

SUL COMPORTAMENTO TERMICO DI EDIFICI RESIDENZIALI AL VARIARE DELLA CONFIGURAZIONE ARCHITETTONICA

Franco Cotana¹, Anna Laura Pisello¹

¹Università di Perugia – Centro di Ricerca sulle Biomasse, Via G. Duranti, 06125 Perugia, Italy
e-mail: cotana@crbnet.it; pisello@crbnet.it

SOMMARIO

Lo studio del comportamento termico in regime dinamico degli edifici costituisce ormai un elemento imprescindibile di una progettazione finalizzata alla sostenibilità degli interventi edilizi ed all'ottimizzazione dell'efficienza energetica degli stessi. In questa memoria ci si propone quindi di analizzare il ruolo svolto dalla configurazione architettonica dei complessi edilizi, elemento che costituisce l'originalità del lavoro, nella definizione del comportamento termico in regime dinamico dei fabbricati. Sono stati quindi modellati tre differenti edifici ad uso residenziale unifamiliare con l'ausilio di un codice di calcolo di tipo dinamico, per analizzare i livelli di comfort degli stessi sia durante la stagione estiva che in quella invernale. Si è potuto definire inoltre il ruolo degli elementi tecnici capacitivi rispetto a quelli con minore massa superficiale a parità di caratteristiche termiche in regime stazionario; è stata quindi analizzata l'influenza della forma e dell'orientamento degli edifici e delle singole zone termiche (giorno e notte), per valutare anche il contributo dei sistemi di schermatura esterni.

I risultati prodotti mostrano come le strategie passive di progettazione bioclimatica producano un maggiore livello di benessere termico negli ambienti interni in tutte le stagioni climatiche caratteristiche della città di Perugia. Tale vantaggio è quantificabile sia in termini di frequenza maggiore di condizioni di comfort sul totale, che in termini di scostamento minore dalle stesse, soprattutto durante la stagione estiva ed intermedia. La capacità termica delle strutture rappresenta inoltre un ulteriore vantaggio, evidentemente durante la stagione estiva ma comunque durante tutto l'arco dell'anno, stabilendo condizioni termiche interne più confortevoli e sensibilmente meno variabili, quindi più facilmente monitorabili, sia attraverso strategie di controllo ambientale di tipo passivo che di tipo attivo.

INTRODUZIONE

Obiettivo del presente lavoro è quello di analizzare la prestazione energetica del complesso-edificio a partire dallo studio dei vari elementi progettuali influenzanti i livelli di benessere ambientale modellati con un codice di calcolo di tipo dinamico (*EnergyPlus* [1]). Il concetto di progettazione globale dell'intero edificio, così come espresso in [2] è ormai un approccio necessario da adottare nella definizione di modelli architettonici finalizzati all'ottimizzazione dei livelli di benessere e contemporaneamente dell'efficienza energetica.

In questa memoria quindi, per definire i livelli di comfort termico raggiunti, si esamina il ruolo dei diversi fattori e la reciproca interazione degli stessi, quali: la configurazione architettonica nella forma dei fabbricati, l'orientamento delle zone termiche, la differente progettazione delle stratigrafie di involucro edilizio e degli elementi schermanti esterni, mantenendo costanti alcuni dati di input [3] quali la forzante climatica reale della città di Perugia [4], il carico termico dovuto agli apporti interni supposto pari a 4 W/m^2 [5], il tasso di ricambio d'aria pari a $0,3 \text{ vol/h}$, [5], la superficie lorda dei fabbricati e quella trasparente per ciascuna zona termica presa in considerazione.

A partire quindi dalla rappresentazione delle forzanti climatiche reali come input progettuale per elaborare strategie

efficienti [6], viene di seguito approfondito il prodotto di una serie di analisi, risultato di bilanci termici in regime dinamico degli edifici esaminati. Le indagini svolte sia a livello giornaliero che stagionale sui suddetti bilanci termici ed i livelli di benessere raggiunti negli ambienti interni [7] dei prototipi residenziali monofamiliari, conducono verso interessanti conclusioni circa l'efficacia di alcune delle fondamentali strategie passive di progettazione.

I risultati vengono pertanto analizzati anche definendo un indice sintetico di valutazione del comfort termico, a partire dalle considerazioni di Porta-Gàndara et al. [8]. Tale indice verrà utilizzato nell'ambito del calcolo del "Building Global Performance index" [9], che costituirà il futuro sviluppo della presente attività di ricerca.

DESCRIZIONE DEI PROTOTIPI

Come anticipato, il presente studio ha riguardato tre tipologie di edificio residenziale unifamiliare, differenti per configurazione architettonica, disposizione delle aperture finestrate ed orientamento, aventi inoltre equivalente superficie lorda in pianta ed area vetrata (Tab. 1), e la medesima collocazione climatica locale nella città di Perugia [4].

Tabella 1 Proprietà geometriche degli edifici

Edificio/Caratteristiche	L	R	D
Rapporto S/V	1.155	1.109	1.104
S tot lorda [m²]	110.336	109.356	111.808
S zona giorno [m²]	44.9	43.6	50.9
Parete esterna	77.7	65.7	106.2
Soffitto su spazio aperto	44.9	43.6	0
Pavimento controterra	44.9	43.6	50.9
Superficie finestrata	19.0	19.0	19.0
S zona notte [m²]	56.9	58.0	50.9
Parete esterna	88.5	78.3	106.2
Soffitto su spazio aperto	56.9	58.0	50.9
Pavimento controterra	56.9	58.0	0
Superficie finestrata	11.4	11.4	11.4
S zona distribuzione [m²]	8.545	7.778	10.006

Ciascuna configurazione è stata caratterizzata di volta in volta da più soluzioni tecniche di involucro opaco, differenti per proprietà dinamiche ed aventi le medesime caratteristiche termiche in regime stazionario.

Tutte le unità tecnologiche presentano inoltre le stesse proprietà ottico-energetiche delle superfici opache esposte alla radiazione solare del sito, per evitare fenomeni di surriscaldamento superficiale differenziali.

Verranno pertanto analizzate nella presente memoria le caratteristiche termiche globali e di ciascuna zona termica, trascurando in questa fase gli spazi di distribuzione, essendo questi sia geometricamente che termicamente non confrontabili in maniera efficace.

Primo Edificio: forma ad “L” su un unico piano

Il primo edificio (Fig. 1, Tab. 1), indicato di seguito con la lettera “L” per brevità, è quello concepito seguendo alcuni principi di progettazione bioclimatica e presenta una caratteristica forma ad “L”. Le tre zone termiche (giorno, notte e di distribuzione) sono disposte in modo tale da soddisfare i requisiti di benessere ambientale. La facciata a sud vetrata della zona giorno è pensata per ricevere il massimo apporto termico gratuito durante la stagione invernale, in cui l’altezza solare ridotta consente la penetrazione in profondità nell’ambiente giorno della radiazione. Parallelamente in estate, quando l’altezza solare è maggiore, la capacità di penetrazione della radiazione diretta si riduce all’area più vicina al serramento.

La zona notte invece è orientata verso est per consentire all’utente delle camere da letto di giovare della luce naturale mattutina. Il picco massimo di guadagno solare sarà quindi raggiunto nelle ore del mattino, fatto che condurrà la progettazione verso strategie idonee di smaltimento di tale carico durante la giornata, ad esempio con un’opportuna programmazione del sistema di ventilazione, affinché l’utente ritrovi la zona in condizioni di comfort nelle ore serali.

La parete a nord, essendo anch’essa caratterizzata da ampie aperture vetrate pensate per favorire lo smaltimento del calore mediante *free cooling* notturno in direzione nord-sud, è stata caratterizzata da una vetrata con prestazioni di termoisolamento più elevate rispetto agli altri serramenti, di tutte le altre strutture analizzate (Tab. 2).

