

Un metodo per la valutazione del comportamento termico in regime dinamico degli edifici

Parte seconda:
Casi di studio



In questa memoria il metodo di analisi termoenergetica proposto nella Parte I del lavoro viene applicato su tre prototipi di edifici residenziali unifamiliari significativi. I risultati dell'analisi dinamica, espressi mediante gli Indici di Deviazione Termica introdotti nella Parte I, vengono discussi valutando anche il ruolo di differenti strategie progettuali di involucro opaco e vari contesti climatici del territorio italiano. La metodologia proposta viene poi applicata per lo studio della sensitività di alcune importanti caratteristiche di involucro opaco e trasparente, misurate anche sperimentalmente. I risultati ottenuti vengono poi confrontati con le indicazioni fornite da altri parametri comunemente utilizzati per descrivere i livelli di performance degli edifici.

In questo studio viene analizzata la prestazione termoenergetica di tre prototipi di edifici residenziali unifamiliari modellati in un ambiente di simulazione dinamica (EnergyPlus [1]) e confrontati sulla base della metodologia descritta nella Parte I del lavoro [2]. Dall'applicazione di tale metodologia è stato possibile individuare i livelli di performance espressi mediante i valori di Indice di Deviazione Termica ([2]), al variare della configurazione architettonica e della strategia progettuale dell'involucro opaco, studiando anche l'interazione con i vari contesti climatici tipici del territorio italiano (Bolzano, Perugia, Palermo).

Descrizione dei casi di studio

Le tre configurazioni di edificio descritte (Figura 1) presentano equivalente superficie lorda in pianta ed area vetrata in ogni zona termica e sono state caratterizzate di volta in volta da due soluzioni tecniche di involucro opaco, differenti per proprietà termiche dinamiche ma aventi medesime caratteristiche termiche in regime stazionario: stessi valori di trasmittanza termica e proprietà ottico-

energetiche delle superfici opache esposte alla radiazione solare del sito, per evitare fenomeni di surriscaldamento superficiale differenziali. I prototipi 1 e 2 sono caratterizzati da configurazioni architettoniche che ottimizzano le prestazioni termiche rispettivamente estive ed invernali. L'ultima struttura ("0") vuole rappresentare la canonica villetta su due livelli molto diffusa nel patrimonio edilizio italiano in cui il piano inferiore è dedicato alla zona giorno e quello superiore alla zona notte. Il carico termico dovuto agli apporti interni è stato supposto pari a 4 W/m^2 [3] ed il tasso di infiltrazione pari a $0,3 \text{ vol/h}$.

Le performance delle tre configurazioni architettoniche verranno quindi valutate sulla base della metodologia proposta ed i risultati verranno espressi mediante gli Indici di Deviazione Termica IDT_{edificio} e $IDT_{\text{edif-sito}}$, prendendo in considerazione di volta in volta tre contesti climatici (Perugia, Palermo, Bolzano) e due differenti scelte di involucro opaco: la scelta "A" che riguarda l'involucro massivo, la tipologia "B" quello invece leggero. I casi di studio quindi saranno contraddistinti da un numero (0,1,2) che definisce la forma del fabbricato accompagnato da una lette-

Prof. Franco Cotana,
ing. Anna Laura Pisello,
CRB-Biomass Research Centre,
Università di Perugia.

