naturale e/o l'uso di ventilatori mobili/a soffitto.

Entrambi i modelli citati sono stati sviluppati sulla base di interviste in cui i soggetti vengono invitati ad esprimere la propria sensazione termica soggettiva individuandola entro una scala di 7 valori (tabella 1.1).

Tabella 1.1 Scala di comfort termico ASHRAE.

+ 3	molto caldo
+ 2	caldo
+ 1	leggermente caldo
0	confortevole o neutro
- 1	leggermente freddo
- 2	freddo
- 3	molto freddo

Il modello di Fanger⁶ (o del Voto Medio Previsto), si basa su interviste effettuate in laboratorio in camere controllate e correla le risposte a sei variabili: quattro relative alle condizioni all'interno della camera (temperatura dell'aria, velocità dell'aria, umidità relativa, temperatura radiante) e due relative al soggetto (attività metabolica dell'individuo, resistenza termica del suo abbigliamento). La correlazione ottenuta tra i valori di queste variabili e i voti di comfort espressi viene chiamato PMV (Predicted Mean Vote).

⁵EN 15251:2007 - "Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics".

⁶Per una trattazione più esauriente si rimanda alla norma ISO 7730:2005 ("Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort").

Il modello "adattivo", da interviste di comfort realizzate in edifici reali, giunge alla conclusione che specifici fattori contestuali e la storia termica del recente passato modificano le aspettative e le preferenze termiche delle persone che occupano un edificio. I soggetti vengono riconosciuti come componenti attivi in grado di concorrere al raggiungimento della propria soddisfazione termica, attraverso meccanismi comportamentali (variazioni nella scelta degli indumenti, ecc.), fisiologici (naturale riduzione dell'attività metabolica) e psicologici di adattamento. Si è valutato che questi meccanismi hanno una rilevanza non trascurabile soprattutto negli edifici naturalmente ventilati in cui agli occupanti è permesso di interagire attivamente (aprendo una finestra, regolando degli schermi frangisole o azionando un ventilatore) al miglioramento delle condizioni interne. L'analisi dei dati ricavati dalle interviste giunge alla conclusione che la temperatura per cui esprimono preferenza gli intervistati ha una correlazione statistica principalmente con la temperatura esterna, (più precisamente con una media pesata delle temperature nei giorni precedenti) mentre ha bassa correlazione con le altre variabili.

Senza voler entrare nel dettaglio e analizzare il dibattito che, negli ultimi anni, si è focalizzato sul comfort negli edifici, si osserva che, le preferenze termiche espresse da occupanti di edifici raffrescati passivamente sono meno stringenti, rispetto a edifici in cui viene utilizzato un sistema attivo. Questo aspetto può favorire l'adozione di strategie passive, con conseguenti risparmi energetici.

Lo Standard *Passivhaus* è stato dunque esteso tenendo conto della nuova norma EN 15251, in modo da inglobare esplicitamente un criterio di comfort estivo (tabella 1.2).

Tabella 1.2 Requisiti di comfort estivo nello Standard *Passivhaus* esteso

Per edifici senza raffrescamento meccanico	
Requisiti di comfort interno	come definiti dal modello Adattivo proposto dall'Allegato A.2 della norma EN 15251 ⁷
Domanda di energia sensibile utile per il raffrescamento e per il riscaldamento	< 15 kWh/m ² anno
Domanda di energia primaria totale	< 120 kWh/m ² anno

Per edifici con raffrescamento meccanico	
Requisiti di comfort interno	come definiti dal modello di Fanger proposto dalla norma EN 15251
Domanda di energia per il riscaldamento	< 15 kWh/m ² anno
Domanda di energia sensibile utile per il raffrescamento	< 15 kWh/m ² anno
Domanda di energia primaria totale	< 120 kWh/m ² anno

⁷EN 15251 - Allegato A.2: "Temperature interne accettabili per la progettazione di edifici senza sistemi di raffrescamento meccanici".

2 . Strategie passive di controllo termico degli edifici

2.1 Introduzione

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.

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.

I parametri climatici che influenzano il fabbisogno energetico dell'edificio sono, tra gli altri, 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. Adottare l'indirizzo progettuale passivo significa ovviamente calare ogni progetto edilizio nel suo specifico contesto micro-climatico.

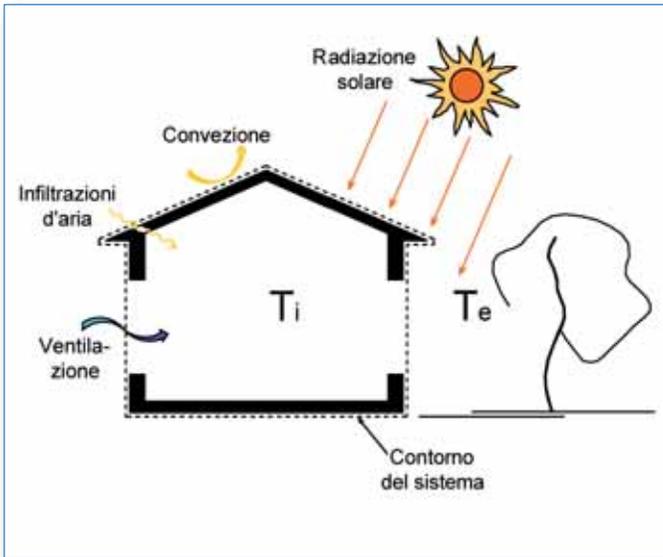


Figura 2.1 Alcuni flussi di massa e di energia che attraversano l'involucro dell'edificio

Un sommario delle principali variabili di progetto su cui agire è fornito in tabella 2.1.

Tabella 2.1 Strategie di controllo termico e principali variabili di progetto	
Controllo del microclima nelle vicinanze dell'edificio	superfici "fresche"
	uso della vegetazione e dell'acqua
Controllo dei carichi interni	uso dell'illuminazione naturale
	sistemi di illuminazione artificiale efficienti
	apparecchiature elettriche efficienti
Forma e tipologia dell'edificio	rapporto superficie su volume
	orientamento
Strutture opache	isolamento termico
	inerzia termica
	posizione relativa di isolamento e massa
	caratteristiche superficiali (assorbanza ed emissività)
	ombreggiamento delle superfici
Strutture trasparenti	dimensioni e orientamento
	caratteristiche termiche e ottiche dei vetri (trasmissione termica, fattore solare)
	sistemi di ombreggiamento esterni
Ventilazione	tenuta all'aria
	tasso di ventilazione per qualità dell'aria
	ventilazione di comfort
	ventilazione notturna
Tecniche per importare o esportare energia da sorgenti e pozzi di energia naturali	scambiatori col terreno, raffrescamento radiativo, raffrescamento evaporativo

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.

Il controllo termico attuato con una combinazione delle altre strategie e tecnologie menzionate, adattata 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 circostanti l'edificio, costituiscono gli strumenti di un "controllo termico attivo".

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

- scelte di controllo del microclima e riduzione dei carichi interni;
- scelte di controllo termico passivo;
- 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 impianti attivi. Si noti che in queste condizioni, è maggiormente probabile soddisfare l'intera richiesta di energia con fonti rinnovabili.

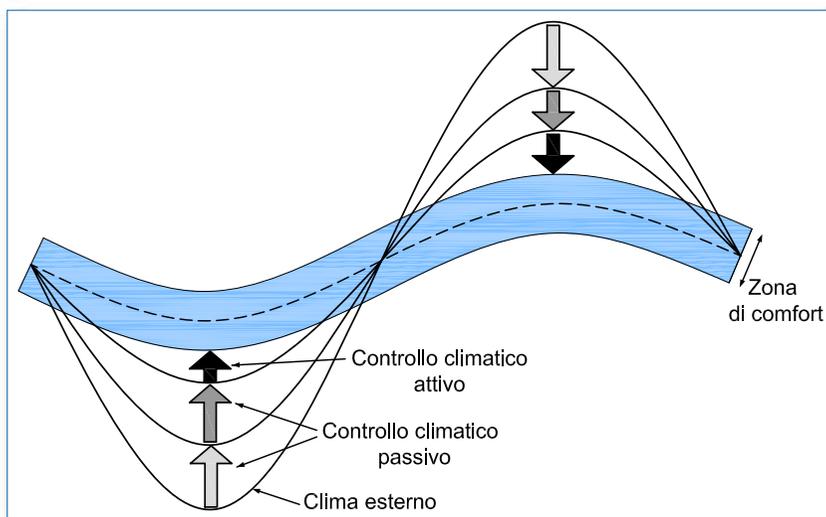


Figura 2.2 Controllo termico passivo, attivo e zona di comfort.

2.2 Controllo del microclima e riduzione dei carichi

Secondo lo schema presentato nell'introduzione (2.1) in questo paragrafo vengono descritte nel dettaglio, dapprima le caratteristiche all'esterno dell'edificio (inclusa la sua superficie esterna) e poi le caratteristiche all'interno dell'edificio stesso, cioè le apparecchiature elettriche che "generano"⁸ energia termica.

Nel paragrafo successivo (2.3) verranno invece 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.

⁸In realtà, ovviamente, trasformano energia elettrica in energia termica.

2 . Strategie passive di controllo termico degli edifici

2.2.1 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. Tra gli esempi ben noti è possibile citare il villaggio Anazasi, ricavato in un anfratto della parete verticale di una Sierra per ripararsi dal sole estivo, ma godere di quello invernale; o la città vecchia di Nizza, con le strade strette rivolte verso il mare per raccogliere le brezze fresche; oppure gli agglomerati molto densi con strade strette per offrire la minor superficie possibile all'irradiazione solare e con superfici bianche per ridurre l'assorbimento, rinvenibili in molti paesi del mediterraneo; o ancora le disposizioni molto più spaziate ed edifici sopraelevati e permeabili al vento, tipiche dei climi caldo-umidi, che consentono la massima circolazione d'aria.

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 raffrescare l'aria grazie all'evaporazione, che ci è testimoniato nelle architetture dell'Alhambra a Granada e nelle case con cortile di Hassan Fathi in Egitto.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus

Nelle zone mediterranee per mitigare le alte temperature estive, questi concetti 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).



Figura 2.3: Scorci dei giardini interni dell'Alhambra di Granada (foto L. Pagliano)

2.2.2 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".

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus

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).

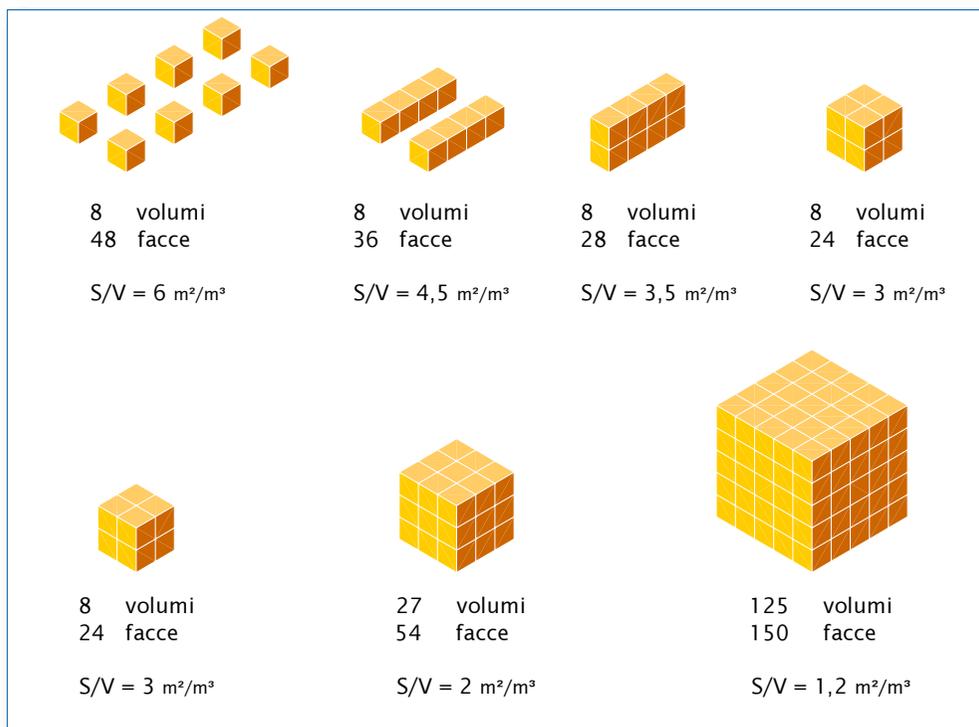


Figura 2.4: Variazione del rapporto S/V. I cubi, variamente aggregati, hanno lato di 1 m.

2.2.3 Orientamento

L'orientamento è un parametro definito per ognuna delle pareti esterne dell'edificio. Quantitativamente, l'orientamento deve essere ricavato dall'angolo esistente tra la perpendicolare alla parete e la direzione nord. Tuttavia, è generalmente possibile parlare di orientamento in modo qualitativo utilizzando i punti cardinali: Nord, Sud, Est e Ovest e le direzioni secondarie. La descrizione quantitativa consente di assegnare un orientamento ad ogni livello di angolarità. Le differenze principali tra facciate con diversi orientamenti sono nel valore dell'irradiazione solare che colpisce ciascuna facciata e l'esposizione rispetto ai venti dominanti.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus

Un orientamento con le facciate più estese a Sud e a Nord, cioè una forma con asse maggiore Est Ovest permette di effettuare in modo relativamente facile il controllo della radiazione che penetra attraverso le superfici vetrate. Un semplice oggetto orizzontale posizionato sopra tali superfici e correttamente dimensionato riesce ad impedire alla radiazione solare diretta di incidere sulla superficie vetrata quando, in estate, il sole è alto, mentre la lascia penetrare in inverno, quando il sole è più basso sull'orizzonte. Ovviamente la facciata a nord avrà di preferenza una superficie vetrata ridotta, dal momento che le finestre costituiscono l'elemento debole dell'involucro isolato. 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).

Riferimento alle soluzioni regionali/Applicabilità climatica

Il buon orientamento dell'edificio è un requisito importante in tutte le aree climatiche. 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.

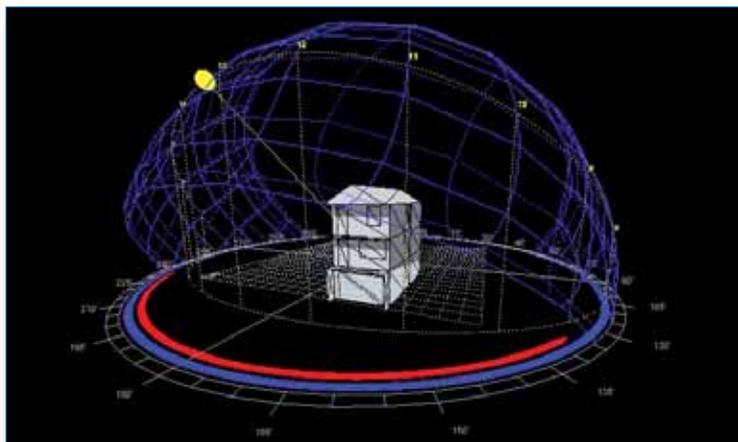


Figura 2.5: Esempio di diagramma solare.

2.2.4 Schermatura solare da strutture circostanti e propria

La schermatura evita che le radiazioni solari colpiscano le pareti esterne degli edifici in certi periodi dell'anno e del giorno. Si può distinguere tra tre tipi di schermatura:

- schermatura propria dovuta alla sovrapposizione delle superfici dell'edificio l'una sull'altra;
- schermatura generata da ostacoli lontani come altri edifici nelle vicinanze;
- schermatura generata da ostacoli vicini come oggetti o veneziane (su questo si veda trattazione specifica in paragrafi successivi).

Riferimento alle soluzioni regionali e applicabilità climatica

Nelle zone climatiche di nostro interesse l'irradiazione solare è elevata e costituisce una parte rilevante del bilancio termico, in particolare estivo. Una combinazione di isolamento termico e protezione solare consente di intervenire su questo bilancio. Le schermature su cui il progettista ha controllo devono essere studiate in maniera selettiva, consentendo alla radiazione solare di raggiungere l'edificio in inverno e, al contempo, bloccando la radiazione in estate.

2.2.5 Albedo

Il colore delle superfici esterne 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.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus

Questa tecnica va considerata negli edifici caratterizzati da grandi superfici opache rivolte a est o a ovest e può aver effetti importanti per i tetti degli edifici a 1 o 2 piani. È 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.



Figura 2.6: Edificio con involucro bianco.

2.2.6 Elettrodomestici e illuminazione

Gli elettrodomestici e l'illuminazione in una casa europea media consumano tipicamente 3000-4000 kWh/anno di energia elettrica. Considerato in rapporto alla dimensione di una abitazione media (dell'ordine di 100 m²) tale valore corrisponde a un consumo unitario compreso tra 30 e 40 kWh/m²anno. Tuttavia, tradotto in energia primaria, (70 - 120 kWh/m²anno, a seconda del fattore di conversione proprio della regione), il fabbisogno energetico per gli elettrodomestici è simile o superiore al fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento dei nuovi edifici a norma di legge nell'Europa centrale, settentrionale e in parte dell'Europa meridionale.

Adottando le migliori tecnologie attualmente disponibili sul mercato è possibile ridurre in modo economicamente vantaggioso il consumo medio di una famiglia dal 35 al 40% anche se i potenziali di risparmio di alcuni specifici utilizzi finali possono essere molto più elevati. Sono disponibili vari strumenti per aiutare i consumatori (inclusi i progettisti) a identificare gli elettrodomestici più efficienti presenti sul mercato.

Nel 1995 l'Unione Europea ha introdotto lo schema di etichettatura energetica per alcuni elettrodomestici. Con il passare del tempo l'etichetta è stata estesa in modo da coprire 7 categorie di elettrodomestici (frigoriferi e congelatori, lavastoviglie, forni elettrici, lavatrici, asciugabiancheria, condizionatori e lampade ad uso domestico). L'etichetta energetica identifica l'efficienza energetica di un prodotto su una scala di 7 punti da A (più efficiente) a G (meno efficiente).

L'etichetta e un programma di supporto (Energy+⁹) hanno avuto un tal successo nel trasformare il mercato degli elettrodomestici per il freddo (frigoriferi) che nel 2003 sono state aggiunte le classi energetiche A+ e A++ all'etichetta energetica. Un frigorifero di Classe A++ consuma il 70% in meno del modello medio presente sul mercato nel 1995 (vale a dire di frigoriferi di classe C).

Molti altri elettrodomestici tra cui i computer, le stampanti e le apparecchiature elettroniche casalinghe (ad esempio i televisori e i videoregistratori) sono coperti dallo schema di valutazione Energy Star che è stato sviluppato per la prima volta negli USA (nel 2000 l'UE ha raggiunto un accordo di utilizzo in Europa). Energy Star è un marchio di approvazione che indica semplicemente se un prodotto è efficiente dal punto di vista energetico, mentre il marchio energetico UE distingue tra vari livelli di prestazione.

Oltre a questi, vi sono numerosi schemi nazionali come il marchio energetico Nordic Swan utilizzato in Scandinavia o il programma tedesco Blue Angel. Il progetto europeo TopTen¹⁰ seleziona e descrive i migliori 10 prodotti di ogni categoria.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus

Lo Standard impone di limitare il fabbisogno totale di energia primaria per tutti i servizi presenti nell'edificio (inclusi quindi illuminazione, elettrodomestici e acqua calda sanitaria) a 120 kWh/m²anno. Questo valore risulta critico non tanto per le necessità di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio, già fortemente contenute dal limite dei 15 kWh/m²anno, quanto piuttosto per l'utilizzo degli elettrodomestici e degli ausiliari che garantiscono la circolazione di aria e acqua negli impianti dell'abitazione.

Poiché l'energia elettrica, una volta svolto il suo ruolo (azionare un frigorifero o un televisore), si trasforma in energia termica a bassa temperatura, l'uso di elettrodomestici inefficienti, caratterizzati da un consumo elevato, contribuirebbe a ridurre i carichi termici in inverno. Questi guadagni termici tuttavia, rappresentano un metodo decisamente inefficiente per riscaldare una casa. Inoltre, i guadagni interni derivanti da elettrodomestici inefficienti aumentano il carico di raffreddamento estivo e possono generare discomfort locale.

⁹Si veda il sito internet www.energyplus.org

¹⁰Si veda il sito internet www.topten.ch

Prima ancora della scelta di un elettrodomestico "efficiente" occorre però indagare se non esista un metodo alternativo che consenta di usare meno energia.

Per esempio l'asciugatura elettrica di un chilogrammo di biancheria può consumare 3 o 4 volte più energia che il suo lavaggio. Dunque l'acquisto di una lavatrice efficiente diventa poco interessante se poi si utilizza un'asciugatrice elettrica.

Il progettista di una casa passiva dovrebbe quindi predisporre spazi, sia interni che esterni ove si possano asciugare i panni su filo e predisporre tubazioni (non troppo lunghe) per fornire acqua calda (proveniente da un generatore di calore efficiente o da pannelli solari) a lavastoviglie e lavatrici.

L'occupante di una casa passiva dal canto suo potrebbe scegliere un frigorifero di dimensioni non eccessive (tenendo conto della numerosità della famiglia) ed effettuare altre scelte di sufficienza nella quantità, dimensione e potenza delle apparecchiature elettriche che installa.