Secondo Edificio: forma rettangolare su un unico piano

L’edificio rettangolare su un unico piano (Fig. 1, Tab. 1), indicato successivamente in breve con la lettera “R”, presenta come il primo tre zone termiche (giorno, notte e di distribuzione) e non possiede uno specifico orientamento guidato da criteri di progettazione bioclimatica.

Terzo Edificio: forma rettangolare su due piani

L’edificio rettangolare su due piani (Fig. 1, Tab. 1), per brevità contrassegnato con la lettera “D” di seguito è, per sua stessa geometria, esposto verso tutti gli orientamenti in entrambe le zone termiche studiate. Anch’esso presenta le medesime zone termiche degli altri due prototipi e non è stato concepito secondo i principi di progettazione bioclimatica.

Elementi tecnici di involucro opaco

Come anticipato, tutti gli edifici verranno caratterizzati da due differenti configurazioni di involucro opaco, comprendente quest’ultimo tutti gli elementi tecnici di confine fra le differenti zone termiche e verso l’esterno, quali: pareti perimetrali, solai controterra, di interpiano e di copertura (Tab. 3). Le due configurazioni suddette sono caratterizzate dai medesimi valori di trasmittanza termica in regime stazionario e proprietà ottico-energetiche superficiali, ma presentano differenti caratteristiche di massa frontale e capacità termica. Si indicherà di seguito con il numero “1” la soluzione massiva e con il numero “2” quella genericamente più leggera, per ogni edificio, così che per esempio l’edificio L1 sarà quello dalla caratteristica forma ad L con elementi tecnici massivi, mentre la struttura L2 avrà la stessa geometria ma presenterà elementi tecnici di massa frontale inferiore al primo caso. Solo per l’edificio ad L verrà poi presa in considerazione una terza configurazione indicata come L1*, ottenuta applicando all’edificio L1 apposite schermature descritte di seguito (Fig. 2).

Serramenti: infissi e vetrocamere

Tutti gli edifici analizzati, ad esclusione delle configurazioni L1, L1* ed L2 presentano serramenti e vetrocamere a doppia lastra aventi le caratteristiche riportate in Tabella 2. Le uniche eccezioni, come anticipato, riguardano gli edifici L1, L1* ed L2 che, sul fronte nord, presentano una vetrata a prestazioni di termoisolamento più elevate, descritta come vetrata quadrupla (Tab. 2).

Sistemi di schermatura

L’unico edificio che presenta elementi tecnologici schermanti è il L1*, ossia il prototipo progettato seguendo i principi di architettura bioclimatica, con elementi tecnici massivi ed appunto, con schermature esterne metalliche. Il sistema di controllo solare passivo, come l’intera progettazione di questo prototipo, è stato specificamente orientato dai principi di massimizzazione del comfort termico ed ambientale nel complesso.

Le lamelle orizzontali inclinate annesse agli elementi vetrati disposti ad est ed ovest (Fig. 2) proteggono gli ambienti dalla radiazione più bassa entrante rispettivamente nelle prime e nelle ultime ore della giornata. La scelta ha tenuto in

considerazione il fatto che, soprattutto per la zona termica notturna, la prestazione di visibilità verso l'ambiente esterno nelle prime ore del mattino è considerata di ridotta importanza, se non addirittura dannosa per la privacy e per il comfort abitativo di tali ambienti adibiti tipicamente al sonno.

Gli aggetti orizzontali e verticali perpendicolari alla partizione perimetrale (Fig. 2) sono invece disposti nelle facciate nord-sud dell'involucro e mirano, oltre che chiaramente a schermare la radiazione solare, anche a garantire la completa visibilità degli ambienti esterni, minimizzando l'apporto solare entrante sia nelle ore centrali della giornata con l'aggetto orizzontale superiore, che in quelle intermedie, con gli aggetti verticali laterali.

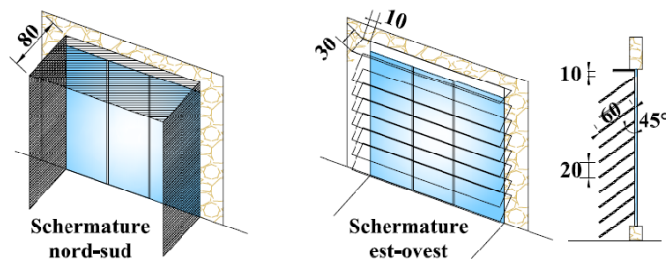


Figura 2 Schematizzazione dei due sistemi di schermatura (fronte nord-sud e fronte est-ovest). Quote in centimetri.

Tabella 2 Caratterizzazione dei serramenti

Telaio	
Materiale: legno	
Spessore: 4 cm	
Capacità termica interna	16.73 kJ/(kg K)
Trasmittanza termica	3.66 W/(m ² K)
Vetrata doppia 6+13+6	
Strato esterno 1	LoE 6 mm
Intercapedine	Argon 13 mm
Strato interno 2	Clear 6 mm
Trasmissione solare totale	0.568 [-]
Trasmissione solare diretta	0.474 [-]
Trasmissione luce	0.745 [-]
Trasmittanza termica	1.493 W/(m ² K)
Vetrata quadrupla 3+8+5+3+5+8+3	
Strato esterno 1	Clear 3 mm
Intercapedine 1	Krypton 8 mm
Strato 2	Coated polimerico 5.1 mm
Intercapedine 2	Krypton 3 mm
Strato 3	Coated polimerico 5.1 mm
Intercapedine 3	Krypton 8 mm
Strato interno 4	Clear 3 mm
Trasmissione solare totale	0.461 [-]
Trasmissione solare diretta	0.338 [-]
Trasmissione luce	0.624 [-]
Trasmittanza termica	0.774 W/(m ² K)

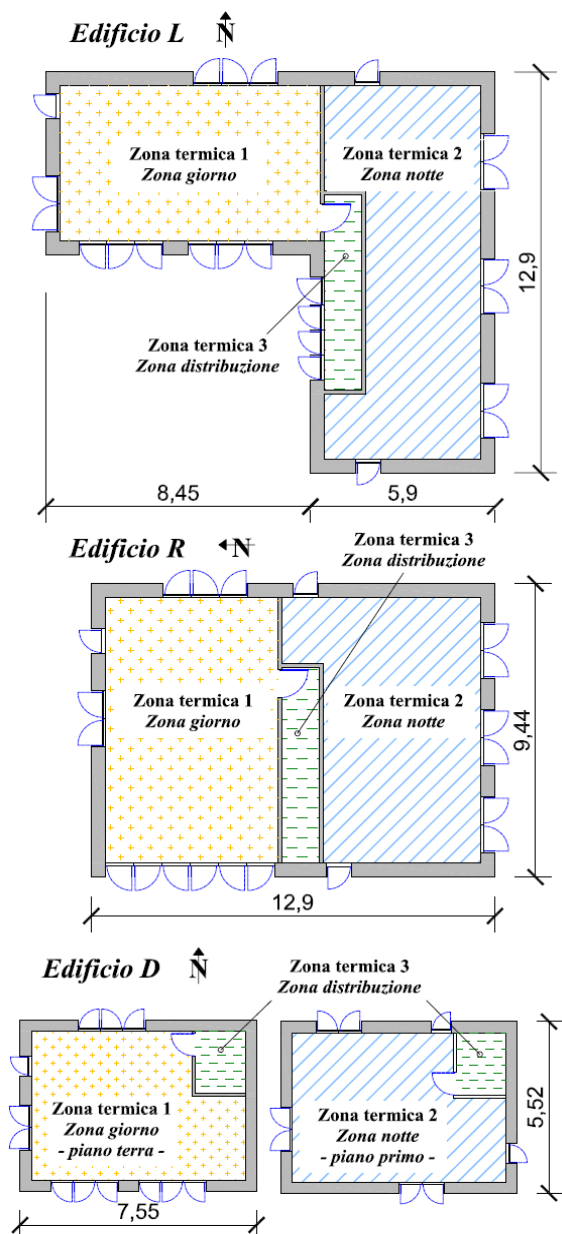


Figura 1 Schemi planimetrici dei tre edifici analizzati. Quote espresse in metri.

