



Ricerca di Sistema elettrico

Simulazione del comportamento
energetico di un fabbricato-tipo in
assenza/presenza di tetto/parete verde per
ottimizzare l'efficienza energetica degli
edifici, rispetto alle aree climatiche italiane

Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani, Caterina Gargari

SIMULAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DI UN FABBRICATO-TIPO IN ASSENZA/PRESENZA DI TETTO/PARETE VERDE PER OTTIMIZZARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI, RISPETTO ALLE AREE CLIMATICHE ITALIANE

Fabio Fantozzi (DESTEC, Università di Pisa), Carlo Bibbiani (DSV, Università di Pisa), Caterina Gargari (Collaborazione esterna Università di Pisa)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo di e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologico

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Validazione di modelli di simulazione semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati dotati di coltri vegetali"*

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Pisa: Fabio Fantozzi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 LA MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DEI TRE EDIFICI TIPO	5
1.1 RISULTATI DELLA SIMULAZIONE	6
1.2 LA QUALITÀ DEI DATI CLIMATICI	6
2 IL TETTO VERDE.....	8
2.1 T° SUPERFICIALE.....	8
2.2 IL FLUSSO DI CALORE SUPERFICIALE.....	14
2.3 TEMPERATURA OPERATIVA	21
3 LA PARETE VERDE.....	21
3.1 T° SUPERFICIALE.....	21
3.2 IL FLUSSO DI CALORE SUPERFICIALE	26
3.3 LA TEMPERATURA OPERATIVA	33
4 CONCLUSIONI.....	37
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	38
CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	39

Sommario

Le simulazioni condotte attraverso il software EnergyPlus, su un edificio tipo di edilizia residenziale pubblica hanno consentito, al variare delle configurazioni di involucro, di valutare le variazioni del comportamento termico dell'involucro dell'edificio e le eventuali ricadute, in termini di comfort, sulle temperature degli ambienti interni.

Il software EnergyPlus impiegato per la simulazione, consente di dettagliare con estrema precisione il complesso meccanismo di scambio di calore che avviene all'interno di un substrato vegetale quale quello del tetto verde, inclusi i meccanismi di scambio per evapotraspirazione, ma non è tuttavia dotato di un modulo specifico per il calcolo delle prestazioni delle pareti verdi: i risultati del presente lavoro di ricerca possono quindi ritenersi indicativi, ma non validati, per quanto attiene ai dati relativi al comportamento della parete verde.

La variazione di comportamento energetico dell'involucro degli edifici tipo è stata valutata principalmente attraverso l'analisi delle temperature T° superficiali degli elementi di involucro, l'andamento dei flussi di calore superficiali sulle facce interne ed esterne degli elementi di involucro, la variazione della temperatura T° operativa all'interno degli ambienti. Le simulazioni hanno confermato il contributo offerto dai sistemi a verde nella riduzione dei carichi termici, con particolare rilevanza per le zone climatiche temperate in cui le oscillazioni della T° esterna e i livelli di irradianza non sono particolarmente rilevanti. Le simulazioni hanno altresì rilevato la significatività di alcuni parametri descrittivi della natura del manto vegetale, primo fra tutti il LAI (Leaf Area Index), nel condizionare il comportamento degli strati vegetali, in riferimento alla capacità di dispersione del calore accumulato. Tale parametro è da tenersi in debita considerazione nella progettazione di tetti verdi in climi in cui i livelli di irradianza e le temperature T° diurne sono elevate (zone climatiche A, B), onde evitare che la copertura non sia in grado di smaltire durante le ore fresche notturne il calore assorbito durante il giorno.

1 La modellazione del comportamento energetico dei tre Edifici Tipo

Il risparmio energetico conseguibile attraverso l'installazione di un tetto verde varia sensibilmente in relazione alla prestazione di riferimento cui riferire l'incremento di performance. I parametri determinanti nel definire il contributo del tetto verde alla riduzione dei carichi dell'impianto HVAC (Heating Ventilation and Air Conditioning , ovvero Riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) in raffrescamento sono costituiti principalmente dal clima specifico e dal livello di isolamento iniziale della copertura.

Oltre ai vantaggi energetici, quantificabili e calcolabili occorre comunque considerare gli ulteriori benefici derivati dalla realizzazione di una copertura a verde, quali:

- riduzione nel ruscellamento delle acque meteoriche
- riduzione dell'intensità dell'isola di calore
- qualificazione dell'ambiente costruito
- miglioramento della qualità dell'aria
- riduzione della trasmissione del rumore all'interno degli edifici
- riduzione del consumo energetico degli edifici

In considerazione dell'obiettivo generale del presente lavoro di ricerca, ossia di valutare il contributo offerto da soluzioni a verde (tetti e pareti) nella riduzione dei carichi energetici in edifici in clima mediterraneo, si è ritenuto opportuno concentrare l'analisi nel periodo di maggiore stress termico ossia nel periodo estivo (*Runperiod*: 1 giugno – 30 settembre) in cui la massa termica e il meccanismo di evapotraspirazione che caratterizzano il funzionamento del tetto verde possono contribuire in maniera determinante alla riduzione del surriscaldamento degli ambienti interni.

Ai fini del presente lavoro di ricerca, le diverse soluzioni tecniche sono state combinate a definire tre edifici di riferimento che sono state impiegate nelle simulazioni:

- l'edificio Tipo A con copertura inclinata di tipo tradizionale in tegole marsigliesi, involucro verticale esterno isolato con cappotto
- l'edificio Tipo B con copertura piana a giardino (tetto verde), involucro verticale esterno isolato con cappotto
- L'edificio Tipo C con copertura inclinata di tipo tradizionale in tegole marsigliesi, involucro verticale esterno isolato con cappotto e, per la sola parete esposta a SUD e oltre al cappotto, un giardino verticale.

La copertura inclinata tradizionale dell'edificio Tipo A è costituita da manto di copertura in tegole marsigliesi su intercapedine ventilata (cm 6) e isolamento termico in EPS, poggianti sul solaio in laterocemento.

La copertura piana a verde dell'edificio Tipo B è costituita da un substrato di suolo (cm 8-20) nel quale cresce la vegetazione, un geotessile in fibre di polipropilene, un pannello di drenaggio in EPS (cm 8) e un manto impermeabile antiradice, poggianti su solaio in laterocemento.

La parete verde verticale dell'edificio Tipo C è sostituita da un substrato di suolo (cm 5) nel quale cresce la vegetazione, un cartonfeltro e un rivestimento impermeabile in PVC, oltre alla camera d'aria (cm 5) che separa il giardino verticale dalla parte esistente in muratura.

Tutto ciò premesso, le simulazioni condotte con il software EnergyPlus nel *Runperiod*, hanno consentito di ottenere, per ognuna delle tre località di riferimento, i seguenti risultati:

Edificio Tipo A:

- andamento della T° operativa delle zone termiche dell'edificio $^\circ\text{C}$
- andamento della T° superficiale esterna dello strato di copertura $^\circ\text{C}$
- andamento del flusso di calore sulla superficie esterna della copertura $[\text{W}/\text{m}^2\text{h}]$
- andamento del flusso di calore sulla superficie interna della copertura $[\text{W}/\text{m}^2\text{h}]$
-

Edificio Tipo B:

- andamento della T° operativa delle zone termiche dell’edificio °C]
- andamento della T° superficiale del substrato del tetto verde[°C]
- andamento della T° superficiale dello strato vegetale del tetto verde [°C]
- andamento del flusso di calore sulla superficie interna della copertura [W/m²h]
- andamento della profondità di irrigazione del substrato del tetto verde [mm/h]

Edificio Tipo C:

- andamento della T° operativa delle zone termiche dell’edificio °C]
- andamento della T° superficiale del substrato della parete verde [°C]
- andamento della T° superficiale dello strato vegetale della parete verde [°C]
- andamento del flusso di calore sulla superficie interna della parete verde [W/m²h]

Le tabelle complete dei risultati ottenuto sono riportate in Allegato B.

Si riassumono di seguito i dettagli delle simulazioni condotte, al variare della localizzazione geografica e della soluzione costruttiva (Tabella 1), unendo così in un unico report sinottico i due report originariamente previsti, uno, relativo ad un fabbricato-tipo posto in una zona climatica di riferimento, e l’altro, esteso ad altre due zone climatiche. In tal modo, vengono compendiate in un unico report le tre zone climatiche più rappresentative della realtà italiana.

Tabella 1 quadro sinottico delle simulazioni condotte con il software EnergyPlus

		Edificio Tipo A	Edificio tipo B – Modello 1 - irrigazione	Edificio tipo B – Modello 1 - piovosità	Edificio tipo B – Modello 2 - irrigazione	Edificio tipo B – Modello 3 - irrigazione	Edificio tipo C irrigazione
TORINO	Zona climatica E	X	X		X	X	X
PISA	Zona climatica D	X	X	X	X	X	X
PALERMO	Zona climatica B	X	X		X	X	X

Una sintesi dei risultati più significativi ottenuti attraverso le simulazioni, è descritta criticamente nei paragrafi successivi, attraverso grafici sintetici di confronto fra le prestazioni dei diversi edifici tipo e tra le prestazioni dei medesimi edifici tipo in località climatiche differenti.

1.1 Risultati della simulazione

Nella analisi per località, i risultati delle simulazioni sono stati confrontati per evidenziare il diverso comportamento dei 4 modelli di edificio in relazione ai parametri significativi di T° superficiale, T° operativa e Flusso di calore.

I risultati ottenuti per le diverse località sono stati successivamente confrontati interpretati per verificare la rilevanza del clima specifico della località sulla prestazione del tetto/parete verde.

1.2 La qualità dei dati climatici

Per la località Pisa, al fine di valutare la rilevanza della qualità dei dati climatici nella determinazione del risultato della simulazione, sono state eseguite simulazioni comparate dei due edifici l’edificio tipo B con copertura a verde di tipo estensivo (Modello1) con una irrigazione giornaliera programmata (per complessivi 52,8 mm/mese), costante nel *Runperiod*, e con una piovosità ipotetica programmata a giorni variabili nel *Runperiod*, ricostruita a partire dai dati climatici disponibili come descritto nel rapporto di ricerca di Sistema elettrico ENEA: “PARAMETRI FISICO-TECNICI DELLE SPECIE VEGETALI UTILIZZATE PER LA REALIZZAZIONE DI TETTI E PARETI VERDI NELLE REGIONI MEDITERRANEE, PER LA REALIZZAZIONE DI UN DATA-BASE SPECIFICO DA UTILIZZARE IN PROGRAMMI DI SIMULAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI”.

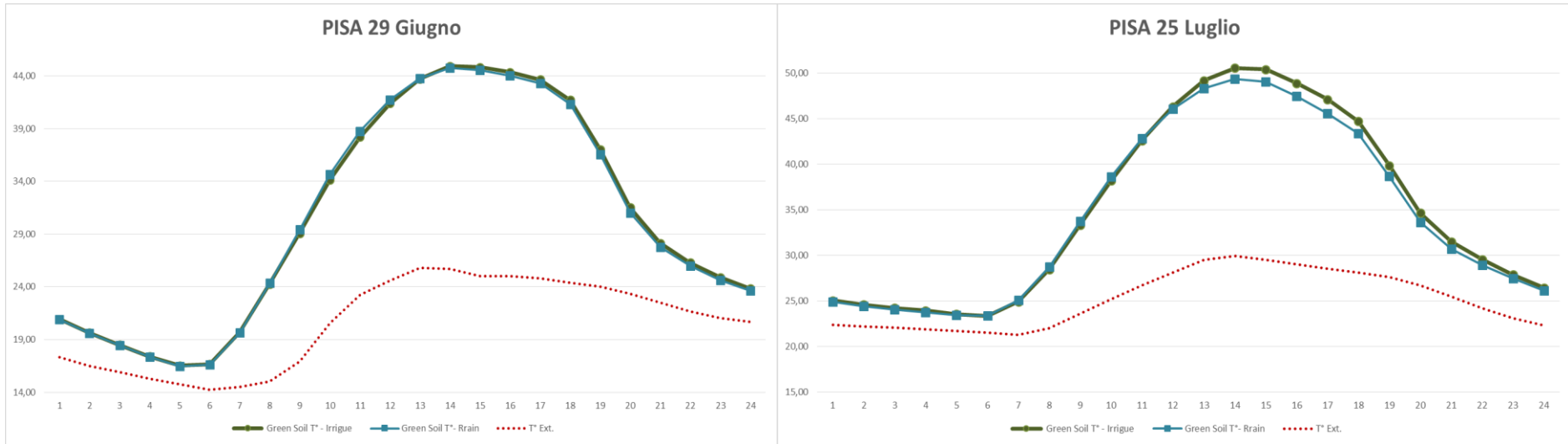


Figura 1 Grafico a confronto dell'andamento delle T° superficiali del substrato vegetale, nella soluzione con piovosità simulata e con irrigazione programmate – mesi di Giugno e Luglio

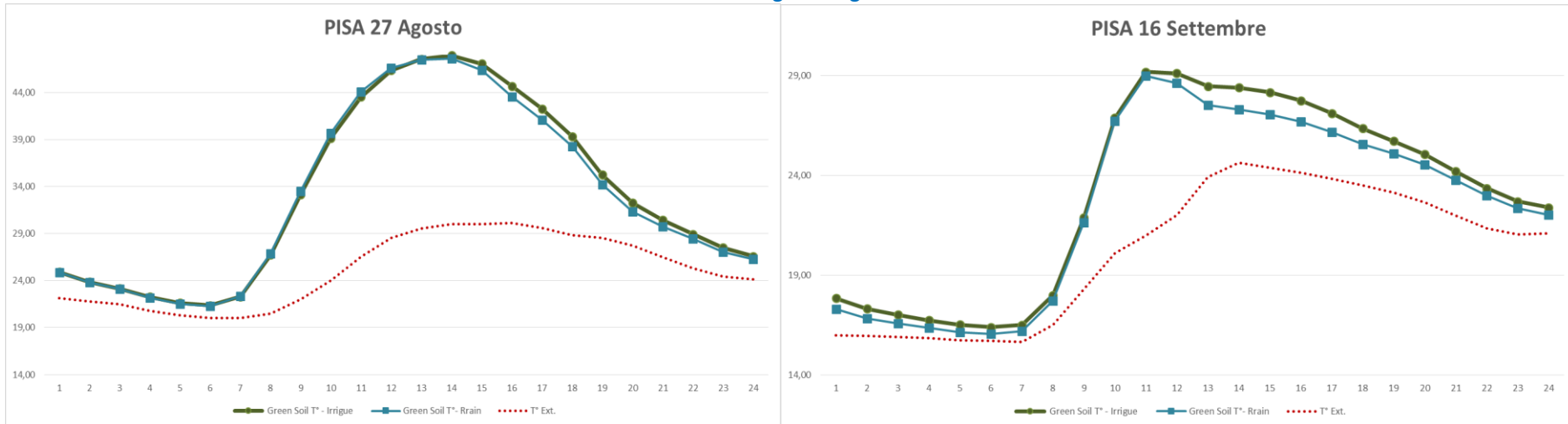


Figura 2 Grafico a confronto dell'andamento delle T° superficiali del substrato vegetale, nella soluzione con piovosità simulata e con irrigazione programmate – mesi di Agosto e Settembre

L'analisi dimostra come, nonostante la quantità complessiva mensile di acqua fornita al substrato vegetale attraverso l'irrigazione costante sia pari ai livelli di piovosità media mensile, poiché la programmazione dell'irrigazione fornisce solo pochi mm di acqua al giorno (~0.44mm/h per 4 ore di irrigazione giornaliera), questi non sembrano essere sufficienti a mantenere un adeguato livello di umidità del substrato e le T° superficiali sono mediamente più alte di 1°C rispetto alla simulazione condotta con una piovosità discontinua e più intensa, anche se, complessivamente, di minore volume.

L'accuratezza del dato climatico, nella specifica applicazione alla simulazione del comportamento del tetto verde, risulta quindi particolarmente rilevante ai fini di una simulazione attendibile nella rappresentatività dei dati di output.

2 Il tetto verde

2.1 T° superficiale

Diversi studi scientifici [1] hanno misurato come la differenza tra le temperature superficiali di un tetto verde e di una copertura tradizionale possano raggiungere e superare i 20°C durante le ore calde e che tale differenza si riduce progressivamente nelle ore notturne, quando le T° (Temperature in gradi °C) del tetto verde rimangono generalmente più alte (1-2°C) a causa dell'inerzia termica del pacchetto verde e della riduzione delle dispersioni di calore verso la volta celeste dovute alla presenza della superficie fogliare.

I risultati della simulazione confermano i dati bibliografici.

La T° media superficiale del tetto verde risulta complessivamente sempre inferiore rispetto alla T° superficiale del manto di copertura in marsigliesi.

Le T° dei diversi pacchetti di tetto verde (Modelli 1-2-3) variano in relazione al variare dello spessore del substrato (8-20cm) e in relazione al variare del parametro LAI.

Una maggiore superficie fogliare garantisce infatti maggiore protezione dall'irraggiamento diretto, riducendo il surriscaldamento del substrato di suolo e mantenendo più bassa la T° superficiale.

Le T° superficiali del tetto verde, risultano mediamente inferiori, nel bilancio mensile rispetto alla copertura in tegole marsigliesi, di circa 20-25°C nella zona climatica E, di circa 18-25°C nella zona climatica D, di circa 5-10°C in zona climatica B.

Le T° superficiali del tetto verde intensivo risultano, in tutte le zone climatiche e con particolare rilevanza durante i mesi più caldi, costantemente più alte, durante la notte, rispetto a quelle del tetto estensivo. Tale fattore è da attribuire alla variazione del parametro LAI, ossia alla estensione della superficie fogliare. Durante il periodo notturno, infatti, una superficie fogliare estesa e fitta impedisce l'irraggiamento verso la volta celeste e limita quindi la dispersione del calore accumulato durante il giorno.

Le T° del tetto verde intensivo, con LAI pari a 2 risultano infatti le più alte dei tre modelli di copertura a verde simulati.

Per la località Pisa (Figura 8), le differenze delle T° superficiali massime possono raggiungere punte di oltre 25°C durante il giorno (misurate nel mese di giugno, con una media di circa 18°C durante il periodo Giugno-Settembre) mentre durante la notte, il tetto verde risulta in media più caldo di un tetto tradizionale di circa 2°C.

Per la località Torino, le differenze medie tra le T° superficiali massime e minime stagionali, si attestano attorno ai 25°C per le T° massime e 0,5° per le T° minime.

Per la località Palermo, al contrario, le differenze medie tra le T° superficiali massime e minime stagionali, si riducono attorno ai 5°C per le T° massime e salgono nuovamente oltre i 2° per le T° minime.

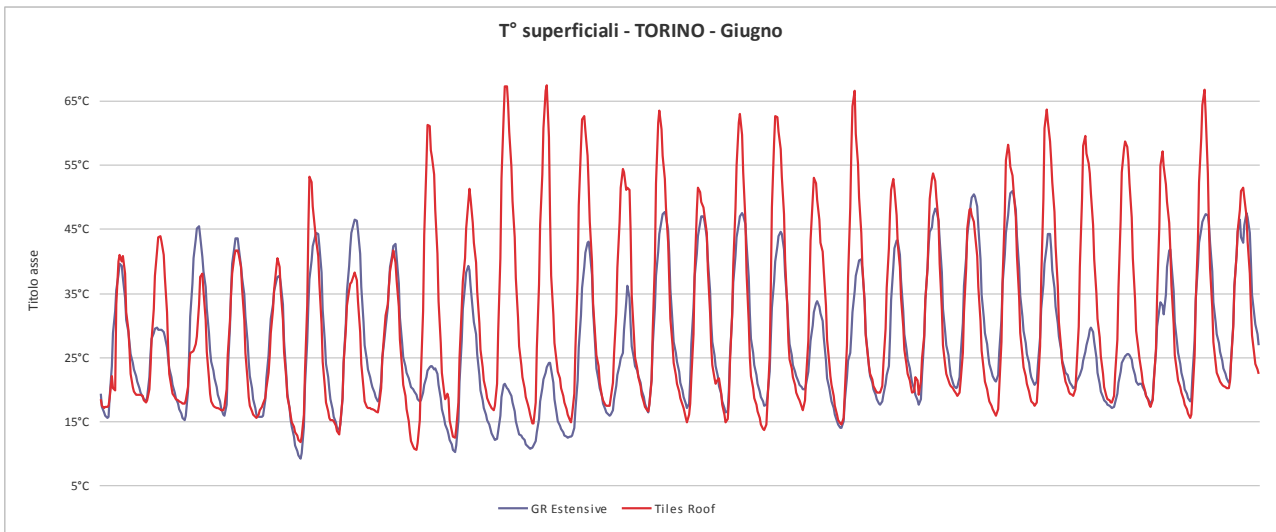


Figura 3 Andamento a confronto delle T° superficiali della copertura in marsigliesi e del tetto verde estensivo in Giugno (TORINO)