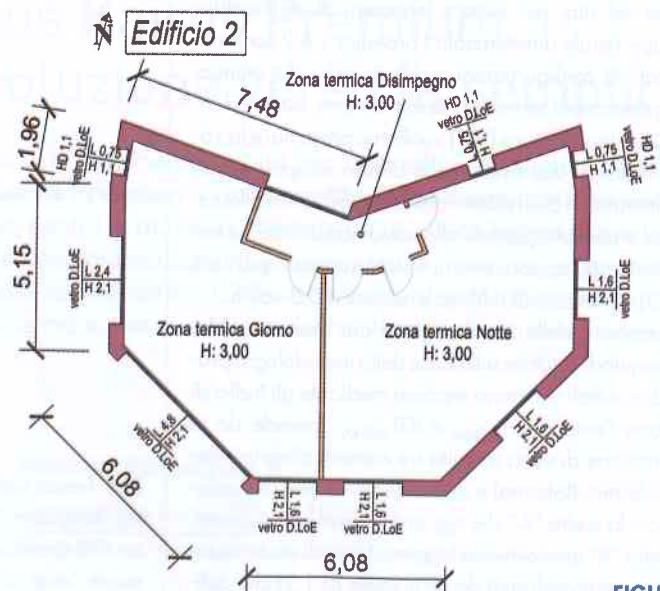
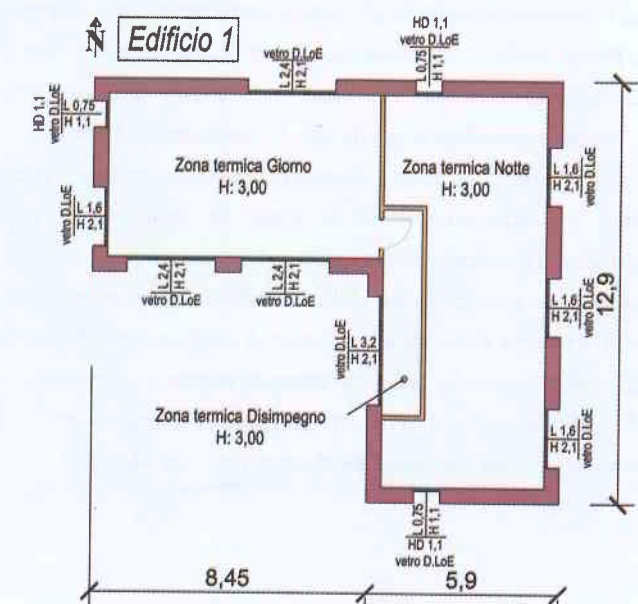
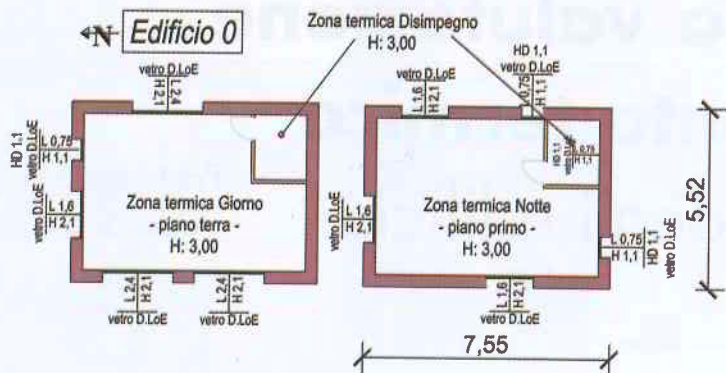


FIGURA 1

ra (A,B) che specifica la soluzione tecnica di involucro, co- sicchè ad esempio il prototipo "1-A" sarà quello dalla ca- ratteristica forma ad L (configurazione 1) con elementi tec- nici di tipo capacitivo (soluzione A).

Discussione dei risultati

La fase di analisi preliminare del problema consiste nella valutazione dei profili giornalieri di temperatura interna, dei bilanci termici di involucro [3], che orientano la scelta di possibili strategie di ottimizzazione delle prestazioni. Tali analisi hanno ad esempio suggerito la definizione di due ulteriori casi di studio (1-A* e 2-A*) dotati di schermature in grado di abbattere il picco giornaliero di potenza termica entrante del 60% circa sul versante sud e dell'80% sui fronti est-ovest. Sulle facciate sud tali elementi sono costituiti da un oggetto orizzontale disposto superiormente al serramento e due oggetti verticali laterali, tutti di profondità pari ad 80 cm, tali da incorniciare la superficie finestrata senza inficiare la visibilità verso l'ambiente esterno. Sui versanti est-ovest vi sono delle lamelle orizzontali profonde 40 cm ed inclinate rispetto al piano verticale della finestra di 45°. I due prototipi 1-A* e 2-A* saranno quindi ottenuti dagli edifici 1-A e 2-A disponendo le schermature metalliche appena descritte.

Si procede poi prendendo in considerazione la prestazione termica estiva degli edifici modellati (mesi da maggio a settembre), sottoposti alle tre forzanti climatiche reali caratteristiche delle città di Perugia, Palermo e Bolzano. Si riportano quindi (Figura 2-a) i risultati di tali analisi sottoforma di Indici di Deviazione Termica IDT_{edif} dei vari prototipi. Si noti come un importante elemento sia rappresentato dal ruolo della configurazione architettonica [3]. Dal report (Figura 2-a) si evince infatti che l' IDT_{edif} , a parità di elementi tecnici di involucro e località climatica, registra valori differenti fino ad un rapporto di 1:2 per la città di Bolzano, cambiando la sola configurazione architettonica, da 1-A a 0-A per esempio.