PRESTAZIONE TERMICA DEGLI EDIFICI IN REGIME ESTIVO

Analisi del comportamento termico estivo giornaliero

Si vuole in questa fase analizzare il comportamento degli edifici in regime dinamico, quando sottoposti a forzanti climatiche reali [4] considerando ora il comportamento dei prototipi in un giorno tipo estivo (21 luglio), per valutarne le prestazioni termiche in termini di temperatura dell'aria interna, per ciascuna delle due zone termiche prese in considerazione.

Gli andamenti di temperatura rappresentati (Figg. 3-4) conducono verso interessanti deduzioni. Si noti come, anche a parità di elementi tecnici di involucro, la configurazione architettonica svolge un ruolo fondamentale nella prestazione termica delle zone. L'edificio L, solo appunto mediante le sue caratteristiche architettoniche descritte pocanzi riesce ad abbattere il picco termico di più del 10% rispetto agli altri edifici, in entrambe le zone termiche, ed a ridurre significativamente il gradiente termico giornaliero, elemento in cui la massa frontale influisce in maniera molto significativa, a parità di configurazione architettonica (Figg. 5-6). L'andamento di temperatura giornaliero degli edifici ad L risulta sostanzialmente traslato in basso verso le temperature più miti di 2°-4°C, sempre rispetto ai casi R e D in entrambe le zone termiche, ad esclusione della zona notte di L2 che, dalle

ore 7 alle 12 circa appare più calda di quella di R2 fino al massimo di 1°C.

Inoltre si noti come nelle zone notte degli edifici ad L (Fig. 4), la soluzione di aver disposto le camere da letto verso est, quindi con aperture vetrate solo in quella direzione, definisca un caratteristico andamento di temperatura interna in cui il picco giornaliero si raggiunge tra le ore 10:00 e le ore 11:00, per essere poi smaltito durante tutto l'arco della giornata, caratterizzata da un andamento monotono decrescente di temperatura. In questo modo, in serata (circa alle ore 22:00) la zona notte dell'edificio L2 raggiunge temperature più miti di circa 2°C rispetto ad R2 e inferiori di circa di 4°C rispetto a D2, ed equivalentemente accade per gli edifici di tipo "1" capacitivi.

Si noti ancora come la zona notte di D2 sia particolarmente inficiata dall'architettura dell'edificio che la pone al secondo piano, esposta alla radiazione solare per tutto l'arco della giornata, in ogni direzione, e quindi impossibilitata a smaltire tale carico, senza opportuni sistemi di climatizzazione, non analizzati in questo studio. Risulta quindi evidente come già le sole configurazioni architettoniche caratterizzino i profili termici giornalieri, di entrambe le zone termiche.

Dall'analisi poi dei bilanci termici, di cui si riportano ora quelli degli edifici L1 e L2 ritenuti esemplificativi per questo scopo (Fig. 7), si nota come un elemento di preponderante importanza sia rappresentato dall'intensità e dalla distribuzione nell'arco della giornata dell'apporto solare attraverso gli elementi vetrati, e quindi implicitamente condizionato dall'orientamento delle chiusure verticali opache che ospitano le varie aperture finestrate.

Tabella 3 Caratterizzazione delle pareti perimetrali opache

Composizione delle stratigrafie delle unità tecnologiche			
Chiusura verticale			
Tipo 1: capacitiva [cm]		Tipo 2: leggera [cm]	
Spessore totale	47	Spessore totale	49
Stratigrafia (esterno-interno)		Stratigrafia (esterno-interno)	
Pietra	10	Pittura	0,1
Intonaco denso	2	Intonaco isolante	2
Isolante EPS	12	Isolante EPS	7
Intonaco denso	2	Blocco cls aerato	19
Blocco cls	20	Intonaco	2
intonaco di gesso	1	Blocco cls aerato	19
		intonaco di gesso	1
Chiusura orizzontale superiore			
Tipo 1: capacitiva [cm]		Tipo 2: leggera [cm]	
Spessore totale	51	Spessore totale	20
Stratigrafia (esterno-interno)		Stratigrafia (esterno-interno)	
Terriccio	10	Pittura	0,1
Ghiaia e sottostruttura	10	Fibra vetro-membrana bitume	1
Aria	3	Isolante EPS	15
Impermeabil. + Isolante PU	8	Aria e sottostruttura	3
Blocco Cls aerato	19	Intonaco	1
Intonaco di gesso	1		
Chiusura orizzontale inferiore (controterra)			
Tipo 1: capacitiva [cm]		Tipo 2: leggera [cm]	
Spessore totale	51.5	Spessore totale	35.6
Stratigrafia (esterno-interno)		Stratigrafia (esterno-interno)	
Vespaio aerato - sottostruttura	30	Vespaio aerato - sottostruttura	30
Solaio con blocchi Cls	30	Solaio a blocchi (Poliespanso)	20
Isolante PUR a celle aperte	10	Isolante PUR a celle aperte	14
Massetto Cls aelleggerito	10	Collante siliconico	0.5
Collante siliconico	0.5	Pavimento (bassa densità)	1
Pavimento (alta densità)	1		

Nella Figura 8 inoltre si riporta il caratteristico andamento a doppia curva della $T_{aria\ interna}$ per la zona giorno della struttura R1 (analogo a quello della struttura R2), strettamente correlabile appunto all'andamento giornaliero degli apporti gratuiti attraverso le aperture. Si noti quindi come siano proprio gli apporti solari attraverso le finestre esterne a definire il profilo termico interno giornaliero della zona interessata. Gli edifici R presentano infatti doppia esposizione est-ovest, distintiva del doppio carico di picco. Il primo delle ore 9:30 è apportato dalle aperture ad est, ridotto rispetto al secondo per l'estensione superficiale minore di queste aperture rispetto alle vetrate ad ovest. Anche il secondo picco è distinguibile dal profilo di temperatura dell'aria interna, ed ancor più chiaramente si evince nell'andamento della temperatura media radiante. Questo secondo picco descritto dal profilo termico dell'aria interna è invece causato dalla vetrata orientata ad ovest, presentandosi tra le ore 15:10 e le ore 15:30 del pomeriggio.

È dall'analisi dei bilanci termici degli edifici che appunto emerge la necessità di intervenire mediante la progettazione di appositi sistemi di schermatura, oltre che agendo sulla capacità termica degli involucri opachi.

In quest'ottica si è proceduto formulando una ulteriore configurazione dell'edificio ad L, denominata di seguito L1*, a partire dall'edificio L1 più performante secondo le analisi giornalieri, dotandolo dei sistemi di schermatura descritti in Figura 2. Si noti come la suddetta soluzione risulti estremamente efficace sia per la costante traslazione del profilo termico verso temperature più miti, sia in termini di riduzione del gradiente termico giornaliero (Fig. 6), descrivendo andamenti di temperatura interna con un'ampiezza massima di oscillazione delle zone giorno sempre inferiore ad 1°C.

Il prototipo L1* rappresenta sicuramente, per tutte le considerazioni finora presentate, quello maggiormente confortevole dall'analisi termica giornaliera.