Figura 2.7 : Panni stesi a Venezia

2.3 Controlli termici passivi

In questo paragrafo si pone l'attenzione sugli elementi che compongono l'involucro edilizio e su 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

2.3.1 Isolamento termico

Tipicamente, l'involucro di un edificio si compone di elementi edilizi contraddistinti da materiali molto diversi tra loro. Vetri, telai degli infissi, porte, pareti, solette 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 termica¹¹ (U-value) delle sue superfici disperdenti. 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. Il suo effetto sul comportamento estivo dell'edificio va valutato attentamente, trattando in modo separato l'isolamento delle diverse componenti edilizie.

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'edificio (per questo punto si rimanda al capitolo successivo).



¹¹Flusso termico che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C [W/m²K].

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

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 dello Standard *Passivhaus*. Mentre nei climi freddi (Centro-Nord Europa) gli svantaggi estivi che ne derivano sono solitamente trascurabili, nelle aree più calde del Sud 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

In inverno, un buon isolamento delle pareti perimetrali 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 di vapore acqueo (crepe, muffe). 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: una soluzione "a cappotto" permette di ridurre i ponti termici e di poter sfruttare l'inerzia termica della parete. Collocandolo in intercapedine invece è possibile non influenzare eccessivamente eventuali esigenze estetiche.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Lo Standard *Passivhaus* richiede una netta riduzione del fabbisogno di energia utile netta per il riscaldamento degli edifici. Un adeguato isolamento delle pareti, che per di più riduce il fabbisogno di raffrescamento, risulta quindi indispensabile. Il livello di isolamento richiesto può variare in funzione delle condizioni climatiche e del progetto dell'edificio.

Figura 2.8 isolamento termico di una parete perimetrale

Isolamento del tetto

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.

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 entrambi i casi 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.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Al fine di limitare a 15 kWh/m²anno il fabbisogno di energia per il riscaldamento è necessario ricorrere a un buon isolamento del tetto. Essendo questo elemento meno soggetto a vincoli costruttivi rispetto alle superfici verticali, si possono utilizzare spessori anche molto elevati (dell'ordine dei 40 cm).

Anche in questo caso, lo spessore ottimale di isolante dipende dal clima e dalle specifiche caratteristiche dell'edificio. Una Passivhaus dell'Europa Centrale è tipicamente contraddistinta da valori di trasmittanza del tetto di 0.1-0.15 W/(m²K). Nel contesto del Sud Europa è possibile aumentare tali valori (cfr. cap 3).



2.3.2 Ponti termici

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 ecc. 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. Queste zone, sono chiamate ponti termici. Ponti termici particolarmente evidenti sono costituiti da elementi strutturali in cemento armato che interrompono una struttura meno conduttrice (figura 2.9) o addirittura lo strato isolante. 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.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Per rendere efficace un buon isolamento termico è necessario prestare attenzione alla riduzione degli effetti ponte termico. Rispettando poche semplici regole di progettazione è possibile ridurre a valori trascurabili gli effetti ponte termico. Per ottenere il livello di prestazioni di una *passivhaus* occorre applicarle rigorosamente. Una struttura priva di ponti termici non migliora soltanto la qualità della muratura termica ma rende anche non necessari i calcoli dei loro effetti, a condizione che le dispersioni termiche vengano calcolate utilizzando le dimensioni esterne dell'edificio.

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.

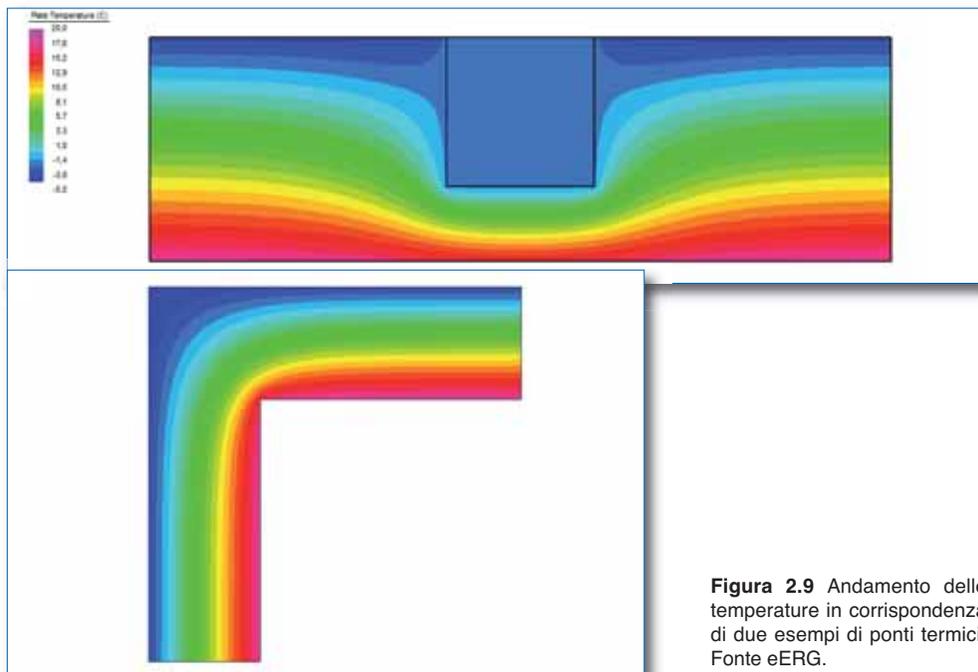


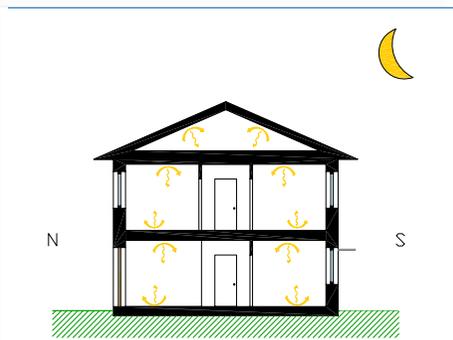
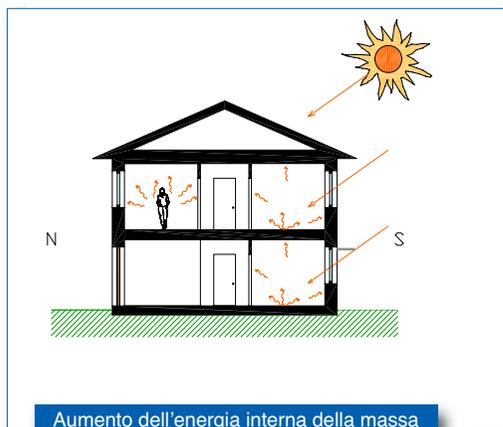
Figura 2.9 Andamento delle temperature in corrispondenza di due esempi di ponti termici. Fonte eERG.

2.3.3 Inerzia termica

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. Il prodotto della massa di un componente edilizio in kg per il calore specifico fornisce la capacità termica del componente. La presenza di strutture con elevata capacità termica (per esempio murature in mattoni pieni o solette in calcestruzzo) contribuisce assieme all'isolamento 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. Attualmente sono allo studio materiali a transizione di fase adatti all'utilizzo in edilizia, per esempio inglobati in alcune pareti o strutture.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

La massa posta in contatto termico con l'aria interna (cioè non separata da questa attraverso controsoffitti, pavimenti rialzati, etc.) può avere importanti effetti positivi sia in estate sia in inverno. In estate 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. Questo effetto può essere migliorato esponendo la struttura ad alta capacità termica ad un flusso d'aria fresca proveniente dall'esterno, durante la notte. L'energia termica accumulata dalla massa durante il giorno viene (almeno in parte) asportata e la massa termica risulta pre-raffreddata 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 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.



2.3.4 Trasmissione 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 in $W/m^2 K$) e 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.

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.

I principali parametri per caratterizzare e scegliere vetri adatti al clima, orientamento e specifico edificio, sono:

- la trasmittanza termica U . Valori bassi di questo parametro sono necessari per il risparmio energetico;
- il fattore solare g , che è definito come la frazione di energia solare incidente trasmessa all'interno dell'edificio attraverso la superficie vetrata. Valori bassi implicano bassi guadagni solari;
- la trasmittanza visibile, definita come la frazione di luce solare incidente trasmessa all'interno dell'edificio. Valori elevati migliorano la disponibilità di luce naturale negli interni.

A causa della conduttività termica relativamente alta del vetro, una finestra con una lastra di vetro singola costituisce un punto estremamente debole nell'involucro isolante di un edificio.

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 rivestimenti basso emissivi o selettivi su una delle superfici delle lastre di vetro, rivolta verso l'interno della cavità e dunque protetta da abrasioni
- 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 a un vetro chiaro.

I vetri tripli sono tra le opzioni da considerare per ottenere basse trasmittanze termiche, ma, tuttavia, presentano qualche svantaggio legato all'ingombro e al peso. La scelta di un vetro triplo dev'essere quindi studiata in modo approfondito, tenendo anche in considerazione, a titolo d'esempio, che un doppio vetro basso emissivo ha una prestazione migliore di un triplo vetro con lastre chiare non trattate.

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", 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.

Selettività spettrale

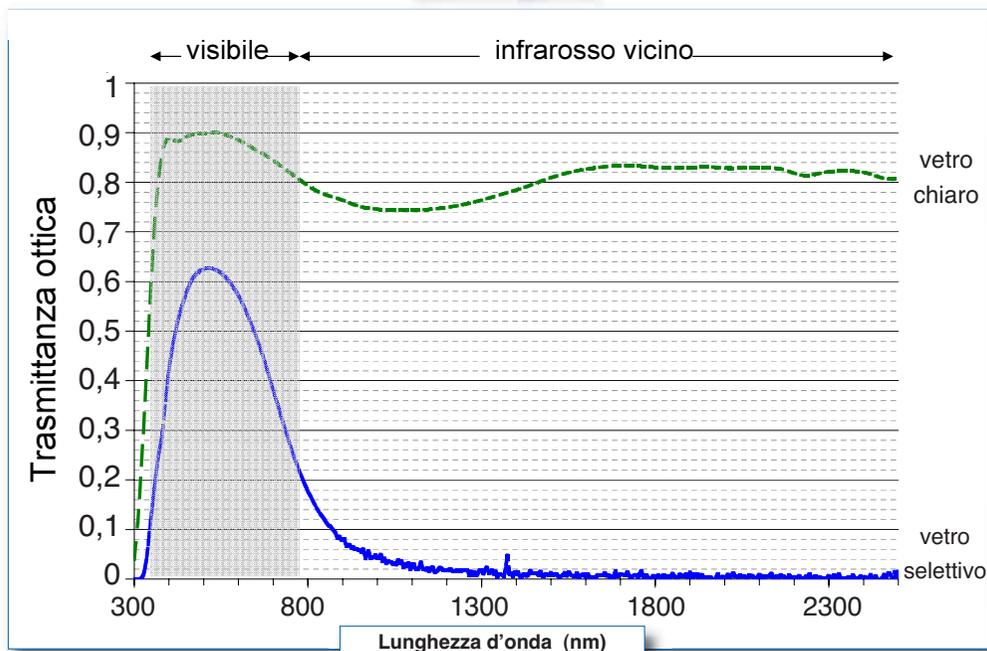
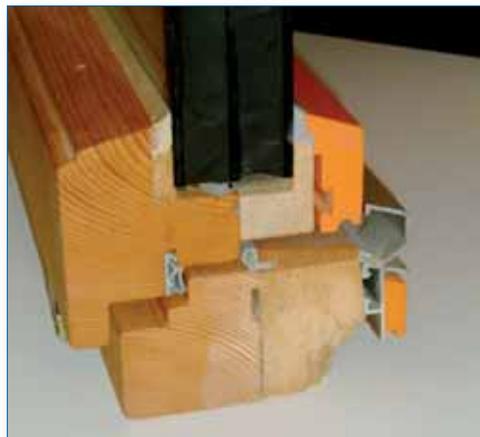


Figura 2.10 Trasmittanza visibile di un vetro chiaro e di un vetro selettivo a confronto; si noti che il vetro selettivo è opaco alla parte termica della radiazione solare (vicino infrarosso) Fonte: A. Dama, L. Pagliano, “Vetri ad alte prestazioni energetiche”, in “Il Progetto Sostenibile”, Maggio 2005.



Un 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.

Figura 2.11 Esempio di telaio a bassa trasmittanza termica e bassa permeabilità all'aria

2.3.5 Ombreggiatura

L'ombreggiatura evita che la radiazione solare colpisca direttamente le parti esposte dell'involucro edilizio. Si può distinguere tra tre tipi di ombreggiatura:

- ombreggiatura propria dovuta alla proiezione dell'ombra di alcuni elementi dell'edificio su altre porzioni dell'involucro;
- ombreggiatura generata da ostacoli vicini come schermi fissi (aggetti orizzontali o verticali) o schermi mobili (veneziane, tende, etc);
- ombreggiatura generata da ostruzioni dell'ambiente circostante all'edificio, quali possono essere costruzioni, vegetazione alta, oppure rilievi orografici.

In linea di principio si deve progettare l'edificio in modo da dotarlo di un controllo selettivo della radiazione solare incidente consentendole di colpire direttamente l'involucro edilizio in inverno e, al contrario, bloccandola in estate.

I dispositivi schermanti fissi o mobili devono essere predisposti e dimensionati in modo da garantire un controllo dinamico dell'esposizione diretta al sole di alcune parti dell'involucro edilizio; in particolare durante il periodo estivo è fondamentale controllare in modo efficace le superfici trasparenti, siano esse orizzontali, inclinate oppure verticali, al fine di evitare il surriscaldamento degli ambienti interni e l'insorgenza di condizioni di discomfort locale (asimmetrie radiative dovute a temperature superficiali interne degli elementi trasparenti molto elevate).

Uno strumento molto utile ed efficace a cui si può ricorrere per valutare l'effetto schermante su una determinata superficie¹² dell'involucro edilizio di un certo edificio è lo Shadow Angle Protractor (SAP). Questo è uno strumento grafico che deve essere usato in abbinamento, ad esempio, ad un diagramma stereografico bidimensionale. Tale strumento, attraverso la proiezione dei profili d'ombra delle ostruzioni, permette di costruire una maschera di oscuramento prodotta da certi elementi ostruenti del contesto circostante naturale e/o antropizzato, che insistono su una data superficie dell'edificio.

Il diagramma stereografico bidimensionale invece è uno strumento grafico proiettivo che permette appunto di proiettare su un piano bidimensionale la volta celeste tridimensionale e i percorsi solari giornalieri visibili da uno specifico sito.

Attraverso questi strumenti è possibile quindi dimensionare aggetti o schermi capaci di intercettare i raggi solari nelle ore più calde del periodo estivo in modo da evitare il surriscaldamento interno.

¹²In realtà, in un punto di una determinata superficie.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Mentre per le Passivhaus dell'Europa centrale il problema del controllo solare estivo può risultare marginale, per gli edifici siti nei Paesi a clima caldo il controllo e la riduzione dell'energia solare in ingresso durante il periodo estivo è indispensabile.

Questo implica che le schermature fisse o mobili vengano quindi utilizzate per ridurre efficacemente il guadagno termico solare durante il periodo estivo, per cui la loro corretta adozione è strategica in luoghi con estati molto calde.

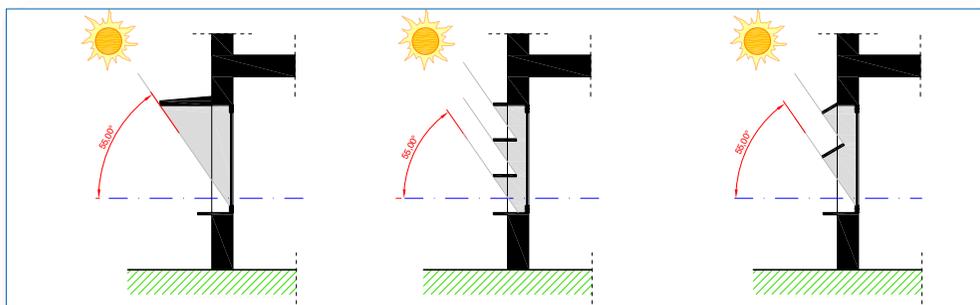


Figura 2.12 Esempio di diverse configurazioni geometriche e tipologiche in grado di intercettare la radiazione solare diretta (nell'esempio per angoli di altezza solare maggiori di 55°)

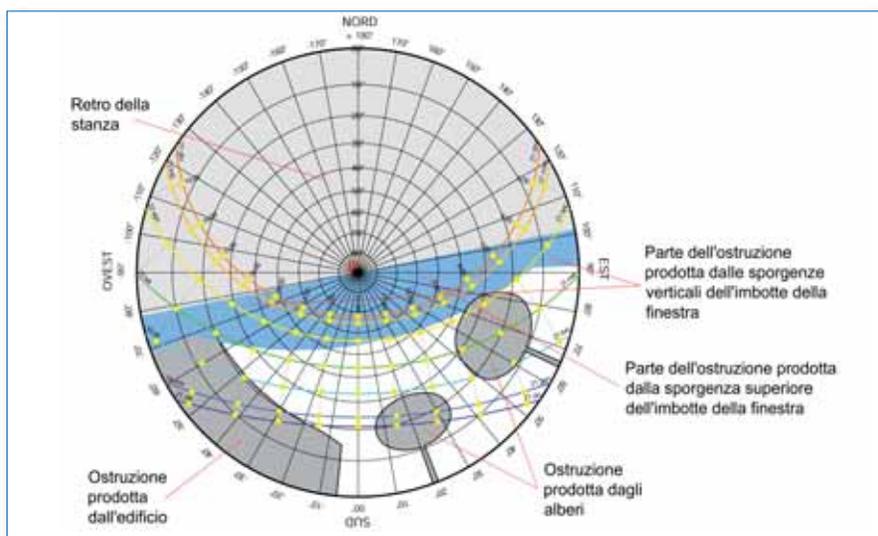


Figura 2.13 Diagramma stereografico bidimensionale e SAP relativi ad elementi dell'ambiente circostante (alberi ed edificio) e all'imbotte della finestra più all'oggetto orizzontale che oscura per angoli solari maggiori di 55° (in azzurro)



Figura 2.14 Esempi di protezioni solari verticali mobili (a sinistra) e di oggetti orizzontali (a destra)

2.3.6 Infiltrazioni e tenuta all'aria

L'involucro edilizio è sollecitato dalle naturali correnti d'aria e dai venti. L'entità di tali pressioni sono caratteristiche peculiari del clima esterno, della morfologia del terreno e del contesto urbano in cui l'edificio è insediato, e sono caratterizzate da una considerevole variabilità nel tempo. Il parametro che descrive il comportamento dell'involucro edilizio in rapporto allo spostamento naturale delle masse d'aria è la permeabilità all'aria che viene espressa in termini di ricambi orari d'aria: si misura in h^{-1} ed è dato dal rapporto tra i volumi orari entranti e il volume dei locali.

La permeabilità all'aria di un edificio è un fattore essenziale da cui non si può prescindere per descrivere correttamente il suo intero comportamento termico. In edifici contraddistinti da elevata permeabilità all'aria, le infiltrazioni causano numerosi problemi, soprattutto nei climi più rigidi e durante i periodi più freddi: oltre a comportare una maggior domanda di riscaldamento, i flussi d'aria attraverso fessure e interfacce a tenuta insufficiente aumentano i rischi di condensatione interstiziale e riducono i livelli di comfort interno (correnti d'aria fredda, gradienti verticali di temperatura etc).

Inoltre le infiltrazioni difficilmente forniscono un ricambio d'aria sufficiente e regolare, in grado di mantenere e garantire una buona qualità dell'aria interna. Gli elementi che maggiormente influenzano la permeabilità all'aria di un involucro edilizio sono le componenti finestrate. Nella pratica, le infiltrazioni d'aria possono essere controllate attraverso infissi a tenuta, dotati di guarnizioni in gomma che proteggono i giunti apribili. La norma UNI EN 12207¹³ definisce una classificazione dei serramenti in funzione della loro permeabilità all'aria e li suddivide in 5 classi (da 0 a 4).

Per quanto concerne le componenti opache perimetrali, è necessario che vengano protette da un rivestimento continuo a tenuta d'aria. Intonaci interni, pannelli in compensato, pannelli in truciolare o a particelle orientate, fogli in PE o in materiale plastico stabilizzato, feltro bituminoso o carta antistrappo rinforzata, sono materiali idonei per realizzare una muratura a tenuta d'aria.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Soprattutto nei climi freddi, il tasso di ricambio d'aria per infiltrazioni è uno dei parametri di progetto che maggiormente influenza la domanda energetica per il riscaldamento di un edificio. Per raggiungere i requisiti prestazionali individuati dallo Standard *Passivhaus* è quindi indispensabile ridurre a valori molto bassi la permeabilità dell'involucro edilizio. Questa evidenza comporta però la necessità di rispondere alle richieste di rinnovo dell'aria interna per altra via: un sistema meccanico di ventilazione con recupero del calore.

¹³La UNI EN 12207 che aggiorna la precedente UNI 7979, si basa sul metodo di prova descritto dalla UNI EN 1026 ("Finestre e porte – permeabilità all'aria").

Questa strategia oltretutto risulta più efficace in presenza di limitate infiltrazioni: se i flussi d'aria interna vengono disturbati e, invece di seguire i percorsi previsti (dalle bocchette di immissione a quelle di evacuazione), si dirigono verso le fessure dell'edificio, l'efficienza di recupero diminuisce considerevolmente. La tenuta all'aria di una abitazione può essere misurata mediante il cosiddetto Blower Door Test. Questo procedimento prevede il posizionamento di un ventilatore in una porta o una finestra esterna in modo da creare una differenza di pressione, tra l'interno e l'esterno, pari a 50 Pa. Il corrispondente tasso di ricambio dell'aria complessivo (n_{50} , espresso in h^{-1}) indica la permeabilità all'aria dell'edificio.