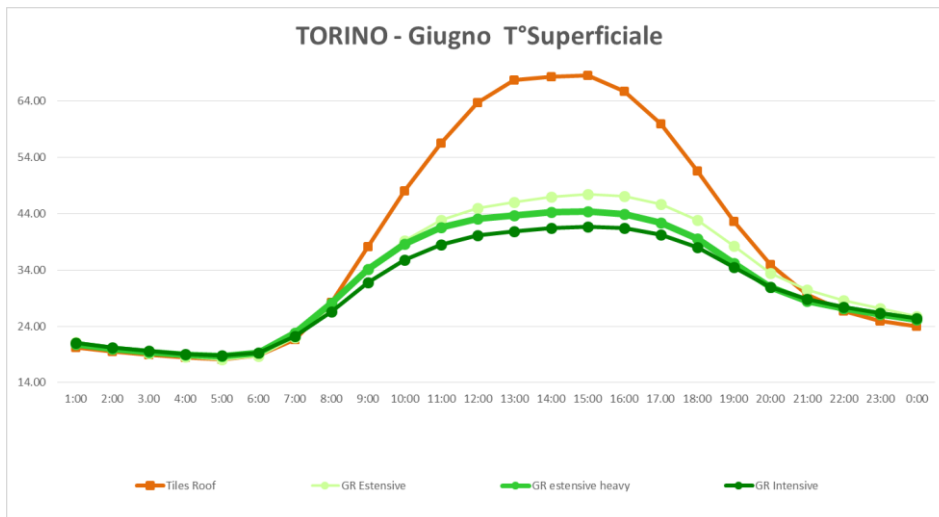


Figura 4 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Giugno

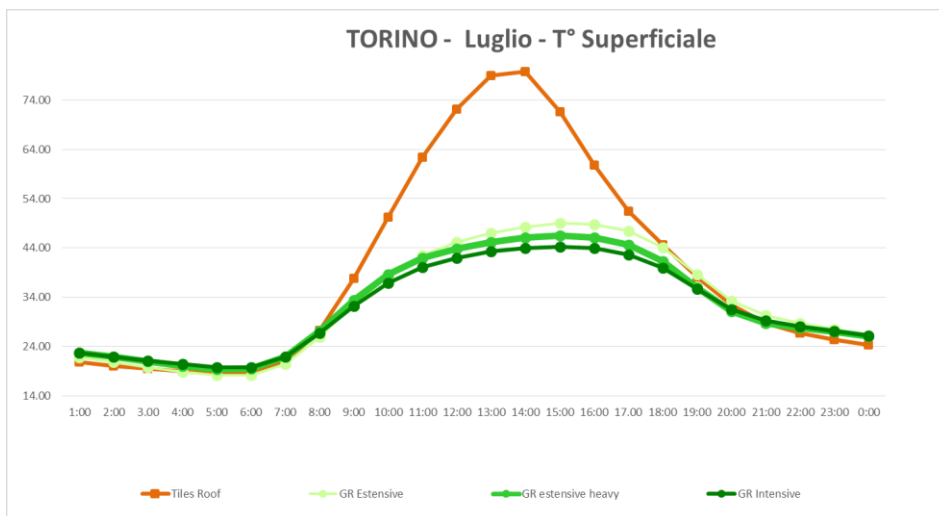


Figura 5 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Luglio

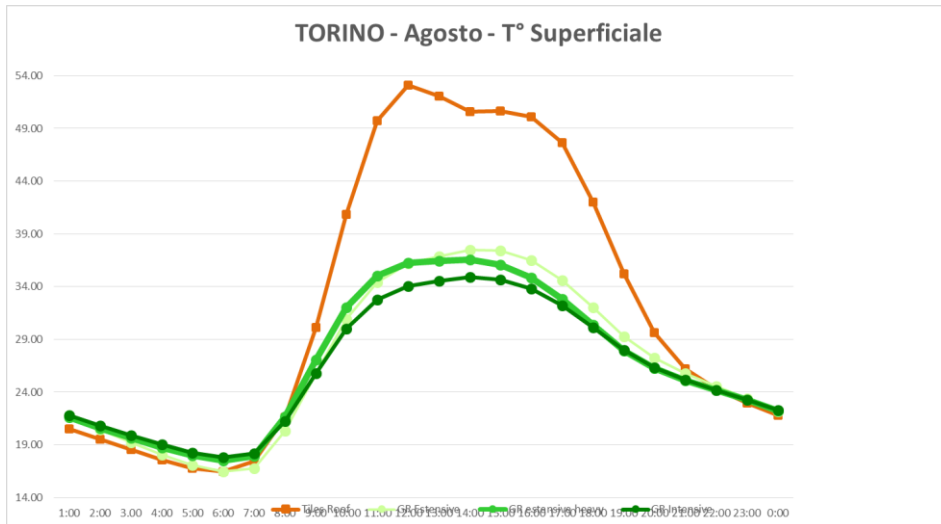


Figura 6 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Agosto

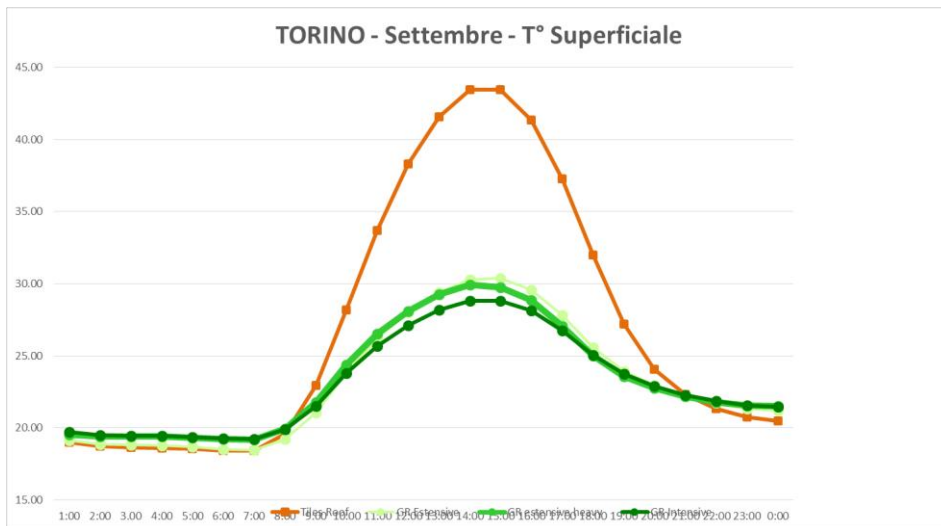


Figura 7 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Settembre

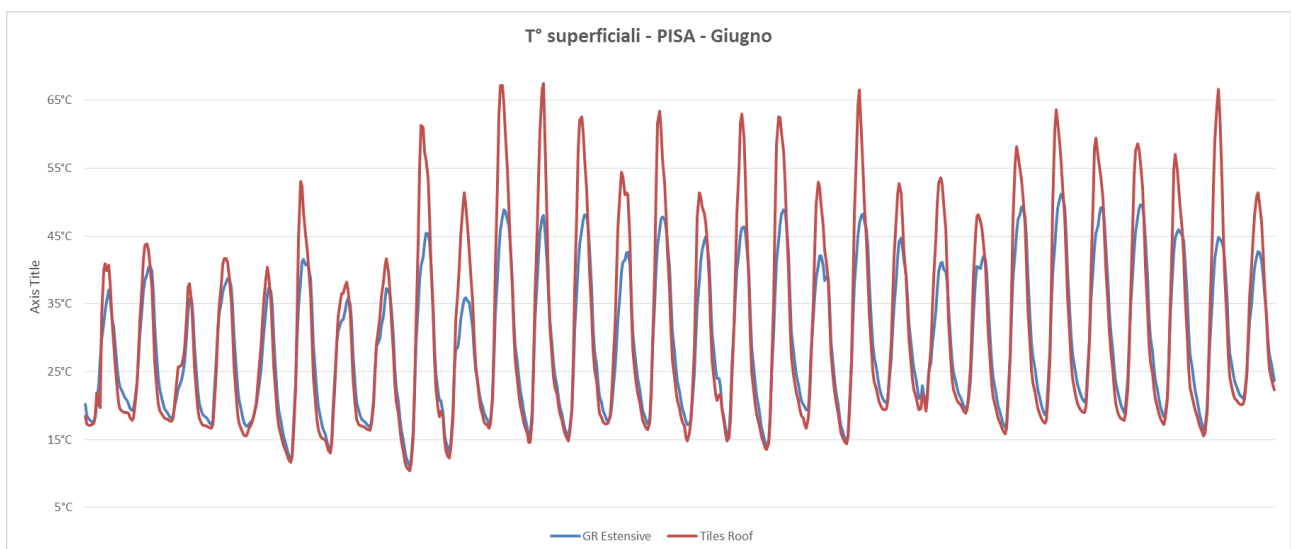


Figura 8 Andamento a confronto delle T° superficiali della copertura in marsigliesi e del tetto verde estensivo in Giugno (PISA)

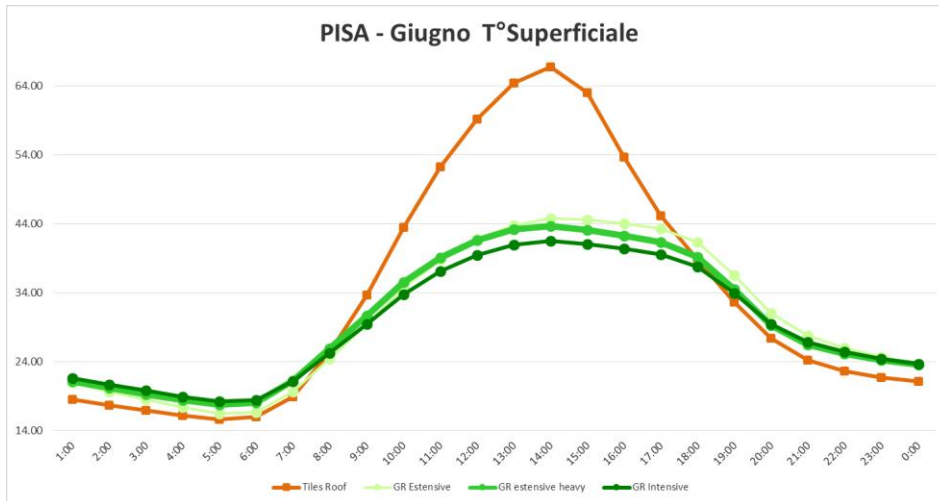


Figura 9 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Giugno

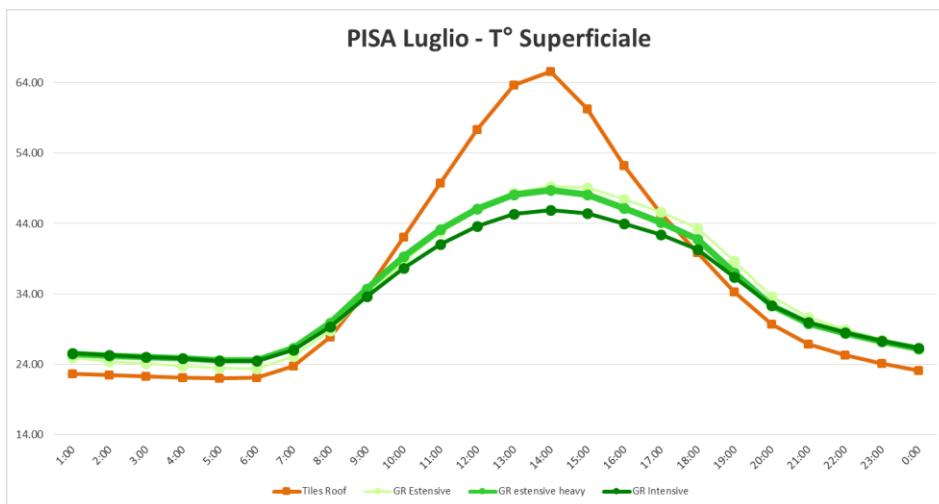


Figura 10 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Luglio

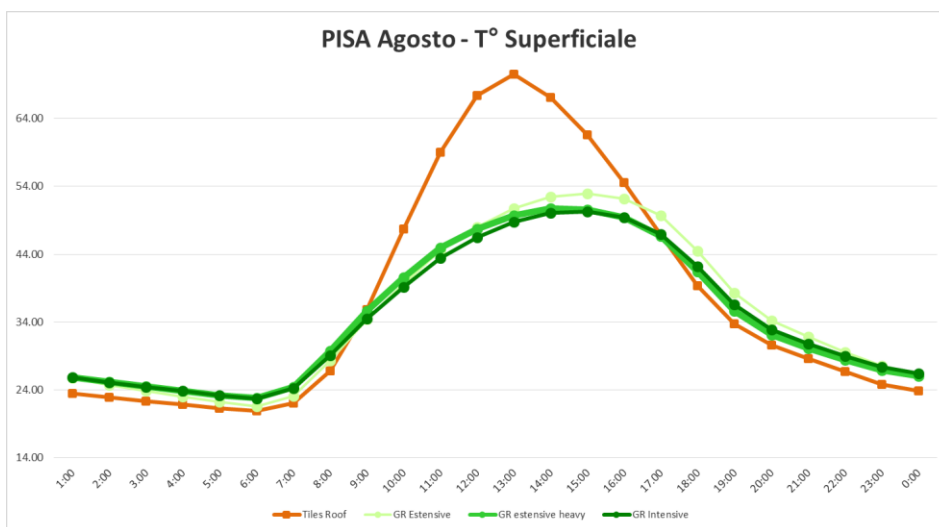


Figura 11 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Agosto

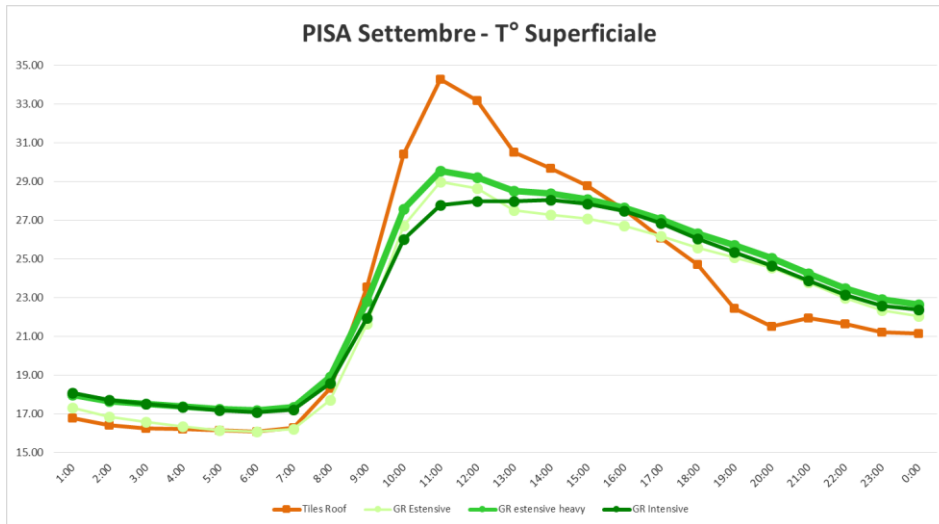


Figura 12 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Settembre

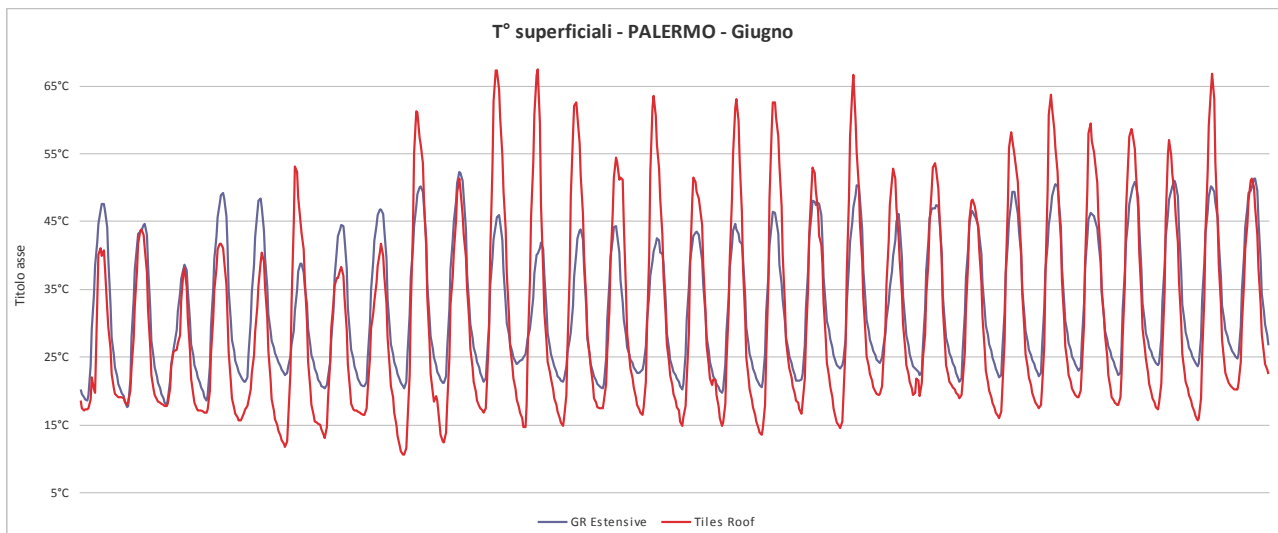


Figura 13 Andamento a confronto delle T° superficiali della copertura in marsigliesi e del tetto verde estensivo in Giugno (PALERMO)

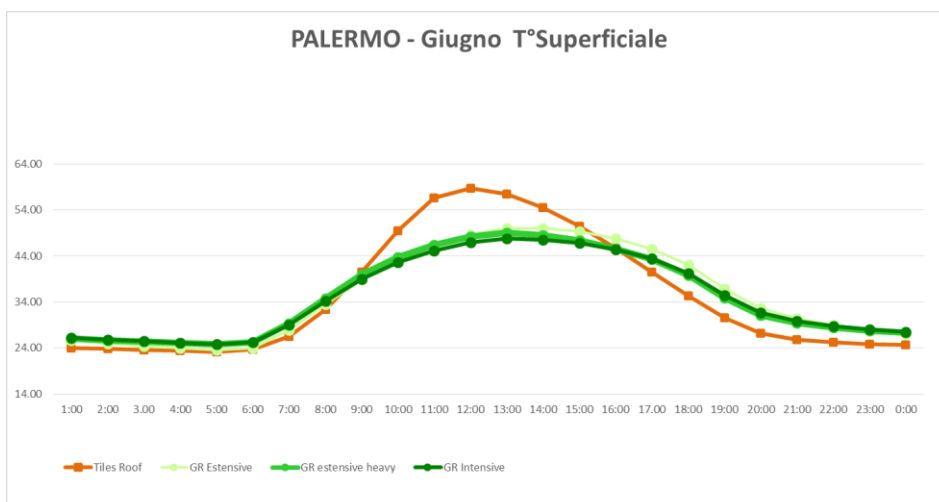


Figura 14 Figura 11 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Giugno

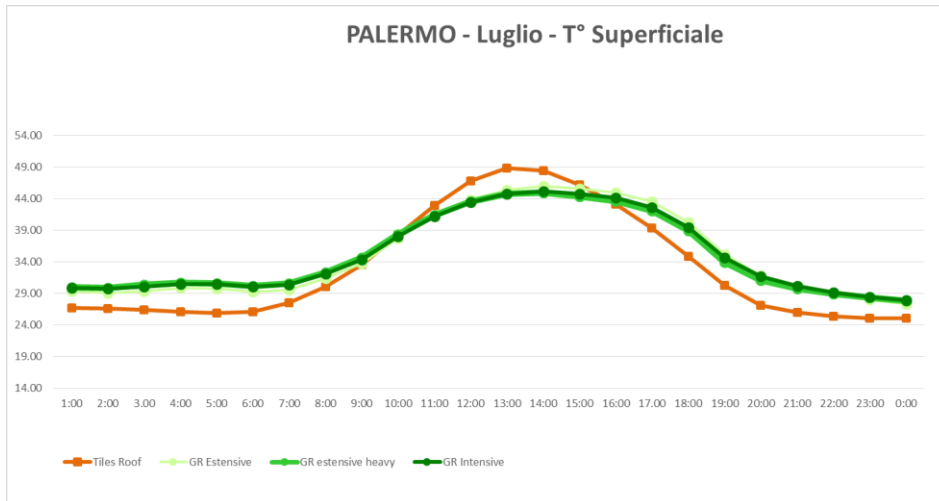


Figura 15 Figura 11 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Luglio

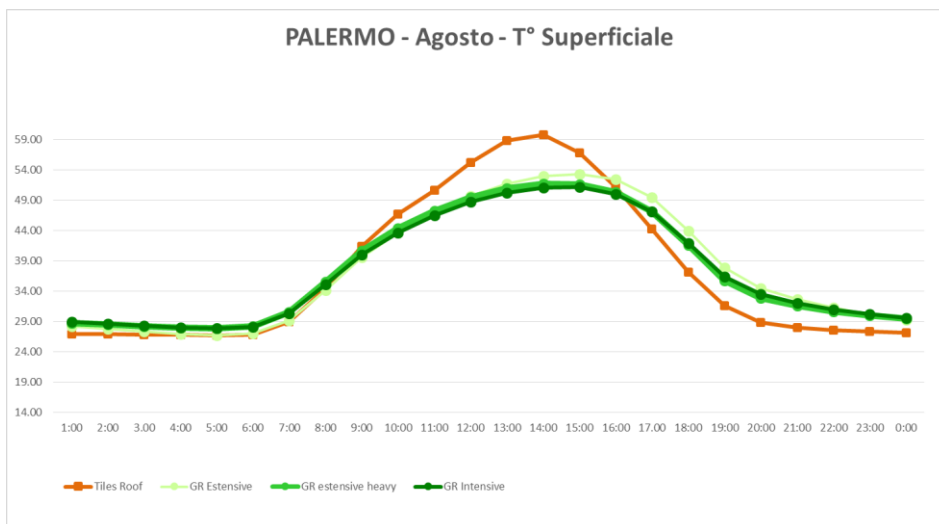


Figura 16 Figura 11 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Agosto

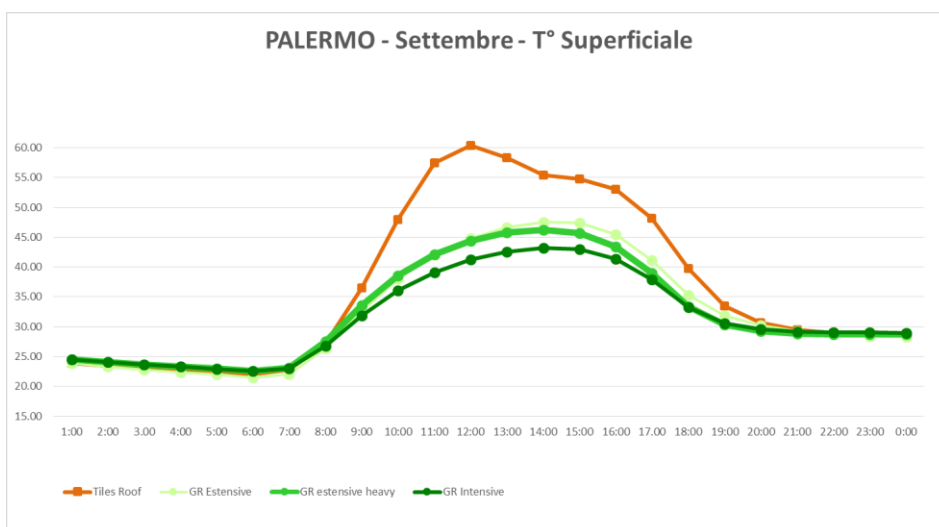


Figura 17 Figura 11 andamento giornaliero delle T° superficiali in un giorno tipo in Settembre

2.2 Il flusso di calore superficiale

Wong et al. [1], nel confronto tra coperture tradizionali scarsamente isolate e tetti verdi, hanno calcolato una riduzione potenziale di oltre il 60% del flusso di calore durante il periodo caldo estivo, concludendo che il tetto verde si comporta come uno strato isolante altamente performante dal momento che, al contrario di uno strato di isolamento tradizionale, nel periodo di maggiore stress termico ossia nelle ore più calde della giornata, il flusso di calore inverte la propria direzione e il calore in eccesso viene sottratto all'ambiente interno e assorbito dalla massa termica della copertura.

Tali riduzioni potenziali non sono ovviamente apprezzabili nel confronto tra due strutture parimenti isolate (il solaio di copertura tradizionale in tegole marsigliesi e i tre modelli di tetto verde presentano valori di trasmittanza simili) e i benefici nell'applicazione della copertura a verde risultano pertanto di più lieve entità.

L'analisi dei risultati delle simulazioni relativamente al fenomeno di trasferimento del calore sulla superficie della copertura¹, ha comunque mostrato una riduzione sensibile dell'intensità del flusso, in entrambe le direzioni, particolarmente rilevante nei climi più freddi. Tale differenza si riduce drasticamente nei climi caldi.

Nelle zone termiche più temperate, i grafici (Figura 24-Figura 25) relativi alla quota di calore scambiato per conduzione attraverso la superficie interna della copertura, mostrano come, nelle ore centrali della giornata (12:00-16:00) il pacchetto di copertura sfrutti la propria massa termica per assorbire quota parte del calore in eccesso prodotto all'interno degli ambienti, riducendo così il valore della T° Operativa all'interno degli ambienti.

Il Tetto verde estensivo pesante/intensivo (20 cm di substrato), in virtù dell'alto valore di capacità termica areica (vedi schede allegato A), è in grado infatti di assorbire dall'ambiente interno una quantità maggiore di calore rispetto al tetto verde estensivo (8 cm di substrato) mentre, al contrario, rilascia una quantità minore di calore verso la volta celeste durante le ore notturne.

Questo processo dipende in maniera significativa dalle caratteristiche della superficie vegetale presente sul tetto che attestano come, all'aumentare del LAI, da un lato si riduca l'irradiazione diretta sulla superficie, (come dimostrato dai grafici relativi all'andamento delle T° superficiali da Figura 4 a Figura 17) ma dall'altro, data l'elevata inerzia termica, diminuisca proporzionalmente la capacità di dispersione del calore dalla copertura verde.