Si valuta ora (Fig. 9) l'apporto dei sistemi schermanti. Si noti come l'efficacia delle lamelle orizzontali inclinate della zona notte (Fig. 2) riduca dell'82% la potenza termica di picco, facendo descrivere agli apporti gratuiti attraverso le finestre esterne una curva ora simmetrica rispetto al mezzogiorno solare. L'andamento di temperatura dell'aria interna non presenta più quindi il picco intenso e ben collocato all'interno dell'intervallo mattutino compreso fra le ore 8:00 e le ore 10:00 caratterizzato da apporti termici gratuiti maggiori di 1.6 kW, situazione che avrebbe reso tali zone estremamente penalizzate sotto il profilo del comfort. Nella zona giorno invece l'andamento era caratterizzato da apporti termici che superavano i 1.6 kW tra le ore 12:00 e le ore 14:30 che, anche in questo caso, vengono potentemente smorzati dagli aggetti orizzontali e verticali perpendicolari alla partizione esterna perimetrale della struttura L1. Importante elemento è rappresentato dal fatto che si raggiunge un abbattimento del 62% del picco di guadagno termico con sistemi che mantengono completamente la visibilità diretta dell'ambiente esterno, senza quindi inficiare le prestazioni di benessere ambientale che ne derivano.

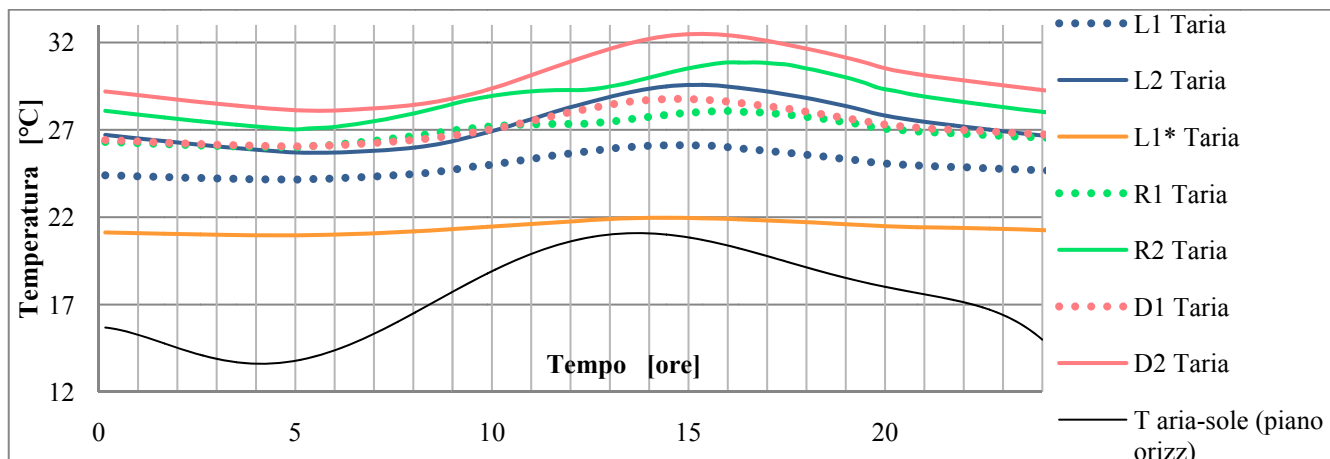


Figura 3 Profilo di temperatura giornaliero (21 luglio) delle zone giorno delle varie configurazioni architettoniche.

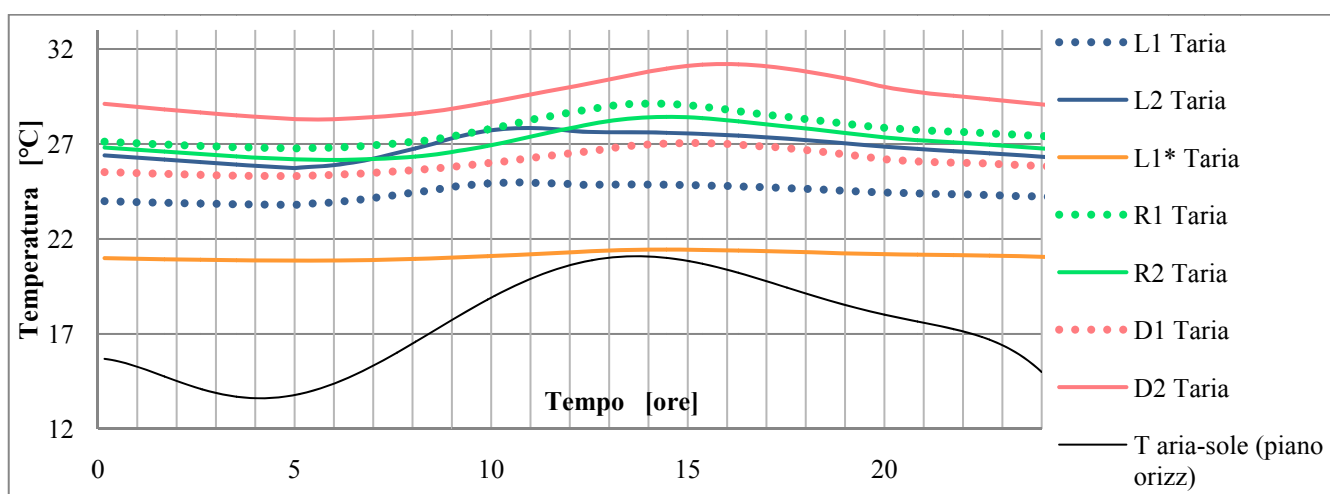


Figura 4 Profilo di temperatura giornaliero (21 luglio) delle zone notte delle varie configurazioni architettoniche.

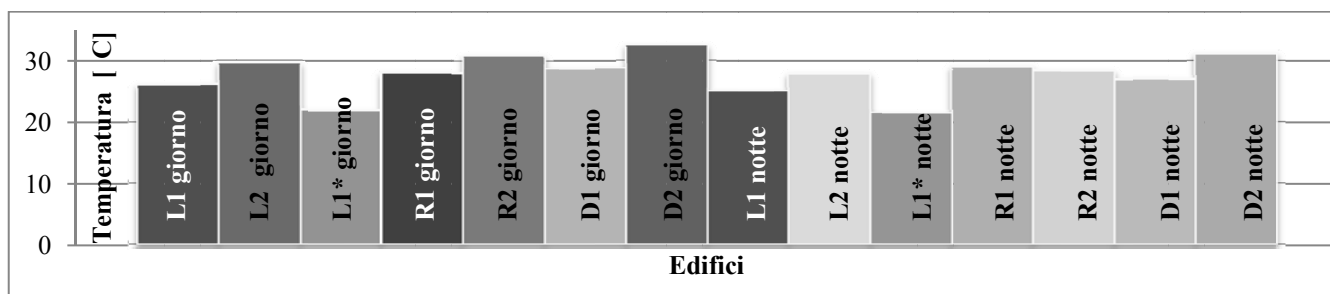


Figura 5 Valori di picco giornaliero (21 luglio) della $T_{aria\ interna}$ al variare della tipologia edilizia e della zona termica.