Mentre nel Centro-Nord Europa le *Passivhaus* vengono progettate e costruite considerando un limite massimo del parametro n_{50} pari a $0.6 h^{-1}$, nel Sud Europa risulta possibile rilassare questo requisito: le masse d'aria entranti per infiltrazione sono mediamente più calde ed incidono quindi meno sui consumi energetici. Orientativamente, in questi contesti è possibile considerare come valore di riferimento quello di $1 h^{-1}$ nel caso si adotti una strategia di ventilazione forzata e valori superiori di n_{50} qualora sia addirittura possibile fare a meno del recupero di calore.



Figura 2.15 Misura della permeabilità all'aria: visibili la tenuta sulla porta, il ventilatore e gli strumenti di misura e registrazione.

2.3.7 Ventilazione

La ventilazione è necessaria in un edificio per mantenere costante il livello della qualità dell'aria interna. Le esigenze per la ventilazione variano a seconda del tipo di edificio e del numero di occupanti. Nelle abitazioni è necessario assicurare un ricambio d'aria tale che sia in grado, allo stesso tempo, di assicurare il manteni-

mento delle condizioni di adeguata qualità dell'aria per le persone che vi risiedono e di garantire lo smaltimento degli inquinanti che vengono generati nell'edificio, specialmente nei bagni e nelle cucine.

La ventilazione è assicurata, negli edifici privi di un sistema di ricambio dell'aria meccanico, dalle infiltrazioni e dalle aperture volontarie di porte e finestre.

Si concorda, in genere, sul fatto che le infiltrazioni non controllate debbano essere ridotte al minimo per evitare dispersioni termiche indesiderate durante l'inverno e guadagni termici non voluti durante l'estate. Gli standard di permeabilità all'aria negli edifici variano molto in Europa, ma la legislazione sta spingendo i costruttori edili a migliorare la tenuta degli involucri edilizi. La scelta tra ventilazione meccanica e naturale per gli edifici dipende dalle caratteristiche climatiche, dalla tenuta d'aria che è possibile raggiungere, dalla presenza di un sistema per recupero di calore e dalle preferenze dei residenti.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

In una Passivhaus la ventilazione naturale finalizzata al mantenimento della qualità dell'aria, non può essere affidata alle infiltrazioni (che sono ridottissime) o all'apertura occasionale delle finestre da parte degli occupanti. Come descritto in modo più approfondito nel paragrafo sui recuperatori di calore, per minimizzare il costo energetico della ventilazione è necessario ricorrere ad un sistema meccanico dotato di recuperatore di calore, che garantisca il tasso di ricambi orari prestabilito.

Durante la stagione estiva questa esigenza diventa meno stringente e può accadere che il sistema di ventilazione venga disattivato per fare spazio alla ventilazione naturale.

La ventilazione naturale per effetto camino è molto efficace nei climi del Nord Europa nei quali, di solito, vi è una maggiore differenza di temperatura tra gli ambienti interni ed esterni, sia in estate che in inverno. I climi nei quali vi è una forte variazione termica diurna sono idonei per l'utilizzo della massa termica e della ventilazione notturna.

Nelle regioni mediterranee, dove le necessità di climatizzazione estiva sono più importanti rispetto all'Europa continentale, la ventilazione può giocare un ruolo importante nel contenimento del fabbisogno di raffrescamento.

In particolare si può ricorrere a ventilazione naturale o ventilazione meccanica o a entrambe. La ventilazione naturale viene realizzata, come già accennato, aprendo le finestre (o altre aperture apposite) nelle ore notturne, quanto la temperatura esterna è inferiore rispetto a quella interna. Il flusso d'aria che si stabilisce tra l'interno e l'esterno, proporzionale alle dimensioni delle aperture, alla loro posizione, alle differenze di temperatura e all'intensità del vento, svolge un ruolo importante nell'asportare energia termica dall'edificio, raffreddando le masse che avevano accumulato calore durante il giorno.

Il flusso d'aria che si stabilisce tra l'interno e l'esterno, proporzionale alle dimensioni delle aperture, alla loro posizione, alle differenze di temperatura e all'intensità del vento, svolge un ruolo importante nell'asportare energia termica dall'edificio, raffreddando le masse che avevano accumulato calore durante il giorno.

Alla ventilazione naturale può essere accoppiata o sostituita una ventilazione meccanica che svolge le stesse funzioni.



Figura 2.16 Elementi per la distribuzione dell'aria

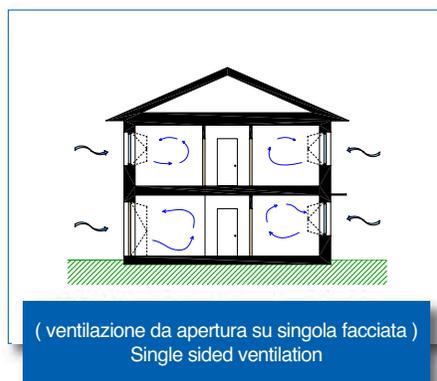
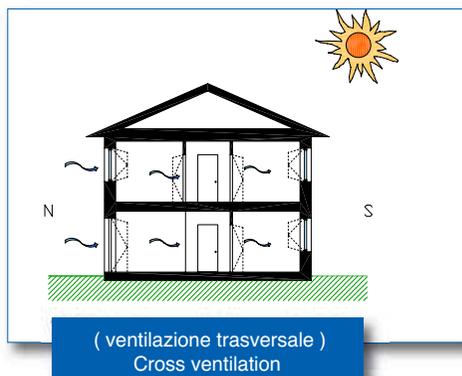
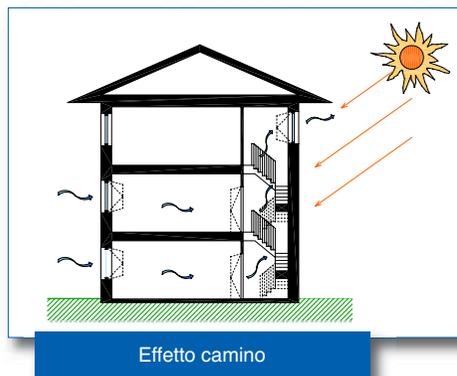


Figura 2.17 Diverse modalità di ventilazione naturale, attraverso le finestre o aperture di ventilazione apposite

2.3.8 Sistemi di recupero del calore

Un ventilatore dotato di recupero di calore può contribuire ad una sensibile riduzione dell'energia termica richiesta per mantenere una buona qualità dell'aria interna agli ambienti, recuperando energia dal flusso d'aria esausta estratto. Durante la stagione invernale, uno scambiatore di calore riscalda l'aria fredda in ingresso, raffreddando nello stesso tempo l'aria espulsa dall'abitazione e recuperando una frazione rilevante (dal 60 al 90%) dell'energia in essa contenuta che andrebbe altrimenti persa.

Anche se sono disponibili unità montate a finestra o a parete, questi sistemi di recupero del calore sono più spesso integrati in sistemi a tubature che distribuiscono l'aria nei diversi ambienti dell'abitazione. L'elemento essenziale è uno

scambiatore di calore, nel quale i flussi d'aria in ingresso e in uscita scambiano energia termica senza mescolarsi, permettendo all'aria estratta di aumentare la temperatura dell'aria fresca in ingresso.

Dopo aver attraversato lo scambiatore di calore, l'aria scaldata può essere inviata ad un impianto che ne innalza ancora la temperatura o direttamente alle varie stanze, mentre l'aria estratta dall'ambiente, dopo aver ceduto energia, viene espulsa all'esterno. In una configurazione tipica, l'aria viene immessa nel salotto e nelle camere e viene estratta dalla cucina e dal bagno, ambienti dove vi è la maggiore produzione di inquinanti e umidità e che in genere vengono tenuti leggermente in depressione.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Il sistema di recupero di calore è un elemento essenziale nella Passivhaus dell'Europa continentale; grazie al recuperatore di calore è possibile limitare fortemente il fabbisogno energetico legato alle necessità di ventilazione, garantendo così un'elevata qualità dell'aria con una spesa energetica contenuta.

Nei mesi più freddi il recupero di calore può essere insufficiente (pur in presenza dei guadagni solari e interni) per portare l'aria in ingresso alla temperatura richiesta. Il sistema di recupero di calore è quindi spesso associato a un generatore di calore di bassa potenza (ad esempio una stufa a legna o una pompa di calore) per effettuare un post-riscaldamento sull'aria in ingresso.

E' possibile sfruttare una configurazione di questo tipo, con un semplice post riscaldamento a valle del recuperatore, nel caso in cui picchi di carico non siano troppo elevati; in questo caso è possibile sostituire l'impianto di distribuzione tradizionale con un impianto ad aria (comunque necessario per la ventilazione) garantendo così risparmi economici considerevoli dal punto di vista impiantistico.

I sistemi dotati di recuperatore di calore sono molto utilizzati nella realizzazione di Passivhaus nell'Europa continentale. E' possibile trasferire questa soluzione nell'area del Mediterraneo, dal momento che le esigenze di attenuare il fabbisogno legato alla ventilazione sono importanti anche in questi climi.

Per i climi più a sud in cui la domanda di energia invernale è più bassa, occorre analizzare più in dettaglio la convenienza economica.

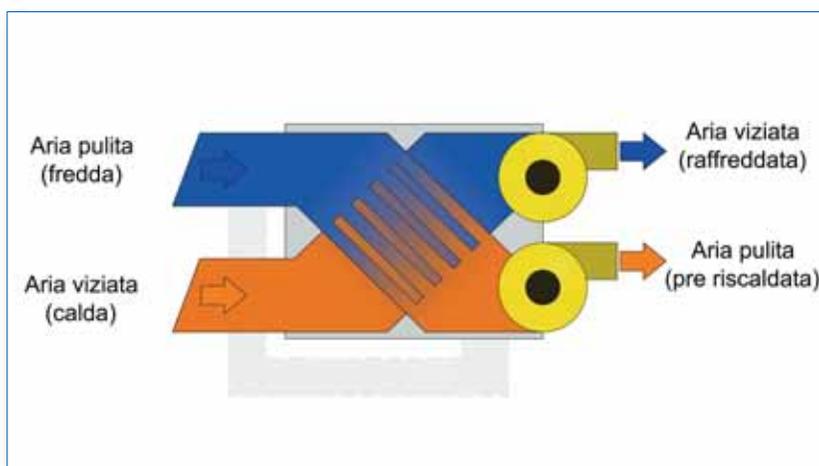


Figura 2.18 Recuperatore di calore sulla ventilazione.

2.3.9 Zone cuscinetto

Uno spazio 'cuscinetto' è uno spazio libero posto tra gli ambienti interni e l'esterno che offre una protezione termica (e a volte acustica) ulteriore agli ambienti abitati. Oltre a ridurre le dispersioni può permettere di preriscaldare l'aria di ventilazione e, se progettato in modo appropriato, può aumentare lo sfruttamento dei guadagni termici solari.

Architettonicamente, lo spazio cuscinetto si traduce spesso in forma di un atrio di ingresso, di scala di accesso, di sottotetto, di porticato o di serra con vetrate. Nei casi in cui le zone cuscinetto siano esposte a Sud, il loro involucro è normalmente vetrato per intercettare la radiazione solare invernale.

Ovviamente, in questi casi, è buona regola prevedere l'utilizzo di schermature esterne regolabili e l'apertura dei vetri per evitare i surriscaldamenti estivi.

Le zone cuscinetto con spazi 'di transizione', (ossia che possono essere occupati soltanto per breve tempo e possono essere consentite variazioni di temperature molto più ampie rispetto a quelle che generalmente si considerano come confortevoli per gli spazi occupati), non devono ovviamente essere riscaldate al fine di estenderne il periodo di uso.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Nel Nord Europa è tipico predisporre zone cuscinetto e serre solari per garantire il raggiungimento dello Standard Passivhaus. Si tratta di misure aggiuntive particolarmente adatte in climi caratterizzati da inverni molto rigidi.

In contesti climatici più caldi è necessario porre tutta l'attenzione del caso nella progettazione di queste zone termiche: se, da una parte, non risultano infatti indispensabili per limitare la domanda di riscaldamento, dall'altra, soprattutto nel caso di serre, possono peggiorare il comportamento termico estivo dell'edificio. Un compromesso può essere rappresentato da sistemi notevolmente flessibili che offrono agli occupanti ampi margini di regolazione.

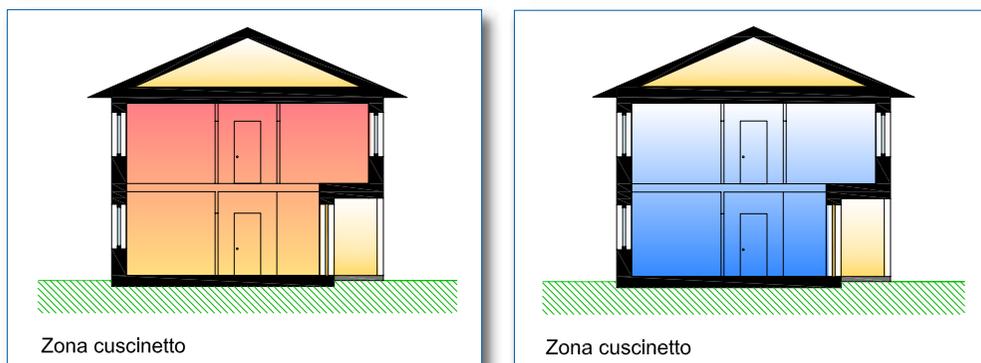


Figura 2.19 Esempi di zone cuscinetto: sottotetto e atrio di ingresso.

2.3.10 Altre strategie passive per la rimozione del calore in estate

In molti edifici del Sud Europa sono state adottate con successo varie strategie per l'esportazione del calore dall'edificio all'ambiente circostante in estate. Queste strategie, sfruttando i principali "pozzi" ambientali (aria, cielo, acqua, suolo), comportano un limitato, se non nullo, consumo di energia. In particolare in queste strategie sono inclusi: la ventilazione notturna, il raffrescamento radiativo, il raffrescamento evaporativo e il raffrescamento geotermico.

Ventilazione notturna

In molte aree dell'Europa si manifesta, in estate, un'oscillazione diurna della temperatura dell'aria abbastanza elevata con temperature notturne che scendono al di sotto della temperatura di comfort. Questa aria fredda può essere convogliata all'interno dell'abitazione per scaricare le strutture edilizie del calore immagazzinato durante il giorno e per utilizzare il benefico effetto dell'inerzia termica durante il giorno successivo.

Per garantire un raffrescamento efficace ed evitare discomfort locali durante la notte, è necessario prevedere una organizzazione dei locali interni che non ostacoli i flussi d'aria diretti dalle aperture sopravento a quelle sottovento, permettere alle correnti d'aria di lambire la massa dell'edificio, dimensionare e gestire opportunamente (anche attraverso sistemi di automazione) le aperture.

Raffrescamento radiativo

Un cielo notturno in condizioni di tempo sereno costituisce un potenziale pozzo di calore, sfruttabile mediante il meccanismo di scambio termico per irraggiamento attraverso cui la superficie relativamente calda del tetto trasmette calore verso la volta celeste fredda che lo sovrasta. In caso di tetti ben isolati, come quelli tipici degli edifici realizzati secondo lo Standard Passivhaus questa strategia è meno efficace se usata direttamente, per cui sarebbe necessario individuare una tecnica appropriata per sfruttare questo potenziale di raffreddamento.

Raffrescamento evaporativo

Il potenziale di raffreddamento associabile all'acqua in evaporazione è stato sfruttato in molte aree dell'Europa del Sud, del Medio Oriente e dell'India del nord. Come regola generale, è possibile ottenere una riduzione della temperatura dell'aria di ventilazione facendola entrare in contatto con acqua che, per evaporare, preleva dall'aria che la lambisce il calore latente necessario per il cambiamento di fase. Tale abbassamento ovviamente varia da pochi gradi, quando l'aria è relativamente umida, fino a 10-12°C quando l'aria è relativamente secca. Per quanto riguarda il raffrescamento convettivo, il controllo della velocità di evaporazione e del flusso d'aria mediante aperture di ventilazione è fondamentale per ottimizzare le prestazioni ed evitare una sovraumidificazione.

Raffrescamento geotermico

Come già detto in precedenza, a latitudini prossime alla nostra, la temperatura del terreno per profondità maggiori a circa 6 m, oscilla in modo limitato e tende alla temperatura media annua dell'aria esterna di circa 10-12°C. La terra è quindi una enorme sorgente di energia termica a temperatura costante, che può essere sfruttata sia per il riscaldamento che per il raffrescamento degli edifici. Oltre ai già citati effetti sulla dissipazione dell'energia termica accumulata nei pavimenti, questa sorgente di calore e di raffrescamento può, per esempio, essere sfruttata utilizzando sonde geotermiche verticali ad acqua che, collegate tramite scambiatore di calore a un circuito interno di distribuzione, permettono di scaricare l'energia termica accumulata nelle solette edilizie, dotate di pannelli radianti. Tale strategia di raffrescamento diretto può essere integrata da una pompa di calore, le cui prestazioni vengono notevolmente aumentate dallo sfruttamento del suolo, come pozzo sorgente.

Rilevanza nella progettazione della Passivhaus e applicabilità climatica

Nel Nord Europa, una attenta progettazione della muratura degli edifici (proprietà termiche, orientamento, schermatura solare) può spesso eliminare il bisogno di un sistema di raffrescamento aggiuntivo. Ciò può essere possibile anche nel Sud dell'Europa, ma al variare delle condizioni climatiche e delle aspettative di comfort, tale opportunità va progettata con particolare cura.

In riferimento allo Standard *Passivhaus* esteso, in molti casi il potenziale di raffrescamento passivo può permettere, da solo, il raggiungimento del comfort secondo il modello previsto dalla normativa nei casi di non presenza di raffrescamento meccanico (modello adattivo di comfort).

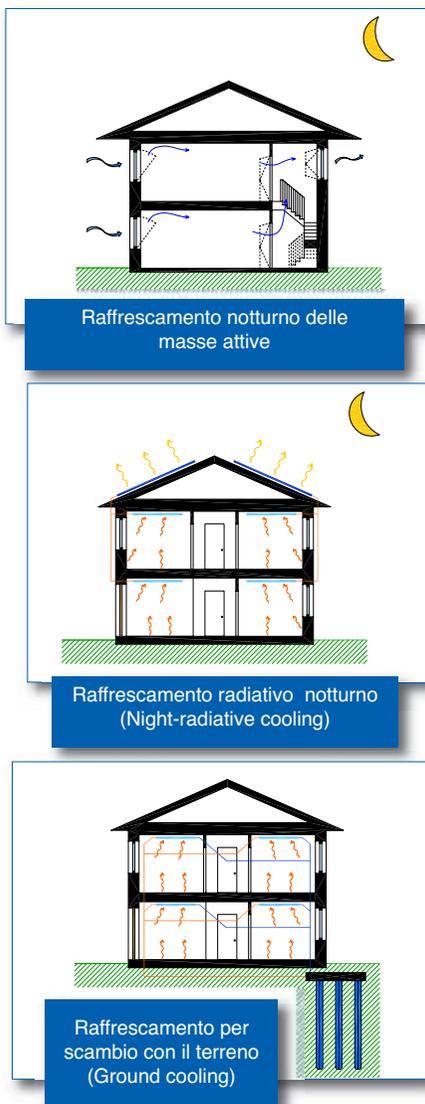


Figura 2.20 Diverse strategie passive di esportazione del calore durante l'estate.

3. Modelli di Passivhaus ottimizzati per tre climi Italiani

In questo capitolo viene presentato un esempio di come lo standard Passivhaus potrebbe essere applicato in Italia, paese caratterizzato da condizioni climatiche e socio-economiche diverse da quelle del contesto di applicazione originario, la Germania.

Va sottolineato che le considerazioni che seguono sono da intendersi come uno stimolo o una traccia su cui un progettista può interrogarsi nello sviluppare il proprio progetto che andrà necessariamente calato nel clima, nel contesto del luogo e dovrà rispondere ai requisiti e alle preferenze del committente; non costituiscono delle regole, ma solo degli esempi con cui confrontarsi. Occorrerà sempre tenere in considerazione la serie di ipotesi su cui le linee di tendenza proposte si basano e confrontarle con quelle della situazione concreta in cui si opera.

L'attenzione è stata focalizzata sul settore residenziale, individuando come riferimento la tipologia abitativa di "villetta a schiera": l'analisi è stata sviluppata attraverso la simulazione dinamica del comportamento energetico di modelli d'edificio appositamente definiti.

Partendo dalla considerazione della natura dello Standard Passivhaus, l'obiettivo è stato quello di individuare almeno un pacchetto di soluzioni tecnologiche e di strategie di controllo che consentano di soddisfare i requisiti prestazionali energetici (energia utile netta sensibile per il riscaldamento e il raffrescamento) e di comfort illustrati nelle sezioni precedenti.

Dal punto di vista metodologico, si è ritenuto vantaggioso partire dall'esperienza già consolidata nel centro Europa e, con una successione di analisi di sensitività, ottimizzarne i risultati progettuali attraverso opportune modifiche e integrazioni.