Tale fenomeno è meno rilevante nelle zone termiche più calde ma la copertura a verde, in particolare modo quella di tipo intensivo (Modello 3), garantisce costantemente una riduzione dello scambio di calore rispetto alla copertura tradizionale (Figura 27-Figura 28-Figura 29) e a sistemi di tetto verde del tipo estensivo (Modello 1-2)

1 Cit. *Input and Output - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, September 27, 2013

[p. 231] Note that Inside Face Conduction, when positive, does **not** indicate the heat flow from the surface to the zone air, which is governed by the inside face convection coefficient and the difference in temperature between the inside face and the zone air.

A positive value means that the conduction is from just inside the inside face toward the inside face. A negative value means that the conduction is from the inside face into the core of the heat transfer surface. [...] The basic heat gain rate (W) and a per unit area flux (W/m²) can have positive or negative values with the sign convention that positive indicates heat flowing toward the face itself. There are also directed "gain" and "loss" versions that have only positive values or zero when the heat flow direction opposes.

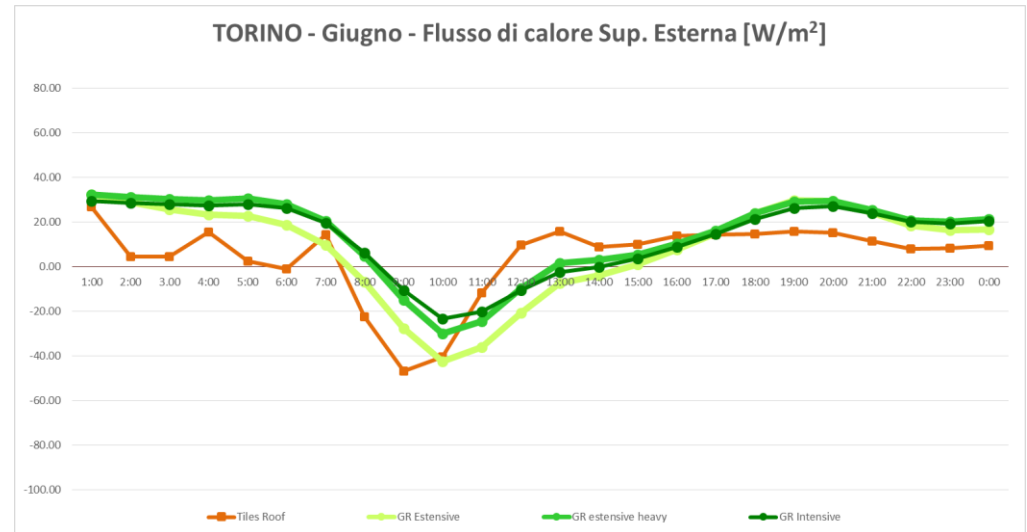
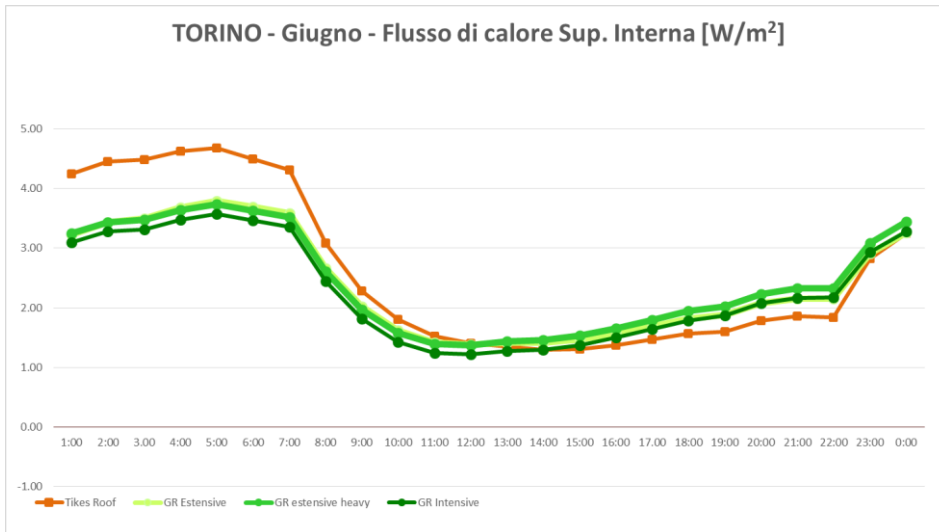


Figura 18 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Giugno

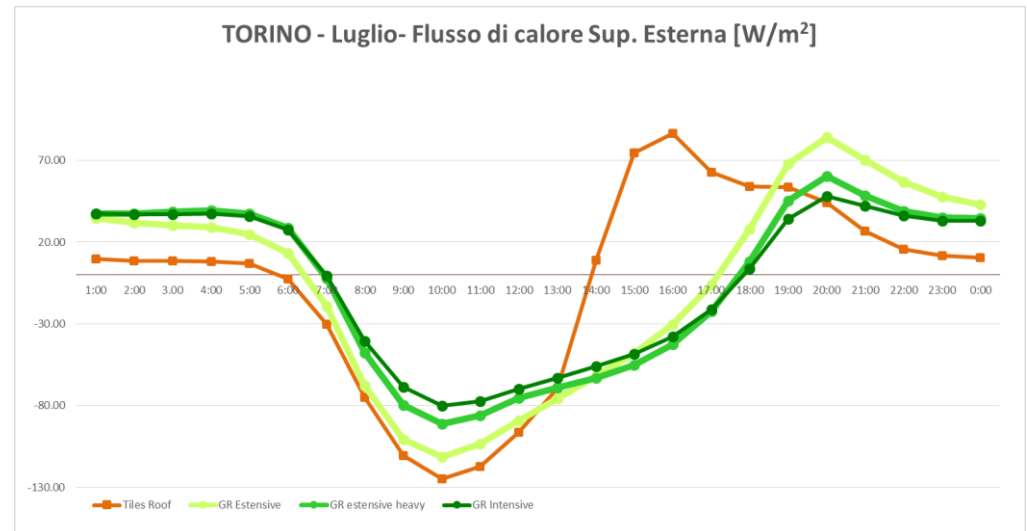
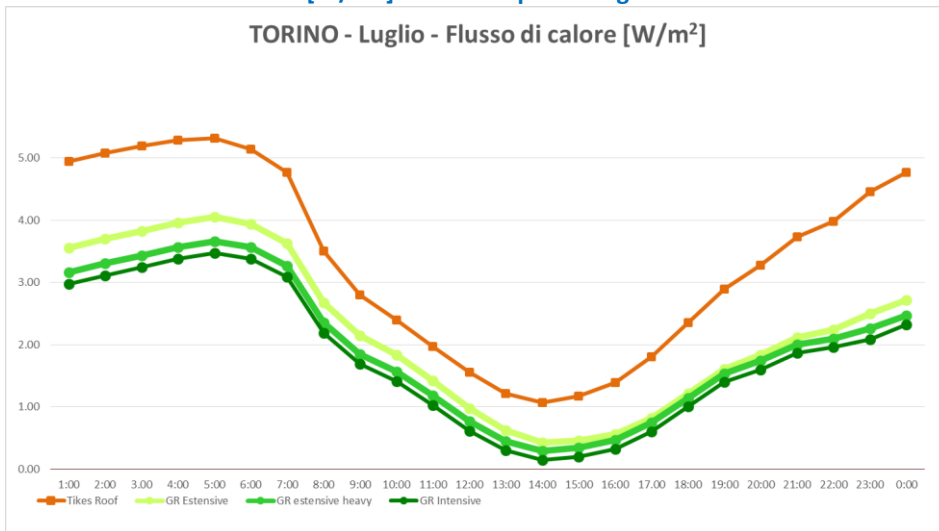


Figura 19 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Luglio

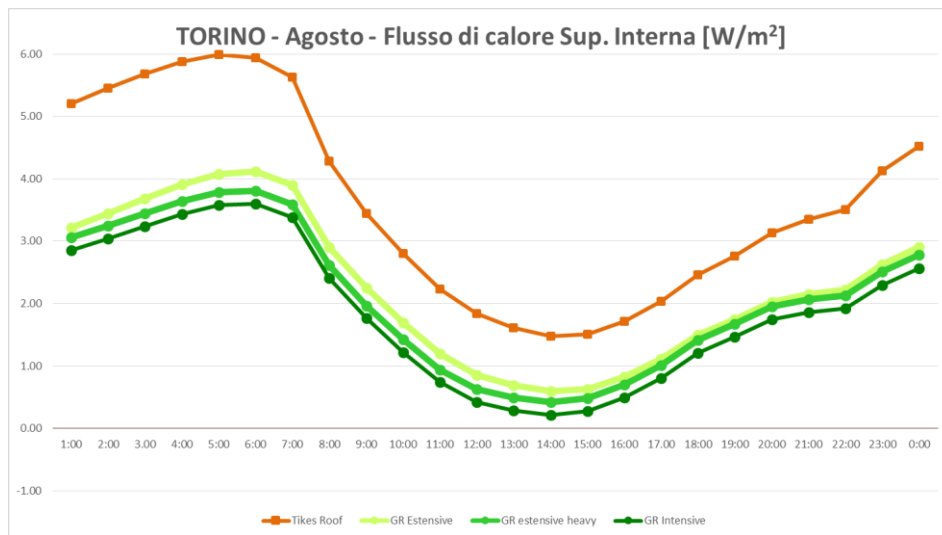


Figura 20 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m2] – Giorno tipo in Agosto

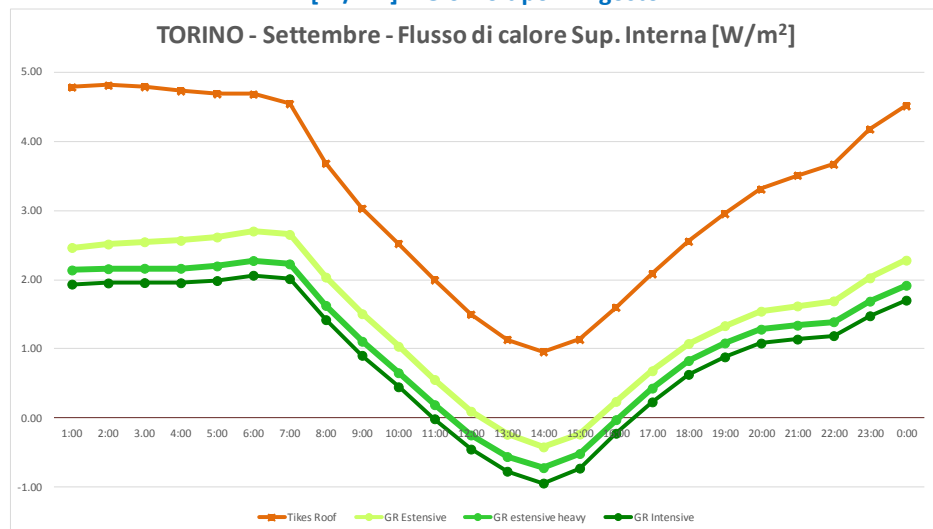
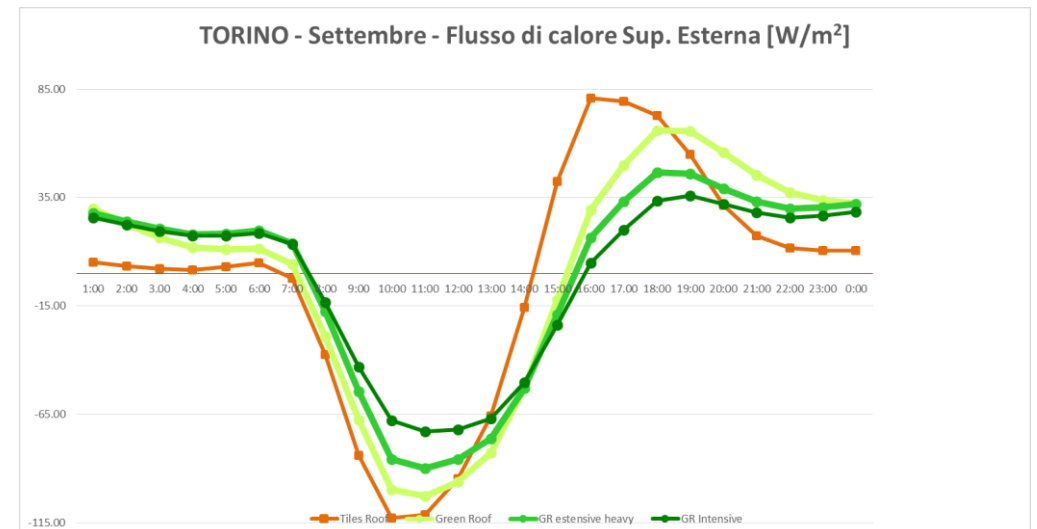
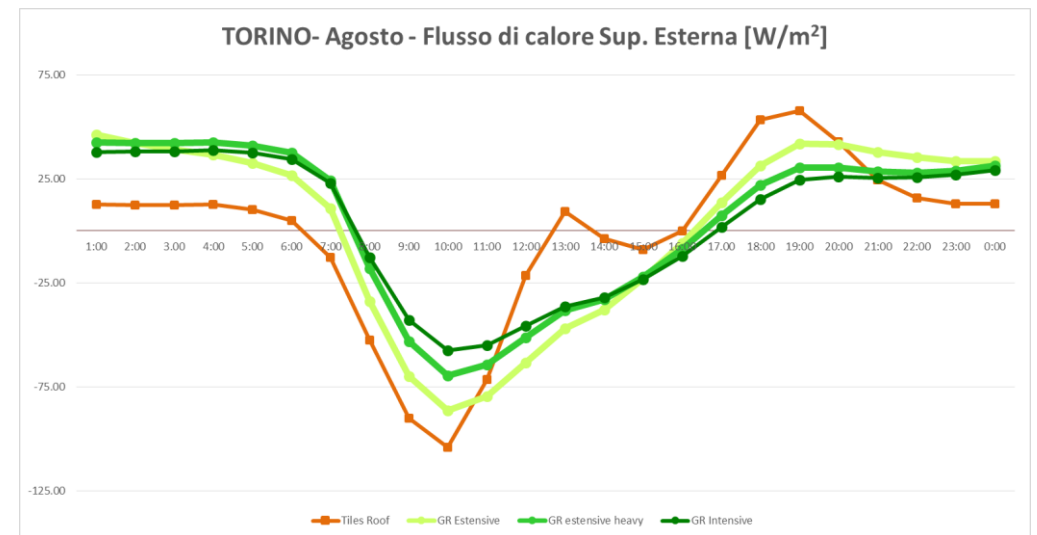


Figura 21 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m2] – Giorno tipo in Settembre



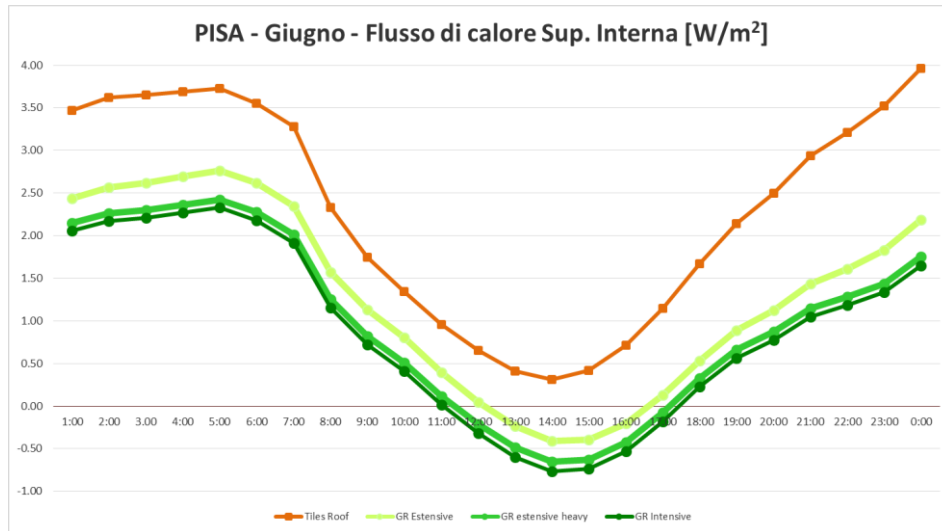


Figura 22 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Giugno

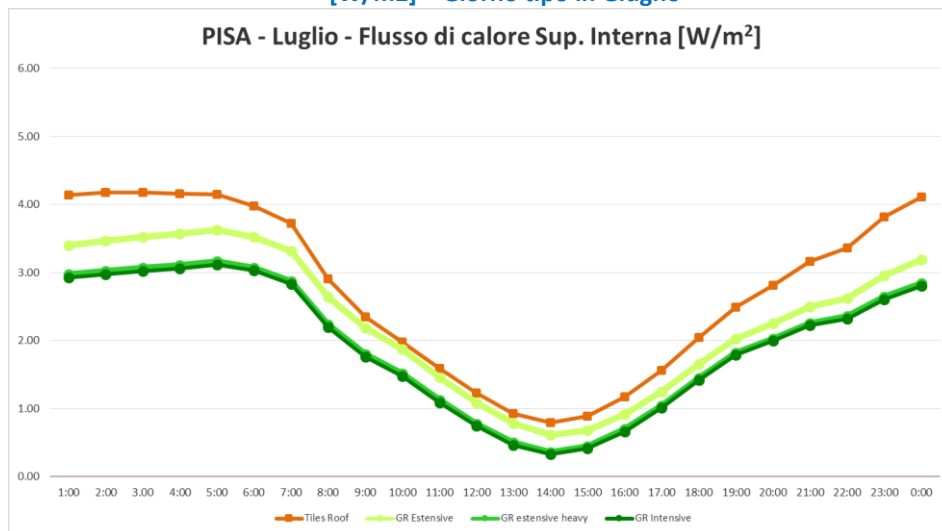
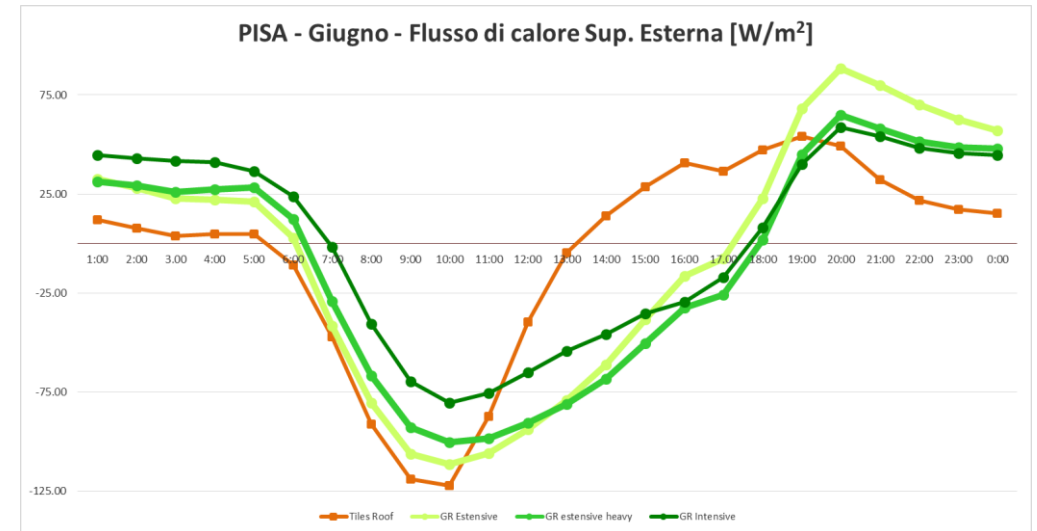
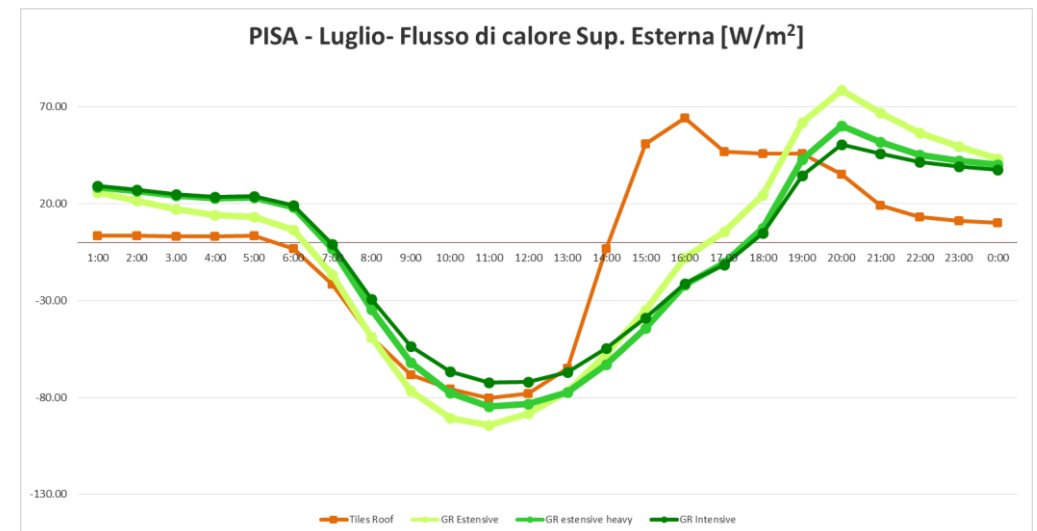