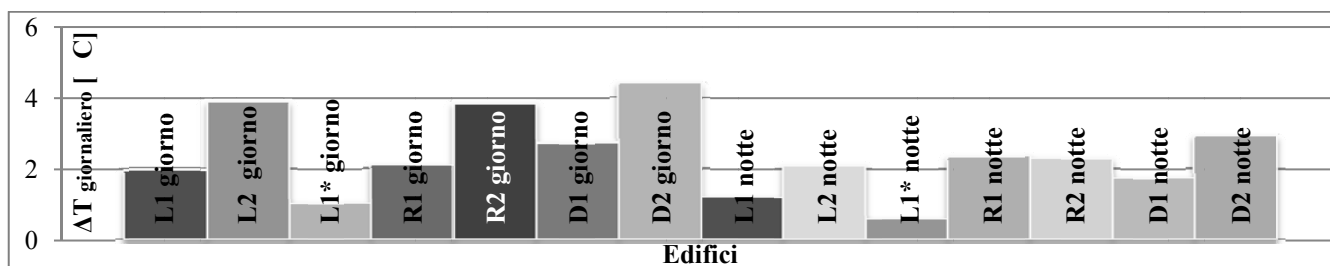


Figura 6 Massimo gradiente termico giornaliero al variare della tipologia edilizia e della zona termica (21 luglio).

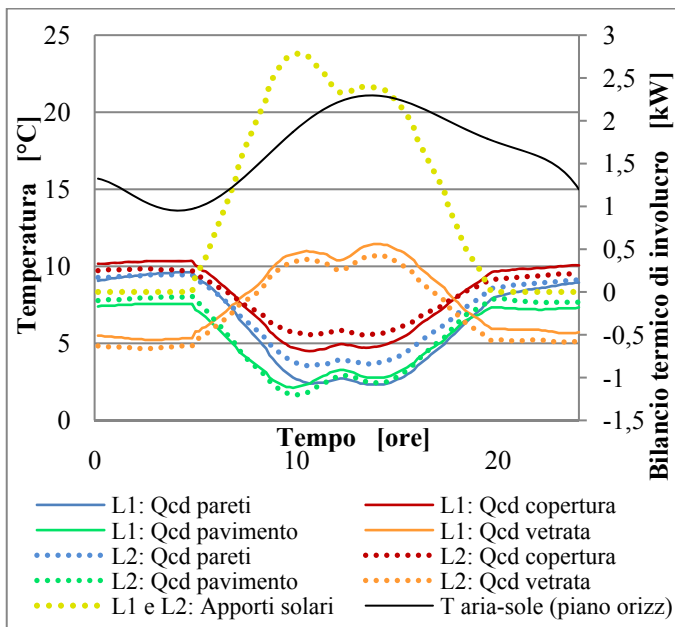


Figura 7 Bilanci termici giornalieri degli edifici L1 e L2.

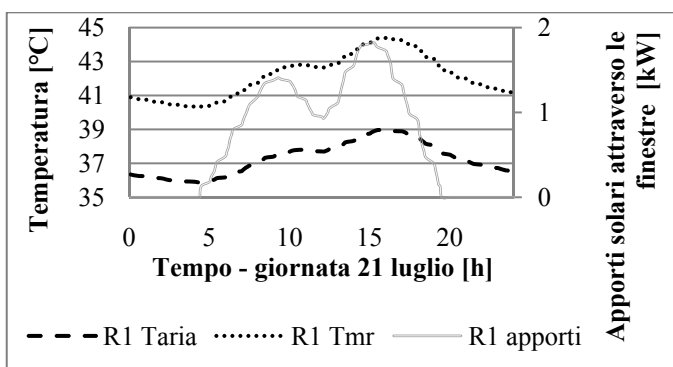


Figura 8 Andamenti di T_{aria} e T_{mr} dell'edificio R1 (zona giorno) con l'apporto solare attraverso le finestre.

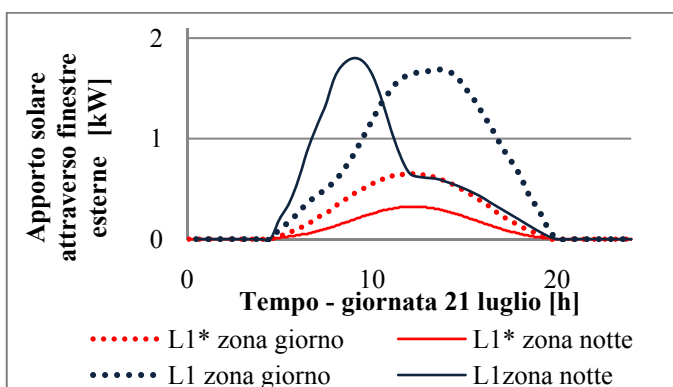


Figura 9 Valutazione dell'abbattimento del carico termico con i sistemi di schermatura.

Analisi del comportamento termico estivo stagionale

Si vuole ora valutare la prestazione termica degli edifici modellati durante tutto l'arco della stagione estiva, facendo sempre riferimento alla forzante climatica reale della città di Perugia [4]. Per questo scopo si è deciso di analizzare in un primo momento il numero di ore di comfort rispetto al totale

fra il giorno 1 giugno ed il 30 agosto, per valutare appunto in termini comparativi le strutture e le strategie architettoniche modellate.

Si è scelto di considerare come target di comfort termico l'intervallo di temperature dell'aria interna comprese fra 20°C e 26°C per tutti gli edifici analizzati, in maniera tale da poter condurre analisi di tipo comparativo fra le varie configurazioni modellate al calcolatore.

Si è inoltre ritenuto fondamentale definire un ulteriore criterio di valutazione che tenesse conto non solo della frequenza delle condizioni di discomfort ma anche dell'intensità degli scostamenti rispetto al range di benessere. Si definisce perciò con l'Eq. (1) l'indice di Deviazione Termica IDT con le seguenti caratteristiche (Fig. 10):

$$IDT = \frac{\int_{D_1} [f(\tau) - T_{26}] d\tau + \int_{D_2} [T_{20} - f(\tau)] d\tau}{t_{stag}} \quad (1)$$

In cui τ è il tempo, $f(\tau)$ è l'andamento di temperatura dell'aria interna rilevato, t_{stag} è il periodo stagionale valutato diminuito di D_1 e D_2 che rappresentano i domini di integrazione così definiti:

$$D_1 = \{\tau \in [0, t_{stag}] : f(\tau) \geq T_{26}\} \quad (2)$$

$$D_2 = \{\tau \in [0, t_{stag}] : f(\tau) \leq T_{20}\} \quad (3)$$

Dove $T_{20} = 20^\circ\text{C}$ e $T_{26} = 26^\circ\text{C}$, ovvero sono i limiti dell'intervallo di comfort di temperatura dell'aria interna. Chiaramente, ad un valore di IDT ridotto, corrisponde una maggiore tendenza della struttura a mantenersi prossima alle condizioni di comfort, espresse con un valore di IDT nullo.

Si nota subito (Fig. 11) come in generale l'edificio concepito seguendo principi di bioclimatica in ogni caso sia più confortevole rispetto a tutte le altre configurazioni trattate.

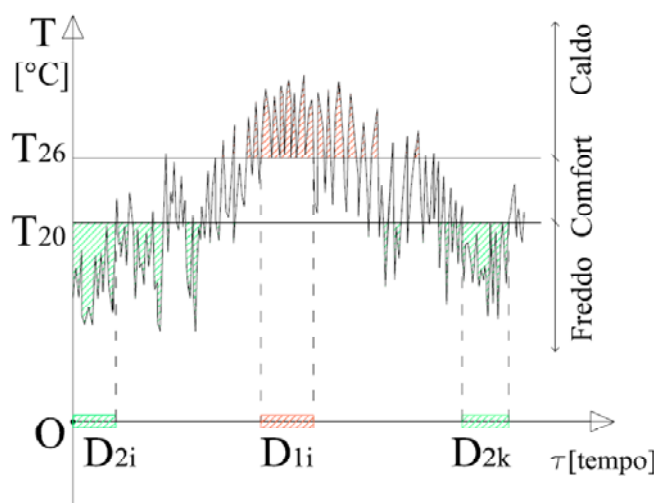


Figura 10 Rappresentazione schematica del significato dell'Indice di Deviazione Termica IDT definito in Eq. (1).