Le strategie progettuali di ottimizzazione delle prestazioni estive dell'edificio 1 hanno inoltre portato ad evidenti miglioramenti delle condizioni interne di temperatura operativa, sintetizzata da valori di IDT_{edif} inferiori almeno del 70% rispetto ad entrambe le altre configurazioni. L'unico caso in cui si registra un'apparente anomalia è l'edificio 0-A di Palermo. Nel complesso, mediando i valori di IDT_{edif} delle due zone termiche, si perde un'informazione invece importante, recuperabile analizzando i valori di IDT di ogni zona termica. Nel clima di Palermo infatti, dove l'elevata massa frontale svolge un ruolo grandemente benefico sulle prestazioni estive, la zona giorno a piano terra dell'edificio 0-A presenta un valore di IDT pari a 0,465 mentre il valore di IDT della zona notte è di circa 5 volte superiore, essendo appunto il piano superiore esposto al maggior carico termico entrante estivo mentre per la soluzione di tipo

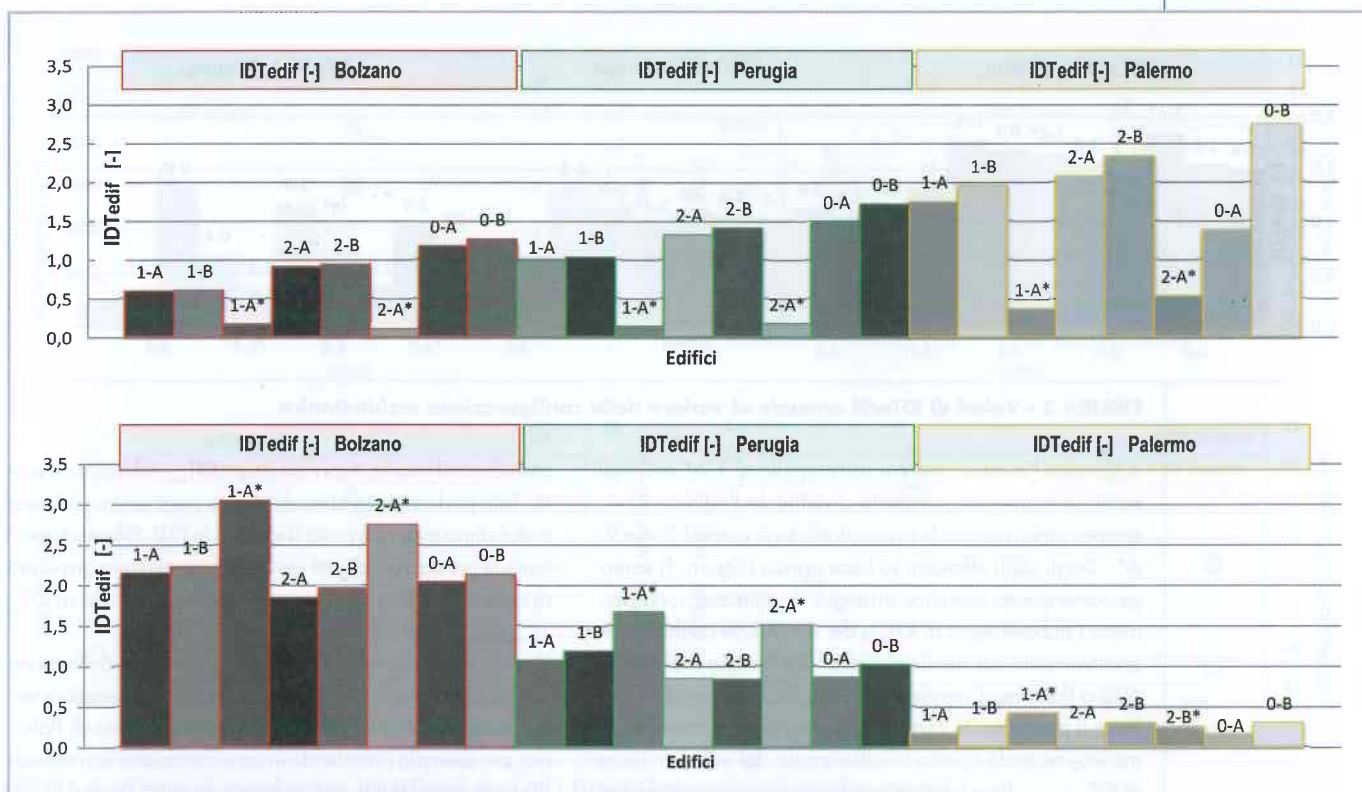


FIGURA 2 - Valori di IDTedif per la stagione estiva al variare della configurazione architettonica

