

UNIVERSITA' DELLA CALABRIA



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale

Scuola di Dottorato

Pitagora

Indirizzo

Ingegneria Meccanica

CICLO

XXVII

Green Roofs per il risparmio energetico negli edifici

Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/11 FISICA TECNICA AMBIENTALE

Direttore:

Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'L. Pagnotta', written over a horizontal line.

Supervisore:

Ch.mo Prof. Natale Arcuri

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'N. Arcuri', written over a horizontal line.

Dottorando: Dott. Piero Bevilacqua

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Piero Bevilacqua', written over a horizontal line.

Indice

Capitolo 1. Coperture a verde: aspetti generali.....	1
1.1 Cenni storici	1
1.2 Politiche sui tetti verdi	7
1.3 Tipologie costruttive di tetto verde	10
1.4 Composizione di un tetto verde.....	14
1.5 Normativa in Italia. La UNI 11235.....	29
1.6 Benefici energetici ed ambientali di una copertura a verde	33
1.7 Tipologie stratigrafiche di coperture a verde sul mercato.....	46
Capitolo 2. Il sito sperimentale del Dipartimento DIMEG.....	57
2.1 Progettazione dei settori e delle stratigrafie	57
2.2 Progettazione del sistema di monitoraggio e del sistema DAQ.....	70
2.3 Progettazione dell'impianto elettrico	85
2.4 Realizzazione del sito sperimentale	92
Capitolo 3. Analisi dei dati sperimentali	100
3.1 Attività di ricerca sperimentale condotta sul sito Unical	100
3.1.1 Analisi termica delle stratigrafie.....	100
3.1.2 Effetto delle stratigrafie sulle variabili climatiche interne.....	114
3.2 Attività di ricerca sperimentale sul sito di Lleida	119
3.2.1 Descrizione del sito sperimentale	119
3.2.2 Analisi delle prestazioni termiche della copertura a verde	123
3.3 Misure delle proprietà termiche di substrati di coltivazione.....	133

Capitolo 4. Prestazioni energetiche della copertura a verde	142
4.1 Analisi di letteratura	142
4.2 Simulazione energetica della copertura a verde	168
4.2.1 Generazione del modello del cubo universitario 46C.....	168
4.2.2 Generazione dei templates	179
4.2.3 Simulazione energetica della copertura a verde	182
Capitolo 5. Modellazione termofisica della copertura a verde	193
5.1 Analisi di letteratura dei modelli più significativi.....	193
Modello n°1	198
Modello n°2	210
Modello n°3	219
Modello n°4	224
5.2 Analisi dei modelli analizzati.....	231
5.3 Modello termofisico della copertura a verde	236
5.4 Analisi dei risultati forniti dal modello termofisico.....	239
5.5 Accoppiamento del modello termico con un modello idraulico	251

Introduzione

Negli ultimi anni la crescente consapevolezza dell'insostenibilità del modello attuale di sviluppo economico ha portato verso il nuovo concetto di sviluppo sostenibile. Nel campo energetico e specialmente nel settore edilizio, che è responsabile di rilevanti quote di consumo di energia primaria, la ricerca si sta orientando che fanno uso di sistemi passivi quali i tetti verdi. La sempre più crescente attenzione verso questi sistemi è legata alla capacità di questi di fornire diversi benefici in svariati campi. Tra questi l'abilità di mitigare le isole di calore urbano (UHI), di ridurre i picchi di deflusso idrico legati ad eventi piovosi, la capacità di migliorare la durabilità della vita utile di una copertura ed in particolare di ridurre i consumi energetici legati alla climatizzazione degli edifici.

Da un punto di vista energetico i benefici termici di una copertura a verde hanno ricevuto negli ultimi anni l'attenzione dei ricercatori. La soluzione di una copertura a verde di un edificio è in grado di generare non solo rilevanti risparmi energetici ma di migliorare il confort interno degli ambienti.

La peculiarità di questi sistemi, dovuta alla contemporanea presenza di strati biotici ed abiotici, è che i fenomeni fisici coinvolti nel bilancio energetico conducono ad una riduzione dei carichi per la climatizzazione degli ambienti interni sia in estate che in inverno. D'estate l'effetto combinato dell'ombreggiamento da parte della vegetazione, l'aumentata inerzia termica della copertura e i fenomeni evapotraspirativi permettono la riduzione dei flussi termici entranti nell'edificio attraverso la copertura. D'inverno il tetto verde offre una resistenza termica aggiuntiva che aiuta a ridurre le perdite di calore verso l'ambiente esterno.