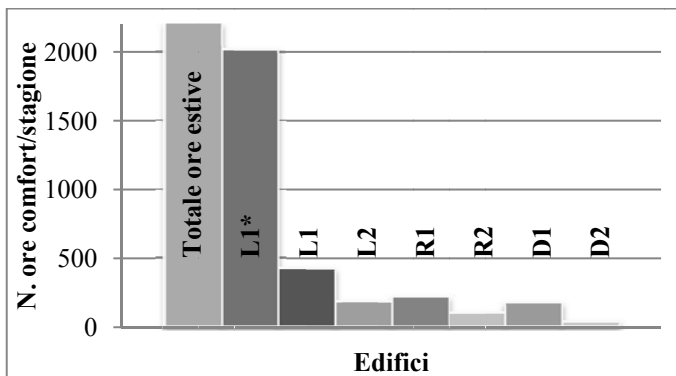


Figura 11 Numero delle ore di comfort della stagione estiva al variare della configurazione architettonica.

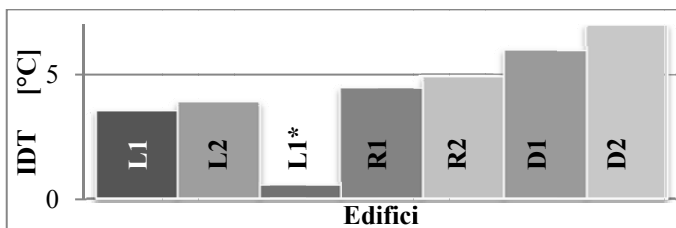


Figura 12 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione estiva al variare della configurazione architettonica (zona giorno).

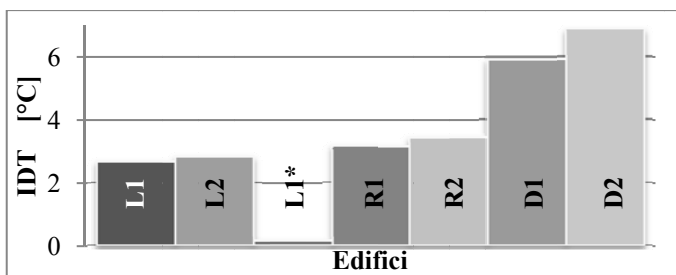


Figura 13 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione estiva al variare della configurazione architettonica (zona notte).

Esso presenta infatti, a parità di elementi tecnici, almeno il doppio delle ore di comfort rispetto alle altre strutture. Anche valutando l'intensità dello scostamento dall'intervallo di benessere, il comportamento delle strutture di tipo L risulta molto migliore rispetto alle altre. In questo caso (Figg. 12-13) si noti come la struttura schermata L1* riesca a ridurre notevolmente l'Indice di Deviazione Termica, assumendo valori inferiori del 90% rispetto a tutti gli altri casi di studio. La struttura L1* è infatti in grado di stabilire condizioni di comfort termico per il 91.4% del periodo estivo e riesce a mantenersi, per il restante tempo, su un livello di scostamento rispetto all'intervallo di comfort inferiore ad 0.53°C in zona giorno (e 0.16°C in zona notte), considerando i carichi occupazionali caratteristici dell'utenza residenziale ([5]) e solamente per aver adottato strategie di progettazione bioclimatica e soluzioni tecniche di involucro di tipo passivo. Di contro le strutture di tipo R e D, non concepite allo stesso modo, raggiungono i livelli di comfort soltanto per periodi ridotti: dal 1.8% del caso peggiore (D2) al migliore caratteristico della struttura R1 con l'19.9% delle ore di comfort rispetto al totale delle ore estive.

Al contempo da ogni analisi (Figg. 11-12-13), per ogni configurazione architettonica ed ogni zona termica, emerge

che le soluzioni tecniche di carattere capacitivo sono sicuramente le più prestazionali durante la stagione estiva per le condizioni climatiche della città di Perugia prese in considerazione in questo studio.

PRESTAZIONE TERMICA DEGLI EDIFICI IN REGIME INVERNALE

In questa fase del lavoro si è scelto di suddividere le analisi in due periodi differenti: il primo, tipicamente invernale compreso fra il 1 novembre ed il 30 aprile; il secondo, di stagione intermedia, riguarda il mese di settembre e maggio. Anche in questa fase i risultati sono stati sintetizzati valutando sia le ore di comfort rispetto al totale che l'entità degli scostamenti rispetto alla fascia di benessere di temperatura dell'aria interna.

È subito evidente come, durante la stagione invernale per il clima della città di Perugia, le strutture analizzate riescano a garantire le condizioni di benessere termico per meno del 30% del tempo, essendo il caso complessivamente migliore quello dell'edificio D1 con il 28.6%. Risulta quindi chiara la necessità di intervenire attraverso strategie di tipo attivo per raggiungere i livelli di benessere attesi dall'utenza residenziale.

È utile osservare come anche in questa stagione le soluzioni capacitivo siano preferibili alle altre. I risultati poi concordano nell'affermare che la struttura L1* in inverno peggiora le condizioni di sottoraffreddamento rispetto ai prototipi di pari configurazione (L1 ed L2). Dall'analisi quindi dei diagrammi sintetici (Figg. 15-20) si può dedurre che la soluzione considerata più vantaggiosa per la configurazione L1, in ogni caso preferibile rispetto alla L2, sia quella di adottare sistemi di schermatura di tipo amovibile, e quindi di rimuoverli durante la stagione invernale in ogni zona termica e durante la stagione intermedia mantenerli solo nella zona giorno (Fig. 20).

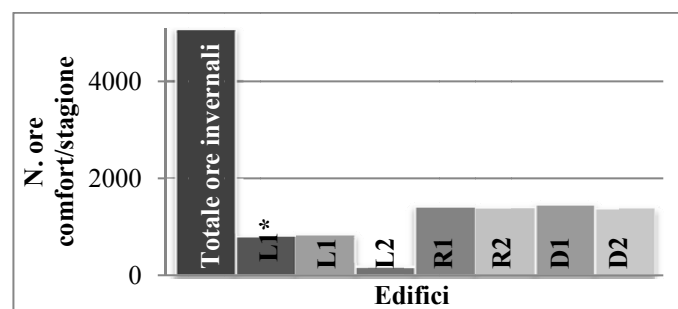


Figura 15 Numero delle ore di comfort della stagione invernale al variare della configurazione architettonica.

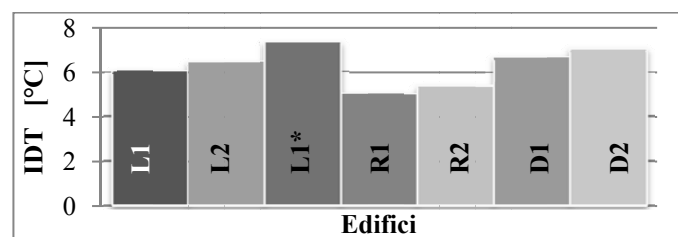


Figura 16 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione invernale al variare della configurazione architettonica (zona notte).

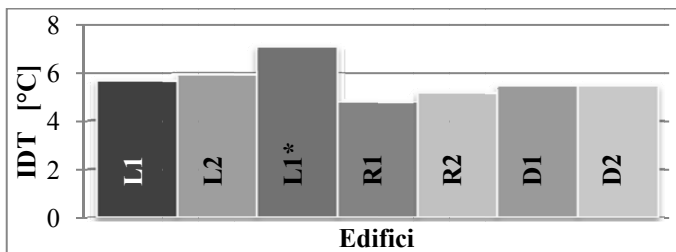


Figura 17 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione invernale al variare della configurazione architettonica (zona giorno).