Figura 23 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Luglio



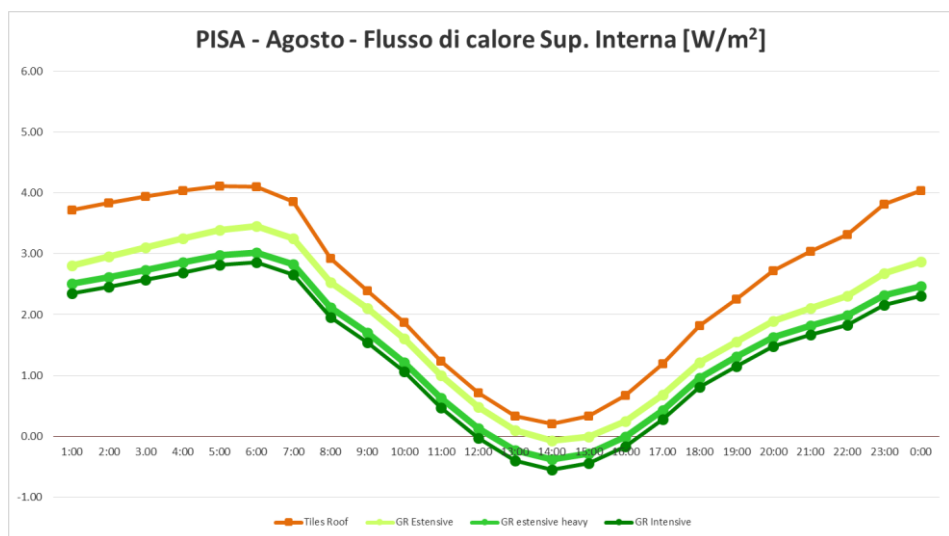


Figura 24 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Agosto

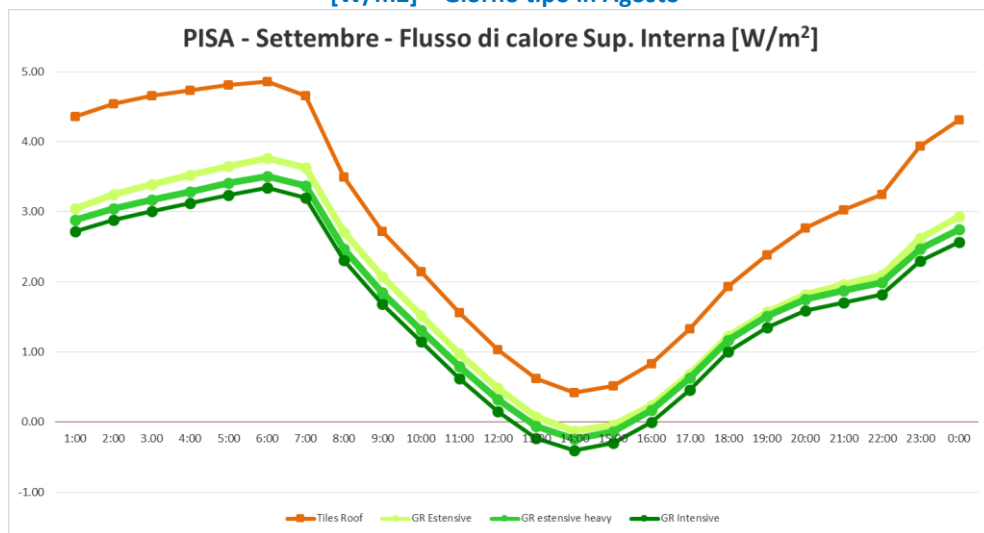
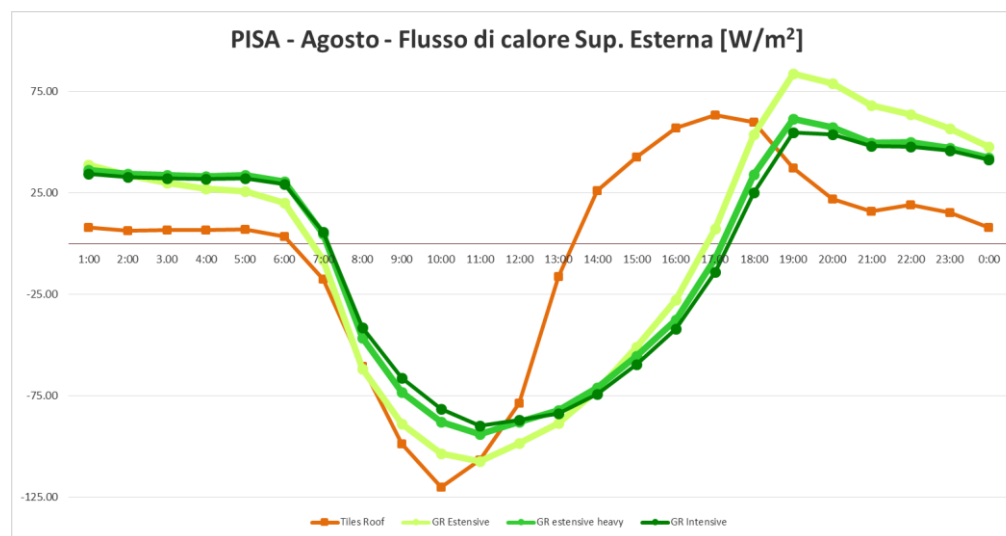
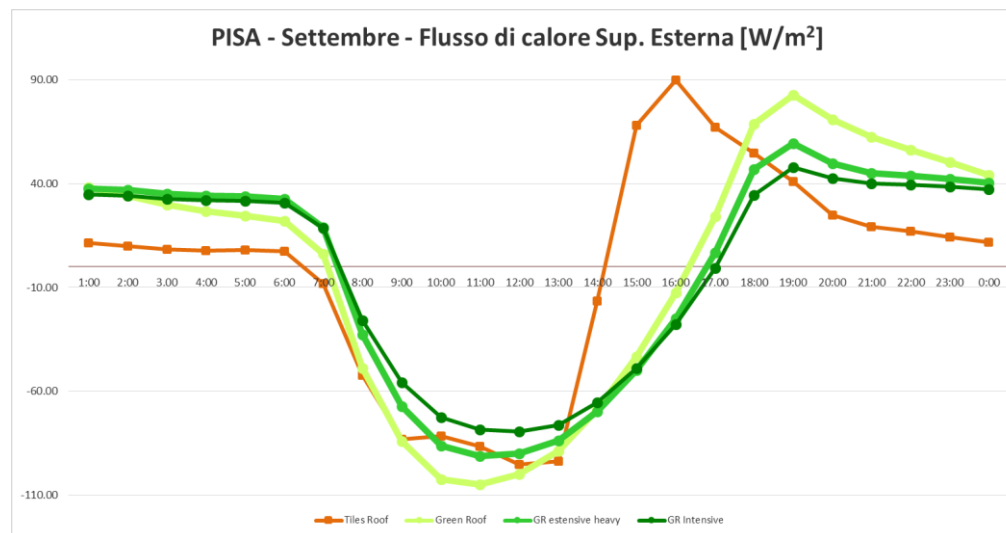


Figura 25 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Settembre



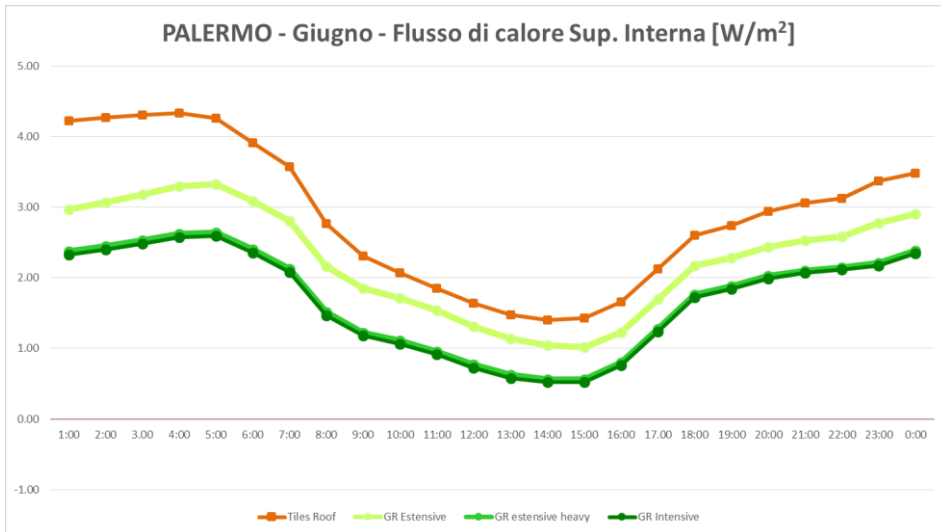


Figura 26 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Giugno

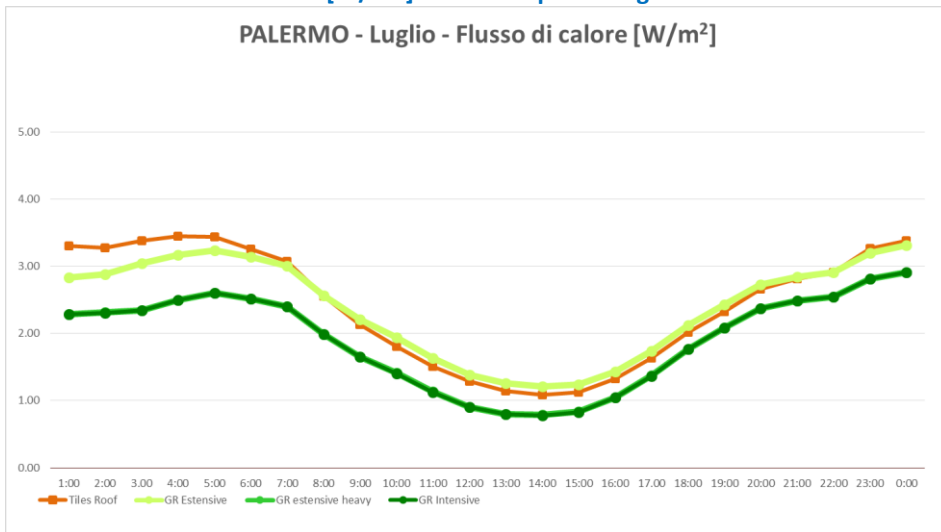
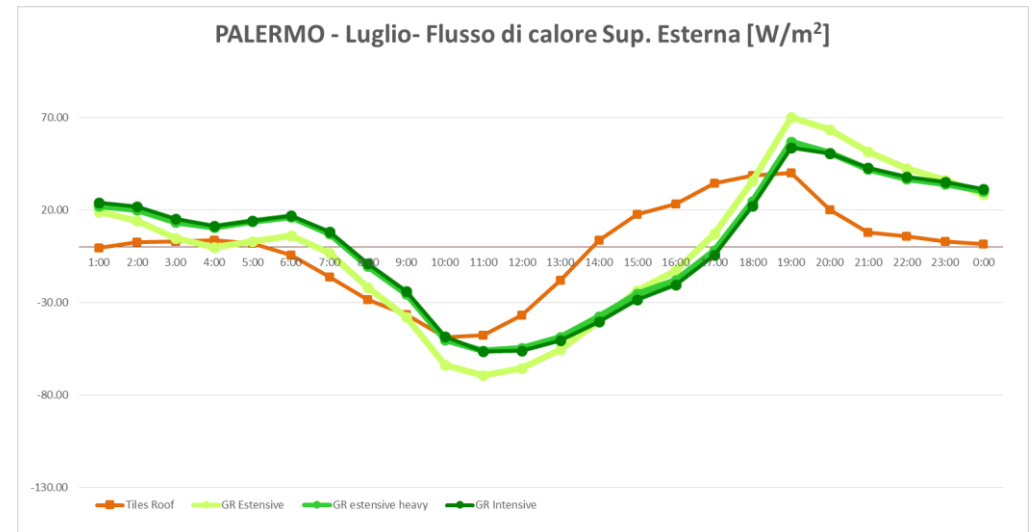
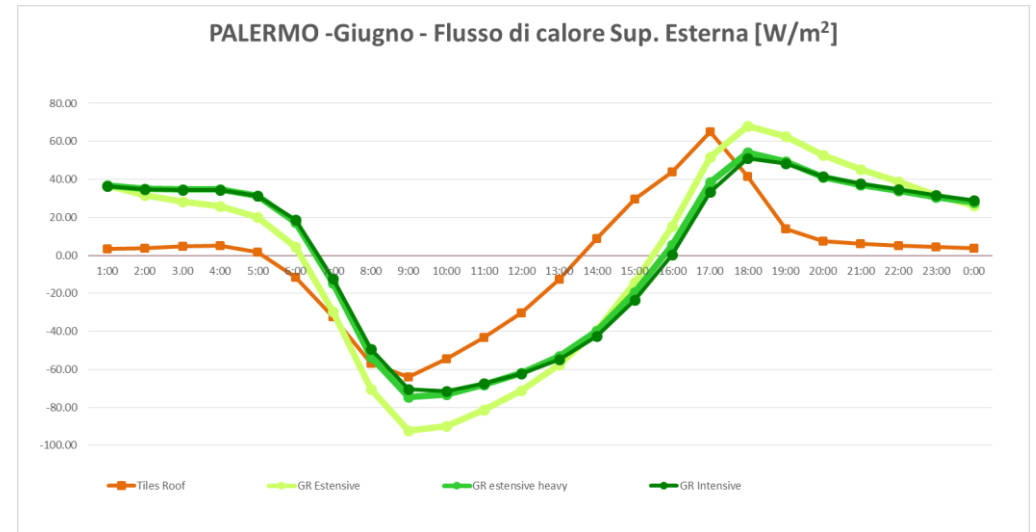


Figura 27 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Luglio



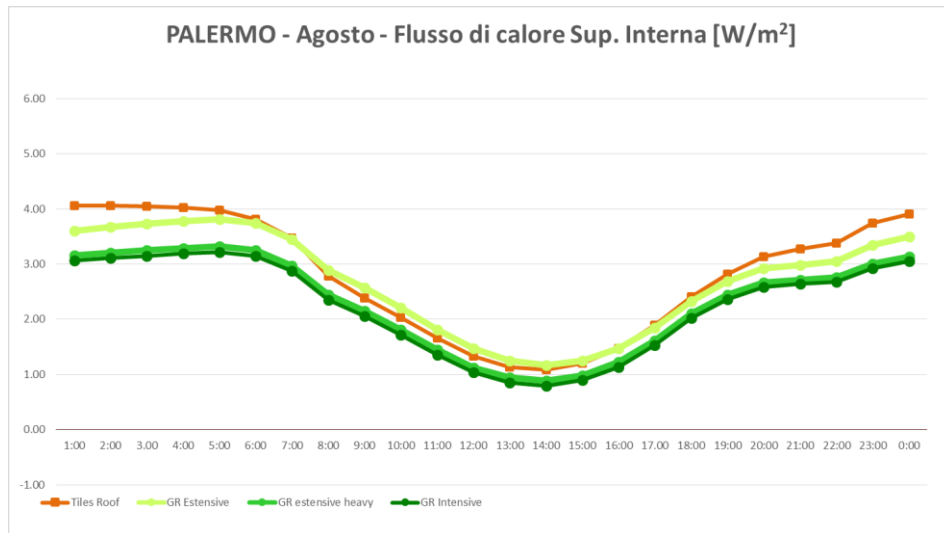


Figura 28 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Agosto

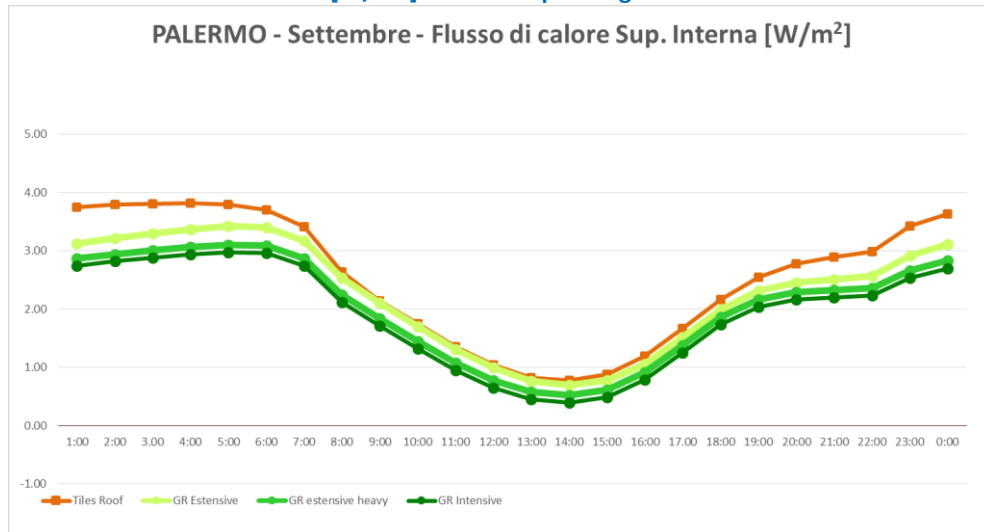
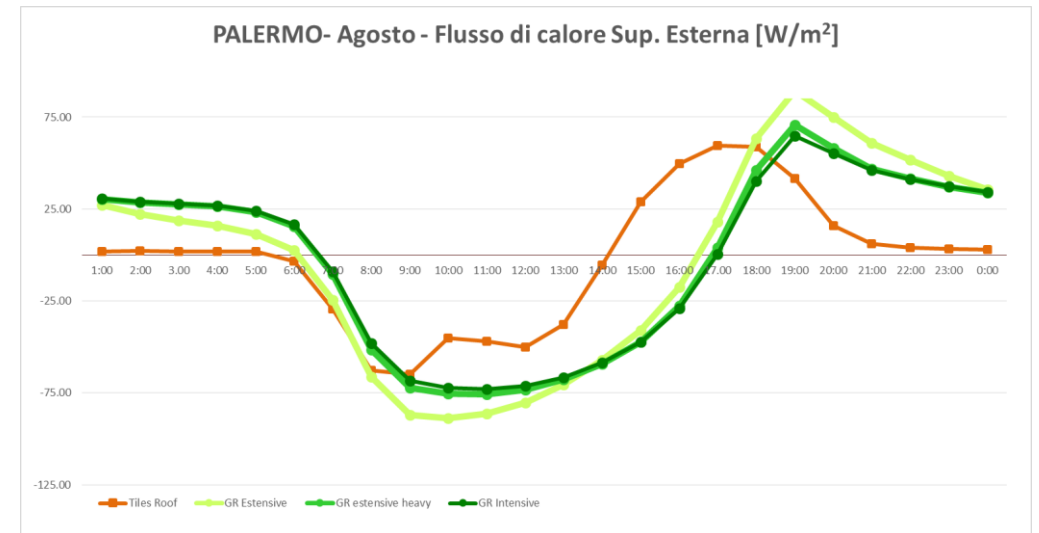
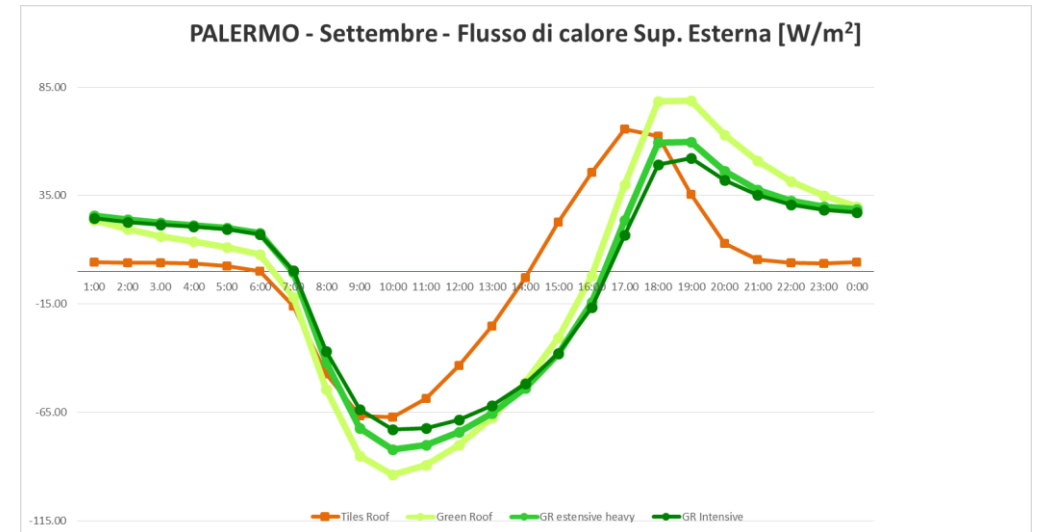


Figura 29 Scambio di calore per conduzione sulla superficie esterna ed interna [W/m²] – Giorno tipo in Settembre



Studi scientifici [2] hanno rilevato come, raddoppiando la superficie fogliare sulla superficie della copertura (passando ad esempio da un LAI, Indice di Area Fogliare, pari a 3 a uno pari a 6), il flusso di calore attraverso la copertura possa essere ridotto fino al 50%. Le simulazioni condotte hanno rilevato una riduzione mensile media del flusso di calore del 5% nel passaggio da LAI pari a 1 del Modello 2 a LAI pari a 2 del Modello 3. Tale riduzione è di maggiore entità nei climi freddi e si riduce (2-3%) nelle zone climatiche più calde.

In generale, le simulazioni hanno rilevato, nel confronto con la soluzione di copertura tradizionale con prestazione Sufficiente e qualità IV ai sensi del Dlgs. 311/20062, una riduzione del flusso di calore attraverso la copertura variabile, a seconda della tipologia di tetto verde realizzato tra il 5% e il 20% in zona B, tra il 12% e il 25% in zona D e intorno al 30% in zona E.

2.3 Temperatura Operativa

Sebbene gli studi di Niachou et al. [3] abbiano dimostrato una riduzione della T° operativa interna degli ambienti di circa 2°C rispetto ad una copertura tradizionale, le simulazioni condotte nel clima mediterraneo hanno evidenziato valori meno rilevanti: la differenza tra le T° operative massime medie mensili si attesta attorno agli $0,3^\circ\text{C}$ gradi in zona climatica B, variabile da $0,3$ a $0,9^\circ\text{C}$ in zona climatica D, variabile da $0,55$ a $0,9^\circ\text{C}$ in zona climatica E.

Il tetto intensivo, con LAI più alto, garantisce una riduzione maggiore della T° operativa.

I benefici apportati dal tetto verde durante la stagione di riscaldamento, non valutati in questo lavoro di ricerca, sono stati evidenziati da Sailor et al. [4] che, in una lettura annuale del bilancio energetico dell'edificio ha rilevato come l'aumento dello spessore del substrato di suolo sia favorevole anche alla riduzione delle dispersioni e contribuisca significativamente al risparmio nella stagione invernale.

I risparmi energetici (e conseguentemente economici) legati alla presenza del tetto verde generalmente aumentano all'aumentare dello spessore del substrato di suolo e all'aumentare del valore del LAI. In climi mediterranei però, dove l'irraggiamento solare in copertura durante le ore diurne è particolarmente rilevante, è opportuno tenere in debita considerazione che una superficie fogliare molto estesa limita il re-irraggiamento del calore accumulato durante il giorno e conseguentemente riduce il raffrescamento della struttura, soprattutto se in assenza di ventilazione notturna.

Il confronto condotto nelle tre zone climatiche tra l'edificio Tipo A e l'edificio Tipo B, ha evidenziato quanto già dichiarato da G. Kokogiannakis et al. [5] ossia che per edifici isolati secondo le indicazioni più restrittive della normativa energetica, il tetto verde offre in realtà benefici modesti rispetto ad una copertura tradizionale isolata. Tale riflessione meriterebbe quindi un approfondimento specifico, non solo per una migliore comprensione delle conseguenze energetiche che la scelta del tetto verde comporta, ma soprattutto per una valutazione del costo complessivo nel ciclo di vita, ambientale, sociale ed economico, associato a tale tecnologia, in confronto ad altre tradizionali egualmente performanti.

Tenendo conto di alcune indicazioni emerse dalla lettura della bibliografia [5] sarebbe opportuno condurre una indagine più dettagliata sulla possibilità di progettare soluzioni di tetto verde a bassa intensità vegetativa che, in climi particolarmente caldi (Zona climatica A e B) possano essere realizzate in assenza o in presenza di strati di spessore limitato di isolamento termico, per valutare con maggiore dettaglio la possibilità di modulare, con una programmazione adeguata del sistema di irrigazione, il comportamento della struttura nel periodo estivo, ottimizzandone i benefici nel periodo di maggiore efficacia.

3 La parete verde

3.1 T° superficiale

Il meccanismo di funzionamento di una parete verde differisce sensibilmente da quello di una copertura piana o leggermente inclinata e, agli effetti della radiazione solare, si aggiunge quello della schermatura quasi totale prodotta dal rivestimento vegetale, generalmente molto più folto e compatto della vegetazione presente in copertura. La parete verde offre inoltre una consistente resistenza al vento e un

² Le specifiche tecniche della copertura tradizionale simulata nel corso della ricerca, sono riportate all'allegato A cui si rimanda per i dettagli specifici. Trattasi di copertura isolata (pannello in EPS cm 8) e ventilata (camera d'aria cm 6), con manto in tegole marsigliesi in laterizio su solaio in laterocemento.

ulteriore incremento al livello di isolamento termico, contribuisce al miglioramento della qualità dell'aria interna trattenendo le polveri sottili e contribuisce, come le coperture alla mitigazione dell'effetto isola di calore, grazie alla minore quantità di calore re-irraggiata verso l'esterno e all'innalzamento del livello di umidità relativa prodotta per evapotraspirazione .

Per parete verde si intendono in realtà diverse tipologie di strutture verticali, ricoperte da elementi vegetali, radicati a terra, sulla parete, o in strutture accessorie modulari agganciate alla struttura muraria di supporto.

La scelta del tipo di essenza vegetale influisce non solo sugli aspetti estetici ma su quelli funzionali dell'edificio.

Piante sempreverdi proteggono la facciata dai venti, dalla neve e dalla pioggia durante la stagione invernale e possono costituire una risorsa preziosa soprattutto in climi temperati e su facciate esposte a nord.