leggero tale effetto si perde. L'edificio su due piani con soluzioni tecniche ad elevata massa frontale a Palermo registra quindi condizioni termiche interne estremamente differenti fra il piano inferiore e quello superiore, elemento che quindi va tenuto in considerazione in fase di analisi, al fine di adottare criteri progettuali opportunamente differenziati. Ulteriori considerazioni possono già essere dedotte per quanto riguarda la forzante climatica.

Si noti come, a parità di prototipo, la stagione estiva di Bolzano sia la meno gravosa in termini di carico termico entrante rispetto alle altre due città italiane, elemento che si traduce con valori di IDT_{edif} minori dell'unità sia per la configurazione ottimizzata estiva "1" che per quella invernale "2". Per il clima di Perugia avente caratteristiche intermedie fra i due, soltanto la configurazione "1" è in grado di far registrare valori di IDT_{edif} minori dell'unità. Infine a Palermo, con mesi estivi molto caldi, fa registrare valori di IDT_{edif} inferiori dell'unità soltanto mediante l'utilizzo di schermature esterne. Si noti comunque come gli stessi sistemi di schermatura svolgano in ogni caso un ruolo fondamentale nel determinare le condizioni termiche interne. A parità di tutti gli altri elementi infatti, i prototipi schermati 1-A* e 2-A* presentano valori di IDT_{edif} mediamente inferiori dal 60% all'85% per tutte le città prese in considerazione. Applicando ora la stessa metodologia di analisi ai vari casi di studio per la stagione invernale (Figura 2-b), emerge una maggiore variabilità di IDT_{edif} rispetto al caso

estivo ed in generale un maggior scostamento rispetto al target termico invernale. Vediamo infatti che, per lo stesso prototipo di edificio, la rigidità dell'inverno di Bolzano fa raddoppiare il valore medio di IDT_{edif} rispetto a quello di Perugia, già circa cinque volte superiore a quello di Palermo. Si noti quindi come, a parità di tutte le altre condizioni, lo stesso edificio possa essere caratterizzato da livelli di prestazione (valori di IDT_{edif}) assolutamente diversi da un sito all'altro, rilevabili solo mediante analisi dinamiche che tengano conto della forzante climatica reale del luogo di interesse. Si osservi inoltre come la scelta della configurazione l'involucro, apporti importanti benefici per il clima di Perugia ed ancora più evidenti per quello di Bolzano. Nella città di Palermo invece, il ruolo della configurazione architettonica risulta meno influente, registrando mediamente il 10% di scostamento di IDT_{edif} .

Come era deducibile, il ruolo delle schermature solari è invece peggiorativo della performance termica invernale. Emerge quindi la necessità di adottare sistemi di tipo amovibile stagionalmente. Ciò suggerisce la definizione di due ulteriori prototipi di edifici con la finalità di ottimizzare le prestazioni su base annua. Tali edifici, denominati 1+ e 2+, saranno ottenuti a partire rispettivamente dai prototipi 1-A ed 2-A che ottengono complessivamente le migliori prestazioni, disponendo gli elementi schermanti solo nel periodo estivo. L'edificio "1+" sarà identico all'edificio 1-