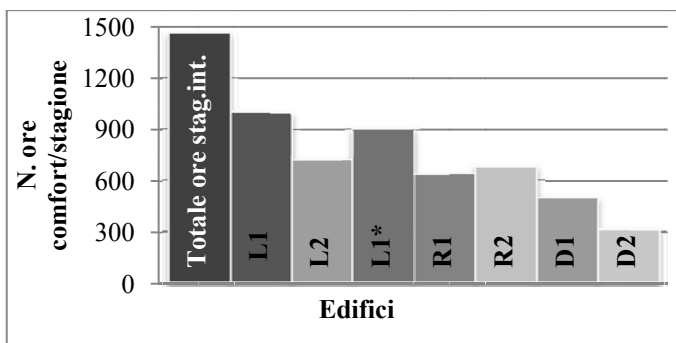


Figura 18 Numero delle ore di comfort della stagione intermedia al variare della configurazione architettonica.

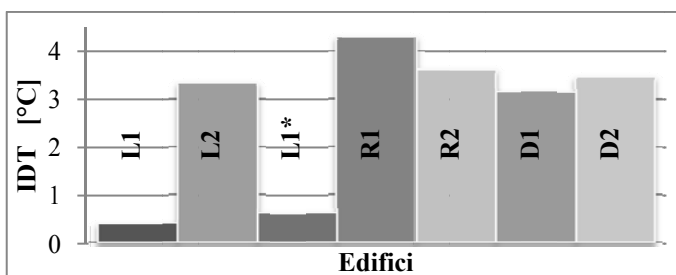


Figura 19 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione intermedia al variare della configurazione architettonica (zona notte).

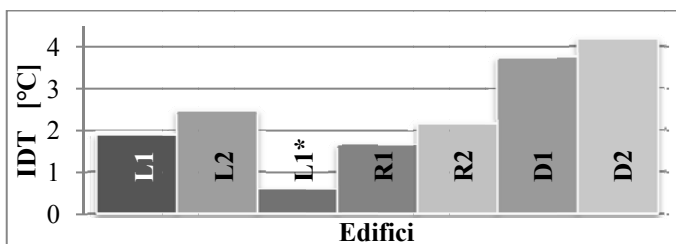


Figura 20 Valori di IDT, Eq. (1), nella stagione intermedia al variare della configurazione architettonica (zona giorno).

PRESTAZIONE TERMICA DEGLI EDIFICI SU BASE ANNUALE

Dalle analisi stagionali emerge, come d'altronde atteso, che la struttura ad L, mentre riesce meglio delle altre a garantire elevati livelli di comfort sia in estate che durante la stagione intermedia, durante l'inverno si trova in condizioni di benessere per periodi più brevi. I valori di deviazione termica rispetto al target (20°C-26°C) si trovano comunque su valori

confrontabili rispetto alle altre strutture, le quali comunque, come detto, necessitano di ricorrere a sistemi attivi di riscaldamento per la gran parte della stagione fredda.

Si ritiene ora opportuno studiare i prototipi su base annuale (Figg. 21-22-23). Da questo emerge in primo luogo che, nel clima della città di Perugia, è nettamente preferibile in ogni caso progettare soluzioni tecniche di tipo capacitivo. Poi si nota come, grazie alle elevate prestazioni che essa è in grado di garantire durante i mesi caldi, la struttura L1 risulta la più confortevole nella zona giorno, mentre nella zona notte la struttura R1 è la migliore e si presenta in condizioni di comfort termico per circa il 27.5% dell'anno. Complessivamente comunque il prototipo che ottimizza maggiormente il benessere termico su base annua è rappresentato dalla struttura L1* schermata. Si ritiene quindi opportuno ora definire un ulteriore caso di studio (L1+).

L'edificio L1+ sarà progettato per ottimizzare le prestazioni della struttura L1, disponendo gli elementi schermanti laddove essi garantiscono miglior comfort termico. Il prototipo L1+ sarà quindi identico al L1 durante l'inverno, uguale al L1* in estate, mentre nei mesi di maggio e settembre i sistemi di schermatura amovibili verranno disposti nella sola zona giorno, per ottenere i benefici descritti in Figura 20 (IDT=0.58°C).

L'edificio così rappresentato presenterebbe prestazioni assolutamente migliori durante tutta la stagione estiva (Figg. 11-12-13), garantendo comunque dei valori di J sostanzialmente in linea rispetto alle altre strutture anche durante l'inverno, a meno di variazioni dovute anche alla maggiore superficie disperdente rispetto al volume (Tab. 1) che penalizza la configurazione ad L rispetto alle altre più compatte.

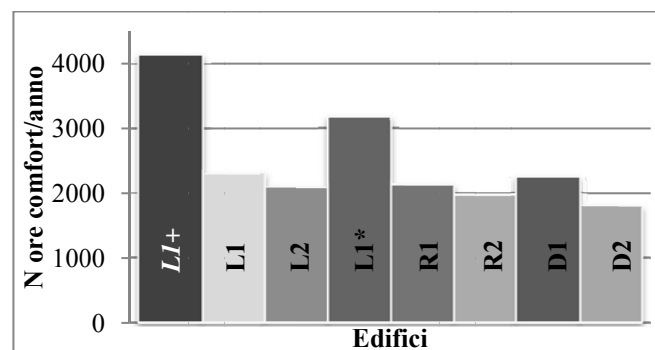


Figura 21 Numero delle ore di comfort annuali al variare della configurazione architettonica (zona giorno).

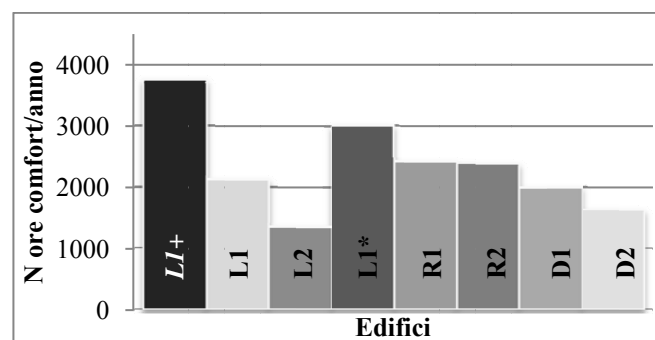


Figura 22 Numero delle ore di comfort annuali al variare della configurazione architettonica (zona notte).

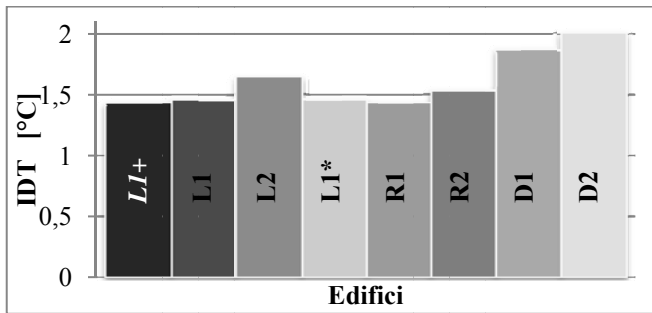


Figura 23 Valori annuali di IDT, Eq. (1), al variare della configurazione architettonica.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato analizzato e quantificato il ruolo della configurazione architettonica sulle prestazioni termiche degli edifici, sia sottoforma di progettazione bioclimatica del complesso-edificio che in termini di scelta stratigrafica delle unità tecnologiche e dei sistemi di schermatura solare.