L'analisi si compone delle seguenti fasi:

- caratterizzazione del contesto climatico con cui la progettazione edilizia si è dovuta confrontare;
- riconoscimento di un modello base, costruito a partire dall'esperienza consolidata delle Passivhaus nordeuropee, preventivamente integrato da alcune strategie di raffrescamento;
- studio volto all'adeguamento delle principali caratteristiche dell'involucro iniziale alle diverse condizioni climatiche considerate e all'individuazione di modelli ottimizzati;
- analisi aggiuntiva volta a fornire indicazioni circa l'influenza dei principali parametri progettuali sui fabbisogni energetici degli edifici ottimizzati;
- valutazione dei livelli estivi di comfort termico per gli edifici risultanti.

3.1 Contesto climatico

L'Italia è generalmente riconosciuta come un Paese dal clima mediterraneo. In realtà, essa è caratterizzata da una notevole varietà climatica¹⁴ lungo i circa 1.000 km che separano le Alpi dai mari della Sicilia.

La normativa ufficiale (Legge 10/91) ha individuato sei zone climatiche invernali, dalla più mite zona A (< 600 gradi giorno) alla più severa zona F (> 3.000 gradi giorno).

¹⁴L'Italia viene divisa convenzionalmente in quattro tipi di clima: alpino, mediterraneo, peninsulare e della pianura padano-veneto-emiliana.

Nonostante la varietà climatica sia molto pronunciata anche durante il periodo caldo, le norme di riferimento non forniscono una suddivisione del territorio in zone climatiche estive¹⁵.

Con l'obiettivo di considerare queste differenze si è deciso di sviluppare una proposta di Passivhaus per le condizioni climatiche di Milano, Roma e Palermo: rappresentative di condizioni tipiche del Nord, Centro e Sud del Paese, e facenti parte delle zone climatiche invernali E, D e B.

I dati riportati nelle tabelle 3.1 e 3.2 indicano che Roma, considerato l'intero periodo annuale, offre probabilmente le condizioni climatiche più favorevoli: i suoi inverni risultano miti e le sue estati non particolarmente critiche. La velocità del vento e l'escursione termica giornaliera estiva che la contraddistinguono, costituiscono inoltre una condizione favorevole allo sfruttamento del potenziale di ventilazione naturale notturna.

A Palermo la stagione fredda è molto mite ma le estati risultano particolarmente calde e caratterizzate sia da un'elevata radiazione solare che da limitate variazioni giorno-notte della temperatura; quest'ultima condizione può ridurre l'efficacia della ventilazione notturna della massa termica degli edifici.

A Milano, invece, risultano predominanti le condizioni invernali che sono contraddistinte da temperature molto basse e da una limitata radiazione solare. In estate la bassa velocità del vento può limitare l'efficienza di strategie dissipative passive.

Tabella 3.1: Dati climatici invernali.

	Zona Climatica	Gradi Giorni Invernali	Temperatura Media	Temperatura Minima	Velocità media del vento	Velocità relativa media	Irradiazione solare diretta media ¹⁶
			[°C]	[°C]	[m/s]		[Wh/m ²]
Milano	E	2404	2.8	-11.0	0.7	83%	1263
Roma	D	1415	9.9	-4.0	4.1	79%	2048
Palermo	B	751	13.9	4.8	4.3	73%	2143

Tabella 3.2: Dati climatici estivi.

	Zona Climatica (CNR)	Gradi Giorni Estivi	Temperatura Media	Temperatura Massima	Velocità media del vento	Velocità media del vento	Umidità relativa media	Irradiazione solare diretta media ¹⁷
			[°C]	[°C]	[°C]	[m/s]		
Milano	7	482	21.7	32.6	8.9	1.0	71%	4855
Roma	3	568	23.3	31.8	7.5	3.3	75%	4918
Palermo	1	842	25.5	34.0	4.0	3.3	74%	6471

¹⁵Per colmare tale lacuna è possibile riferirsi a una proposta del CNR che, nel 1990, riconosceva sette zone climatiche estive (dalla più severa zona 7 alla più mite zona 1) analizzando i principali parametri climatici locali (umidità relativa, velocità del vento, temperatura dell'aria e radiazione solare).

¹⁶Media su novembre, dicembre, gennaio e febbraio.

¹⁷Media su giugno, luglio e agosto.

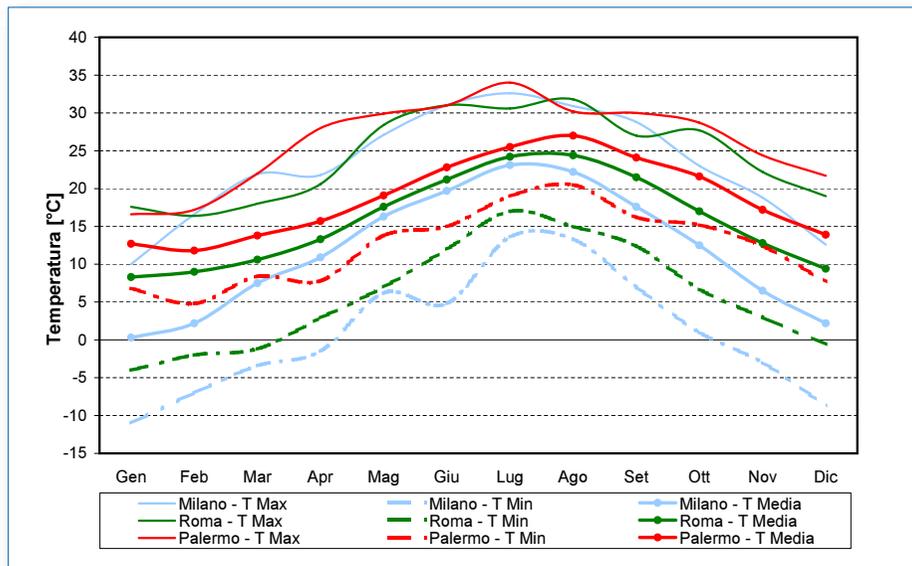


Figura 3.1 Temperature medie, minime e massime per Milano, Roma e Palermo.

Si sottolinea che i dati riportati nelle tabelle precedenti e utilizzati nelle simulazioni si riferiscono ad “anni tipo” costruiti¹⁸ utilizzando i rilievi condotti dalle stazioni meteorologiche collocate nei pressi degli aeroporti (Linate, Fiumicino, Punta Raisi). Va osservato che le condizioni climatiche nei centri urbani presentano generalmente degli scostamenti: a causa dell’effetto “isola di calore”, le temperature estive risultano solitamente più elevate e, a causa dei tanti impedimenti architettonici, la velocità del vento risulta generalmente minore. Al fine di ridurre tale incongruenza e quindi adattare i dati meteorologici disponibili alle reali condizioni, si è provveduto a correggere la velocità dell’aria in funzione della densità edilizia tipica del contesto urbano ma, nonostante tale provvedimento correttivo, si invita il lettore alla prudenza e a ritenere che le proposte presentate siano più appropriate e pertinenti ad abitazioni localizzate in zone periferiche, laddove non si risente dell’effetto “isola di calore”.

3.2 Modello base

Come già accennato, risulta inizialmente interessante studiare come l’involucro edilizio di una *Passivhaus* tradizionale, opportunamente integrato da strategie di raffreddamento passivo, risponda alle sollecitazioni climatiche considerate; questa valutazione preliminare intende ricavare indicazioni di massima circa le potenzialità di una sua trasposizione nei climi considerati, individuarne eventuali criticità e indirizzare successive possibili ottimizzazioni. Al fine di contestualizzare i risultati che verranno proposti, si riporta una sintesi (tabella 3.3) delle caratteristiche principali dell’edificio considerato inizialmente e una loro descrizione più dettagliata: geometria, componenti costruttivi, strategie di riscaldamento-raffreddamento e tasso di ricambi d’aria.

¹⁸Fonte: International Weather for Energy Calculations (IWEC).

Tabella 3.3: Principali caratteristiche del modello base.

Area abitabile	103		m ²
Altezza dei locali	2.7		m
Rapporto S/V	0.88		-
Infiltrazione d'aria: n ₅₀	0.6		h ⁻¹
Trasmittanze dell'involucro edilizio	pareti	0.135	W/m ² K
	tetto	0.135	W/m ² K
	basamento	0.135	W/m ² K
	vetri	0.7	W/m ² K
Massa termica efficace	450		Kg/m ²
Occupazione	n° persone	4	
Carichi interni (Potenza installata)	Elettrodomestici	2	W/m ²
	Illuminazione	1.2	W/m ²
Strategie di riscaldamento	Distribuzione ad aria		
	Recupero di calore con efficienza del 85%		
	Pompa di calore reversibile		
Strategie di raffreddamento	Protezioni solari orientabili		
	Ventilazione naturale notturna		
	Pompa di calore reversibile		
Ricambi d'aria	0.74		h ⁻¹

3.2.1 Geometria dell'edificio

Lo studio si propone di quantificare sia le prestazioni energetiche sia quelle di comfort di una villetta a due piani con superficie calpestabile netta di circa 100 m², composta da piano interrato, piano terra e primo piano. Un vano scala collega la taverna interrata con la zona giorno del piano terra e la zona notte collocata al primo piano. La taverna e il garage sono esterni all'involucro termico.

Si è deciso di considerare un edificio della tipologia "villetta a schiera", collocata ad un'estremità della schiera stessa e con un rapporto S/V pari a 0.88 m⁻¹. Per ottimizzare i guadagni solari (favorendoli in inverno e limitandoli in estate), l'edificio ha la facciata con maggiore frazione vetrata rivolta a Sud.

Negli aspetti estetici e nella disposizione dei locali la Passivhaus sviluppata per l'Italia è conforme allo stile abitativo che rappresenta almeno nel centro nord, una parte significativa delle nuove costruzioni di provincia degli ultimi anni. La scelta di una "villetta a schiera" come riferimento mira a mostrare come sia possibile recepire i requisiti dello Standard Passivhaus anche rispondendo alle esigenze e alle aspettative abitative tipiche degli acquirenti. Analizzata e recepita una tipologia di domanda che caratterizza il mercato immobiliare italiano, è bene comunque ricordare che andrebbero sviluppate valutazioni di più ampio respiro sull'opportunità della scelta abitativa considerata. In particolare, sarebbe opportuno studiare come la realizzazione di agglomerati residenziali basati su modelli edilizi a bassa densità abitativa possa comportare un aumento dei consumi energetici (relativi ad esempio ai servizi, le infrastrutture e i trasporti connessi) rispetto a modelli edilizi a media densità, come i condomini.

Anche se sviluppate per questa particolare unità abitativa, le indicazioni che verranno fornite possono essere in parte considerate valide anche per soluzioni condominiali che, essendo caratterizzate da rapporti S/V più vantaggiosi e dispersioni solitamente inferiori, facilitano il raggiungimento dello Standard.

Le superfici trasparenti del modello d'edificio di riferimento, sono state dimensionate in accordo con i requisiti minimi imposti dai regolamenti di igiene vigenti in Italia, che impongono che la cosiddetta superficie aeroilluminante¹⁹ di ogni stanza non sia inferiore ad un ottavo della superficie utile dello stesso ambiente. L'ottemperanza a tale principio ha comportato che la superficie finestrata totale del prospetto Sud dell'edificio in esame rappresenti circa il 20% dell'intera facciata.



Figura 3.2: Facciata Nord (a sinistra) e Sud (a destra) del modello base di Passivhaus.



Figura 3.3: Disposizione degli spazi del piano interrato (sinistra), del piano terra (centro) e del primo piano (destra)

¹⁹Per la sua definizione e procedura di calcolo si rimanda al Regolamento di Igiene del Comune di Milano, Art. 3.4.15.

3.2.2 Componenti costruttivi

Per la definizione del modello d'edificio oggetto di questo studio ci si è riferiti alle tecniche comunemente impiegate nella realizzazione della maggioranza dei nuovi edifici residenziali in Italia, adeguatamente combinate. In particolare il sistema portante è costituito da un telaio in conglomerato cementizio armato gettato in opera; i tamponamenti, per ottenere un'elevata ed efficace inerzia termica sono costituiti da una doppia parete, con paramento murario interno in mattoni pieni (sp. 15 cm), paramento esterno in blocchi forati autoportanti (sp. 12 cm) e interposto strato isolante (25 cm di lana di roccia). Come finitura esterna è stato previsto un intonaco di calce e cemento, all'interno invece un intonaco di calce e gesso.

Il solaio che costituisce la chiusura superiore (verso il sottotetto non riscaldato) dell'involucro edilizio è costituito da una struttura portante in laterocemento (20+4 cm), isolata con pannelli in lana di roccia ad alta densità (25 cm). Il solaio interpiano (tra piano terra e primo piano) non è coibentato. Il solaio che costituisce la chiusura inferiore (verso il piano interrato non riscaldato) presenta isolamento sul lato inferiore: tale soluzione consente di mantenere la massa del solaio all'interno dell'involucro termico.

Considerando un materiale isolante con valore di calcolo della conduttività pari a 0.037 W/mK (ottenuta migliorando la conduttività dichiarata del 10%, come previsto dalla normativa vigente), tutte le trasmittanze delle tre componenti edilizie che confinano gli ambienti riscaldati (pareti, tetto e basamento) risultano pari a 0.134 W/m²K, valore tipico per le Passivhaus dell'Europa Centrale.

Anche per i componenti finestrati ci si è riferiti, in prima istanza, alle tecnologie tradizionalmente impiegate nelle Passivhaus tedesche mirate prevalentemente alle prestazioni invernali: vetrocamere triple composte da due lastre di vetro basso-emissivo e una lastra di vetro chiaro, intervallate da intercapedini riempite con argon, in grado di limitare la trasmittanza al centro del vetro a 0.7 W/m²K, diminuire il discomfort locale dovuto alla minore temperatura che solitamente hanno le superfici trasparenti e non ridurre eccessivamente i guadagni solari invernali (fattore solare = 0.53). Combinando tale tipologia di vetrocamere con telai ad alte prestazioni termiche si è potuto limitare la trasmittanza complessiva delle finestre della casa a $1 \div 1.2$ W/m²K, in funzione delle diverse dimensioni delle finestre stesse.

Lo Standard e la buona pratica dell'Europa Centrale richiedono poi che gli involucri edilizi limitino il ricambio d'aria per infiltrazioni a un massimo di 0.6 h⁻¹ per una differenza di pressione di 50 Pa ($n_{50} < 0.6$ h⁻¹): i telai delle finestre dell'abitazione considerata sono stati quindi caratterizzati da una permeabilità all'aria pari a 0.31 kg/h per metro di giunto.

Per quanto riguarda la massa termica complessiva efficace²⁰ dell'edificio, esperienze e analisi rilevano la sua influenza sui fabbisogni energetici: la norma svizzera SIA 382, ad esempio, fissa un valore minimo di massa termica efficace pari a 350 kg per m² di area calpestabile allo scopo di limitare il fabbisogno di raffrescamento. Le componenti edilizie considerate comportano per la Passivhaus analizzata un valore di massa termica efficace media²¹ pari a circa 450 kg/m². In generale, è attribuibile all'edificio un'inerzia termica medio-alta, in linea con le soluzioni costruttive normalmente impiegate in Italia.

Si sottolinea che per essere davvero efficace la massa termica deve essere posta in contatto con la portata d'aria notturna. Ciò significa da un lato che la massa va lasciata esposta e dall'altro, che occorre collocare le aperture di ventilazione in modo che le pareti interne e i solai vengano lambiti dal flusso d'aria.

Per quanto riguarda i ponti termici, è necessario considerare che la pratica edilizia più comune in Italia (telaio portante in calcestruzzo armato e tamponamenti in muratura) comporta solitamente dei ponti termici in corrispondenza delle travi e dei pilastri e lungo i giunti tra i mattoni e la struttura portante. Altri ponti termici si sviluppano di solito laddove le gronde poggiano sulle pareti perimetrali, nei vani delle finestre e nelle fondazioni.

²⁰In linea generale per massa termica efficace si intende quella degli elementi (strutture, tamponamenti, solai, finiture etc) contenuti all'interno dell'involucro termico isolato, che agiscono come volano termico.

²¹Calcolata secondo la procedura proposta dalla norma ISO 13786.

Nelle costruzioni standard è tipico riscontrare ponti termici con coefficienti di trasmissione lineare pari a $0.1 \div 0.8 \text{ W/m K}$. Ipotizzando valori di trasmittanza delle pareti perimetrali e del tetto pari a $0.4 \div 1 \text{ W/m}^2\text{K}$, tipici nelle nuove costruzioni in Italia, i ponti termici incidono significativamente sulle perdite totali per conduzione attraverso l'involucro edilizio.

In un edificio ben coibentato, se non vengono corrette le dispersioni attribuibili ai ponti termici possono risultare pari a circa il doppio delle perdite totali attraverso le pareti e il tetto. Oltre a comportare un maggiore fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, la presenza di zone fredde nell'involucro edilizio potrebbe causare problemi di condensazione nei mesi invernali.

Nella Passivhaus, per limitare i ponti termici al 5% delle perdite totali attraverso l'involucro edilizio, è necessario ridurre la trasmittanza lineare a 0.01 W/m K .

3.2.3 Carichi interni

Per quanto concerne i carichi termici attribuibili alla presenza degli occupanti e per quelli relativi al funzionamento degli elettrodomestici e dei sistemi d'illuminazione, si è scelto di considerare una famiglia di quattro persone e si è ipotizzato l'utilizzo di apparecchiature a basso consumo energetico, ossia, elettrodomestici efficienti e lampadine compatte fluorescenti.

Per la caratterizzazione delle potenze installate si sono utilizzati i dati raccolti in una campagna di misure effettuata in 110 abitazioni italiane nel periodo 2000-2002²². Da questo monitoraggio è risultato un consumo di energia elettrica medio pari a circa 3 000 kWh annui per abitazione.

Mantenendo gli andamenti di utilizzo (schedule orarie) ottenute dalle misure, i livelli di potenza installata sono stati modificati sulla base di alcune considerazioni:

- le misure effettuate nel periodo 2000-2002 rispecchiano i consumi degli elettrodomestici e dei sistemi di illuminazione presenti nelle abitazioni italiane in quegli anni; nel corso degli anni gli elettrodomestici più obsoleti sono stati in parte sostituiti dai nuovi, caratterizzati da consumi inferiori, aumentando l'efficienza media dell'esistente. Anche per quanto riguarda l'illuminazione, le campagne per l'efficienza energetica promosse negli ultimi anni hanno portato a una maggiore diffusione delle lampade compatte fluorescenti, che hanno sostituito una frazione significativa delle lampade ad incandescenza. Inoltre, nel simulare il comportamento di un'abitazione recente, è verosimile ipotizzare la presenza di elettrodomestici nuovi e quindi più efficienti.
- altro aspetto importante nella determinazione dei consumi sono le abitudini degli occupanti: la scelta, la quantità e la modalità di utilizzo delle apparecchiature elettriche presenti nell'abitazione. E' verosimile ipotizzare che gli occupanti di una casa passiva siano attenti nello scegliere apparecchiature a basso consumo e che le usino in modo oculato;
- terza considerazione, già citata, che risulta di fatto vincolante, è l'obbligo di mantenere l'uso di energia primaria inferiore ai $120 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ per rispettare lo Standard Passivhaus. L'ipotesi di considerare un consumo di energia elettrica pari a 3 000 kWh annui complessivi avrebbe comportato un superamento di tale limite. Di fatto, quindi, la definizione stessa di Passivhaus richiede un'attenzione particolare ai consumi da parte degli occupanti nella gestione quotidiana dell'edificio.

Sulla base di queste osservazioni, sono stati assunti i valori di consumi energetici riportati in tabella 3.4 e la potenza elettrica installata relativa agli elettrodomestici e all'illuminazione è stata fissata a 3.2 W/m^2 .

²²Monitoraggi compiuti da eERG per i progetti EURECO e MICENE, finanziati dal programma SAVE della Comunità Europea e dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Tab 3.4: Proposta di ripartizione del limite sui consumi primari totali (120 kWh/m²anno) dello Standard Passivhaus.

Uso Finale	Energia [kWh/m ² anno]	Energia [kWh/anno]	Energia primaria ¹² [kWh/m ² anno]
Elettrodomestici	10.9	1129.0	28.6
Illuminazione	4.1	421.3	10.7
Acqua calda sanitaria	21.3	2209.4	18.7
Cucina (gas)	5.8	600.0	5.8
Riscaldamento	15.0	1556.0	13.2
Raffrescamento	15.0	1556.0	13.2
Ventilazione	7.0	729.8	18.5
Altri ausiliari	1.0	100.0	2,5
Totale			111.2

Sulla base delle linee progettuali del Passivhaus Institut, il consumo energetico dei ventilatori è stato stimato in 0.4 Wh per m³ d'aria esterna immessa. Questo dato di consumo specifico assieme al dato dei ricambi d'aria stabiliti per l'abitazione (si consulti il prossimo paragrafo 3.2.5), ha determinato un fabbisogno annuo di energia elettrica per la ventilazione pari a 7 kWh/m²a.

3.2.4 Strategie di riscaldamento e raffrescamento

Nelle case costruite secondo lo Standard *Passivhaus* il sistema di riscaldamento è strettamente legato all'involucro edilizio, così da formare un unico sistema integrato e razionalizzato.