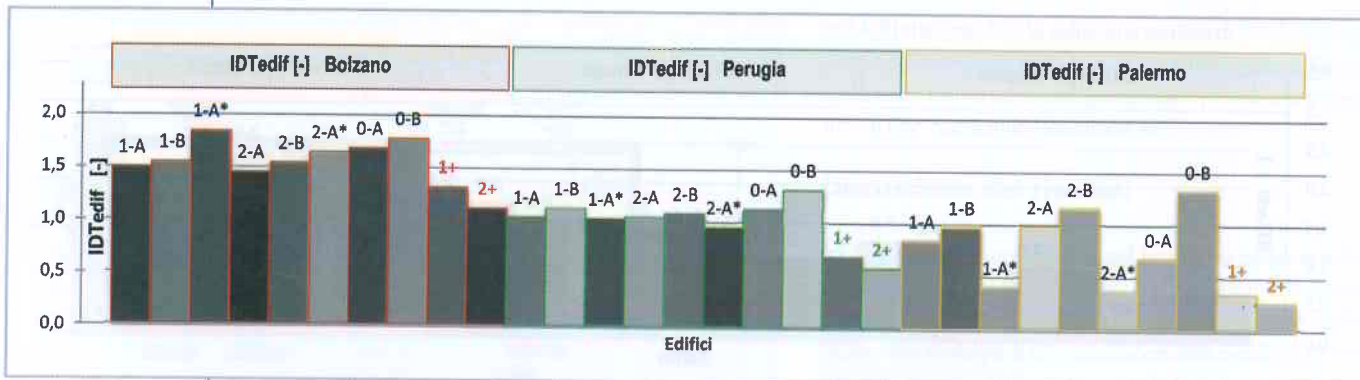


FIGURA 3 - Valori di IDTedif annuale al variare della configurazione architettonica

A durante l'inverno, mentre sarà uguale al 1-A* nei mesi estivi; in maniera equivalente si definisce l'edificio "2+", sempre ottimizzando le prestazioni degli esempi 2-A e 2-A*. Dagli studi effettuati su base annua (Figura 3) emerge come questa semplice strategia di ottimizzazione permetta l'abbattimento di IDT_{edif} del 40-50% in confronto rispettivamente alle medie di Bolzano e Perugia e di circa il 60% a Palermo. Complessivamente è quindi possibile definire il prototipo 2+ come il migliore, in ogni contesto climatico, essendo questo caratterizzato dal valore minore di $IDT_{edif,anno}$. Esso infatti in inverno massimizza gli apporti solari gratuiti (2-A), mentre in estate (2-A*) l'uso delle schermature permette l'abbattimento del picco di apporto solare dal 60% all'80%.

Si procede ora allo studio annuale del comportamento termico dei prototipi in relazione al clima (Fig. 4), i cui risultati vengono sintetizzati mediante l'indice $IDT_{edif-sito}$ [2], fondamentale soprattutto quando l'obiettivo è quello di analizzare le prestazioni del sistema integrato edificio-sito, approccio particolarmente utile in fase di diagnosi comparativa sull'esistente. I prototipi di Palermo hanno i valori maggiori di $IDT_{edif-sito}$ nonostante presentino i valori minimi di IDT_{edif} (Figura 2). Da questi risultati in apparente incongruenza, emerge invece un importante elemento. La prestazione dei prototipi di Palermo è in termini assoluti da

considerarsi buona, espressa da un IDT_{edif} inferiore all'unità. Tale performance ottimale deriva però sostanzialmente dal clima mite della città (Figura 3 in [2]). Riferendo pertanto le prestazioni di tutti i prototipi rispetto alla gravosità di ciascun sito (Fig. 4), si nota invece come i valori di $IDT_{edif-sito}$ Palermo siano quelli maggiori.

Questa duplice analisi tuttavia guida verso la definizione di ulteriori strategie di ottimizzazione delle prestazioni termiche nello specifico per quanto riguarda il sito di Palermo, per esempio prendendo in considerazione vari scenari di sfruttamento della ventilazione naturale notturna.

Analisi di sensitività

Si applica ora il metodo proposto ad analisi di sensitività riguardanti alcune proprietà di involucro, quali: la trasmittanza e la capacità termica delle pareti perimetrali opache, la riflettanza della copertura, il Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) delle vetrate e la trasmittanza solare delle schermature diffondenti. La variabilità di questi parametri, definita da quattro casi per ciascuno, è stata scelta sulla base delle caratteristiche reali degli edifici residenziali italiani, sia sulla base di analisi sperimentali. Queste ultime hanno riguardato la misura della trasmittanza in opera di una residenza in classe A (CasaClima) e di