Il lavoro svolto si colloca all'interno delle attività del progetto PON01_02543 *“Servizio di gestione integrata e sostenibile del ciclo acqua – energia nei sistemi di drenaggio urbano” che hanno visto la realizzazione di un tetto verde sperimentale*

Si è innanzitutto realizzato un sito sperimentale sulla copertura del cubo 46C, che prevede la contemporanea presenza di quattro diversi settori, di cui tre a verde, ognuno realizzato con opportuni criteri progettuali in modo da poter effettuare confronti tra le

diverse tipologie stratigrafiche ed il tetto tradizionale di riferimento. La composizione stratigrafica di un tetto verde è ben lontana dall'essere standardizzata anche se sono spesso fornite indicazioni tecniche sulla tipologia degli strati da utilizzare si riscontrano le più svariate soluzioni stratigrafiche a verde per cui ogni singolo studio può fornire informazioni utili per costruire un database sulle prestazioni delle coperture a verde. L'innovatività principale della ricerca oggetto di studio sta nella realizzazione di diverse tipologie costruttive su di un edificio reale adibito ad uffici, che permette una quantificazione dell'effetto della presenza del tetto verde sugli ambienti interni. Oltretutto è ben noto che le prestazioni termiche di una copertura vegetata sono fortemente legate alle condizioni climatiche del sito d'installazione, per cui un'analisi in un clima Mediterraneo costituisce un ulteriore passo in avanti nella valutazione delle performances di questa tipologia di sistemi, essendo per tali climi limitati i dati sperimentali a disposizione.

Di seguito sono descritte le fasi di progettazione e realizzazione del sito estensivo sono presentate le prime indagini sperimentali condotte con riferimento a condizioni di riferimento sia estive che invernali che permettono di evidenziare il comportamento termico delle varie stratigrafie in relazione al tetto tradizionale e di quantificare anche l'effetto benefico sulle temperature negli ambienti interni. Sono presentati anche i risultati di un'indagine sperimentale presso l'Università di Lleida in Spagna, frutto di un periodo di ricerca all'estero, condotta su una particolare tipologia di tetto verde commerciale con particolare riferimento all'effetto della vegetazione sul comportamento termico della stratigrafia. Sono state inoltre condotte una serie di esperimenti tramite un apparato sperimentale sviluppato dal centro di ricerca GREA su diverse tipologie di substrato colturale con lo scopo di misurare le principali proprietà termiche di questi che sono del resto difficilmente disponibili.

Successivamente sono state condotte una serie di simulazioni numeriche dell'edificio 46C tramite il software di calcolo *DesignBuilder* che implementa il motore di calcolo *EnergyPlus* ipotizzando diverse soluzioni di copertura a verde. L'obiettivo di tale studio è quantificare i possibili risparmi energetici conseguibili in termini di energia termica per il raffrescamento ed il riscaldamento degli ultimi due piani del cubo. I risultati ottenuti evidenziano come il maggiore risparmio si ottenga nel periodo invernale, mentre le prestazioni estive risultano considerevolmente limitate. D'altro

canto le simulazioni mostrano dei risultati in contrasto con le evidenze sperimentali. La scarsa rilevanza delle prestazioni estive ottenute tramite simulazione è da attribuire principalmente alle limitazioni nella modellazione dei fenomeni fisici da parte del codice implementato nel software di calcolo, che trascura alcuni elementi che potrebbero essere responsabili dei differenti risultati ottenuti rispetto alle indagini sperimentali.

Sulla base di tali osservazioni si è proceduto ad una approfondita analisi sui modelli termofisici delle coperture a verde presenti in letteratura ed è stato sviluppato un nuovo modello che, sulla base dei lavori già presenti in letteratura, presenta alcuni elementi che introducono maggiore accuratezza nella definizione degli scambi termici. Tra i diversi input da fornire al codice di calcolo sviluppato, oltre alle condizioni al contorno esterne (dati climatici dell'ambiente esterno) ed interne (temperatura alla base della stratigrafia) vi è il contenuto volumetrico d'acqua del substrato. Poter disporre di tali valori risulta difficile se non si dispone di un sito sperimentale, soprattutto nell'ottica di una futura applicazione del codice di calcolo sviluppato all'interno di un software di simulazione dinamica. Per questo motivo l'ultima fase della ricerca ha riguardato l'accoppiamento del modello termico con un modello idraulico, di modo che a partire dalle stesse condizioni al contorno il modello idraulico sia in grado di calcolare il valore del contenuto d'acqua da fornire poi al modello termico per la risoluzione del bilancio energetico. Tale operazione è il risultato di un periodo di ricerca all'estero presso l'Istituto di Ingegneria Idraulica ed Ambientale della Facoltà di Ingegneria Civile dell'Università di Belgrado.