Vegetazioni caducifoglie consentono all'edificio di cambiare aspetto e prestazioni al variare delle stagioni e questo tipo di soluzione risulta preferibile per climi mediterranei, in cui non sempre è necessaria una protezione contro gli agenti atmosferici durante il periodo invernale e il sole può contribuire a riscaldare l'involucro.

Studi sperimentali approfonditi sulla riduzione della T° interna di ambienti rivestiti con pareti verdi, sono stati condotti da Bartfelder e Köhler [6], rilevando una riduzione della T° superficiale nell'ordine dei 2-6°C rispetto ad una parete semplicemente intonacata. Il più recente studio di Wong et al. [1], ha rilevato una differenza massima di T° di oltre 10°C. Tali valori riflettono i risultati della simulazione condotta nelle tre zone climatiche di riferimento, che presentano valori di ΔT° tra le T° superficiale della parete verde e della parete intonacata variabili tra 3°C e 10°C nei periodi in cui è massima l'irradiazione solare diretta (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.÷Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

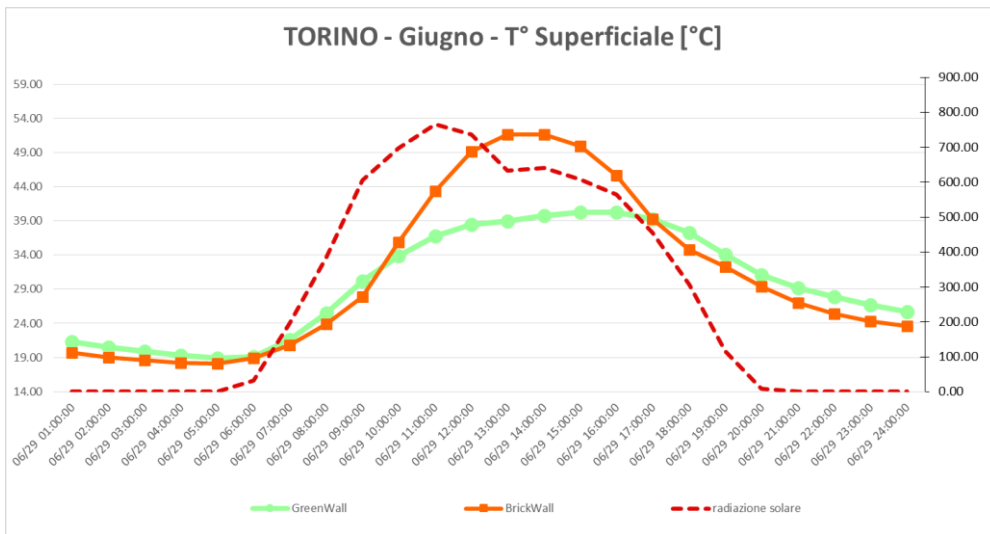


Figura 30 T° Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Giugno – Esposizione SUD

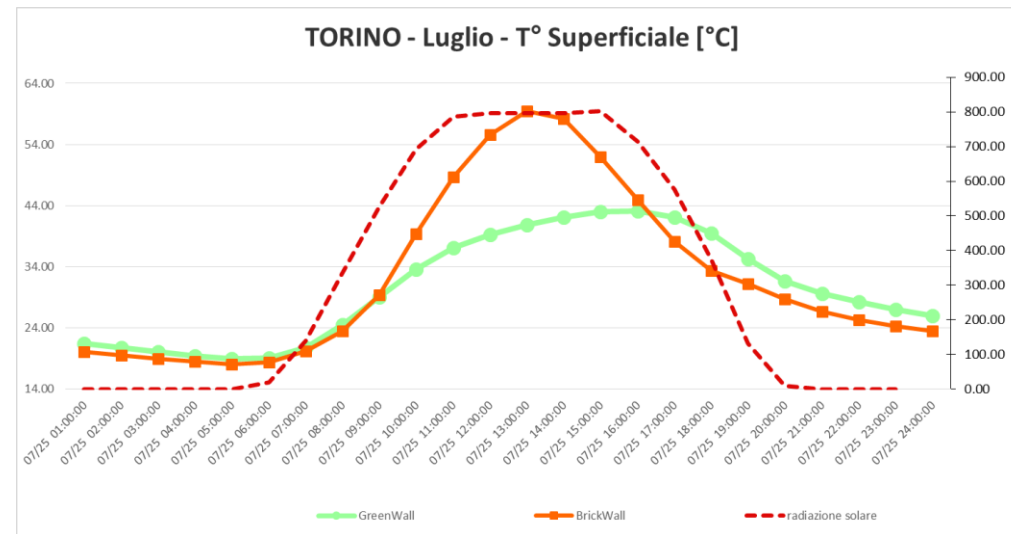


Figura 31 T° Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Luglio – Esposizione SUD

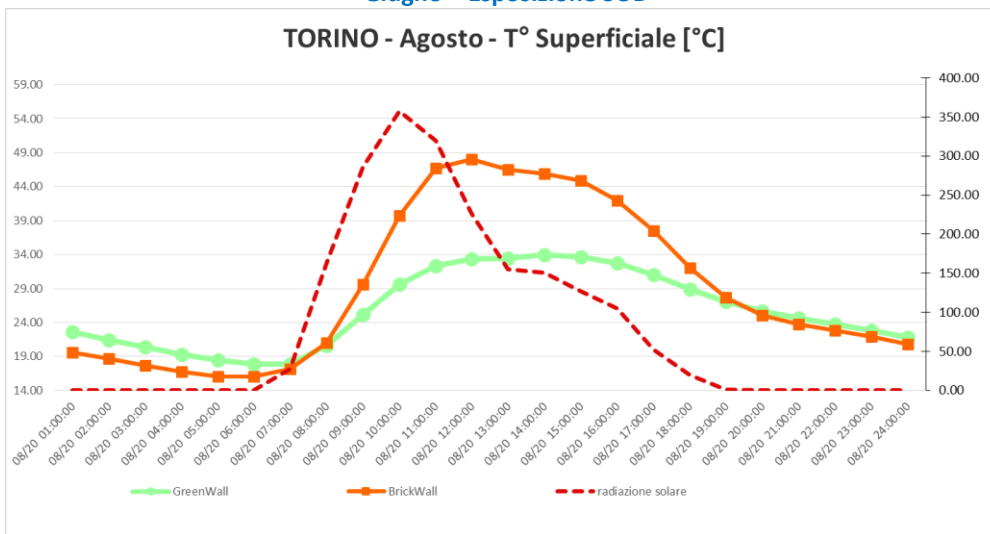


Figura 32 T° Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Agosto – Esposizione SUD

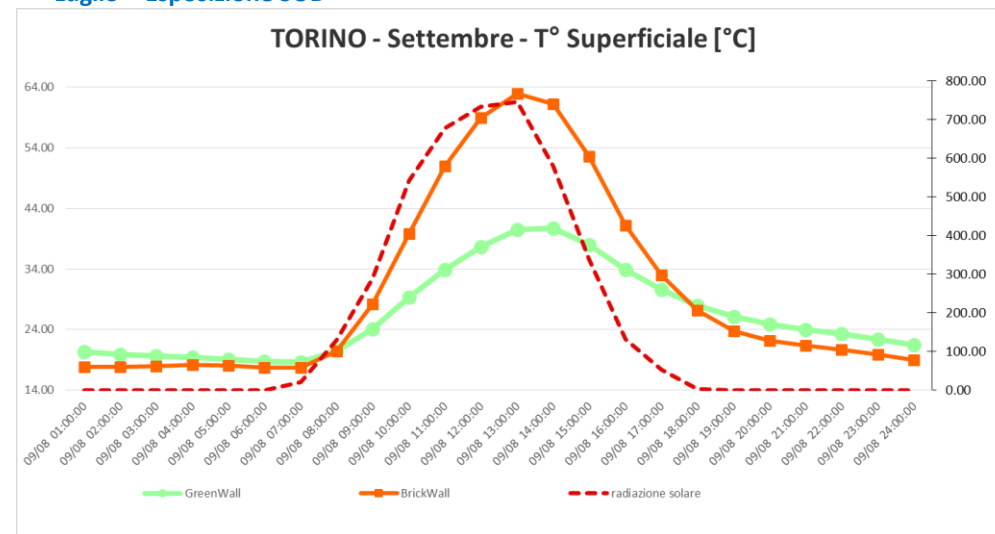


Figura 33 T° Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Settembre – Esposizione SUD

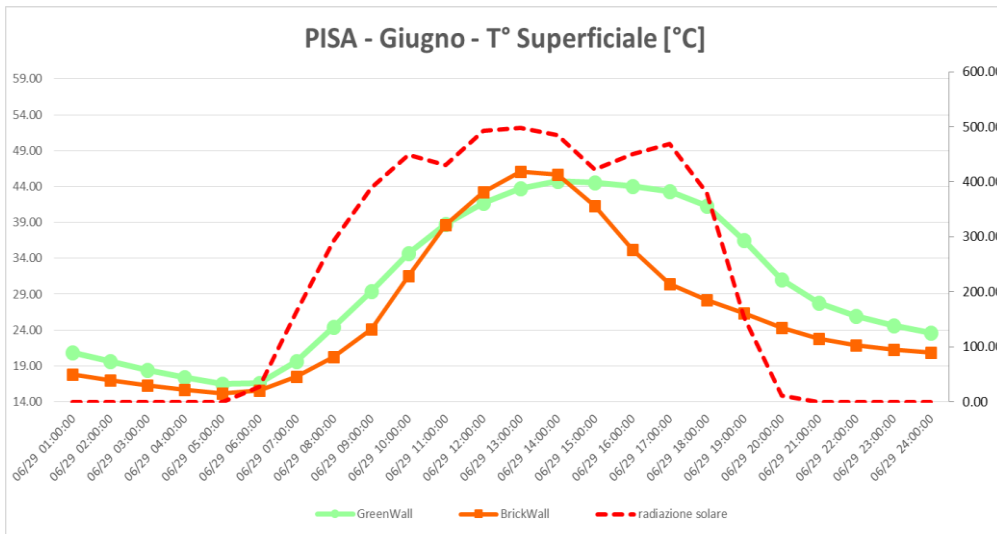


Figura 34 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Giugno – PISA Esposizione SUD

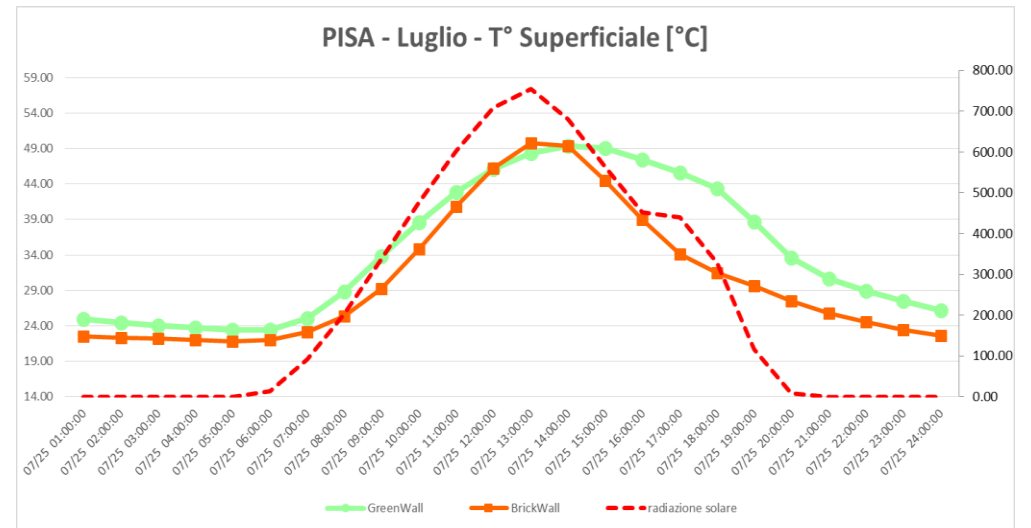


Figura 35 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Luglio – PISA Esposizione SUD

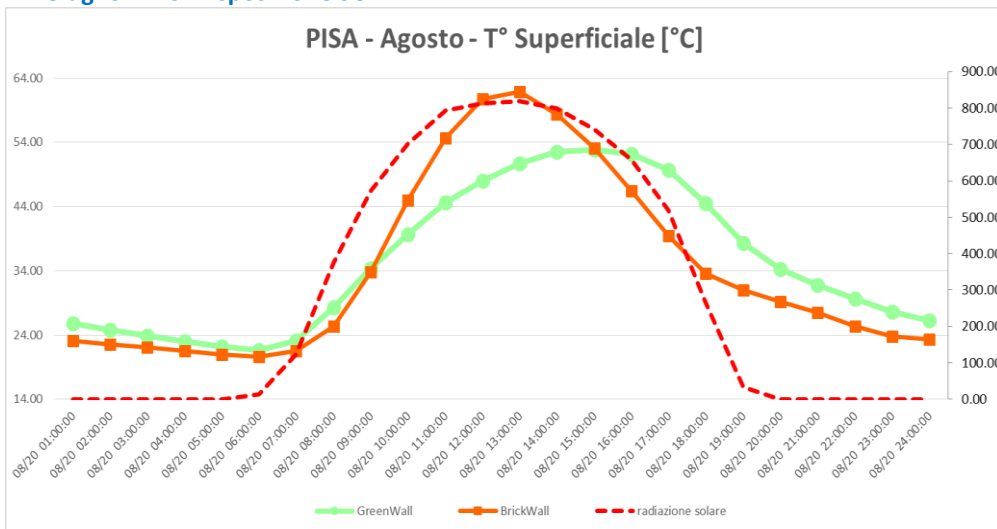


Figura 36 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Agosto – PISA Esposizione SUD

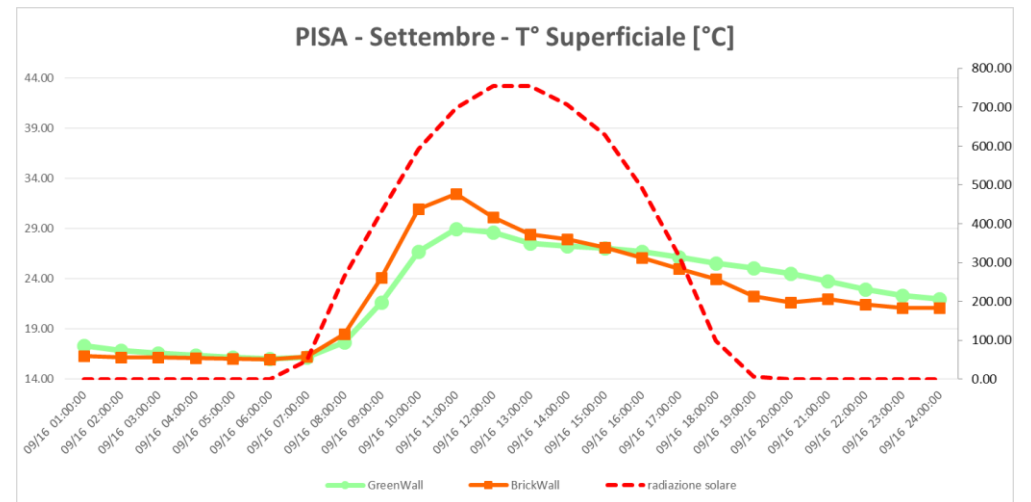


Figura 37 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Settembre – PISA Esposizione SUD

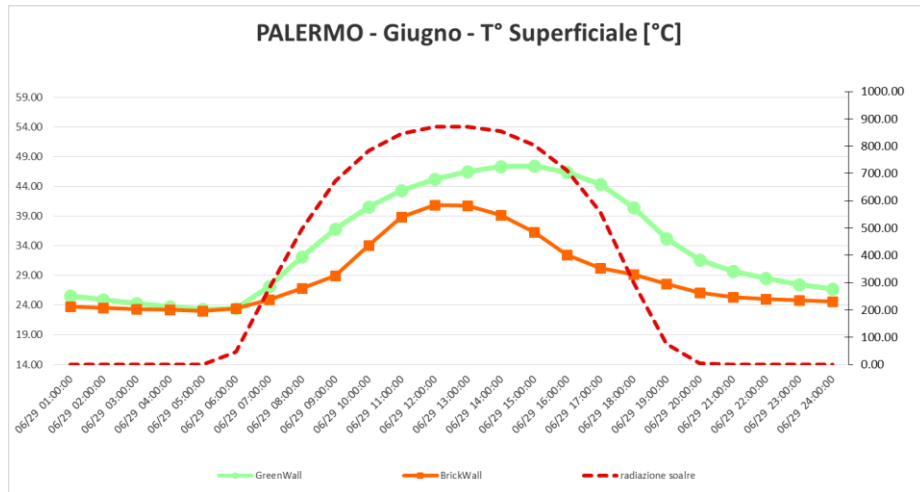


Figura 38 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Giugno – Esposizione SUD

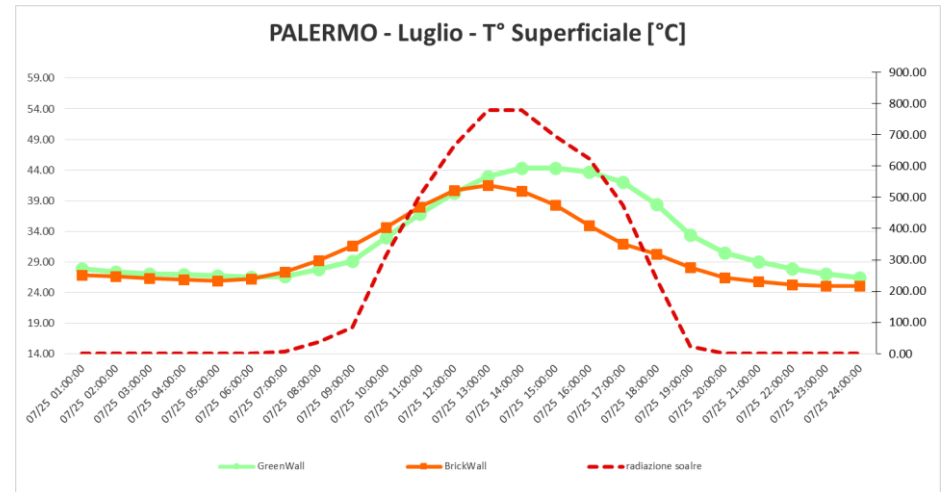


Figura 40 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Luglio – Esposizione SUD

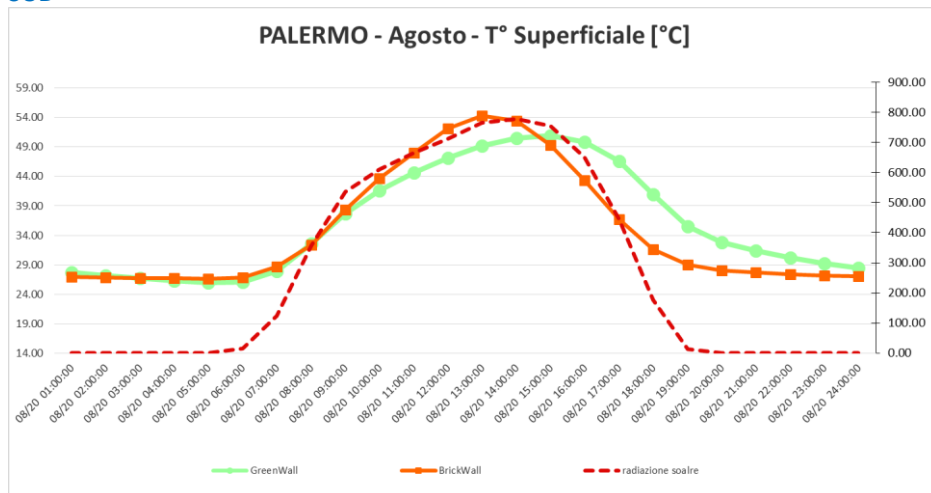


Figura 39 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Agosto – Esposizione SUD

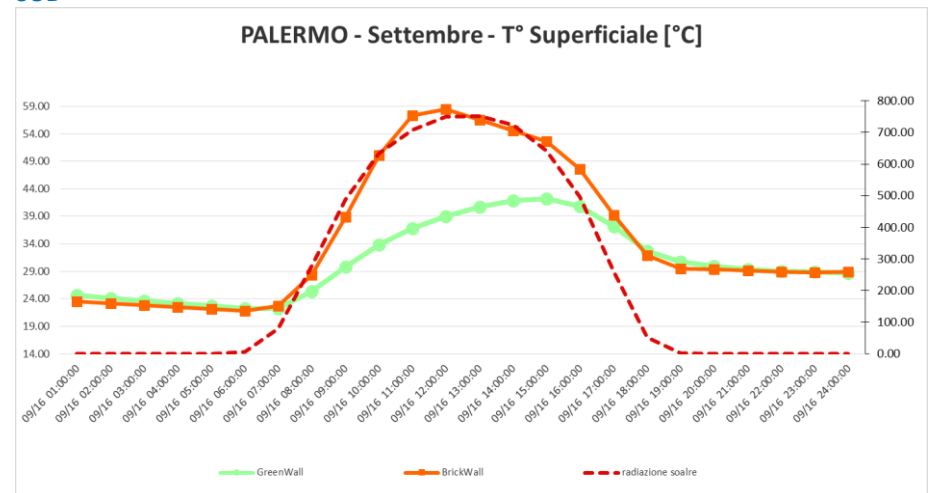


Figura 41 Superficiale delle due pareti verticali a confronto per un giorno tipo in Settembre – Esposizione SUD

3.2 Il Flusso di calore superficiale

Gli elementi che contribuiscono alla riduzione del flusso di calore attraverso la parete sono, oltre alle specifiche dei materiali che compongono il pacchetto, il contenuto di acqua nel substrato, la eventuale presenza di cavità tra i diversi strati ma soprattutto lo spessore dello strato fogliare, che può creare una intercapedine di aria stagnante tra la superficie e la parete riducendo l'irraggiamento diretto e l'azione del vento, con un conseguente aumento della resistenza termica della parete di circa $0.1\text{m}^2\text{K/W}$ [7].

La presenza della vegetazione offre un contributo significativo alla riduzione dei guadagni solari e delle dispersioni attraverso l'involucro. Questo si traduce in un minore carico energetico sia in riscaldamento che in condizionamento estivo.

La simulazione ha mostrato un andamento dell'irraggiamento sulla parete esposta a Sud variabile al variare della zona climatica, con punte significative nelle zone climatiche più calde di circa $15\text{ W/m}^2\text{K}$ inferiori rispetto alla parete intonacata.

Il comportamento della parete verticale, mostra nelle tre zone climatiche, un andamento simile.

Durante le ore più calde della giornata le perdite di calore (Heat Loss) sulla superficie interna della parete in muratura sono meno rilevanti rispetto alle perdite di calore della parete verde. Ciò a significare che la parete in muratura accumula e cede all'ambiente più calore di quanto non faccia la parete verde. Al contrario, durante le ore fresche notturne e in concomitanza con il periodo di ventilazione naturale, la parete accumula maggiore quantità di calore dall'ambiente interno (Heat Gain) favorendone il raffrescamento e contribuendo all'abbassamento della T° operativa. Tale fenomeno assume particolare rilevanza nei climi più caldi, mentre la prestazione delle due pareti si mantiene su livelli simili nei climi più freddi (da Figura 42 a Figura 53)³

³ Cit. *Input and Output - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, September 27, 2013

[p. 231][...]Note that outside face conduction, when positive, does not indicate the heat flow from the surface to the surrounding air, which is governed by the outside face convection coefficient and the difference in temperature between the inside face and the surrounding air. [...] The basic heat transfer rate (W) and a per unit area flux (W/m²) can have positive or negative values with the sign convention that positive indicates heat flowing toward the face itself. There are also directed "gain" and "loss" versions that have only positive values or zero when the heat flow direction opposes.