Sono stati descritti e modellati con un codice di simulazione in regime dinamico [1] tre differenti prototipi di strutture residenziali monofamiliari, caratterizzati da confrontabile superficie lorda in pianta, stesse zone termiche interne, ma concepiti con diverse strategie progettuali. Ciascuno è stato rappresentato in due differenti configurazioni dei componenti edilizi: quella capacitiva e quella invece di massa frontale inferiore, a parità di trasmittanza termica in regime stazionario. Lo studio delle prestazioni termiche è stato inoltre effettuato per tutto l'arco dell'anno considerando come condizione al contorno climatica quella riferita alla città di Perugia [4].

Dalle analisi sono stati raggiunti risultati congruenti con altri lavori presenti in letteratura, a parità di condizioni al contorno [8]. In particolare durante tutto l'arco dell'anno le configurazioni massive apportano un effetto benefico sull'ottenimento delle condizioni di comfort termico interno rispetto agli stessi edifici meno capacitivi, riuscendo a raggiungere i livelli di comfort con una frequenza maggiore (più che raddoppiata nel periodo estivo).

Analizzando poi l'intensità dello scostamento dalle condizioni di comfort è emerso che la maggiore massa produce in generale condizioni termiche più stabili, e quindi più facilmente controllabili anche attraverso la progettazione impiantistica del sistema di climatizzazione, elemento non preso in considerazione in questo studio.

Si è poi notato dalle analisi effettuate sia durante il periodo invernale (1 ottobre – 30 aprile) sia nelle stagioni intermedie (maggio e settembre) che tutti gli edifici analizzati necessitano per gran parte del tempo, in ogni caso superiore al 70% del periodo, di un sistema attivo di climatizzazione degli ambienti.

Discorso a parte va affrontato per la configurazione che prevede schermature esterne L1*: in essa si registrano condizioni di benessere termico in regime estivo per più del 90% del tempo, soltanto mediante quindi l'utilizzo di sistemi passivi (progettazione bioclimatica e frangisole esterni). Durante il periodo invernale invece la stessa struttura L1* appare eccessivamente fredda rispetto alla L1.

Dai risultati ottenuti e discussi, è stato così possibile definire un prototipo di edificio finalizzato ad ottimizzare i livelli di comfort nella città di Perugia a partire dalla scelta

della configurazione ottimale (ad L) e progettando adeguati sistemi di schermatura amovibile. Essi infatti sono ritenuti necessari durante la stagione estiva ed intermedia ma sono dannosi in inverno, elemento che fa quindi dedurre l'esigenza che essi siano progettati in maniera tale da essere appunto regolabili od amovibili stagionalmente.

Si è definito quindi l'edificio L1+ a partire dall'edificio L1, predisponendo su quest'ultimo le schermature descritte in tutti gli ambienti in estate, e soltanto nella zona giorno nella stagione intermedia. La configurazione ottimizzata L1+ risulta così in grado di generare condizioni di comfort termico per circa il doppio del tempo rispetto alla media degli altri edifici, senza l'ausilio di sistemi di controllo attivo dei parametri ambientali, per il 47.3% dell'anno nella zona giorno ed il 42.8% nella zona notte.

NOMENCLATURA

Abbreviazioni	Significato	
S/V	Rapporto tra la superficie lorda dell'involucro ed il volume contenuto	
L	Edificio dalla forma ad L monopiano	
R	Edificio dalla forma rettangolare monopiano	
D	Edificio dalla forma rettangolare a due piani	
L1, R1, D1	Edifici con elementi tecnici massivi	
L2, R2, D2	Edifici con elementi tecnici leggeri	
L1*	Edificio ad L con elementi tecnici massivi e schermature	
L1+	Edificio ad L con elementi tecnici massivi e sistemi di schermatura disposti per ottimizzare il comfort termico su base annua	
Simboli	Significato	Unità misura
S	Superficie	m ²
V	Volume	m ³
T _{aria}	Temperatura dell'aria interna	[°C]
T _{op}	Temperatura operante interna	[°C]
T _{aria-sole (piano orizz.)}	Temperatura aria-sole riferita al piano orizzontale della copertura degli edifici	[°C]
T _{mr}	Temperatura media radiante interna	[°C]
Q _{cd}	Potenza termica trasmessa per conduzione	[kW]
IDT	Indice di Deviazione Termica definito in Eq. (1)	[°C]
T	Variabile tempo	[min]
f(τ)	Andamento di temperatura	[°C]
T ₂₀	Temperatura dell'aria interna minima di comfort	[°C]
T ₂₆	Temperatura dell'aria interna massima di comfort	[°C]
t _{stag}	Periodo stagionale di analisi	[min]
D1	Dominio di integrazione definito in Eq. (2)	[min]
D2	Dominio di integrazione definito in Eq. (3)	[min]

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program: *EnergyPlus*.
 [2] Mohammad S. Al-Homoud, Optimum Thermal Design of Air-Conditioned Residential Buildings. *No.3 Building and Environment*, vol.32, pp. 203-210, 1997.

- [3] W. Pessenlehner and A. Mahdavi, Building Morphology, transparency and energy performance. Proc. Conf. Building Simulation, vol.1, pp 1025-1032, 2003.
- [4] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Building Technologies Program. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=ITA/cname=Italy. WMO Station Region 6 : Italy, Perugia 161810 (IGDG).
- [5] V. Corrado e S. Paduos, Il progetto termico dell'involucro opaco: l'effetto della massa sulla prestazione termica ed energetica dell'edificio. Atti Congr. ATI, vol. 1, pp.02-008, 2008.
- [6] Z. Yilmaz, Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparison of thermal performance of building in temperate-humid and hot-dry climate. *No.3 Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 306-316, 2007.
- [7] Dorota A. Chwieduk, Some aspects of modeling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy. *No.10 Solar Energy*, vol. 82, pp. 870-884, 2008.
- [8] M.A. Porta-Gándara et al., Effect of passive techniques on interior temperature in small houses in the dry, hot climate of northwestern Mexico. *No. 1 Renewable Energy*, vol.26, pp. 121-135, 2002.
- [9] F. Cotana e M. Goretti, BGP index: an approach to the certification of building global performance. Proceedings 9th REHVA World Congress "Clima 2007-WellBeing Indoors", Helsinki (Finland), 2007, paper ID:B01E1404.

SUMMARY

The present study aims to define the building energy performance trying to relate the building design to the thermal requirements. Three shape configurations (Fig.1), various orientations, windows features (Tab.2), shielding systems (Fig.2) and two technical envelope solutions which differ for mass level (Tab.3) are considered. Daily and seasonal dynamic simulations by *EnergyPlus* [1] code were carried on in order to relate the thermal requirements with all the morphological solutions and to the real climate boundary condition [4]. The location, the building residential use, the building plan surface, the internal heat gains level (4W/m^2) were kept constant throughout the simulations [3]. Also, a numeric indicator was defined to evaluate the comfort-related assessments. The daily results (Figg.3-4-5-6) show that both the envelope mass and the building morphology have positive effects reducing the temperature hot peak and the daily thermal variability. The bioclimatic shape indeed presents higher comfort levels, in all the thermal zones during all the seasons. The mass influence contributes to realize more steady internal conditions, and so easier to control with active and passive techniques. Moreover, the shielding systems are the most responsible to realize the best comfort summer conditions, making the bioclimatic morphology ("L" shape) essentially self-contained from June 1st to September 30th. At the same time, the boundary climate of Perugia presents a highly variable condition all over the year. This condition guides to remove the shielding systems during the winter.

The present study thus results to be a guide for defining the most comfortable building for this climate, starting from the L1 example. The new L1+ prototype presents all the shielding systems during the summer and during the intermediate season just in one thermal zone; the same shielding systems are removed during the winter. The building L1+ can thus guarantee thermal comfort without any plant for the half year period.