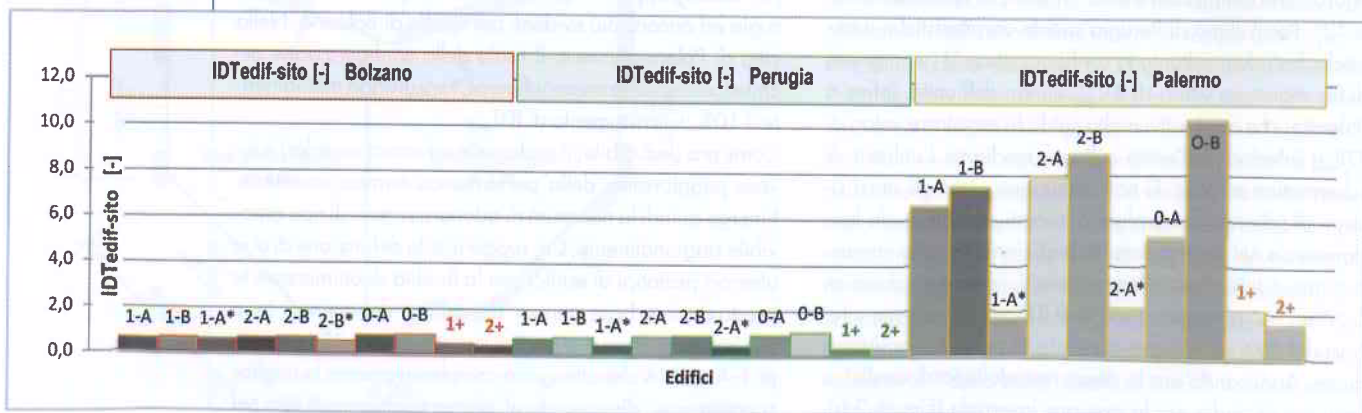


FIGURA 4 - Valori di IDTedif-sito annuale al variare della configurazione architettonica

Grandi prestazioni a p...

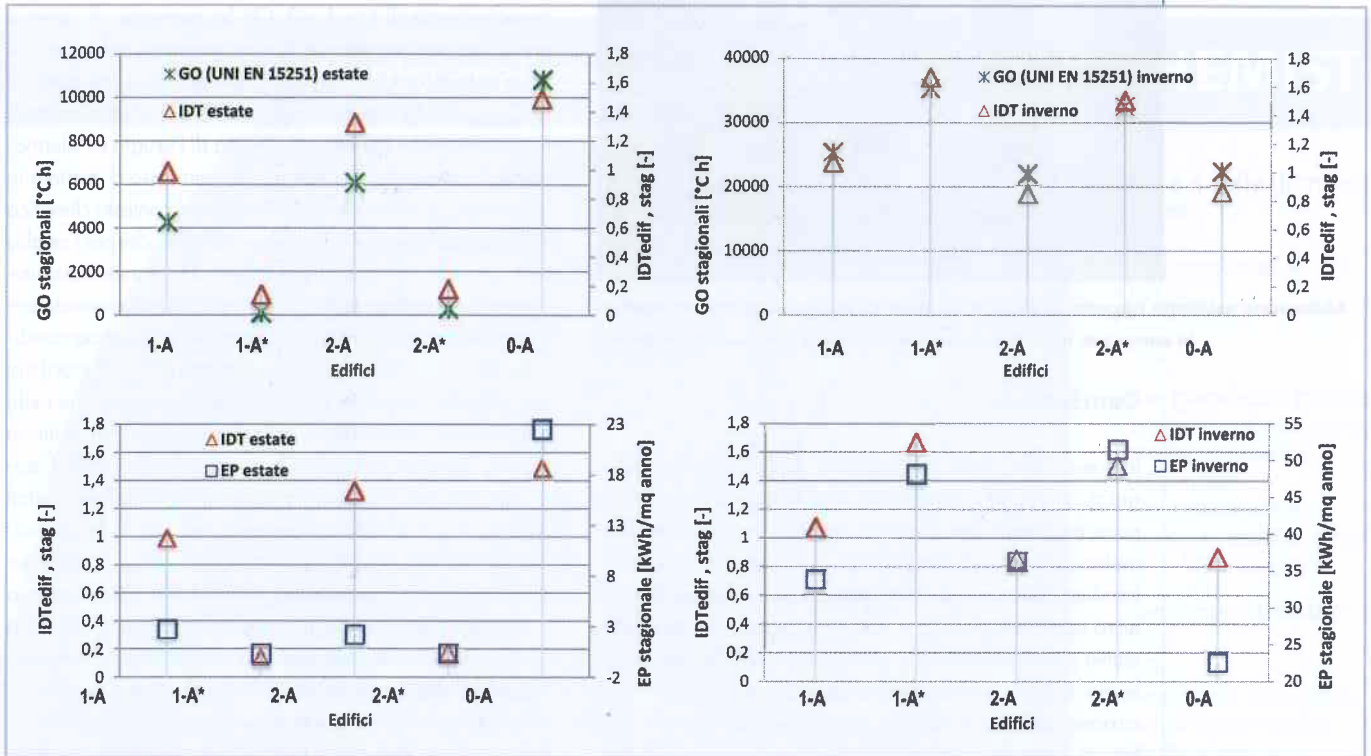


FIGURA 5 - Valori di correlazione fra IDTedif,stag ed i Gradi Ora stagionali (grafici sopra) e fra IDTedif,stag ed il fabbisogno di Energia Primaria stagionale (grafici sotto)