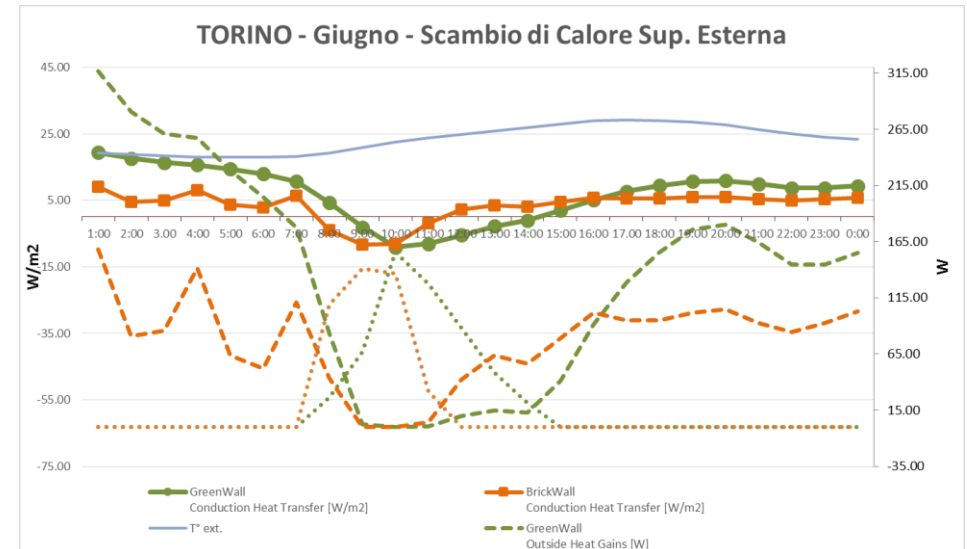
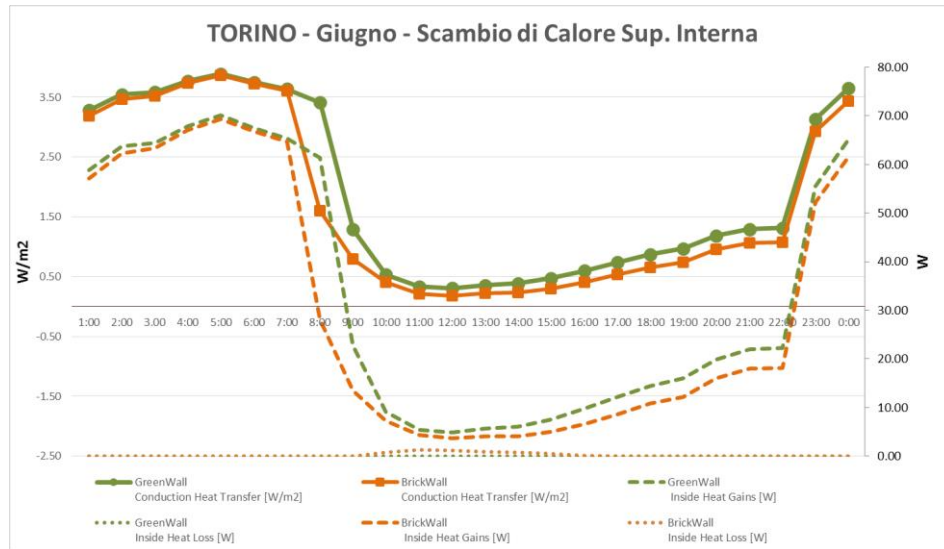


Figura 42 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Giugno - TOIRINO

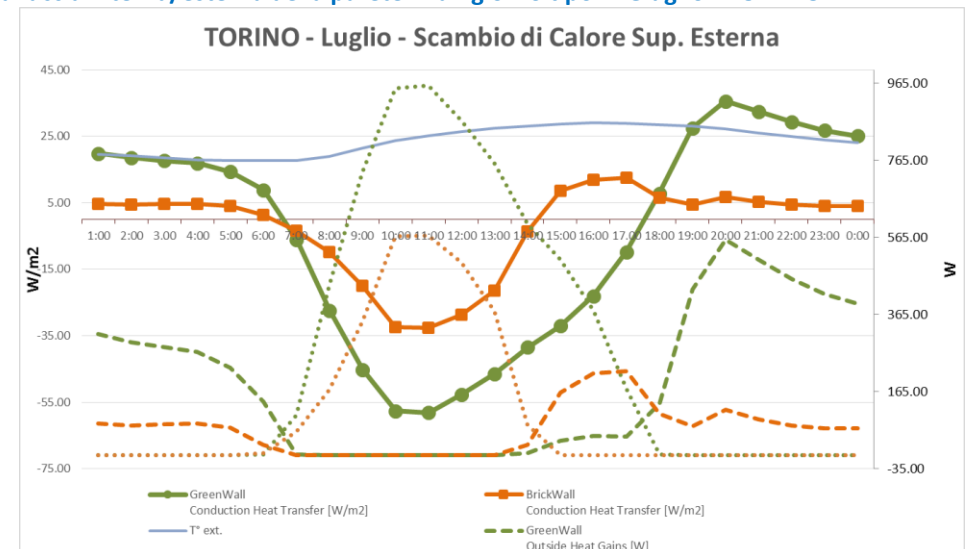
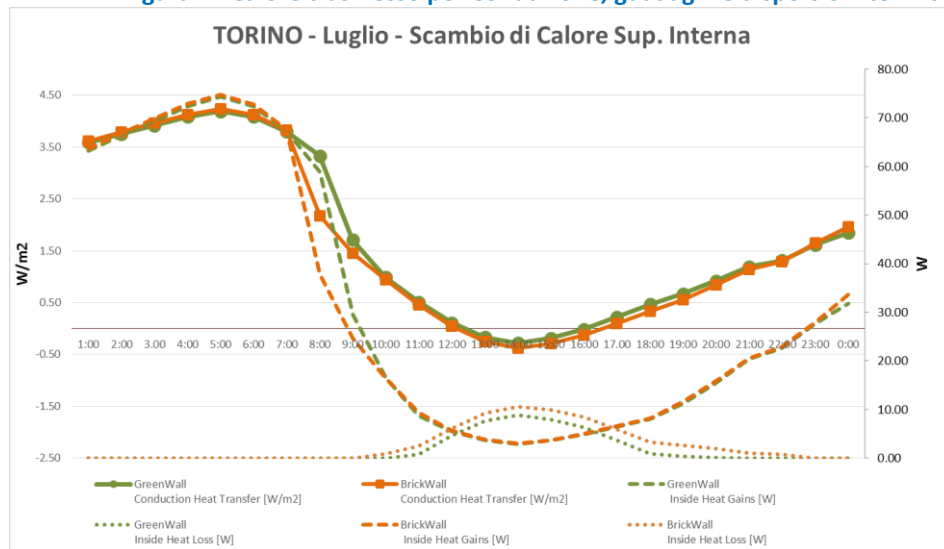


Figura 43 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Luglio - TOIRINO

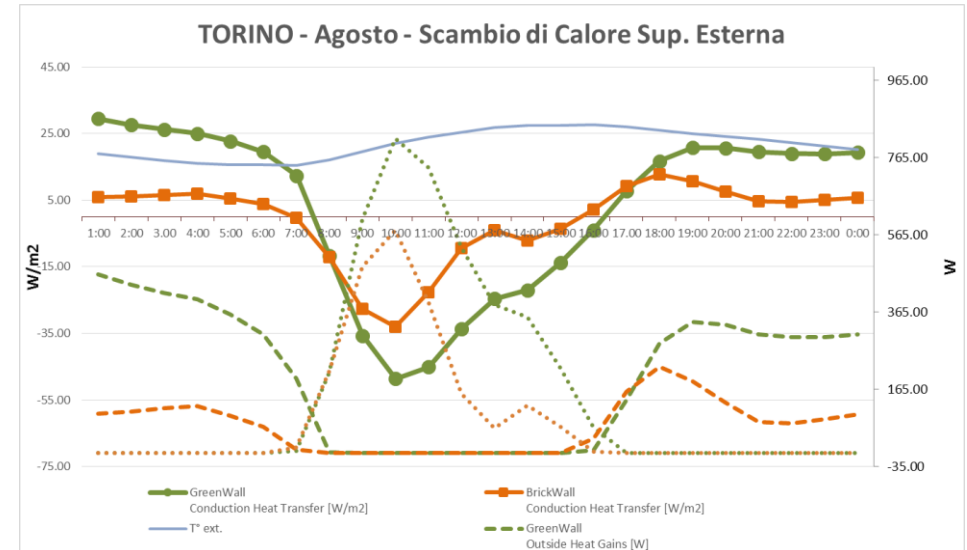
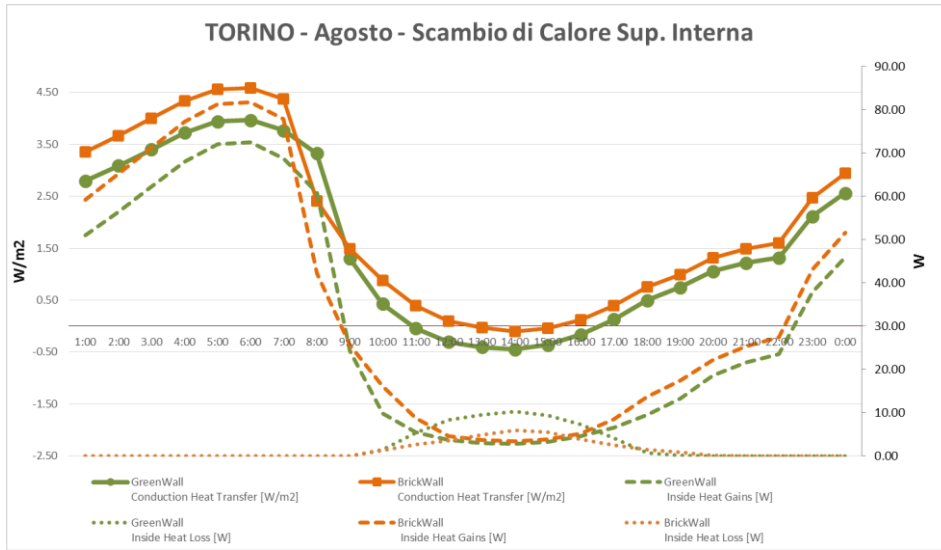


Figura 44 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Agosto - TOIRINO

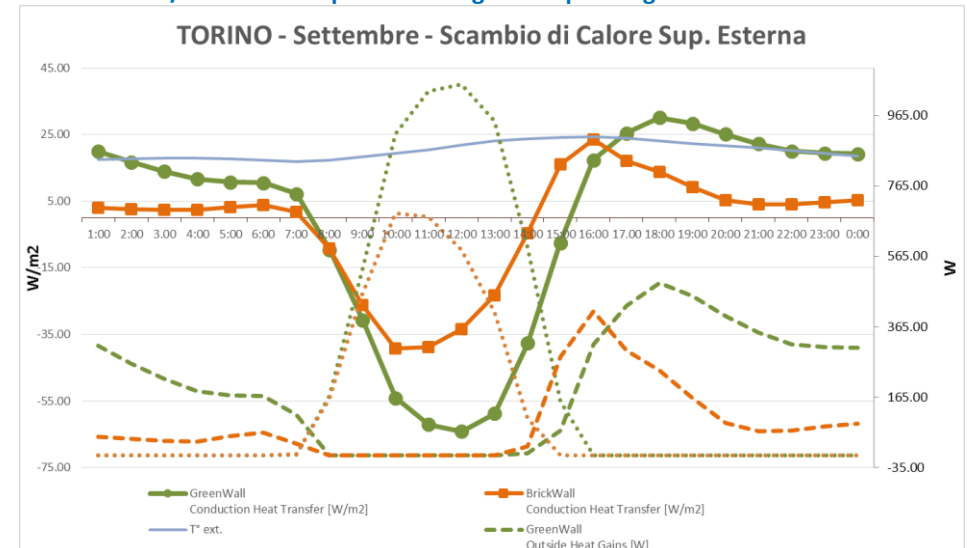
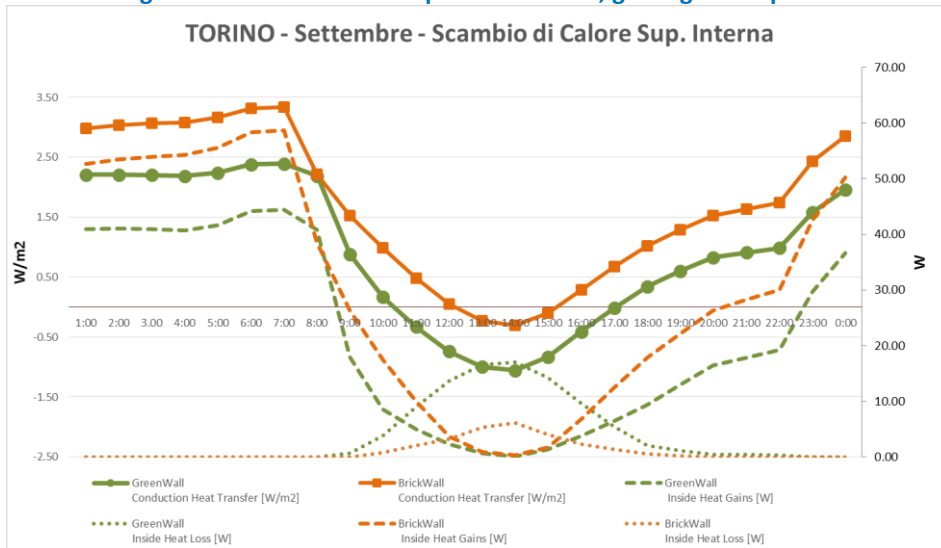


Figura 45 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Settembre - TOIRINO

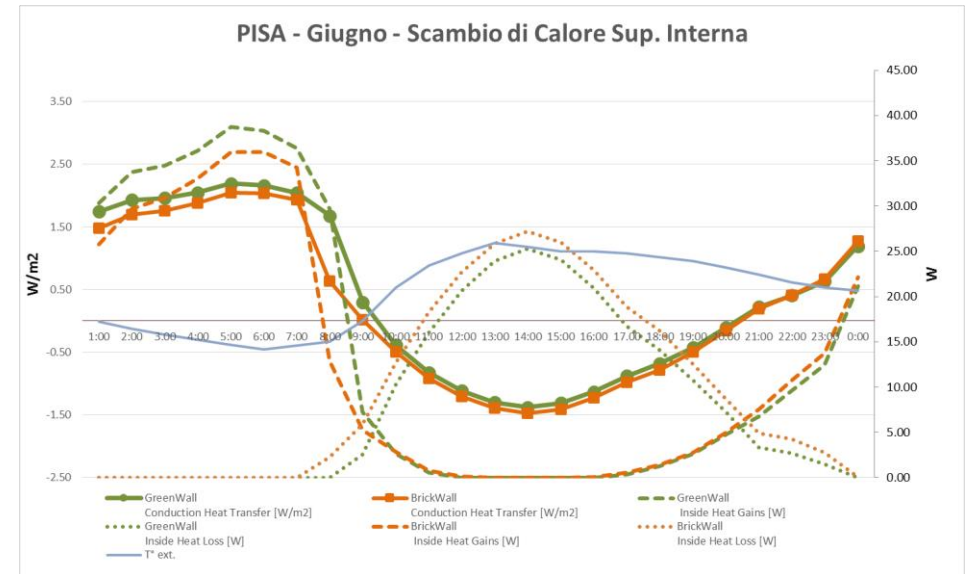
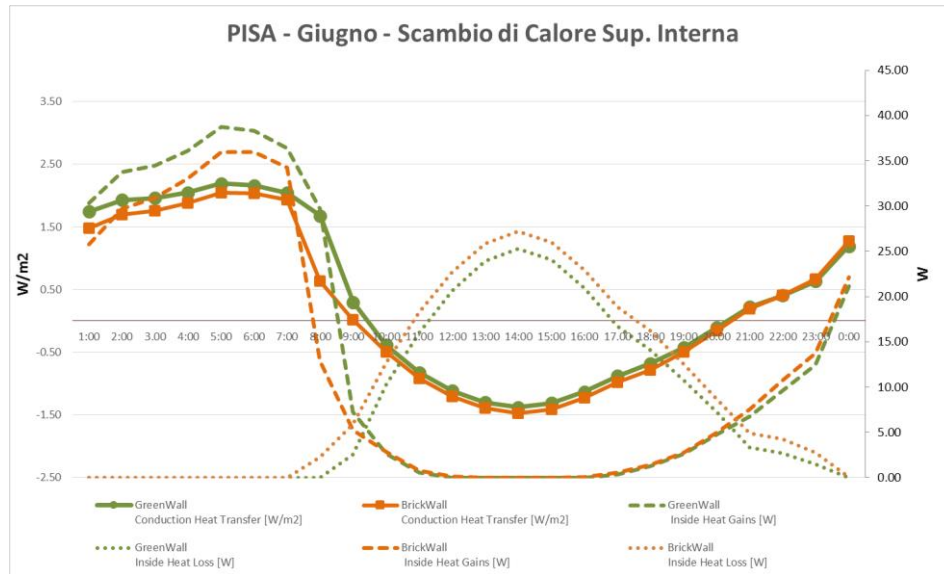


Figura 46 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Giugno - PISA

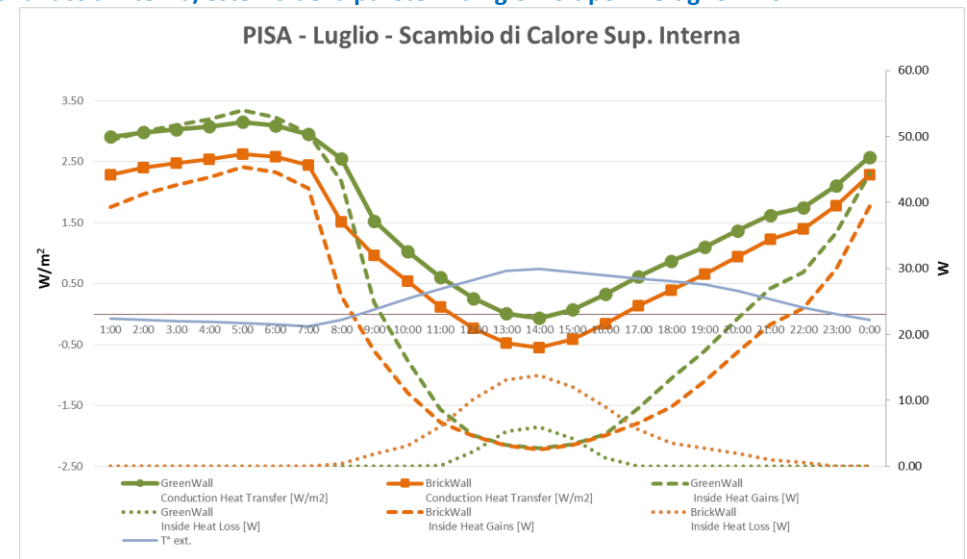
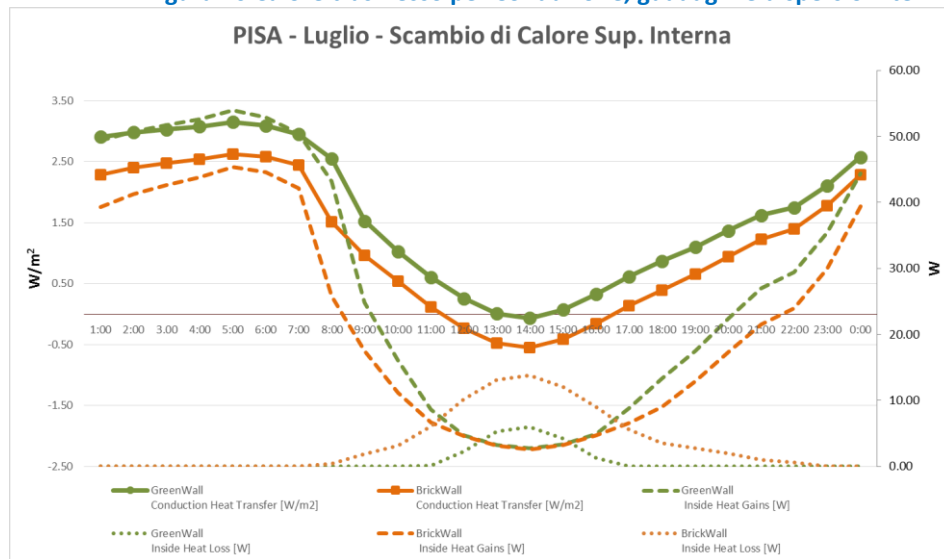


Figura 47 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Luglio - PISA

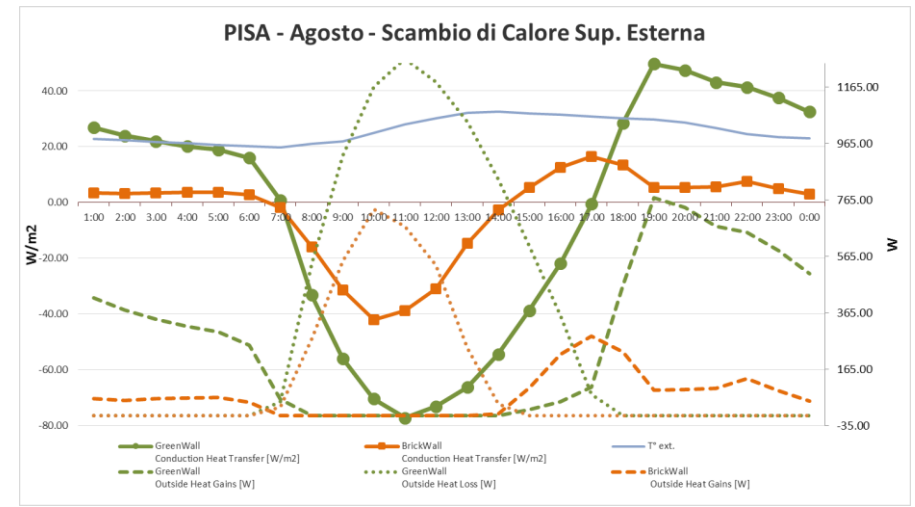
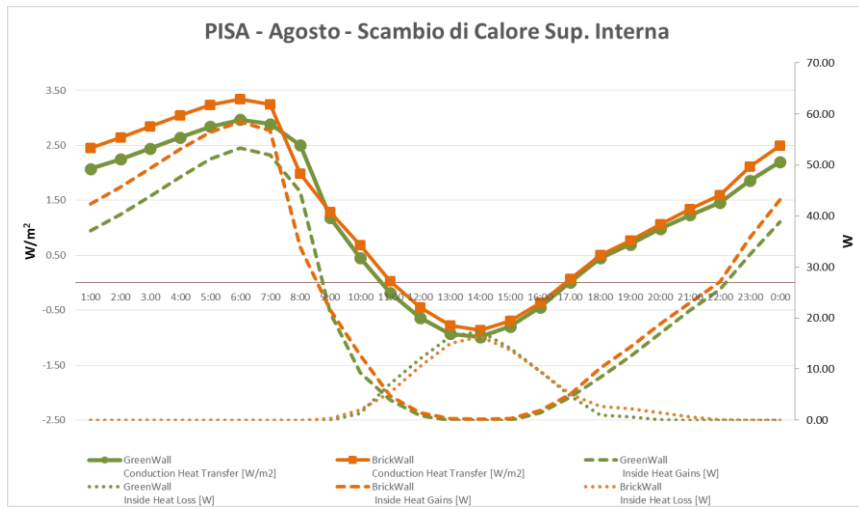