Il fabbisogno di calore è contenuto riducendo le infiltrazioni di aria fredda attraverso l'involucro: per compensare tale assenza e garantire i necessari ricambi d'aria, risulta necessario un sistema di ventilazione forzata in grado di mantenere la qualità dell'aria negli ambienti interni. Un sistema di ventilazione attivo permette inoltre il recupero di calore dall'aria esausta espulsa, con conseguente riduzione del carico di riscaldamento. La *Passivhaus* qui analizzata è sviluppata sulla premessa che le soluzioni progettuali applicate nella *Passivhaus* dell'Europa Centrale siano pertinenti a molte aree dell'Italia con inverni relativamente rigidi e possano, se integrate con soluzioni aggiuntive, fornire una strategia efficace anche per il raffrescamento passivo estivo: una struttura ben coibentata e con un'inerzia termica medio-alta fornisce una base efficace per utilizzare la bassa temperatura dell'aria esterna di notte e di primo mattino al fine di aumentare il benessere del giorno successivo. L'aria notturna può attraversare i locali dell'edificio mediante una strategia di ventilazione naturale (apertura delle finestre o altre aperture) oppure utilizzando i ventilatori del sistema attivo di ventilazione. In aggiunta, l'alto isolamento dell'involucro rende possibile, d'estate, il contenimento dei guadagni termici solari.

La *Passivhaus* considerata presenta quindi il sistema integrato tipico dell'esperienza centro europea, caratterizzato da:

- sistema di distribuzione composto da canali di aerazione con diametro di 10-20 cm e da due ventilatori (da circa 40 W ciascuno) per la mandata dell'aria di rinnovo e l'aspirazione dell'aria esausta;
- scambiatore di calore aria-aria con efficienza dell'85%¹³ per il pre-riscaldamento dell'aria;
- pompa di calore di bassa potenza per il riscaldamento supplementare del fluido termovettore al fine di garantire una temperatura minima degli ambienti interni di 20°C in inverno.

¹²Si ipotizza l'uso di una pompa di calore ad azionamento elettrico e si assume il fattore di conversione dell'energia elettrica in energia primaria pari a 1/0,38.

¹³Valore garantito da diversi modelli di recuperatore già presenti nel mercato tedesco.

E adotta le seguenti soluzioni aggiuntive:

- ombreggiamento delle finestre con esposizione Sud ed Est attraverso lo spiovente del tetto e utilizzo di frangisole riflettenti dimensionati e regolati per bloccare la radiazione solare diretta, ma non quella diffusa utilizzabile per illuminare i locali interni;
- strategia di ventilazione notturna regolata dall'apertura degli infissi, opportunamente studiata per rimuovere efficacemente il calore immagazzinato durante il giorno ed evitare condizioni di discomfort locale nella zona notte dell'edificio.
- utilizzo di un sistema di raffrescamento attivo atto a limitare le temperature interne a 26°C^{23} e destinato a intervenire quando la ventilazione notturna non risulta sufficiente a questo scopo. Tale ulteriore contributo può essere fornito da una pompa di calore reversibile di bassa potenza (la medesima macchina termica utilizzata in fase di riscaldamento invernale).

Il vantaggio di basare il modello di partenza sulla Passivhaus tipica dell' Europa Centrale risiede nella possibilità di applicarlo in modo relativamente semplice ad edifici con caratteristiche estetiche comunemente accettate. Per esempio, non c'è particolare necessità di ampie superfici finestrate a Sud o serre solari per assicurare sufficienti guadagni termici invernali. Il sistema di ventilazione attivo può essere usato in estate per fornire ventilazione notturna senza la necessità di specifici camini.

D'altro canto non si vuole suggerire che le soluzioni progettuali considerate rappresentino la migliore soluzione architettonica possibile, né si desidera imporre una particolare tipologia di sistemi di riscaldamento e raffrescamento: sono possibili altre scelte che forniscano le condizioni di comfort richieste in inverno ed estate, così come definite nello Standard Passivhaus esteso (2007). Una serra esposta a Sud che riduca la richiesta termica invernale, ma che comporti un surriscaldamento estivo, ovviamente, non risulterebbe accettabile.

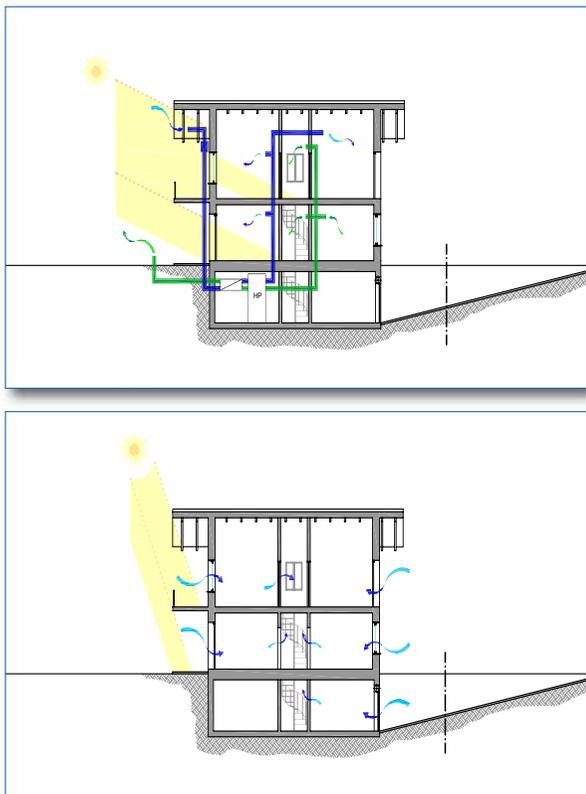


Figura 3.4: Vista d'insieme delle principali strategie progettuali impiegate per assicurare il comfort invernale (sopra) ed estivo (sotto).

²³Per approfondire questa specifica si rimanda al paragrafo 1.4

3.2.5 Tasso di ricambio d'aria

Uno dei parametri che più influenza il bilancio energetico edilizio è il tasso di ricambio d'aria che, in funzione del volume dell'ambiente in esame, stabilisce quanta aria interna esausta viene sostituita da aria esterna nell'unità di tempo.

Un adeguato livello di ventilazione è necessario per raggiungere negli ambienti interni condizioni di benessere igienico e olfattivo, ma al suo aumentare si accrescono i consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici.

Gli enti normativi nazionali ed europei hanno predisposto procedure di calcolo, codificate in norme specifiche o più generali, che individuano valori minimi di ricambio che garantiscono la qualità dell'aria interna.

Le diverse procedure presenti in letteratura (sintetizzate in tabella 3.5) non conducono tuttavia a risultati completamente convergenti.

La normativa italiana valuta il numero di ricambi d'aria da due punti di vista: dal punto di vista energetico oppure dal punto di vista della qualità dell'aria interna.

La norma europea di recente approvazione cerca un compromesso ottimale tra i due aspetti, mentre la procedura indicata col nome PHPP è stata messa a punto per la verifica del raggiungimento dei requisiti dello Standard *Passivhaus* originario.

Tabella 3.5: Sintesi delle principali norme o marchi volontari che codificano il calcolo del tasso di ricambio d'aria. I valori riportati si riferiscono alla geometria e alla disposizione degli spazi dell'edificio in esame

Norma	Tasso di ricambio d'aria [h ⁻¹]	Ambito di validità	Ambito di riferimento
UNI EN 832:2001	0,5	Nazionale	Prestazione energetica edifici
UNI EN ISO 13790:2005	0,3	Nazionale	Prestazione energetica edifici
UNI 10339:1995	1,08	Nazionale	Qualità dell'aria interna
EN 15251:2006	1,18 / 0,36	Europea	Prestazione energetica edifici Benessere ambientale interno
PHPP	0,35-0,6	Passivhaus	Prestazione energetica edifici Benessere ambientale interno

Ricostruito questo quadro abbastanza eterogeneo nei presupposti e quindi nei risultati (il valore massimo è circa quattro volte maggiore di quello minimo), si è scelta l'impostazione più conforme ai principi su cui si basa il nuovo Standard *Passivhaus* (eccellenti livelli di comfort ambientale e di qualità dell'aria e riduzione dei consumi energetici), fissando per i nostri calcoli un valore di 0.74 volumi/ora, ottenuto a partire dalla norma UNI 10339 tenendo conto della presenza di occupanti.

Le considerazioni appena proposte non sarebbero valide nel caso di edifici non dotati di un sistema di ventilazione meccanica e che non contemplino una strategia di recupero del calore: l'impianto qui considerato si presta particolarmente a garantire la qualità dell'aria senza appesantire il bilancio energetico.

3.2.6 Prestazioni energetiche

Per quanto concerne lo Standard *Passivhaus* esteso (Cap. 1.3) occorre rispettare sia per la fase di riscaldamento che per quella di raffrescamento un limite energetico di 15 kWh/m²anno e garantire i livelli di comfort estivi descritti dal modello di Fanger.

Le simulazioni dinamiche condotte sull'edificio descritto hanno permesso di quantificare l'energia utile netta (EUN) richiesta per soddisfare i requisiti di benessere termico interno nei tre contesti climatici considerati.

Come mostrato in figura 3.5, l'analisi conferma le considerazioni iniziali sul possibile trasferimento e integrazione delle strategie utilizzate nel centro Europa e individua quantitativamente i margini di intervento per modificare il modello di base. Rispetto ai requisiti energetici richiesti dal nuovo Standard *Passivhaus*, i fabbisogni stimati permettono di considerare nei tre climi, in particolare a Roma e Palermo, caratteristiche d'involucro meno stringenti sia per il regime estivo che per quello invernale.

Risulta quindi possibile intervenire ulteriormente sull'involucro edilizio al fine di ridurre i costi e semplificare le tecniche di costruzione. In questo senso sono state sviluppate due analisi di ottimizzazione con l'obiettivo di delineare i margini di azione e di compiere semplificazioni successive sulla permeabilità e sulla resistenza termica dell'involucro edilizio.

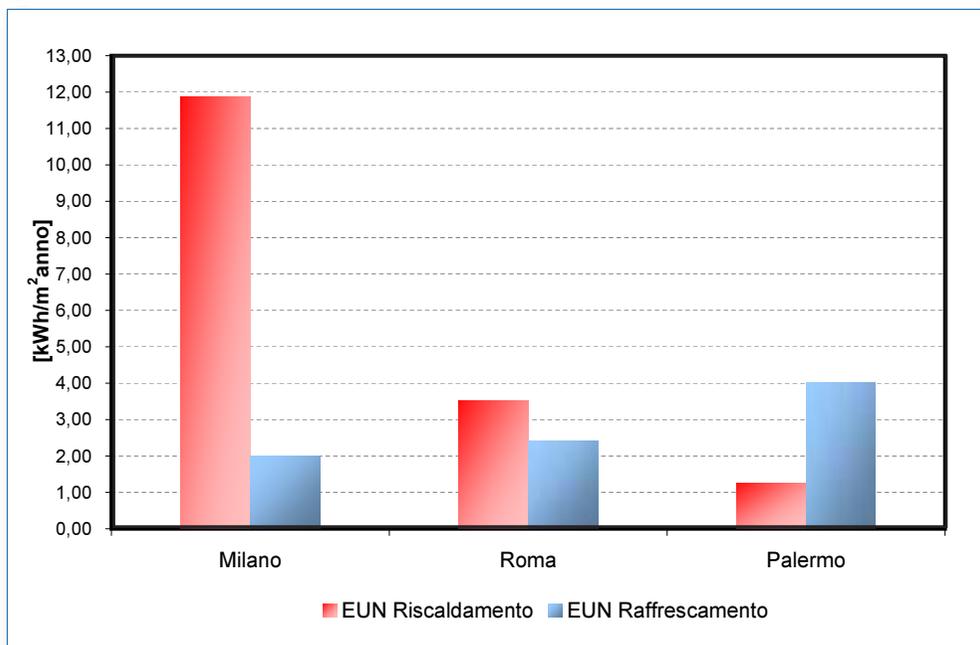


Figura 3.5: Fabbisogni di energia utile netta (EUN) relativi al modello base nei tre climi considerati.

3.3 Analisi di ottimizzazione

Di seguito si ripercorrono le considerazioni che hanno guidato il processo di affinamento proposto e si forniscono risultati quantitativi che possono indirizzare la progettazione preliminare di una Passivhaus in contesto italiano.

3.3.1 Analisi di ottimizzazione sulla permeabilità dell'involucro edilizio

Infiltrazioni incontrollate di aria esterna nello spazio abitato comportano correnti d'aria e aumenti del fabbisogno di riscaldamento invernale. Analogamente in estate, l'infiltrazione di correnti d'aria calda può comportare un aumento della domanda di raffrescamento. Come già specificato, lo Standard *Passivhaus* definito per climi freddi cerca di limitare le correnti d'aria indesiderate e impone alla permeabilità dell'involucro edilizio il limite di n_{50} pari a 0.6 h^{-1} . Anche se raggiungibile, tale valore comporta un aumento dei costi di costruzione e il suo ottenimento può risultare complesso poiché richiede assemblaggi tra gli elementi costruttivi e la posa in opera di qualità particolarmente elevata: solitamente è necessario eseguire diversi tentativi prima di superare il Blower Door Test²⁴ previsto nella procedura di verifica. Rilassare il limite del parametro n_{50} comporterebbe una semplificazione nella costruzione.

Come evidenziato nelle figure 3.6, le analisi mostrano che in tutte le località considerate i limiti energetici possono essere raggiunti applicando specifiche meno stringenti rispetto a quelle correntemente applicate nello Standard *Passivhaus*. In particolare risultano come accettabili valori di n_{50} di:

- $1 \div 1.5 \text{ h}^{-1}$ per Milano
- valori anche superiori per Roma e Palermo.

Le infiltrazioni hanno un effetto maggiore sul fabbisogno di riscaldamento che su quello di raffrescamento, infatti la differenza di temperatura dell'aria tra esterno e interno è maggiore durante l'inverno e di conseguenza le infiltrazioni invernali comportano aumenti proporzionalmente superiori del fabbisogno energetico.

Considerando che il valore di n_{50} di 1 h^{-1} sia già sufficiente a semplificare le operazioni di rifinitura e test dei componenti finestrati, si sceglie di adottare in tutti i climi questo valore e procedere con le ulteriori analisi.

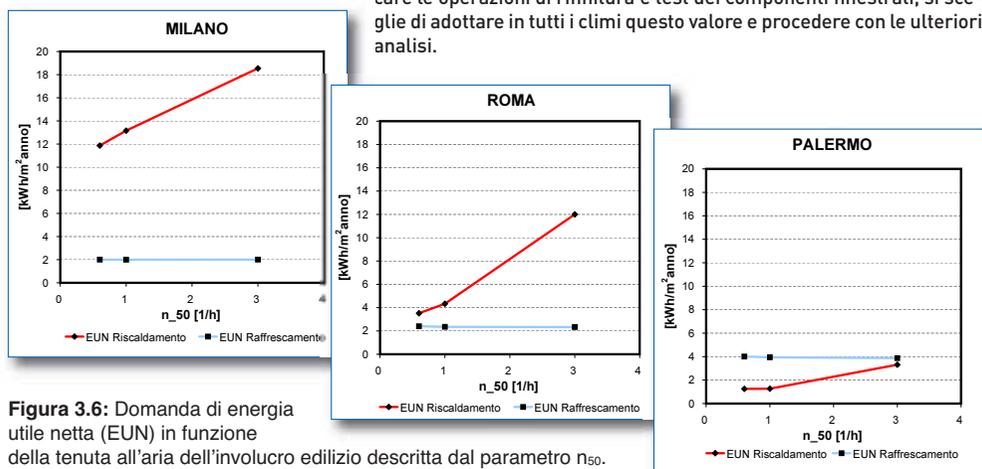


Figura 3.6: Domanda di energia utile netta (EUN) in funzione della tenuta all'aria dell'involucro edilizio descritta dal parametro n_{50} .

²⁴Si rimanda al paragrafo 2.3.6.

3.3.2 Analisi di ottimizzazione sull'isolamento dell'involucro: le superfici trasparenti

Una tipica *Passivhaus* tedesca presenta finestre speciali con tripli vetri basso-emissivi (b-e). Ma finestre con tripli vetri ad alte prestazioni, salvo il caso del Trentino Alto Adige, non sono facilmente reperibili sul mercato italiano e sono altresì relativamente costose. Dato il clima generalmente più mite che caratterizza l'Italia, è ragionevole chiedersi se sia possibile applicare criteri meno stringenti riguardo i componenti finestrati.

I grafici di figura 3.7 confrontano le prestazioni energetiche complessive che si ottengono nelle tre località usando tripli vetri basso-emissivi (con trasmittanza del vetro di $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fattore solare di 0.5), doppi vetri basso-emissivi (con trasmittanza del vetro di $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fattore solare di 0.6) e doppi vetri standard (con trasmittanza del vetro di $2.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ e fattore solare di 0.8). Si osserva che:

- la sostituzione dei vetri tripli basso-emissivi con doppi vetri basso-emissivi comporta sempre un aumento esiguo del fabbisogno energetico complessivo (circa 0.5-1.5 kWh/m²anno);
- la sostituzione dei vetri tripli basso-emissivi con vetrocamere standard (doppio vetro chiaro) comporta un aumento rilevante del fabbisogno energetico complessivo in presenza di inverni rigidi (a Milano si osserva un aumento del 52%);
- in contesti climatici caratterizzati da buoni livelli di irradiazione solare e temperature invernali relativamente alte (Roma e Palermo), l'adozione di doppi vetri basso-emissivi può comportare un bilancio positivo tra i maggiori guadagni solari e le minori dispersioni (figura 3.8) e, conseguentemente, una diminuzione del fabbisogno di riscaldamento;
- l'utilizzo di componenti trasparenti ad alte prestazioni rispetto a soluzioni standard riduce il fabbisogno di raffrescamento in maniera limitata e proporzionale alla criticità delle condizioni climatiche estive. Si tenga presente che questa conclusione è relativa al nostro caso in cui le protezioni solari esterne (verticali e orizzontali) bloccano la radiazione solare diretta che inciderebbe sulle superfici vetrate in estate.

Ciò considerato, per Roma e Palermo in particolare, sembra superflua l'adozione dei tripli vetri e a rischio (sia dal punto di vista energetico che da quello di discomfort locale), l'utilizzo di vetrocamere standard. Si è deciso quindi di proseguire l'analisi considerando il modello d'edificio dotato di doppi vetri basso emissivi.

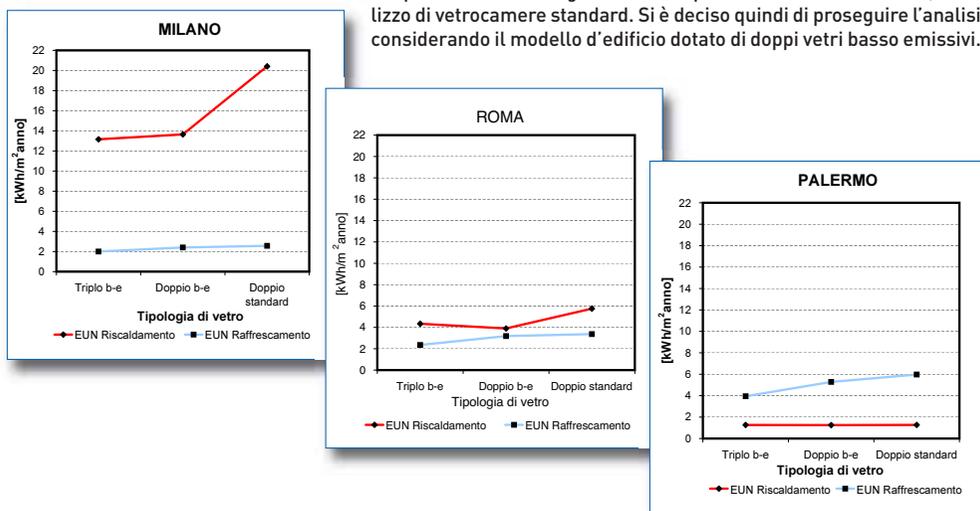


Figura 3.7: Domanda di energia utile netta (EUN) in funzione della tipologia di superfici trasparenti impiegate.

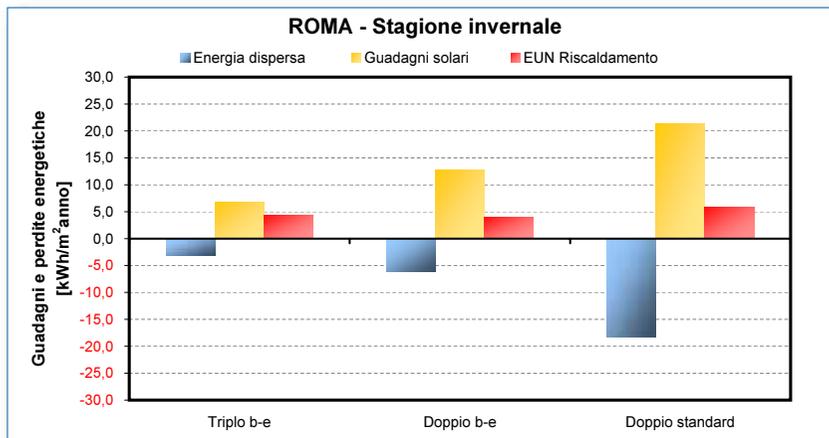


Figura 3.8: Bilancio tra guadagni solari e dispersioni termiche al variare della tipologia di vetri, nel clima di Roma.

3.3.3 Analisi di ottimizzazione sull'isolamento dell'involucro: le superfici opache

Il modello di casa passiva sviluppato per il clima Nord Europeo, ha come punto irrinunciabile un elevato isolamento degli elementi opachi. Trasferendo nei climi italiani un'abitazione costruita secondo gli standard del Passivhaus dell'Europa centrale e settentrionale si rileva che i livelli di isolamento possono essere ridotti, in alcuni casi, pur rimanendo assai superiori alla pratica costruttiva attuale.