un'abitazione costruita prima della Legge 373/76 e priva di coibentazione. Questi ossia rispettivamente 0,16 e 1,19 W/m²K, misurate secondo la ISO 9869:1994. La riflettanza *r* del tetto è stata invece misurata con spettrofotometro e sfera integratrice (ASTM E 903-96) su quattro tipologie di tegole in laterizio: color testa di moro (*r*=22%), terracotta (*r*=44%), beige (*r*=66%), bianco (*r*=88%). La trasmittanza solare delle schermature ed il SHGC varia dal 20% all'80%, e la capacità termica varia da 60;40;56,5 kJ/m²K a 210;167;208 kJ/m²K rispettivamente per le pareti esterne, la copertura ed il solaio controterra. I risultati di tale analisi applicati all'edificio "2" mostrano come, per tutte le località climatiche, il ruolo delle proprietà degli elementi trasparenti è assolutamente preponderante (40-50%) rispetto a quello degli elementi opachi, soprattutto in estate. Sempre in estate anche il coefficiente di sensitività relativo alla riflettanza di copertura presenta una maggiore variabilità (circa 45%) in termini di IDTedif.

Correlazione dell'indice IDTedif con altri indici di prestazione

Si ritiene a questo punto importante comparare i risultati ottenuti in termini di IDTedif con altri indicatori comunemente usati per la definizione del comportamento termico indoor dei fabbricati e per la valutazione dei consumi energetici, al fine di definire l'applicabilità della metodologia propo-

sta. È stato quindi valutato il grado di correlazione dell'IDTedif con il fabbisogno estivo ed invernale di Energia Primaria per unità di superficie di ogni fabbricato EP espresso in [kWh/(m² anno)] e con il numero di Gradi Ora stagionali GO [°C·h]. Quest'ultimo parametro di riferimento è stato calcolato seguendo il modello di comfort adattivo descritto nella norma UNI EN 15251, prendendo in considerazione i dati climatici orari della località di riferimento ed ipotizzando una categoria II di edificio definita nella UNI EN 15251 come "Normal level of expectation and should be used for new buildings and renovations". Sono stati quindi in concreto calcolati gli indici di correlazione dapprima fra i valori di IDTedif,stag ed i valori di EPstag e poi sempre tra gli stessi valori di IDTedif,stag ed i Gradi Ora calcolati secondo la UNI EN 15251. Si è infine giunti alla quantificazione dei seguenti coefficienti di correlazione R(i,j):

- R (IDT,GO)= 94,62% (stagione estiva); 99,96% (stagione invernale);
- R (IDT,EP)= 66,70% (stagione estiva); 87,04% (stagione invernale).

Dai risultati di tale confronto effettuato sui prototipi 1-A, 2-A, 0-A, 1-A*, 2-A* nella città di Perugia (Figura 5), si nota come l'IDTedif può essere rappresentativo del comfort termico espresso mediante i gradi ora stagionali sia per la stagione estiva che per quella invernale. Si osserva poi anche una accettabile correlazione, migliore per la stagione invernale, con i valori di fabbisogno di energia primaria stagionale.



Abitazione esistente oggetto di monitoraggio meteorologico e microclimatico in corso per la validazione sperimentale dei modelli numerici

Conclusioni

In questa parte dello studio è stata applicata la metodologia di analisi termoeconomica degli edifici descritta nella parte del lavoro. Sono stati modellati in un ambiente di simulazione dinamica tre prototipi di edifici residenziali unifamiliari, ciascuno caratterizzato da due soluzioni di involucro opaco e collocato in tre città italiane ritenute significative per le finalità dello studio: Bolzano, Perugia e Palermo. È stato così possibile valutare il ruolo della configurazione architettonica sulla prestazione termica dei fabbricati, notando come tale elemento sia in grado di ottimizzare la performance dei fabbricati, espressa mediante gli IDT_{edif} , fino a circa il 50% in estate tra l'edificio 1-A ed il prototipo 0-A ad esempio. In inverno invece l'effetto della configurazione si attenua soprattutto per la maggiore severità delle condizioni climatiche di questa stagione rispetto al target di riferimento, per tutti i siti presi in considerazione. Durante tutto l'arco dell'anno poi si nota un livello di performance maggiore per le soluzioni di involucro capacitive rispetto a quelle più leggere, ancor più evidente nel sito di Palermo, in cui tale differenza espressa in termini di IDT_{edif} si aggira attorno al 30-40%.