Figura 48 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Agosto - PISA

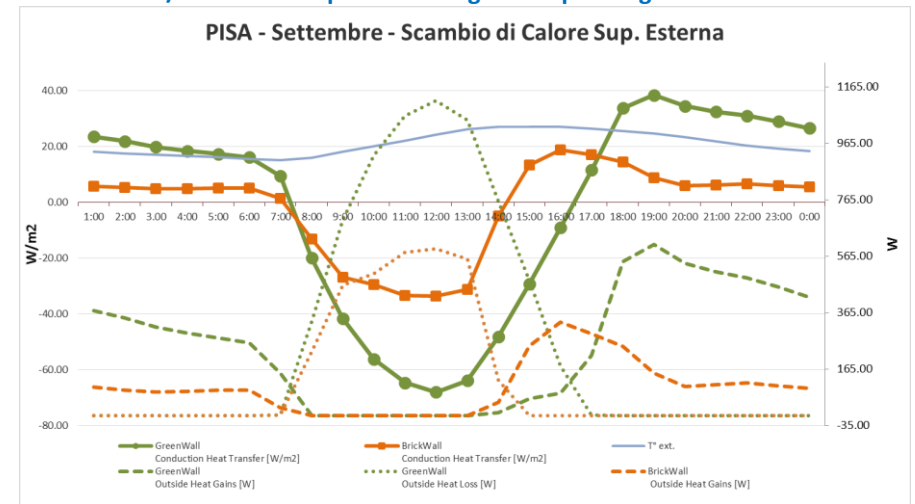
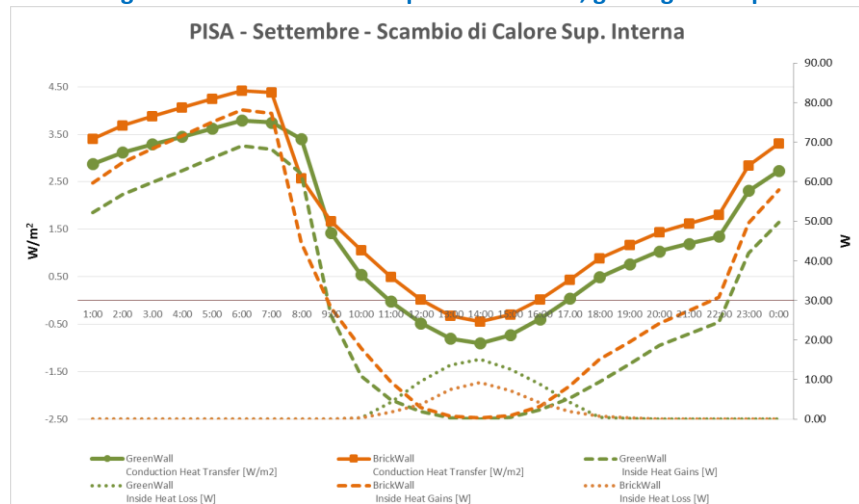


Figura 49 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Settembre - PISA

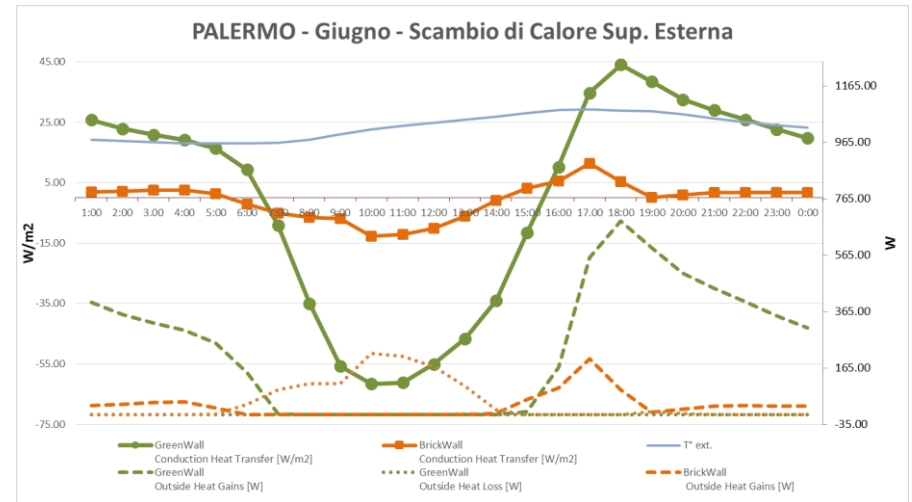
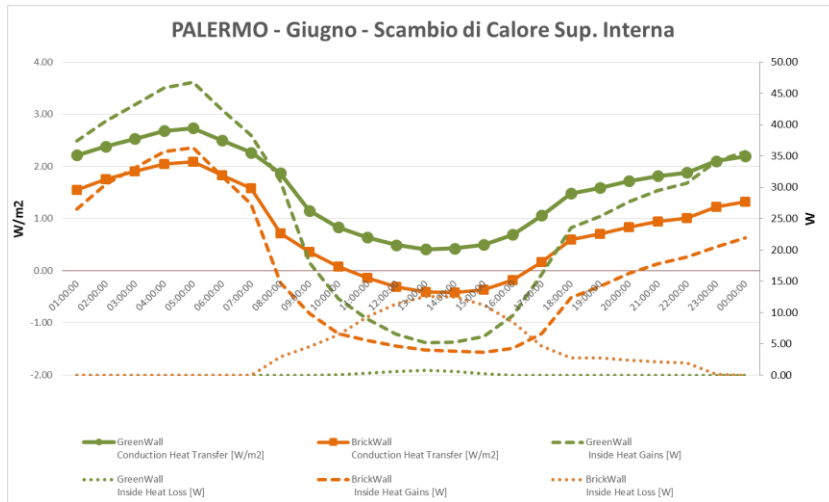


Figura 50 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Giugno –PALERMO

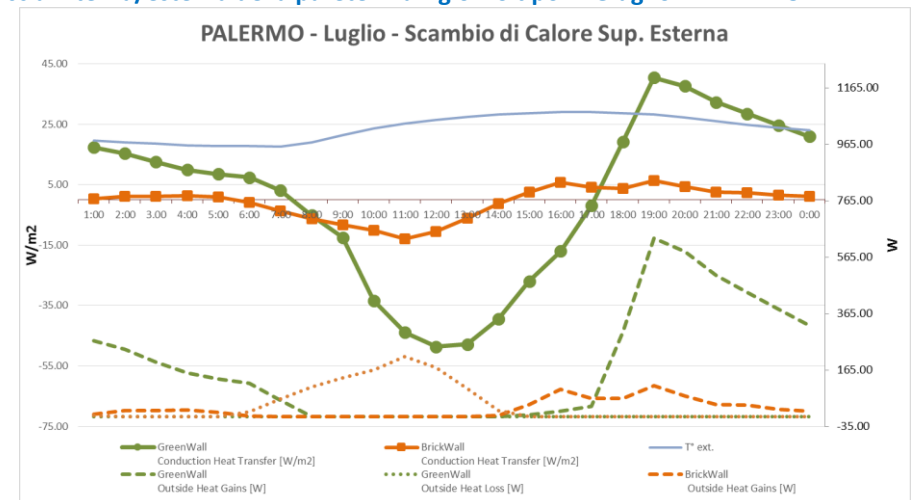
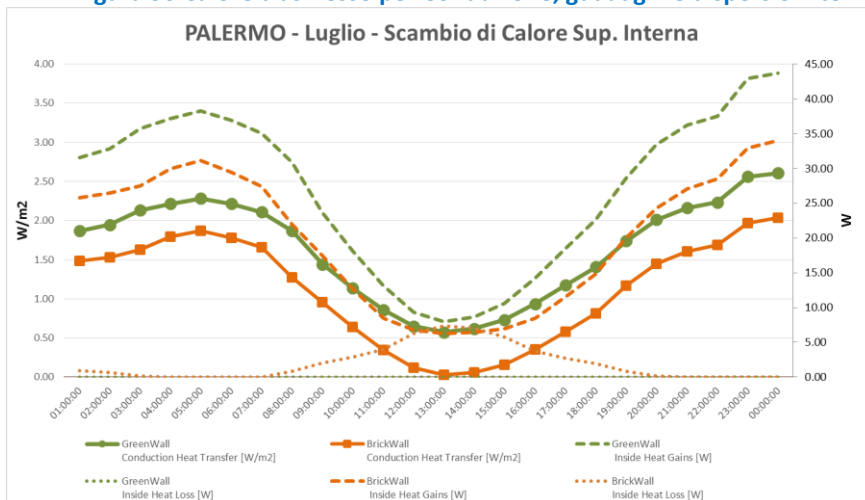


Figura 51 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Luglio –PALERMO

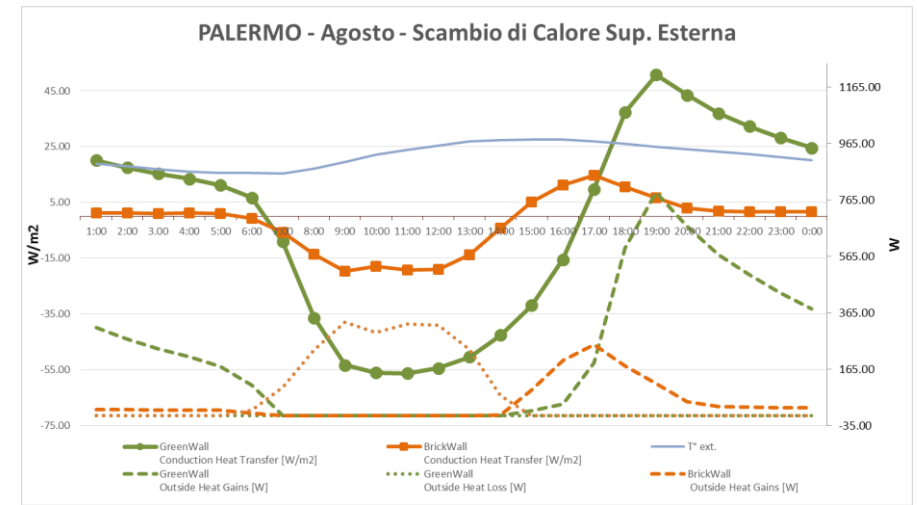
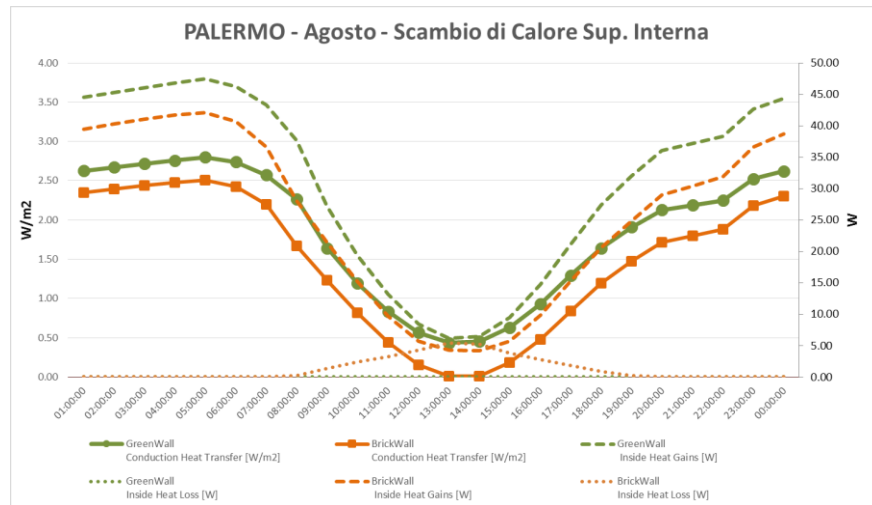


Figura 52 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Agosto –PALERMO

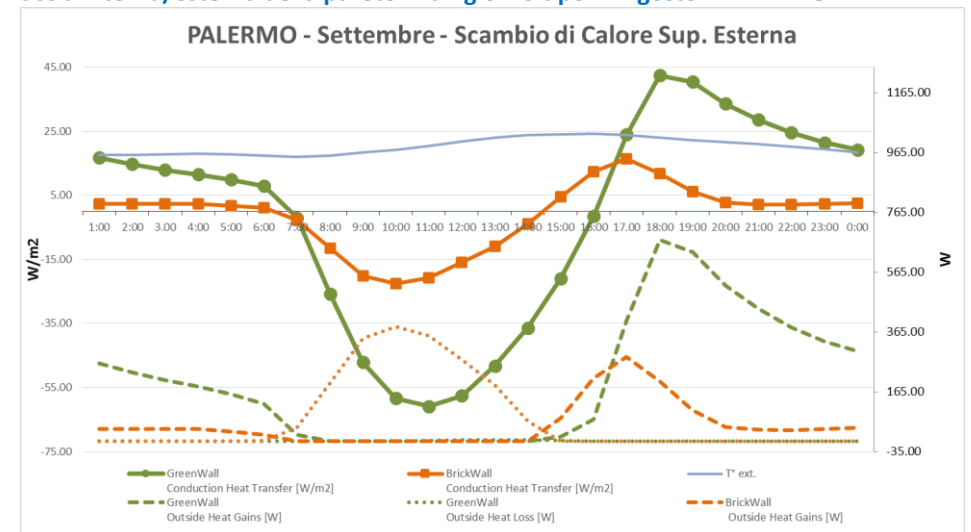
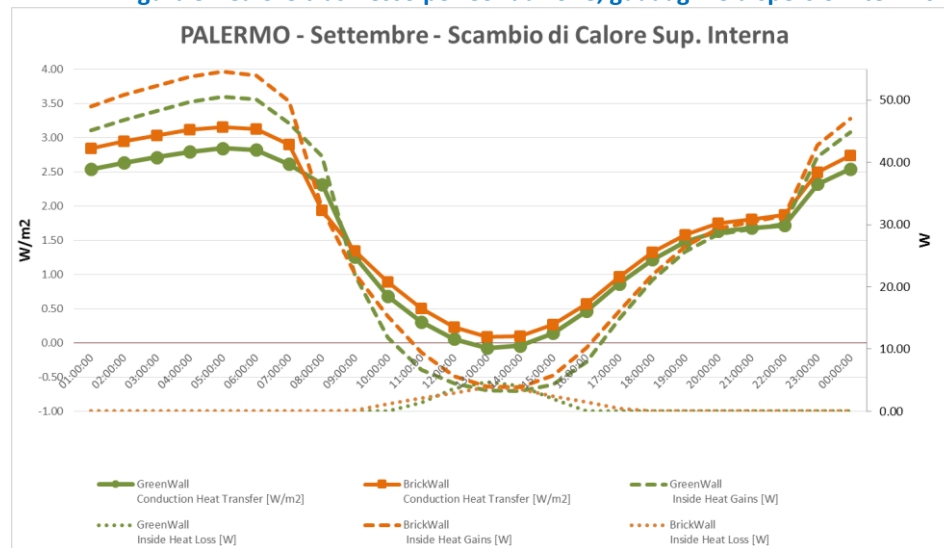


Figura 53 Calore trasmesso per Conduzione, guadagni e dispersioni termiche sulla faccia interna/esterna della parete in un giorno tipo in Settembre –PALERMO

3.3 *La Temperatura Operativa*

Analogamente, le simulazioni attestano una generale riduzione del valore massimo ed un innalzamento del valore minimo delle T° operative in entrambe le zone termiche, in tutte le zone climatiche. Tali variazioni, oscillano tra i $0,5^\circ\text{C}$ e i 2°C sulla T° massima e tra i 7°C e i $9,5^\circ\text{C}$ sulla T° minima in zona climatica E (dati non mostrati in figura).

In zona climatica D, le variazioni diventano più significative soprattutto sul valore della T° massima con valori compresi tra 4°C e 6°C . Analoghe variazioni si rilevano per il dato della T° minima (dati non mostrati in figura).

Nella zona climatica B più calda, tali variazioni, al contrario, risultano di minore entità attestandosi tra i $0,5^\circ\text{C}$ e i $1,5^\circ\text{C}$ per le T° massime e i $2,5^\circ\text{C}$ - 4°C per le T° minime (dati non mostrati in figura).

.