Al fine di descrivere in modo esaustivo l'effetto dell'isolamento delle diverse componenti edilizie (pareti, tetto e basamento) sui fabbisogni energetici si è provveduto a sviluppare un'analisi di ottimizzazione costruendo, per variazioni successive delle trasmittanze, una combinazione di 16 edifici (tabella 3.6).

Tabella 3.6: Combinazione di varianti d'edificio considerate.

	Pareti (P)	Tetto (T)	Basamento (B)
Mod0	x	x	x
Mod1	+	+	+
Mod2	+	+	0+
Mod3	0+	+	0+
Mod4	0+	0+	0+
Mod5	0+	0+	0
Mod6	0	0+	0
Mod7	0	0	0+
Mod8	0	0	0
Mod9	-	-	-
Mod10	0-	0-	0-
Mod11	n	n	n
Mod12	+	0	+
Mod13	+	+	n
Mod14	0	+	0
Mod15	0+	+	n

Ricordando che nei modelli elaborati è prevista in estate una strategia di ventilazione notturna per la dissipazione degli accumuli di energia termica nelle strutture e per la riduzione del fabbisogno di raffrescamento, le conclusioni generali che possono essere tratte dall'analisi dei modelli sono:

- i benefici marginali (cioè legati all'aggiunta di un cm di isolante allo spessore) sul fabbisogno di riscaldamento si riducono progressivamente all'aumentare dello spessore già considerato, fino a diventare poco significativi al di là di determinati valori di trasmittanza termica, dipendenti dal clima considerato;
- sia in inverno che in estate è attribuibile un effetto vantaggioso all'isolamento delle pareti verticali e della copertura: i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento diminuiscono con la trasmittanza dei due elementi edilizi;
- se da un lato un maggior isolamento del basamento riduce il fabbisogno di energia per il riscaldamento, dall'altro, durante l'estate, è necessario considerare come un basamento molto isolato in edifici ad uno o due piani, come quello considerato, porti ad un aumento delle necessità di raffrescamento. Il peso di tale effetto e la scelta del livello di isolamento ottimale è strettamente legata al clima; in particolare, in climi caldi, in cui il periodo critico è l'estate sarà da prediligere un basamento poco isolato, mentre in climi più freddi, caratterizzati da inverni rigidi, la scelta ricadrà su un isolamento importante del basamento.

Tabella 3.7: Livelli di isolamento termico considerati nell'analisi. Si assume che il materiale isolante abbia conduttività di 0.037 W/mK.

Varianti	Simbolo	Pareti		Tetto		Basamento	
		U-value [W/m ² K]	Spessore isolante [m]	U-value [W/m ² K]	Spessore isolante [m]	U-value [W/m ² K]	Spessore isolante [m]
Isolamento molto alto	x	0.1	0.345	0.1	0.344	0.1	0.344
Isolamento alto	+	0.135	0.250	0.134	0.250	0.134	0.250
Isolamento medio alto	0+	0.200	0.160	0.200	0.159	0.300	0.097
Isolamento medio	0	0.300	0.098	0.300	0.097	1.000	0.011
Isolamento medio basso	0-	0.500	0.049	0.300	0.097	0.700	0.027
Isolamento basso	-	0.540	0.044	0.420	0.062	1.340	0.001
Isolamento nullo	n	1.489	0.000	1.404	0.000	1.404	0.000

Facendo riferimento alle variazioni d'isolamento esplicitate nella tabella 3.7, di seguito si riportano in modo più dettagliato i risultati ottenuti per le tre località considerate.

3.3.3.1 Milano

Per Milano si conferma la predominanza dal punto di vista energetico delle condizioni invernali e si osserva una pronunciata dipendenza del fabbisogno di riscaldamento dai livelli di isolamento.

Risultando il fabbisogno di raffrescamento meno rilevante di quello di riscaldamento e debolmente influenzato dalla resistenza termica delle diverse componenti edilizie, non si evidenziano eventuali effetti discordanti relativi al loro diverso livello di isolamento.

Come mostrato nella figura 3.9 si rende necessario un consistente isolamento dei componenti edilizi per limi-

tare la domanda di energia utile netta per il riscaldamento a $15 \text{ kWh/m}^2\text{anno}$ previsti dallo Standard *Passivhaus*. Tra i due modelli altamente coibentati (Mod0 e Mod1) è comunque possibile scegliere quello con minore isolante (25 cm), caratterizzato da una trasmittanza di pareti, tetto e basamento di $0,134 \text{ W/m}^2\text{K}$.

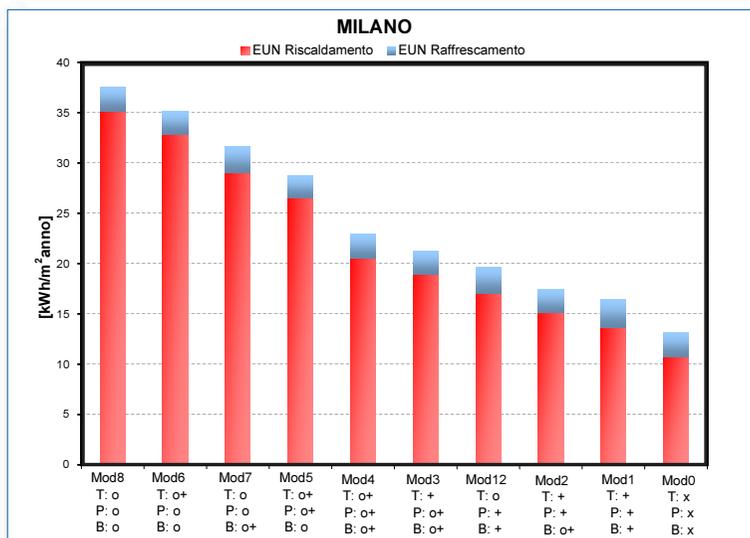


Figura 3.9: Milano-Domanda di energia utile netta (EUN) al variare delle combinazioni di isolamento termico considerate.

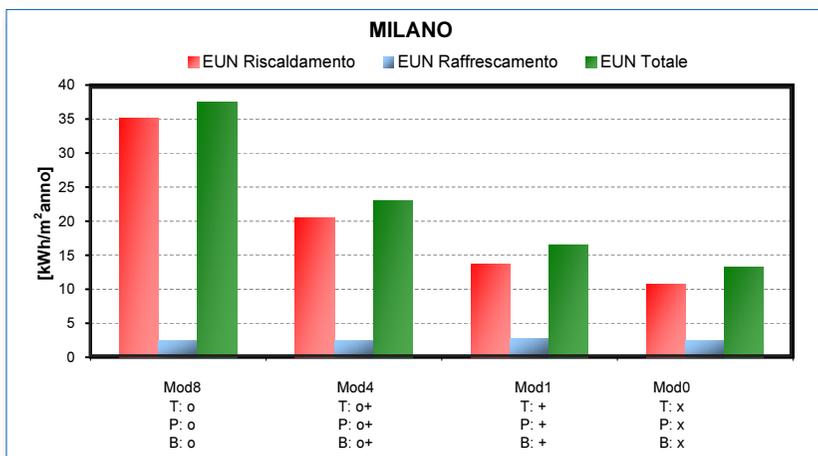


Figura 3.10: Milano - Confronto in termini di fabbisogni energetici tra i modelli caratterizzati da isolamento uniforme delle componenti di involucro edilizio

3.3.3.2 Roma

A Roma si conferma la tendenza riscontrata per Milano e si manifestano più chiaramente gli effetti dell'isolamento sul comportamento estivo dell'edificio: diminuendo la resistenza termica dell'involucro edilizio il fabbisogno di EUN per il riscaldamento aumenta, mentre quello per il raffrescamento risulta dipendente dal diverso livello di isolamento degli elementi costruttivi (basamento, pareti, tetto).

In questo contesto climatico non risulta infatti vantaggioso isolare uniformemente gli elementi che compongono l'involucro edilizio: come mostrato in figura 3.11 le combinazioni che riducono maggiormente il fabbisogno di raffrescamento sono quelle caratterizzate da un elevato isolamento delle pareti perimetrali e del tetto e limitata coibentazione del basamento (Mod13 e Mod15).

Questi modelli, che permettono di smaltire verso il suolo l'energia termica accumulata nelle strutture costruttive, andrebbero presi in crescente considerazione all'aumentare dell'importanza delle richieste energetiche estive.

Nel caso di Roma, come sintetizzato dai confronti proposti in figura 3.13, il comportamento invernale sconsiglia un'eccessiva riduzione della resistenza termica delle fondamenta: rinunciando completamente alla loro coibentazione il bilancio tra aumento dei consumi invernali e riduzione di quelli estivi è negativo. Ricordiamo che stiamo considerando una casa a due piani e che queste considerazioni non varrebbero per un edificio di maggiore elevazione.

Nei confronti con lo Standard di riferimento, a Roma si manifesta la possibilità di contenere l'isolamento a livelli medio-alti: il primo modello d'edificio che soddisfa i requisiti per la fase di riscaldamento e, nel contempo, limita i fabbisogni di raffrescamento è quello caratterizzato da trasmittanze di tetto, pareti e fondamenta rispettivamente di 0,2 e 0,3 e 1 W/m²K (Mod6).

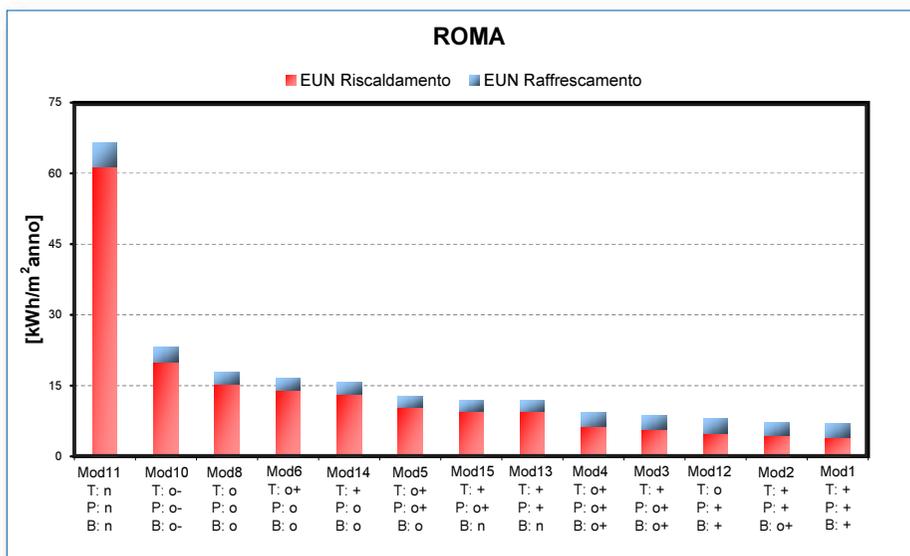


Figura 3.11: Roma - Domanda di energia utile netta (EUN) al variare delle combinazioni di isolamento termico considerate

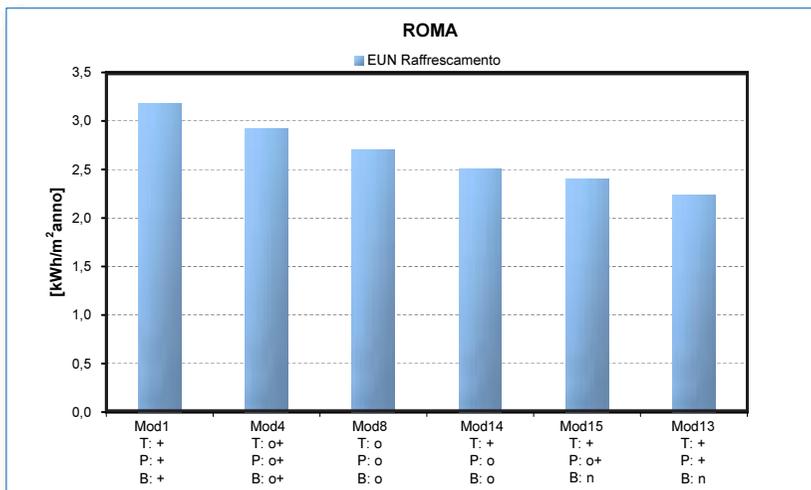


Figura 3.12: Roma - Fabbisogno di raffrescamento al variare dei livelli e della disposizione dell'isolante

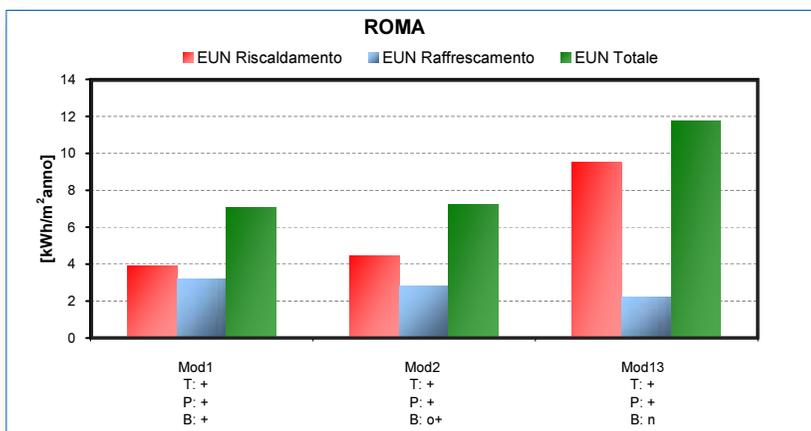


Figura 3.13: Roma - Fabbisogni energetici in funzione dell'isolamento del basamento.

3.3.3.3 Palermo

Nel contesto climatico di Palermo, alcuni dei comportamenti riscontrati a Roma si confermano e sono quantitativamente rilevanti.

Gli inverni più moderati e le estati più critiche che contraddistinguono questa località comportano una differente ripartizione del fabbisogno totale, nelle configurazioni che soddisfano lo standard: qui, infatti, la domanda di energia per il raffrescamento estivo risulta predominante su quella per il riscaldamento invernale.

L'analisi mostra che un iperisolamento delle componenti edilizie non migliora sostanzialmente il comportamento invernale dell'edificio e che, più che negli altri casi, l'isolamento del basamento penalizza le condizioni

estive. In aggiunta, a differenza di quanto osservato a Roma, una completa rimozione dell'isolante da questo componente non risulta più vincolata dal comportamento invernale (figura 3.16): i risparmi energetici per il raffrescamento superano infatti le maggiori perdite invernali.

Ciò nonostante durante la stagione calda, alla coibentazione delle pareti perimetrali e del tetto sono attribuibili rilevanti risparmi energetici (anche del 75% rispetto al modello senza isolamento). Per cui ancora una volta risulta che ai modelli denominati Mod13 e Mod15 sono attribuibili i minori consumi di raffrescamento (figura 3.15).

Per l'edificio considerato i requisiti identificati dallo Standard *Passivhaus* possono essere soddisfatti anche con livelli non particolarmente elevati di isolamento. Il primo modello che li soddisfa è quello caratterizzato da 5 cm di lana di roccia nelle pareti ($U = 0.54 \text{ W/m}^2\text{K}$), da 6 cm nel tetto ($U = 0.42 \text{ W/m}^2\text{K}$) e da un basamento non isolato ($U = 1.34 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Per evitare fraintendimenti si evidenzia ancora una volta che i risultati presentati sono stati ottenuti considerando edifici che si avvalgono di una strategia di recupero del calore sull'aria in uscita. Rinunciando a questo contributo, normalmente non presente nelle abitazioni tradizionali, i requisiti qui individuati non sono più sufficienti, ma si rendono necessari livelli di isolamento molto maggiori (prossimi a quelli del Mod13) per raggiungere lo Standard *Passivhaus* [cfr par.3.6].

Questa soluzione può essere considerata una variante interessante, proponibile, salvo necessaria verifica nel contesto specifico, per le località del Sud Italia, nel caso in cui si preferisca puntare su un maggiore isolamento per poter evitare l'utilizzo della ventilazione meccanica con recuperatore di calore

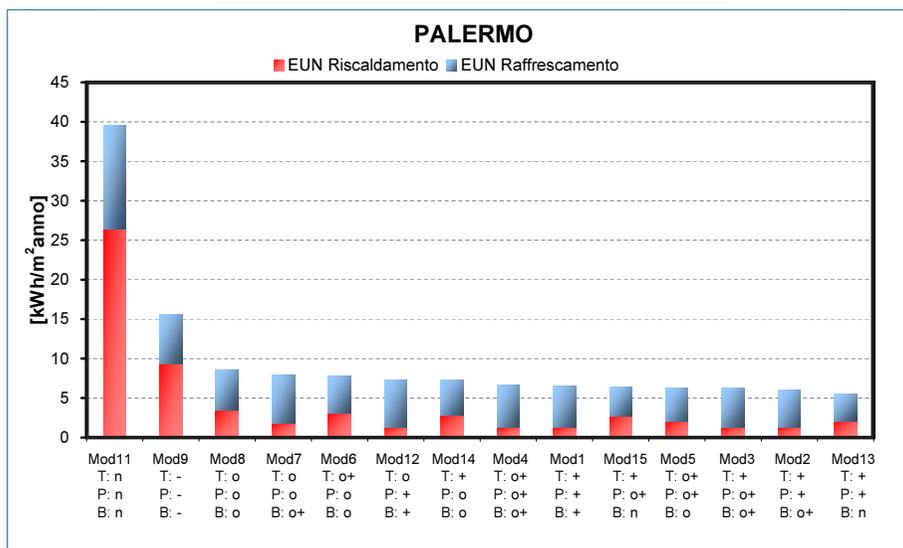


Figura 3.14: Palermo - Domanda di energia utile netta (EUN) al variare delle combinazioni di isolamento termico considerate.

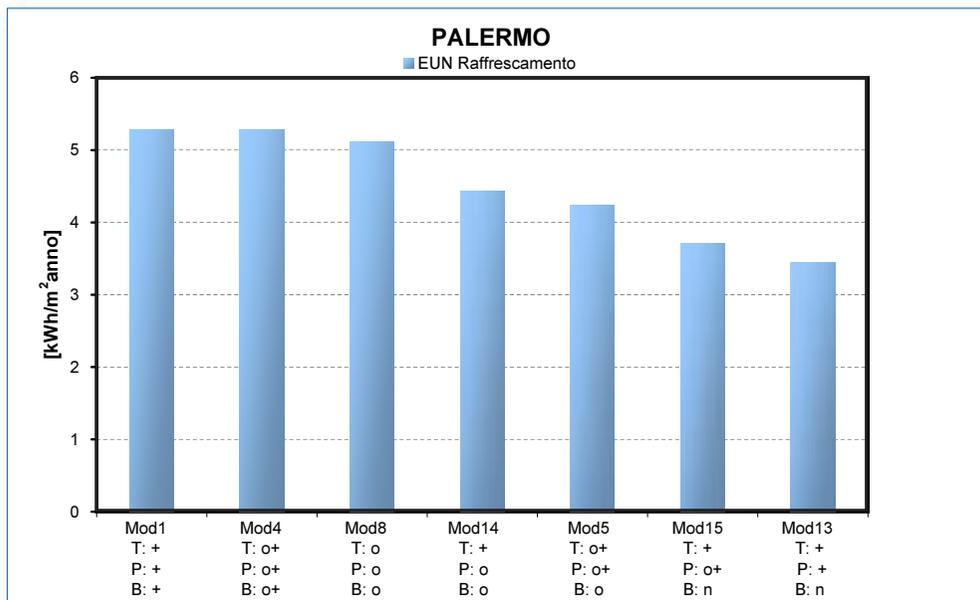


Figura 3.15: Palermo - Domanda di energia utile netta per raffrescamento al variare dei livelli e della disposizione dell'isolante.

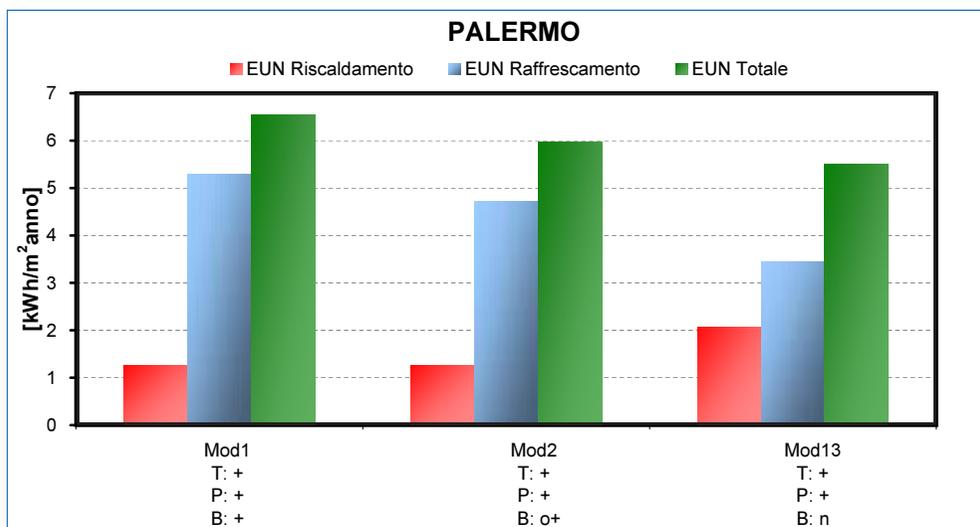


Figura 3.16: Palermo - Domanda di energia utile netta in funzione dell'isolamento del basamento.