Analizzando nello specifico le prestazioni estive, è emerso il ruolo preponderante svolto dal sistema di schermatura, in grado di abbattere il valore di $IDT_{edif,stag}$ dal 70% al 90% in tutti i contesti climatici. In inverno al contrario esso incrementa il livello di deviazione termica rispetto al target, per ogni caso di studio. Ciò ha guidato quindi verso la definizione di due prototipi ottimizzati 1+ e 2+ caratterizzati da: sistemi schermanti soltanto durante la stagione estiva, soluzioni tecniche massive e configurazione architettonica

rispettivamente di tipo 1 e 2. Ciò ha permesso di ottenere una soluzione progettuale (2+) in grado di abbattere, su base annua complessiva, sia i livelli di IDT_{edif} che quelli di $IDT_{edif-sito}$ dal 32% al 67% nella media dei siti di riferimento, con maggiori benefici per le città di Perugia e Palermo. Infine, la metodologia proposta ha permesso di mettere in luce anche quantitativamente il ruolo del contesto climatico sulle prestazioni degli edifici, importante anche per l'analisi delle prestazioni termoeconomiche sull'ambiente costruito. Attraverso il calcolo dell' $IDT_{edif-sito}$ si è infatti osservato come gli edifici siti a Palermo presentino in assoluto condizioni termiche indoor più vicine al target (IDT_{edif} minori) ma che tale elemento trovi sostanzialmente spiegazione nella natura della forzante climatica più mite della città siciliana rispetto alle altre (valori di $IDT_{sito:Palermo}$ molto minori). È stato poi applicato il metodo anche per la sintesi di risultati delle analisi di sensitività ottenendo, per tutte le località climatiche, coefficienti di sensitività relativi alle proprietà degli elementi trasparenti maggiori del 40-50% rispetto a quelli degli elementi opachi, ancor maggiore in estate. Una maggiore inerzia termica apporta sempre beneficio ma con una variabilità massima del 20% raggiunta nel caso invernale. Nel caso estivo poi assume importanza anche la riflettanza della copertura. La condizione massima ($r=88\%$) presenta infatti un valore di IDT_{edif} del 45% inferiore rispetto al caso con r minima (22%).

È stato poi valutato il livello di correlazione di tali indici con i parametri comunemente usati a livello nazionale ed internazionale per caratterizzare le prestazioni degli edifici, giungendo ad un buon ordine di corrispondenza soprattutto fra i suddetti IDT_{edif} ed i livelli di comfort termico espressi mediante i Gradi Ora, secondo la UNI EN ISO 15251. Dall'applicazione del metodo proposto e dalla qualità dei risultati ottenuti, si ritiene che l'iter metodologico proposto possa rappresentare uno strumento efficace per definire in modo chiaro ed esaustivo le prestazioni termoeconomiche degli edifici sottoposti ad analisi termica in regime dinamico. Si ritiene inoltre che tale procedura di analisi potrebbe fornire delle valide linee guida essenziali per definire soluzioni progettuali concepite ad hoc per ottimizzare la performance degli edifici in relazione ad ogni specifico contesto climatico.

Bibliografia

- [1] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, Building Technologies Program: EnergyPlus.
- [2] F. Cotana, A.L. Pisello, *Un metodo per la valutazione del comportamento termico in regime dinamico degli edifici. Parte I: Formulazione*, La Termotecnica, Gennaio-febbraio 2010.
- [3] F. Cotana, A.L. Pisello, *Sul comportamento termico di edifici residenziali al variare della configurazione architettonica*. Atti Congr. ATI 2010.

abstract

A Method to Evaluate the Building Thermal Dynamic Behavior

Part II: Case Studies - The thermal and energy dynamic analysis of buildings and performance optimization strategies both in summer and winter periods became well-established and also fundamental. In this paper, composed of two parts, a synthetic but also exhaustive method for thermal dynamic behavior analysis of buildings is proposed. It is based on performance levels assignment, defined by proper adimensional indexes that allow to express the building behavior in relation to the real climatic contest. Application examples are discussed in the second part of this work.