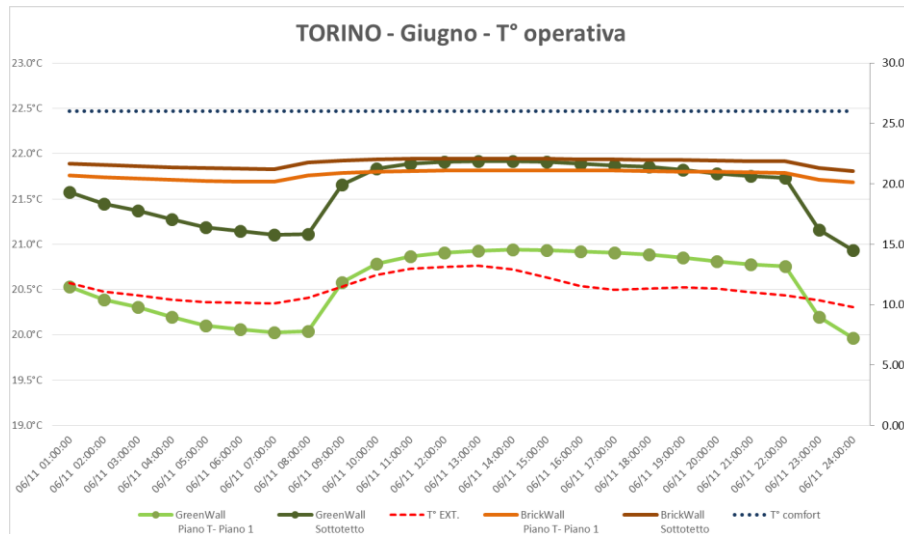


Figura 54 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Giugno-TORINO

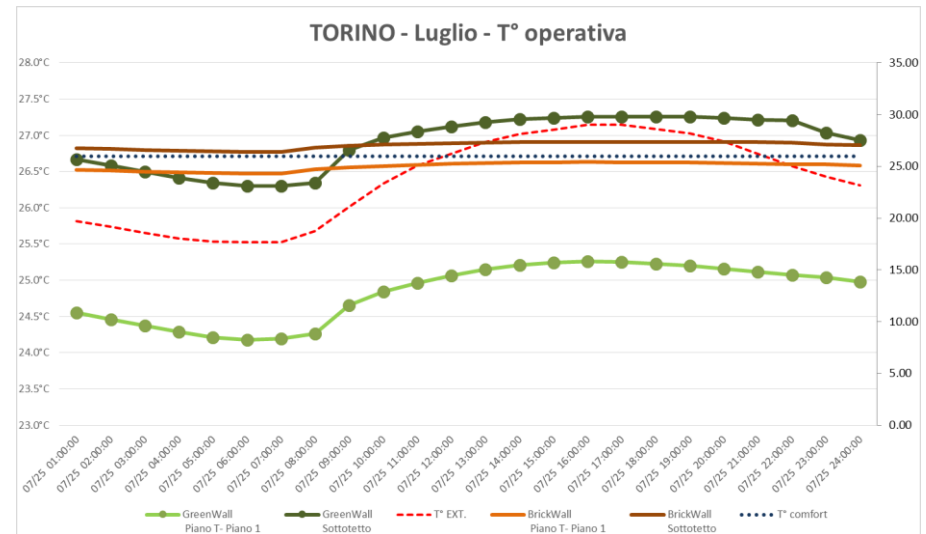


Figura 55 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Luglio-TORINO

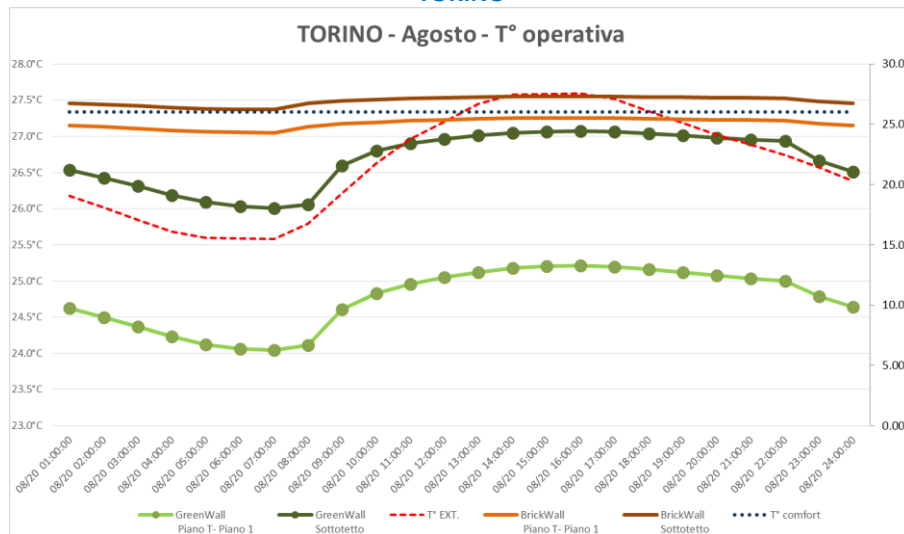


Figura 56 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Agosto-TORINO

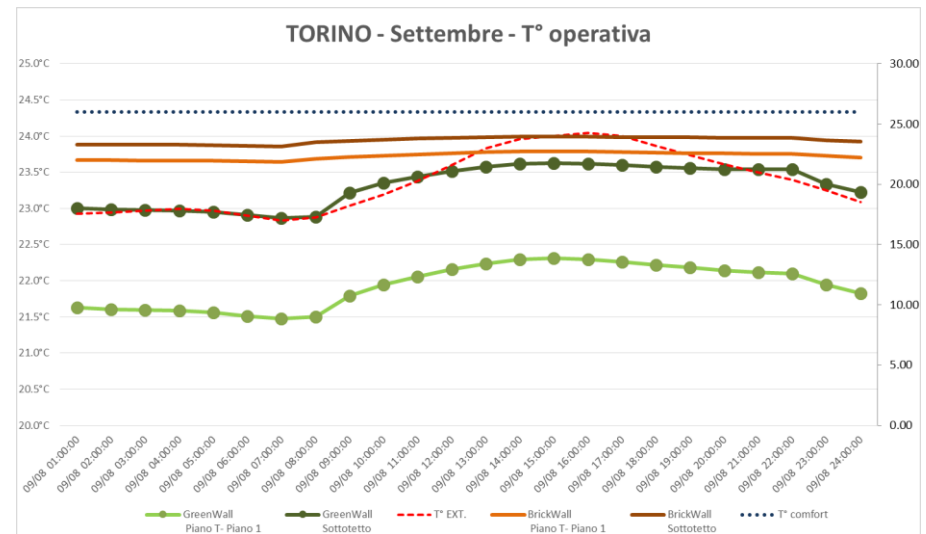


Figura 57 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Settembre-TORINO

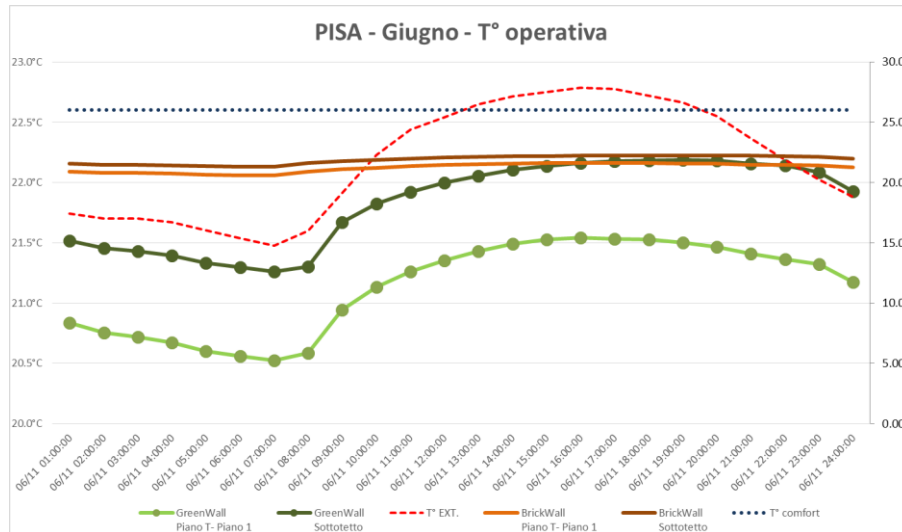


Figura 58 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Giugno - PISA

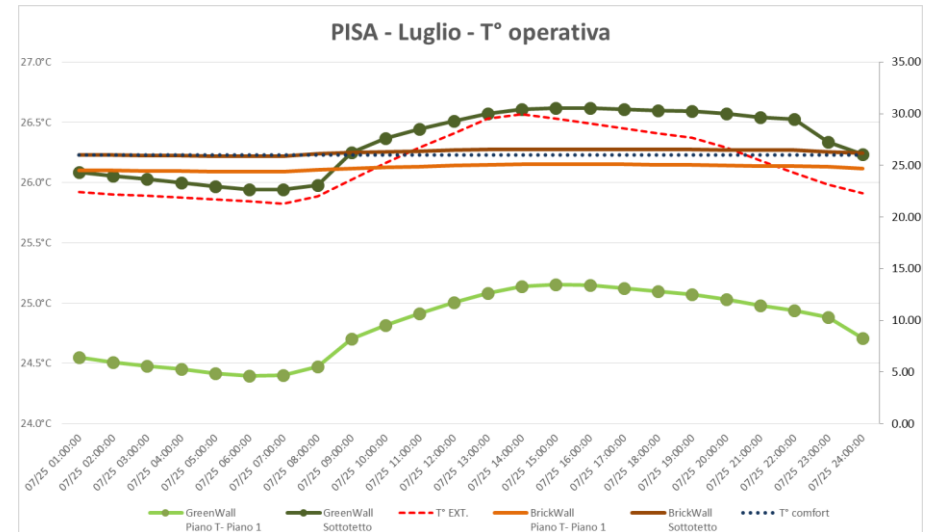


Figura 59 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Luglio - PISA

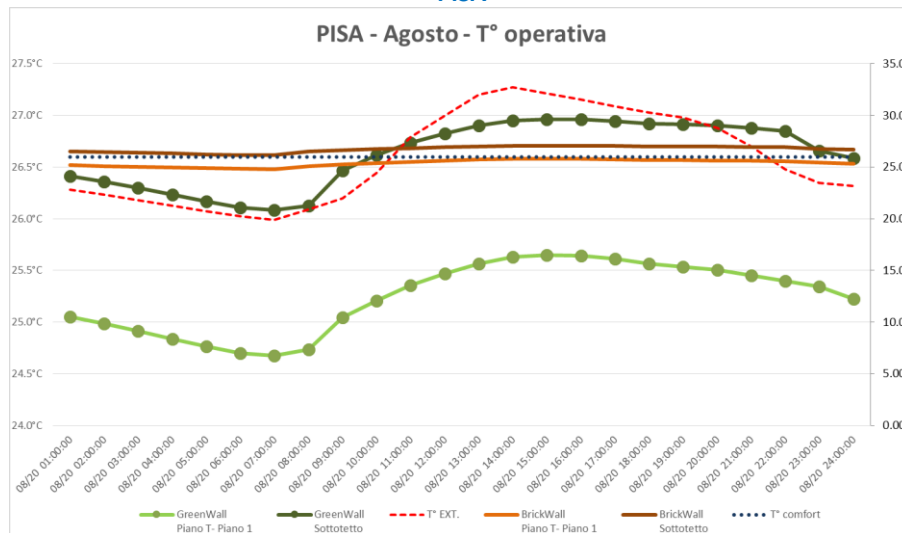


Figura 60 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Agosto - PISA

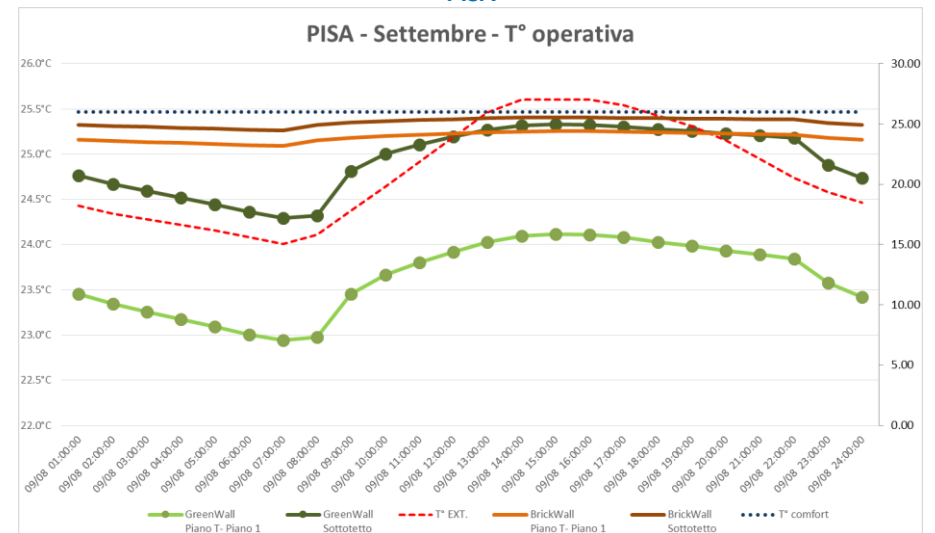


Figura 61 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Settembre - PISA

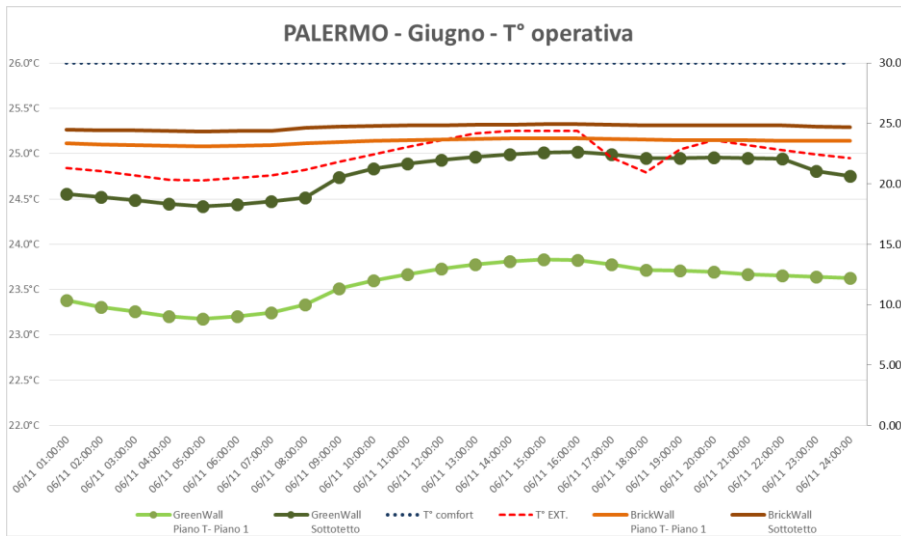


Figura 62 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Giugno - PALERMO

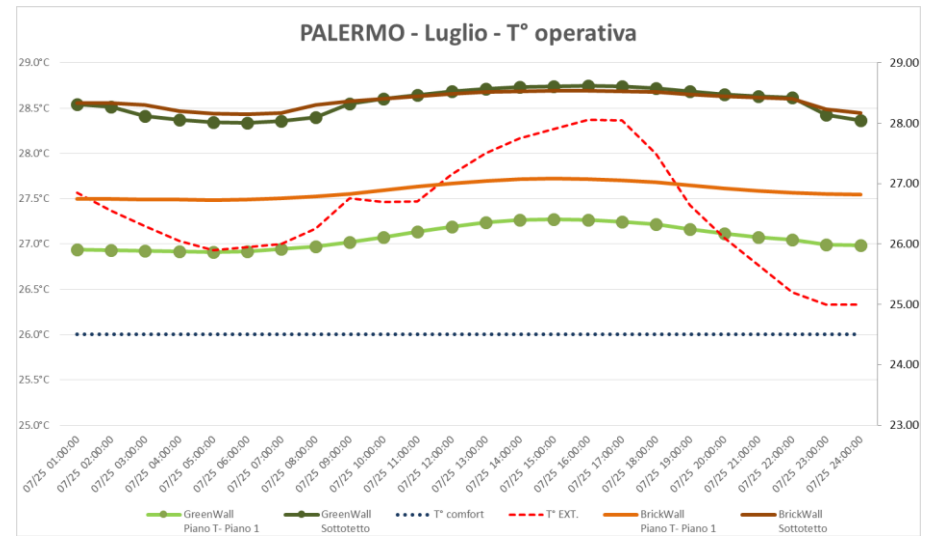


Figura 63 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Luglio - PALERMO

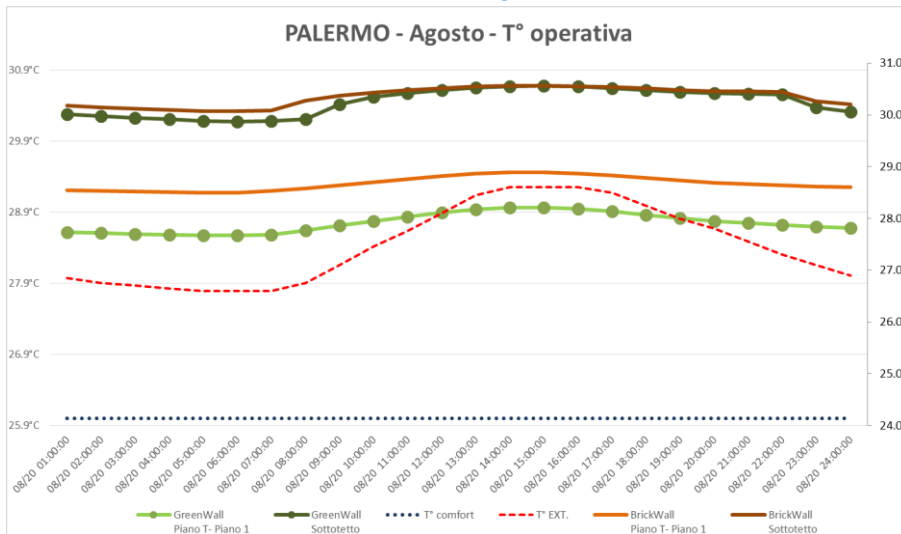


Figura 64 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Agosto - PALERMO

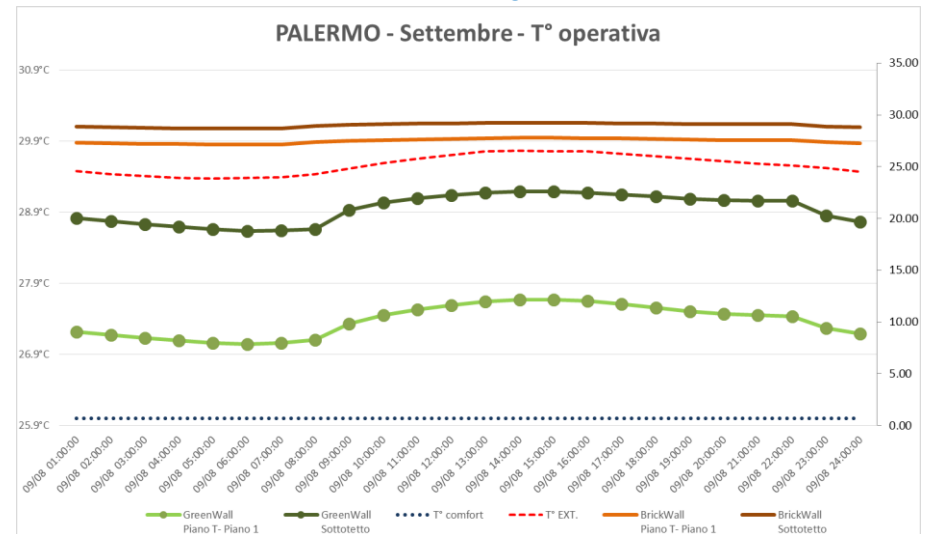


Figura 65 T° operativa nelle due zone termiche in un giorno tipo di Settembre - PALERMO

4 Conclusioni

Le simulazioni condotte hanno confermato i risultati di studi condotti in zone climatiche diverse dall'area mediterranea, testimoniando l'efficacia dei sistemi a verde nel ridurre gli scambi di calore attraverso l'involucro dell'edificio e riducendo i valori della T° interna degli ambienti rispetto a soluzioni egualmente efficienti dal punto di vista prestazionale.

In particolare per il tetto verde sono state evidenziate le differenze prestazionali regolate alla piovosità naturale o alla irrigazione artificiale nonché le variazioni del comportamento legate alle caratteristiche specifiche del manto vegetale utilizzato, come descritto nei capitoli precedenti.

Per una ottimizzazione della progettazione, in climi mediterranei, sarebbe opportuno condurre, su una singola località campione, molteplici analisi a confronto variando i parametri dello strato vegetale (altezza, LAI, emissività, riflettanza) al fine di individuare, tra le specie vegetali autoctone e maggiormente diffuse, quelle in grado di garantire prestazioni ottimizzate.

Un database di soluzioni tecniche potrebbe essere realizzato a supporto di pianificatori e progettisti per l'impiego diffuso delle coperture a verde in clima mediterraneo, al variare del contesto locale geografico di riferimento.

Le previsioni ottenute attraverso le simulazioni potrebbero essere validate attraverso la realizzazione di modelli tridimensionali in scala, sui quali effettuare misurazioni puntuali dei parametri termo-igrometrici.

Le simulazioni oggetto del presente rapporto, per esigenze di ricerca, sono state condotte su edifici privi di impianto di riscaldamento/condizionamento e priva di carichi termici interni.

Per quantificare l'effettivo margine di guadagno, in termini energetici, ambientali ed economici, offerto dall'impiego di soluzioni a verde, verticali ed orizzontali, sarebbe opportuno condurre simulazioni più dettagliate su edifici tipo nelle reali condizioni d'uso.

Ciò significa quantificare l'effettivo contributo offerto dalle pareti verdi/tetti verdi nel ridurre i carichi termici dell'edificio, modulando conseguentemente il dimensionamento degli impianti al fine di massimizzare il beneficio in termini di costo e spesa energetica durante l'intera stagione estiva, estendendo l'analisi al periodo invernale.

Sarebbe altrettanto valido poter simulare a confronto, sempre in regime transitorio, il comportamento di involucri verdi con tipologie diverse di impianti di riscaldamento (radiante, convettivo ad aria, convettivo ad acqua) e di condizionamento (ad aria, radiante) con l'obiettivo di evidenziare eventuali binomi vincenti dal punto di vista della riduzione della spesa energetica complessiva.

Nel dettaglio dell'analisi delle pareti verdi, e con specifico riferimento agli obblighi normativi di schermatura delle pareti esposte a Sud-Est Ovest, sarebbe altresì opportuno verificare l'efficacia delle pareti verdi, a confronto con altre soluzioni tecniche di schermatura (tende, pergole, frangisole), nel controllo della radiazione solare diretta e per la riduzione del carico termico interno per irraggiamento solare.

Non ultimo, tenendo conto delle recenti indicazioni della Direttiva sul consumo energetico degli edifici, sarebbe opportuno condurre una analisi sui costi ambientali ed economici nel ciclo di vita delle soluzioni a verde pensile, attraverso la metodologia LCA, al fine di valutarne da un lato l'impatto ambientale rispetto a soluzioni tradizionali, dall'altro l'effettiva efficacia sotto il profilo dei costi, come richiesto, appunto dalla normativa europea.

5 Riferimenti bibliografici

1. Wong, N.H., et al. (2009). Thermal evaluation of vertical greenery system for building walls, *Building and Environment*, 45 (3) (2010), pp. 663–672
2. J. Sonne, "Evaluating Green Roof Energy Performance", 2006, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (www.ashrae.org). ASHRAE Journal, (Vol. 48, February 2006)
3. Nichaou a. et al, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy and Buildings* 33 (7) (2001) 719-729
4. D. Sailor, T. B. Elley, M. Gibson Exploring the building energy impacts of green roof design decisions – a modeling study of buildings in four distinct climates, *Journal of Building Physics* April 2012 vol. 35 no. 4 372-391
5. G. Kokogiannakis, J. Darkwa A simulation-based framework for a mapping tool that assesses the energy performance of green roofs, EEA 2012: 17-18 March 2012, Singapore
6. Bartfelder, F., Köhler, M., 1987. Experimentelle untersuchungen zur function von fassadenbegrünungen, Dissertation TU Berlin 612S.
7. Perini, K., Ottelé M., Fraaij, A.L.A., Haas, M., Raiteri, R., 2011. Vertical green systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* (2011), doi: 10.1016/j.buildenv.2011.05.009
8. Theodosiou, T. G. (2003). "Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique." *Energy and Buildings* 35(9): 909-917.
9. Alexandri, E., Jones, P., 2008. Temperature decrease in a urban canyon due to green walls and green roofs in di- verse climates. *Building and Environment* 43 (2008) 480- 493.
10. B. |Spolek, H.Craig. Measured Energy Performance Of Greenroofs . Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Awards and Trade Show, Atlanta (2009), p. 15.
11. Desjarlais A.O., Abdi Zaltash A., Atchley J.A., "Thermal Performance of Vegetative Roofing Systems", in Proceedings of the RCI 25th International Convention, March 25-30, 2010. Orlando, Florida
12. Juri Yoshimi, Hasim Altan, THERMAL SIMULATIONS ON THE EFFECTS OF VEGETATED WALLS ON INDOOR BUILDING ENVIRONMENTS Proceedings of Building Simulation 2011:12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.
13. LBNL. 2010. EnergyPlus Engineering Reference. EnergyPlus Manual Documentation Version 5.0, April. The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkely National Laboratory.
14. Ray S., Glicksman L. "Potential Energy Savings of Various Roof Technologies", 2010 ASHRAE
15. Frankenstein S. and Koenig G., "FASST vegetation models" prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Hanover, N.H. : U.S. Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, [2004]
16. Sailor, D.J., "A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs", *Energy and Buildings* 2008
17. Scherba, A., D. J. Sailor, T. N. Rosenstiel and C. C. Wamser (2011). "Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment." *Building and Environment* (DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.06.012).
18. H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1582-1591
19. Keeler, M. & Burke, B. (2009). *Fundamentals of Integrated Design for Sustainable Buildings*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons 15. *The Whole Building Design Guide*, from www.wbdg.org,
20. Perini, K., Ottele, M., Haas. E.M., Raiteri, R. (2011) Greening the building envelope, façade greening and living walls systems. *Open Journal of Ecology*, 1 (1) 1-8.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Prof. Ing. Fabio Fantozzi

Fabio Fantozzi, nato a Pontedera (Pi) nel 1954, laureato in Ingegneria Meccanica con tesi sperimentale dal titolo "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica (1° ciclo- Curriculum: Termofluidodinamica, è attualmente Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC).

Oltre ad un'intensa attività didattica, ha partecipato, in qualità di relatore, a circa 100 tesi di laurea nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ing. Meccanica, Chimica, Civile ed Edile. Questa attività, in qualche caso, lo ha portato non solo a fare da correlatore di studenti di altre Facoltà (Architettura di Firenze e C.L. in Conservazione e Beni Culturali dell'Università di Parma) ma anche ad intraprendere importanti collaborazioni di ricerca con Enti e Università straniere

È attualmente Presidente del Consiglio aggregato dei Corsi di laurea magistrale in Ingegneria idraulica, dei trasporti e del territorio, in Ingegneria edile, in Ingegneria delle Costruzioni civili e in Ingegneria edile e delle Costruzioni civili (laurea interclasse di recente istituzione).

L'attività scientifica si è svolta inizialmente su diverse applicazioni di tubi di calore, su cui aveva lavorato anche durante la tesi (Titolo: "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche").

In particolare, i tubi di calore erano costituiti da termosifoni bifase con applicazioni previste nei campi:

- a) della geotermia
- b) del raffreddamento dell'elettronica, soprattutto di potenza.

Tale attività è stata a lungo svolta in collaborazione con il Moscow Power Engineering Institute di Mosca.

Successivamente, ha cominciato ad interessarsi all'influenza che i parametri termoigrometrici e l'inquinamento esterno hanno sugli ambienti in cui si voglia garantire una corretta conservazione dei manufatti di interesse storico ed artistico, facendo anche parte di gruppi di lavoro, nell'ambito del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per la stesura di progetti di norme sull'argomento

Attualmente, con riferimento alle Direttive Europee sul rendimento energetico in edilizia, svolge la sua attività, principalmente su tematiche di diagnosi energetica, risparmio energetico e riqualificazione di edifici esistenti, tema sul quale è stato chiamato a fare da relatore in diverse occasioni.

Ha lavorato sul tema della "Certificazione Energetica degli edifici", anche nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in cui ha fatto parte di due specifici Gruppi di Lavoro del SottoComitato 1 riguardanti: a) Norme tecniche a supporto della legislazione energetica degli edifici, b) Caratteristiche termiche dei materiali.

L'attività si è poi definitivamente spostata su temi più tipici della Fisica Tecnica Ambientale, in particolare sullo studio di pareti multistrato e ventilate in edilizia, tema con cui ha fatto parte anche di diversi PRIN di ricerca a livello nazionale.

Ha lavorato su tematiche acustiche, con particolare riferimento a barriere acustiche autostradali.

Ha condotto, in qualità di Responsabile, diversi contratti di ricerca con aziende, su tematiche energetiche e ha partecipato come relatore a diversi Convegni e Corsi, sempre in materia energetica, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di un centinaio di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Ing. Carlo Bibbiani

Carlo Bibbiani, nato a Pisa nel 1962, consegue la Laurea in Ingegneria Civile, Sezione Idraulica, presso la Università degli Studi di Pisa. Successivamente consegue il titolo di Dottore di Ricerca in "Genio rurale"

(IX° Ciclo, 1996) presso l'Università di Pisa. Dal 2001 è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DSV) dell'Università di Pisa.

Ha svolto ricerche nei seguenti settori : Energia rinnovabile applicata ai sistemi serra; Compilazione di software volto alla simulazione climatica nelle serre; Studio delle proprietà fisiche ed idrauliche dei substrati per le colture fuori suolo; Simulazione della relazione suolo-acqua nelle colture fuori suolo.

Ha partecipato come relatore a diversi Convegni ,in materia energia rinnovabili applicate alla agricoltura, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di una cinquantina di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Arch. Caterina Gargari

Caterina Gargari, Laureata in Architettura presso la facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento TAeD Tecnologie dell'Architettura e Design di Firenze e il Dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa sulle tematiche della progettazione sostenibile con particolare riguardo alla qualificazione energetica e alla valutazione di impatto ambientale di materiali ed edifici. Ha iniziato la sua attività di ricerca partecipando a numerosi progetti europei sulla progettazione ambientale, il risparmio e l'efficienza energetica, l'utilizzo di energie rinnovabili, con particolare riferimento alla progettazione in clima mediterraneo. Dal 2004 si occupa nello specifico di Valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali da costruzione secondo la metodologia LCA e dal 2006 è membro stabile, nominato da UNI, del tavolo di lavoro CEN TC 350 "Sustainability of Construction Works".