3.4 I modelli ottimizzati

Anche se l'abitazione considerata adotta molti dei concetti delle Passivhaus tedesche, le analisi presentate mostrano come sia possibile modificare alcune specifiche. In generale il clima più mite presente in Italia permette di raggiungere i limiti energetici e di comfort dello Standard Passivhaus utilizzando criteri meno stringenti per quanto riguarda:

- la permeabilità dell'involucro: a Milano il limite di n_{50} pari a 1 h^{-1} risulta accettabile, e probabilmente anche troppo conservativo per Roma e Palermo;
- la trasmittanza delle superfici trasparenti: i tripli vetri normalmente impiegati nel centro Europa possono essere sostituiti da doppi vetri basso-emissivi;
- l'isolamento delle superfici opache: mentre una tipica Passivhaus tedesca richiede 25-35 cm di isolante sulle pareti esterne e 30-40 cm sul tetto, a Milano è possibile soddisfare lo Standard con uno spessore degli strati isolanti di 25 cm e a Palermo si può ridurli ulteriormente (se si mantiene anche qui la ventilazione meccanica con recupero di calore), oppure si può eliminare la ventilazione meccanica con recuperatore e potenziare l'isolamento.

Riassumendo, le caratteristiche minime per soddisfare i requisiti dello Standard *Passivhaus* nelle tre località considerate vengono raccolte nella tabella 3.8

Tabella 3.8: Livelli di isolamento dell'involucro e di permeabilità all'aria richiesti per l'ottenimento dello Standard *Passivhaus* a Milano, Roma e Palermo. Si assume che l'isolamento termico abbia conduttività di 0.037 W/mK e che sia presente ventilazione meccanica con recupero di calore

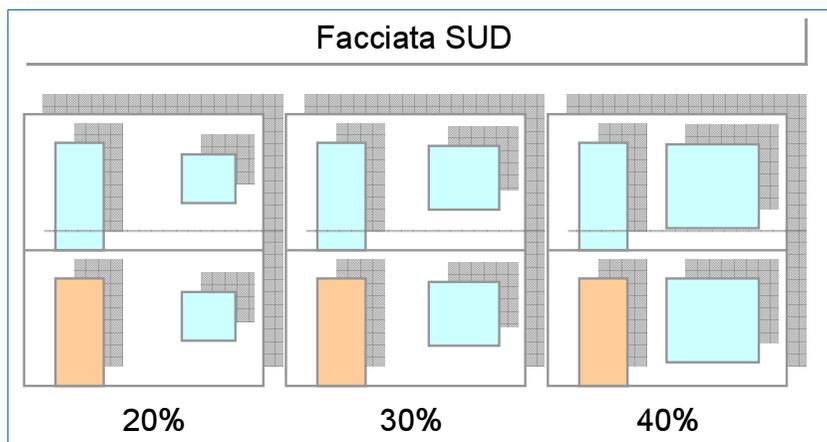
Località	Permeabilità all'aria n_{50}	Trasmittanze dell'involucro edilizio U-value				Livelli d'isolamento		
		Tetto	Pareti	Basamento	Vetri	Tetto	Pareti	Basamento
	[h^{-1}]	[$\text{W/m}^2\text{K}$]	[$\text{W/m}^2\text{K}$]	[$\text{W/m}^2\text{K}$]	[$\text{W/m}^2\text{K}$]	[cm]	[cm]	[cm]
Milano	1	0.134	0.135	0.134	1.400	25	25	25
Roma	1	0.200	0.300	1.000	1.400	16	10	1
Palermo	1	0.420	0.540	1.340	1.400	6	5	0

Le analisi mostrano dunque che con un limitato sforzo addizionale nelle località più a Sud, ad esempio, aumentando l'isolamento delle superfici opache, il limite scelto per lo Standard *Passivhaus* esteso può essere migliorato scendendo considerevolmente sotto il valore $15+15 \text{ kWh/m}^2 \text{ anno}$. Di questo sarà opportuno tenerne conto nelle previste revisioni dello standard.

I modelli d'edificio così caratterizzati sono stati sottoposti ad analisi di sensitività aggiuntive per valutare l'effetto sui fabbisogni energetici di altri parametri progettuali.

3.5 Analisi di sensitività

Di seguito si presenta come può variare la domanda di energia utile netta degli edifici ottimizzati al variare di altre caratteristiche dell'involucro edilizio (superficie vetrata, rapporto S/V, orientamento) e delle strategie passive considerate (protezioni solari, ventilazione naturale e recupero del calore).



3.5.1 Variazione Superficie vetrata

Come regola generale, in inverno le finestre della facciata Sud possono fornire utili guadagni solari che riducono la domanda di riscaldamento, ma un loro sovradimensionamento può comportare un aumento delle dispersioni notturne invernali ed eccessivi surriscaldamenti estivi.

Le figure 3.17 mostrano l'effetto sui fabbisogni di riscaldamento e raffreddamento al variare della percentuale di superficie finestrata della facciata Sud della *Passivhaus* considerata. I grafici mostrano che in tutte le località:

- maggiori dimensioni delle finestre possono ridurre i carichi per riscaldamento proporzionalmente alla radiazione solare incidente: fino a 1.5 kWh/m²anno a Milano e fino a 4.5 kWh/m²anno a Roma e Palermo;
- la percentuale di superficie finestrata della facciata Sud, ben schermata dalle protezioni solari scelte, influenza in modo meno pronunciato il fabbisogno di raffreddamento che aumenta, in modo analogo per i tre climi, fino a 0.5 kWh/m²anno.

Se da una parte i risultati di questa analisi suggeriscono architetture che massimizzano i guadagni solari, è comunque necessario consigliare prudenza nel dimensionamento dei componenti finestrati che notoriamente rappresentano uno degli elementi più "delicati" dell'involucro edilizio. Infatti, oltre a poter comportare situazioni di discomfort locale (asimmetrie radianti, abbagliamento, ecc.), in molti casi una loro non corretta gestione da parte degli occupanti può compromettere il comportamento termico dell'intero edificio.

I risultati ottenuti, inoltre, sono resi possibili dall'utilizzo di protezioni solari dimensionate correttamente e utilizzate in modo ottimale, che consentono di schermare la radiazione diretta durante l'estate, senza impedirne l'ingresso durante la stagione invernale.

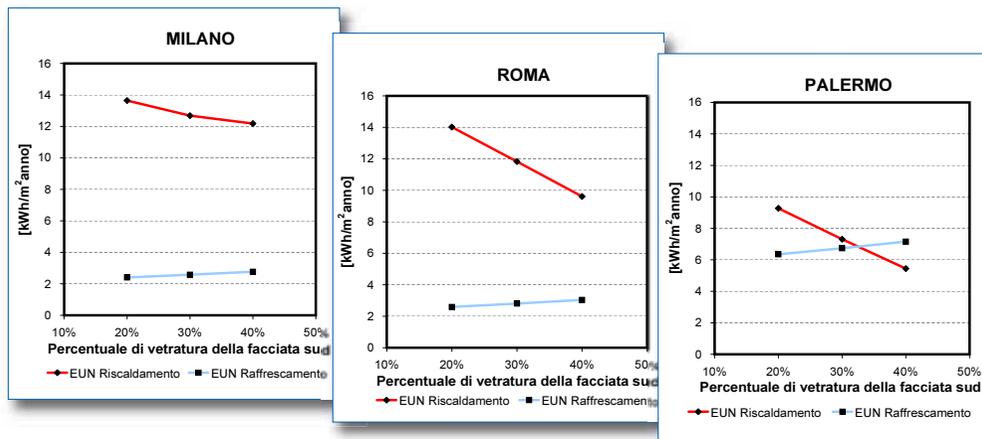
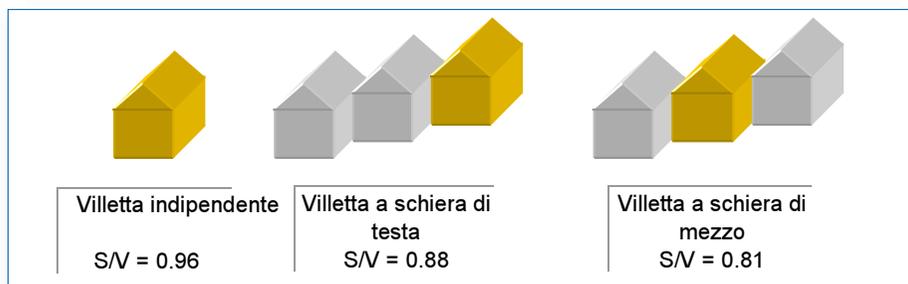


Figura 3.17: Domanda di energia utile netta in funzione della percentuale di superficie vetrata con esposizione Sud, nei tre climi considerati.

3.5.2 Variazione rapporto S/V



Come regola generale, gli edifici con basso rapporto tra superficie disperdente e volume controllato sono soggetti a minori perdite di calore in inverno e a minori guadagni termici in estate. Tali effetti sono ovviamente più pronunciati in edifici poco o non coibentati.

Nonostante risulti possibile rispettare lo Standard Passivhaus anche nel caso di una villetta indipendente risulterebbe più semplice (e quindi meno costoso) ove si rincorra a forme di edificio più compatte.

A supporto di queste considerazioni, le figure 3.18 mostrano che il fabbisogno energetico per riscaldamento della Passivhaus, considerata nel contesto di villa a schiera di mezzo (S/V = 0.81), è del 20-30% più basso della stessa casa considerata come villetta indipendente (S/V=0.96). Oltre a questo, si osserva che a Roma il modello sviluppato non è più in grado di rispettare il limite dei 15 kWh/m²anno nel caso in cui venga realizzata una villetta indipendente.

Anche il fabbisogno di raffrescamento aumenta all'aumentare del rapporto S/V: l'influenza risulta essere generalmente minore, ma maggiormente dipendente dalle condizioni climatiche esterne.

Dove i carichi di raffrescamento sono maggiori (Palermo) si osservano aumenti paragonabili a quelli riscontrati durante la stagione fredda (20%), mentre in un clima meno critico come quello di Milano, gli aumenti del fabbisogno estivo sono molto meno significativi.

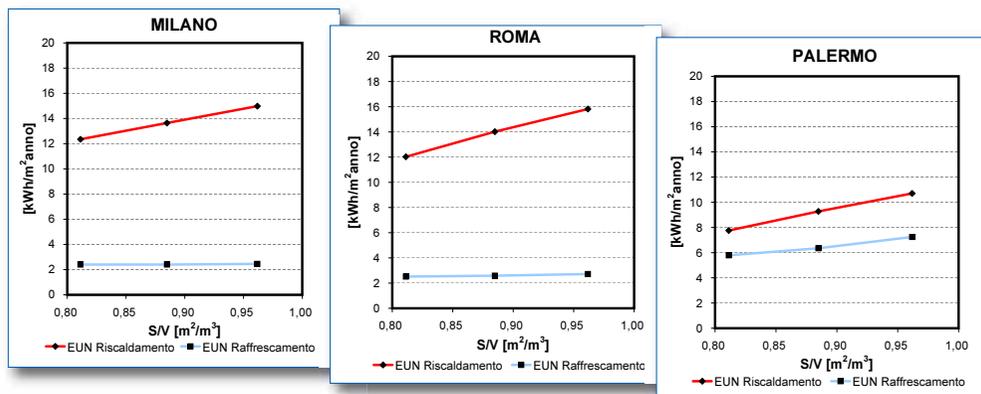


Figura 3.18: Fabbisogni energetici in funzione del rapporto S/V, nei tre climi considerati.

3.5.3 Variazione orientamento

In generale, i migliori risultati si ottengono orientando l'edificio con la facciata più vetrata a sud. Questa disposizione permette un corretto ombreggiamento delle superfici vetrate da parte della sporgenza del tetto e del balcone, in modo da massimizzare i guadagni in inverno e minimizzare i carichi estivi.

Restrizioni locali possono obbligare a sviluppare l'edificio lungo direzioni alternative. Le figure a lato considerano l'effetto conseguente all'orientamento della *Passivhaus* italiana lungo assi ruotati (fino ad un massimo di 45°) rispetto all'ottimale. Non si contemplan orientamenti completamente differenti poiché è ragionevole supporre a priori che le strategie di ombreggiamento delle superfici trasparenti andrebbero adeguate diversamente.

I grafici mostrano che, per tutte le località, per la particolare geometria considerata e per il tipo di protezioni solari, i fabbisogni di riscaldamento e raffreddamento sono influenzati in modo estremamente ridotto dalla rotazione dell'edificio. Questo potrebbe non essere più vero nel caso di geometrie profondamente diverse o di protezioni solari non ottimizzate.

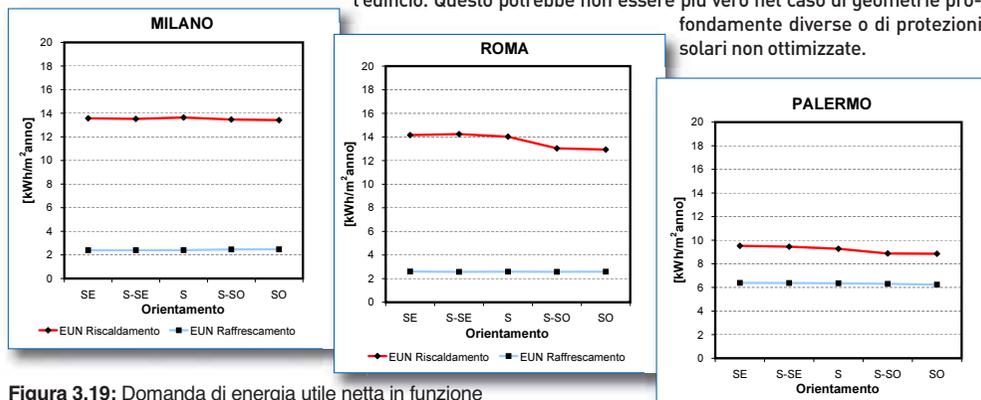
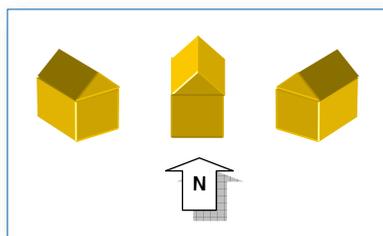
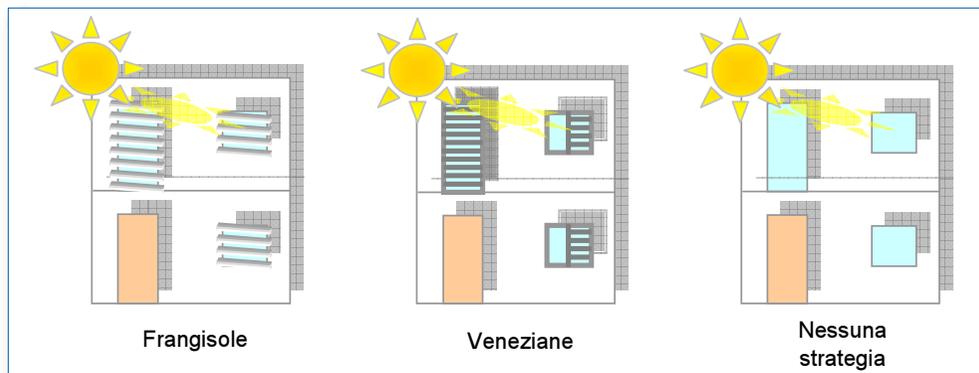


Figura 3.19: Domanda di energia utile netta in funzione della facciata maggiormente vetrata, nei tre climi considerati.

3.5.4 Variazione della strategia di controllo della radiazione solare



Generalmente, per la riduzione degli apporti solari estivi, (strategia d'involucro che si consiglia sempre di considerare), è possibile adottare diverse soluzioni: intervenire direttamente sulla componente trasparente delle finestre o applicarvi sistemi indipendenti di ombreggiamento preferibilmente esterni.

Dovendo ottimizzare il comportamento dell'edificio durante entrambe le fasi di esercizio (riscaldamento e raffreddamento) fin dall'inizio si è deciso di avvalersi dell'efficacia e della flessibilità d'utilizzo che contraddistinguono i frangisole esterni orientabili. Se correttamente controllata infatti, questa tecnologia non ostacola i guadagni solari invernali, l'illuminazione naturale degli ambienti interni ed eventuali strategie diurne di ventilazione naturale. A priori lo stesso non si può dire delle vetrocamere a controllo solare e delle protezioni interne (tende o frangisole interni).

I frangisole utilizzati hanno asse di rotazione orizzontale e sono caratterizzati da elevato coefficiente di riflessione (0.7). Posizionati a 15 cm dal vetro, permettono il passaggio della radiazione solare diffusa e, istante dopo istante, adeguano il proprio orientamento in funzione dell'angolo d'inclinazione dei raggi solari incidenti per bloccare la radiazione diretta. Permettono inoltre una buona circolazione d'aria per la rimozione di energia termica dalle protezioni solari stesse.

Nei grafici 3.20 vengono confrontati i fabbisogni di raffreddamento dei modelli dotati di controlli ottimizzati dei frangisole, con quelli di edifici che non utilizzano nessuna strategia di protezione solare e con quelli di edifici che applicano una strategia di controllo solare meno efficace: il semplice accostamento di persiane in corrispondenza di elevata insolazione, (soluzione che approssima il comportamento più tipico nelle abitazioni, normalmente non dotate di impianti di automazione per il controllo solare).

I risultati dell'analisi mostrano che in tutte le località considerate:

- la rimozione dei frangisole comporta un aumento dei fabbisogni di raffreddamento del 25-30%;
- la sostituzione dei frangisole con veneziane controllate manualmente comporta un aumento del 20%.

Si segnala che nel nostro caso gli aggetti verticali del tetto e del balcone in estate schermano già le finestre da buona parte della radiazione diretta, quindi l'influenza delle protezioni solari verticali alle finestre è limitata.

Ciò considerato occorre osservare che a Milano e Roma, in termini assoluti, gli aumenti sono limitati (circa 0.7 kWh/m²anno) e che solo a Palermo l'utilizzo dei frangisole automatizzati comporta sensibili miglioramenti (2 kWh/m²anno).

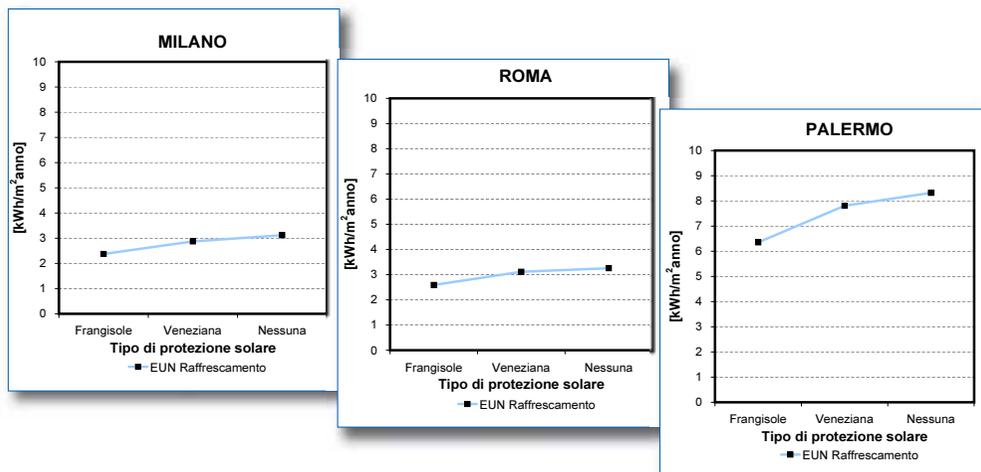
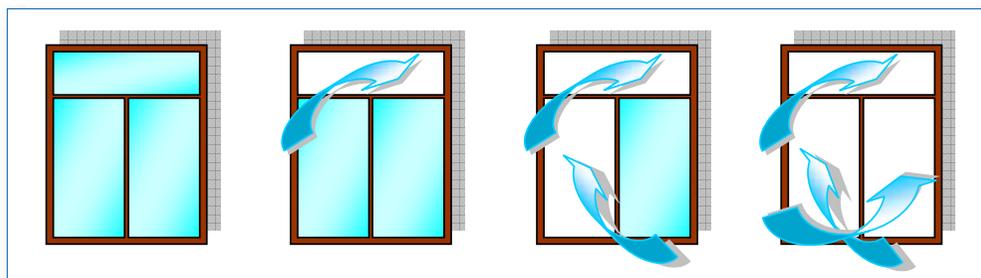


Figura 3.20: Domanda di energia utile netta in funzione della strategia di controllo solare scelta, nei tre climi considerati



3.5.5 Variazione della strategia di ventilazione notturna

Per valutare l'effetto della strategia di ventilazione naturale che è stata applicata nel modello base della presente analisi, si è deciso di farla variare intervenendo sulla superficie finestrata aperta durante la notte nei periodi più caldi.

In particolare, partendo da una soluzione (denominata "Vent -") che prevede la parziale apertura delle finestre della zona giorno (piano terra e scala) e l'utilizzo del solo sistema di ventilazione forzata nella zona notte (primo piano), si sono considerati i casi di completa chiusura degli infissi anche nella zona giorno ("no Vent") e di loro completa apertura ("Vent +").

Per entrambe le soluzioni di ventilazione si sono fissati:

- il periodo di apertura notturna: dalle 22:00 alle 7:00;
- la strategia di modulazione: le finestre si aprono se la temperatura esterna è più fresca di quella in terna, ma per differenze superiori ai 6°C si chiudono gradualmente fino a sigillarsi completamente in corrispondenza di flussi d'aria, di 10°C più bassi delle temperature interne.

Le figure 3.21 mostrano i risultati dell'analisi. Nello specifico si osserva che:

- rinunciare alla strategia di ventilazione notturna comporta sempre consistenti aumenti dei fabbisogni di raffreddamento;
- tali aumenti decrescono al diminuire dell'escursione termica giornaliera e del livello di isolamento dell'involucro. A Milano, dove l'involucro è molto isolato, la ventilazione notturna fornisce un efficace sistema di raffreddamento delle masse; tale meccanismo è agevolato dall'escursione termica tra il giorno e la notte. A Palermo, invece, l'involucro è meno isolato rispetto a Milano, quindi le dispersioni che lo attraversano sono di entità superiore; il meccanismo legato alla ventilazione notturna è inoltre ostacolato dalla scarsa escursione termica tra giorno e notte, che rende più difficile l'asportazione di energia da parte dell'aria. Per le ragioni citate nel caso in cui si decida di rinunciare alla ventilazione notturna, a Milano si osserva un aumento della domanda di energia utile netta per il raffreddamento pari al 300%, mentre a Palermo l'aumento è meno rilevante (circa il 75%);
- l'aumento ulteriore della superficie vetrata che viene aperta ("Vent +") non produce ulteriori significativi risultati.

Ciò considerato, si sottolinea che la ventilazione notturna è, seppur in misura diversa a seconda del clima e dell'isolamento dell'edificio, efficace se, (come nel caso analizzato), viene combinata con una struttura caratterizzata da un'elevata massa termica, esposta alle correnti d'aria in modo da sfruttare la loro bassa temperatura notturna per esportare l'energia termica immagazzinata durante il giorno.

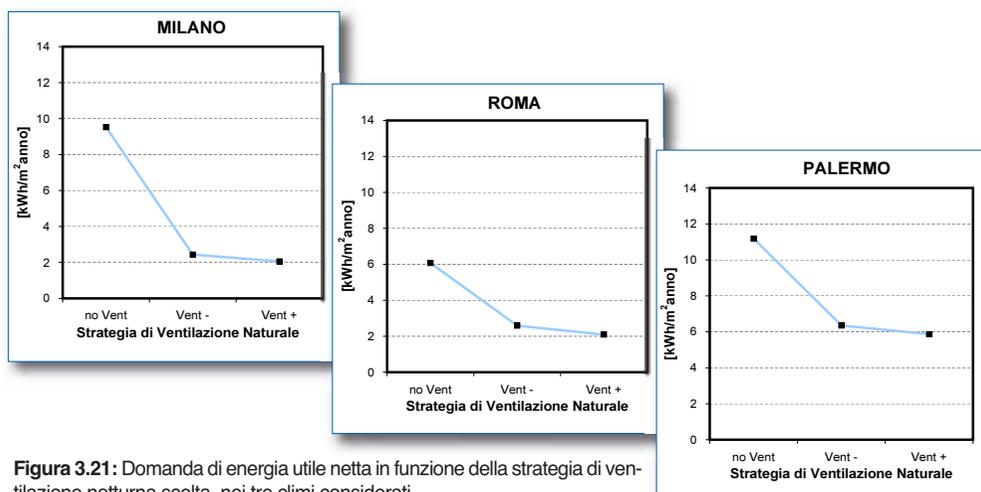


Figura 3.21: Domanda di energia utile netta in funzione della strategia di ventilazione notturna scelta, nei tre climi considerati.

3.5.6 Variazione del tasso di ricambio d'aria e dell'efficienza del recuperatore

Per quanto concerne il sistema di distribuzione ad aria dei modelli d'edificio considerati, si è provveduto a valutare quanto il tasso di ricambio d'aria e l'efficienza del recuperatore influenzino i fabbisogni energetici. A tal fine si sono generate le superfici d'influenza combinata che vengono mostrate nella figura 3.22. Come prevedibile, l'influenza di questi parametri di progetto sulle domande energetiche risulta molto pronunciata, soprattutto sul fabbisogno di riscaldamento. Tale effetto è amplificato in edifici, come quello considerato, caratterizzati da livelli molto limitati di infiltrazioni e per i quali il peso delle perdite energetiche legate alla ventilazione risulta preponderante. In questi casi appare fondamentale l'integrazione di una strategia di recupero del calore e la possibilità di migliorare la qualità dell'aria interna risulta vincolata alla tipologia di scambiatore utilizzato: all'aumentare dei ricambi deve aumentare l'efficienza di recupero.

In particolare, per soddisfare i requisiti dello Standard Passivhaus si può concludere che:

- a Milano e Roma non risulta proponibile l'abbandono della strategia di recupero del calore, ma, a patto di ridurre i ricambi, è possibile limitare l'efficienza di recupero: se si potesse assicurare qualità dell'aria riducendo il ricambio a soli 0,3 volumi orari risulterebbe sufficiente un'efficienza di recupero del 60%;
- a Palermo è possibile fare a meno del recuperatore, ma solo a patto di ridurre ulteriormente le dispersioni attraverso l'involucro edilizio e di limitare il tasso di ricambio d'aria: per esempio considerando livelli di isolamento simili a quelli proposti per il Nord Italia e contenendo i ricambi a 0.5-0.6 h⁻¹.

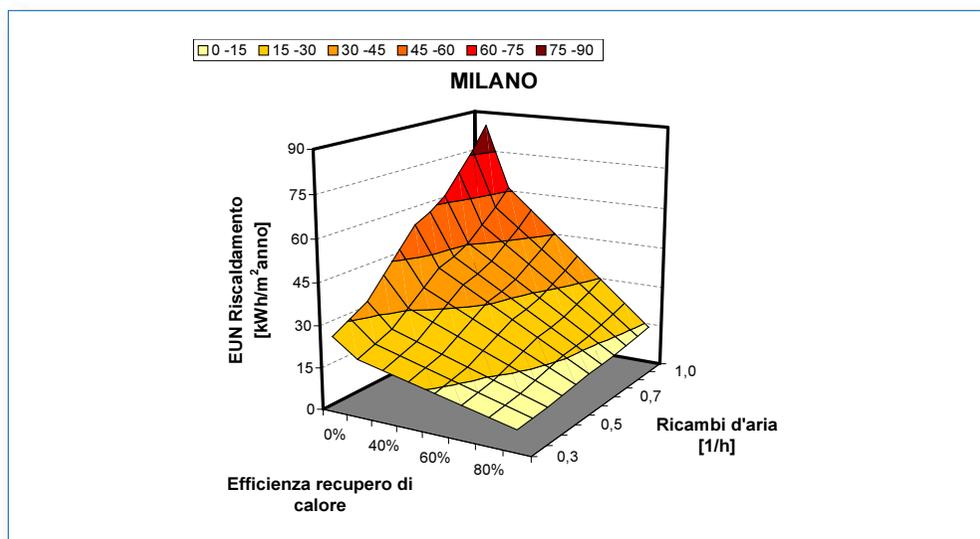


Figura 3.22: Domanda di energia utile netta per riscaldamento nella Passivhaus ottimizzata per Milano in funzione del tasso di ricambio d'aria e dell'efficienza del recuperatore. Un'influenza simile si riscontra a Roma.

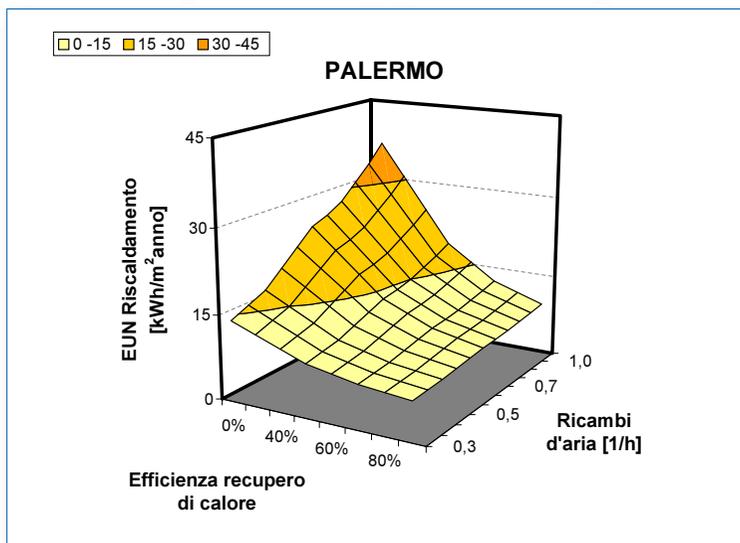


Figura 3.23: Domanda di energia utile netta per riscaldamento nella Passivhaus ottimizzata per Palermo in funzione del tasso di ricambio d'aria e dell'efficienza del recuperatore.

3.6 Analisi di comfort

Oltre a focalizzare l'attenzione sulle prestazioni energetiche dell'edificio, è necessario considerare gli obiettivi della progettazione edilizia, cioè il mantenimento di condizioni di comfort termoisometrico nell'ambiente confinato.

In ogni fase del processo di analisi e ottimizzazione, le condizioni di comfort sono state assicurate dall'applicazione di sistemi attivi di riscaldamento e raffreddamento in grado di garantire i 20°C invernali e i 26°C estivi e quindi di assicurare il comfort interno secondo il modello di Fanger.

Risulta ora interessante verificare come si comporterebbero i modelli ottimizzati d'edificio qualora si applicasse una strategia di raffreddamento interamente passiva che si avvale solamente del controllo solare e della ventilazione naturale già descritti nei paragrafi precedenti. Si ricorda che in questi casi la norma EN 15251 permette di descrivere il comfort interno con i modelli adattivi, caratterizzati da un intervallo di temperatura di comfort variabile con il clima (in particolare variabili con una media pesata delle temperature esterne nei giorni precedenti), al contrario di quello di Fanger relativamente fisso (per maggiori informazioni si rimanda al paragrafo 1.4).

Le figure 3.24 e 3.25 mostrano le condizioni di comfort interno quando si applica una strategia di ventilazione interamente passiva a Milano, Roma e Palermo. I grafici illustrano che le temperature operative interne rimangono al di sotto della temperatura limite di comfort come definita dalla norma EN 15251, quindi gli ambienti interni risultano in condizioni di comfort secondo il modello adattivo.

Inoltre, a Milano e Roma, se si considera l'utilizzo di ventilatori che aumentano la velocità dell'aria interna

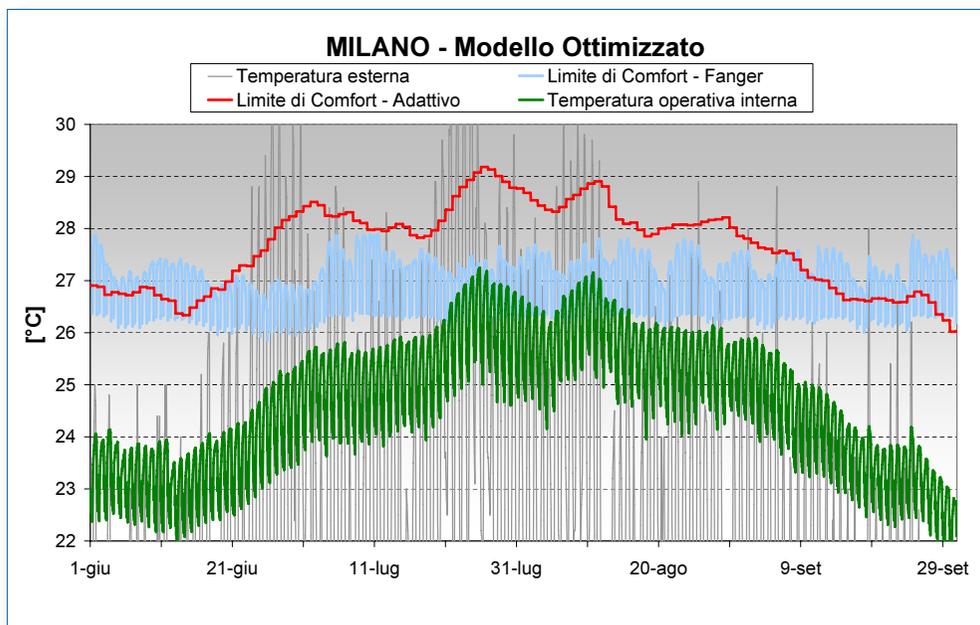
(di 0.2 m/s), le temperature operative risultano tali da superare solo saltuariamente (per il 1-3% delle ore estive) l'intervallo di comfort di Fanger²⁵.

A Palermo le temperature degli ambienti confinati si avvicinano maggiormente al limite superiore adattivo e superano spesso (per il 15% del periodo estivo) il limite di Fanger anche prevedendo l'utilizzo di ventilatori che aumentano la velocità dell'aria interna di 0.5 m/s.

In questo caso, per migliorare le condizioni interne, risulta però possibile intervenire ulteriormente sull'involucro edilizio: come mostrato nella figura 3.25, aumentando a 25 cm i livelli di isolamento delle pareti perimetrali e del tetto dell'edificio (Mod13) è possibile ridurre significativamente (di circa 1°C) i picchi di temperatura interna e ottenere risultati paragonabili a quelli riscontrati per Milano e Roma.

Per concludere, si sottolinea che gli andamenti proposti si riferiscono a modelli d'edificio caratterizzati da carichi termici interni limitati (ottenibili, nel caso di edifici abitativi, scegliendo accuratamente apparecchiature elettriche e impianti di illuminazione ad alta efficienza e non sovradimensionati), simulati in contesti climatici non estremi. È quindi consigliato recepire, più che i risultati quantitativi, l'essenza dell'analisi:

- *nelle località considerate è ipotizzabile non ricorrere a un sistema attivo e quindi ridurre a zero i consumi di raffrescamento;*
- *un consistente isolamento delle superfici opache, se combinato con le altre strategie qui considerate (alta inerzia termica, ventilazione notturna, bassi carichi interni) può migliorare sensibilmente il comportamento termico dell'edificio e le prestazioni di comfort.*



²⁵L'andamento della temperatura limite di Fanger è stato calcolato fissando l'attività metabolica degli occupanti a 1.2 met e la resistenza termica del loro abbigliamento a 0.5 clo e considerando i valori istantanei dell'umidità relativa e della velocità dell'aria ottenuti dalle simulazioni

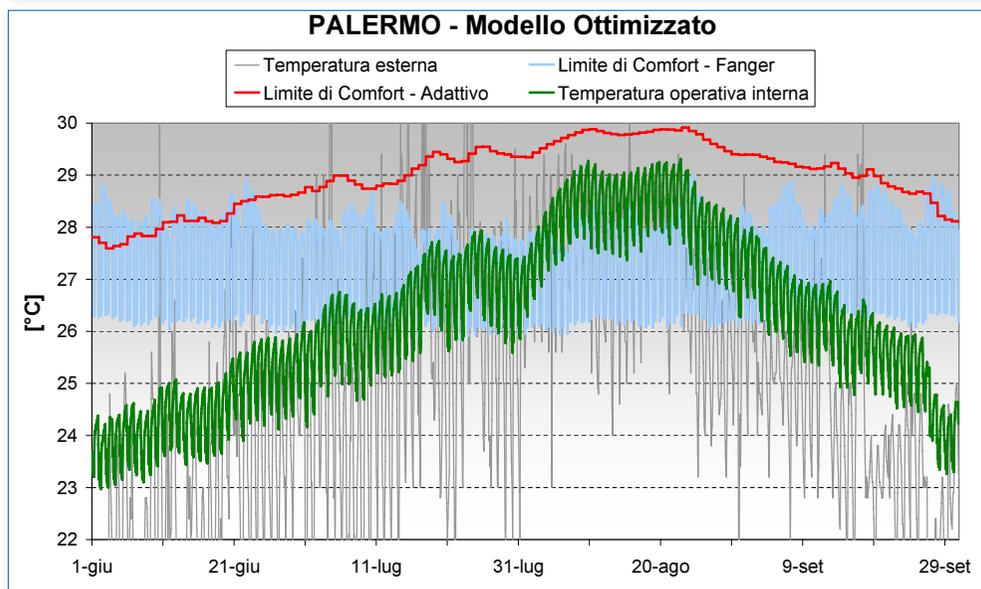
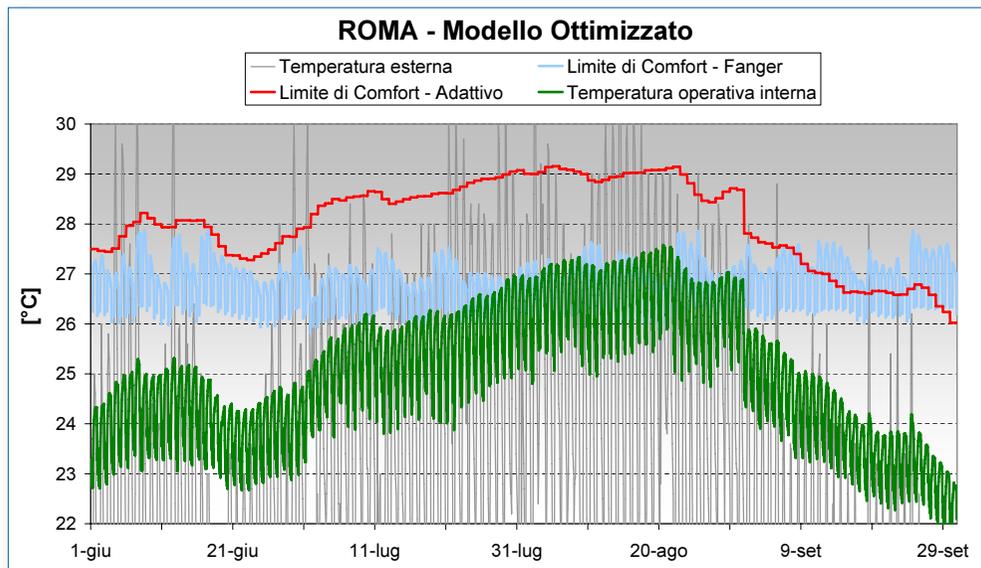


Figura 3.24: Confronto tra le temperature operative interne delle tre Passivhaus ottimizzate e i limiti di comfort individuati dalla norma EN 15251

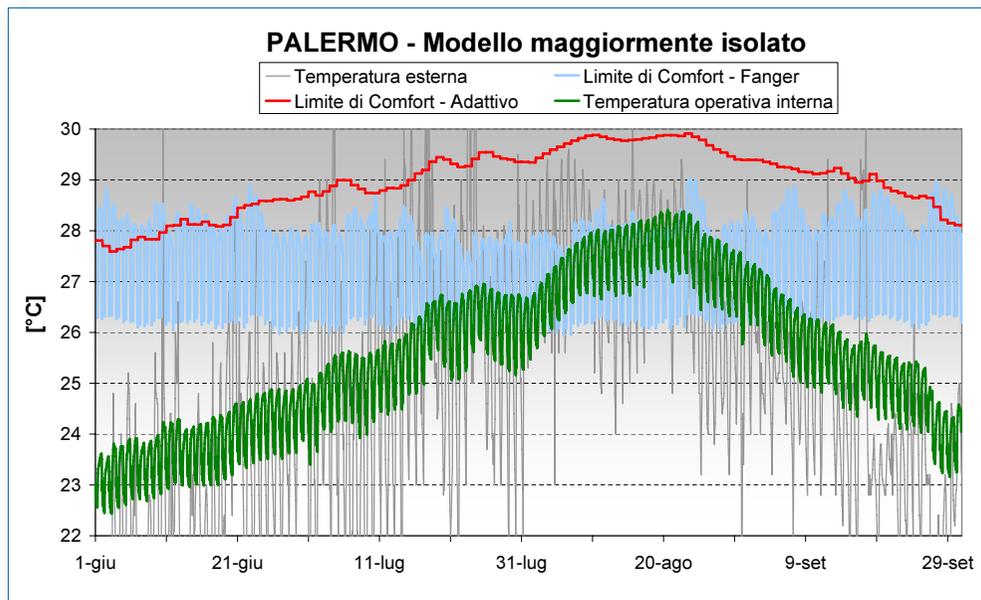


Figura 3.25: Confronto tra la temperatura operativa interne di una Passivhaus per Palermo più coibentata e i limiti di comfort individuati dalla norma EN 15251

Sono stati sviluppati da eERG, e affinati per questa pubblicazione, modelli di Passivhaus ottimizzati per tre climi italiani (Milano, Roma e Palermo) che forniscono un esempio di un insieme di soluzioni progettuali capaci di soddisfare i criteri energetici e di comfort del nuovo standard Passivhaus esteso.

Queste soluzioni se confrontate alla loro controparte nord-europea, si caratterizzano per:

- un elevato isolamento termico con livelli differenziati per clima e per elemento costruttivo (tetto, pareti e superfici a contatto col terreno);
- un livello di tenuta all'aria che può essere leggermente inferiore, soprattutto nelle località più a sud;
- finestre e altre superfici trasparenti dotate di protezioni solari fisse e mobili capaci di intercettare completamente la radiazione solare diretta;
- in estate ventilazione notturna naturale o ibrida, per ottimizzare la rimozione del calore e incrementare il comfort termico locale;
- un eventuale impianto (passivo o attivo) per rimuovere il carico di raffrescamento residuo.

Building L
ROCKWOOL
School

ROCKWOOL ITALIA S.p.A.
Via Londonio, 2 - 20154 Milano
Tel.: 02 346.13.1 - Fax: 02 346.13.321
www.rockwool.it