Capitolo 1. Coperture a verde: aspetti generali

1.1 Cenni storici

Un tetto verde, noto come *green roof*, *eco-roofs*, *nature roofs*, *living roof* o *roof greening* è un sistema di copertura che prevede l'applicazione di una serie di strati tecnologici che permettono la crescita e lo sviluppo di vegetazione sulla copertura di un edificio, proteggendo al contempo l'integrità della struttura sottostante.

L'utilizzo della vegetazione sulle coperture delle abitazioni risale a tempi più remoti ed ha da sempre accompagnato gli interventi architettonici fino ai giorni odierni. Inizialmente utilizzato per funzioni puramente estetiche, di cui sono un celebre esempio gli antichi giardini pensili di Babilonia, nel corso della storia più recente, più precisamente in seguito alla forte urbanizzazione e industrializzazione della seconda metà dell'Ottocento, il verde pensile è stato considerato dall'uomo via via in maniera sempre maggiore per le sue prestazioni e i suoi molteplici benefici, fino ad ottenere, in epoca attuale, una grande diffusione derivata dalla ricerca e dalla sperimentazione scientifica e la nascita di normative specificamente dedicate a tale settore.

La storia dei tetti verdi risale al 500 A.C. con i *Giardini di Babilonia* ad opera del re Nabucodonosor II.



Fig. 1.1. Ricostruzione grafica dei giardini pensili di Babilonia.

Verosimilmente, i giardini consistevano in una serie di terrazzamenti dal fondo impermeabile, sistemati a gradoni e successivamente riempiti con uno strato di materiale drenante e con un metro circa di fertile terreno di coltura. Ad essi, tramite un ingegnoso meccanismo, veniva assicurato il costante afflusso di acqua necessario a irrigare le

preziose ed esotiche colture impiantatevi, soprattutto alberi e piante ad alto fusto come pini, cipressi e palme [1].

I Vichinghi, già ottocento anni fa, furono i primi a realizzare la copertura verde delle loro fattorie secondo una tecnica che poi si diffuse rapidamente in tutto il nord Europa. I tetti realizzati con zolle erbose, materiali facilmente reperibili, consentivano di proteggere l'abitazione dagli sbalzi termici, dall'aria e dall'acqua, inoltre erano resistenti al vento e al fuoco [3].



Fig. 1.2. Tipiche abitazioni vichinghe

In Italia le vestigia delle più antiche coperture a verde pensile che possiamo trovare risalgono agli etruschi che già dal IV secolo a.C. ornavano i loro monumenti funerari con tumuli di terra su cui venivano piantumate diverse tipologie di vegetazione.

In epoca romana la tecnologia del verde pensile era conosciuta ed applicata, anche se poco si è conservato; esempi caratteristici sono il mausoleo di Augusto (29 a.C.), e il mausoleo di Adriano, odierno Castel Sant'Angelo (130 d.C.) entrambi a Roma ed entrambi ricoperti da strati di terreno nel quale erano piantati numerosi cipressi, simbolo di vita e gloria eterna. Le coperture verdi avevano una importante valenza architettonica anche in numerose ville, quali la villa dell'Imperatore Adriano a Tivoli, la villa Laurentina, descritte e frequentemente citate da Plinio il Giovane in epistole datate tra il I e il II secolo d.C.

Durante il Medioevo e Rinascimento i tetti verdi erano principalmente posseduti da persone economicamente agiate e dai monaci benedettini. Nel periodo Medievale, il verde pensile perde ogni significato di tipo estetico e viene utilizzato principalmente per due particolari funzioni: piantumazione ad orto nei chiostri dei conventi e, nelle cinte murarie, protezione e attutimento dei colpi offensivi da parte dell'artiglieria nemica.

Dal XV secolo, il verde pensile recupera l'aspetto estetico del periodo romano e viene utilizzato principalmente nell'ambito di ville e palazzi, come, ad esempio, la villa di Fiesole di Giovanni de' Medici (1451), Palazzo Piccolomini a Pienza commissionato da

Papa Pio II (1460) e Villa D'Este a Tivoli [2]. Il giardino pensile ha in questo periodo una funzione esclusivamente estetica, artistica ed elitaria: lo troviamo solo nelle ville o nei palazzi signorili.

Opera meravigliosa di questo periodo sono i giardini pensili del Vaticano, in cui la grandiosità del progetto si confonde con l'incomparabile bellezza della realizzazione [4].



Fig. 1.3. Villa rinascimentale dei Medici a Fiesole.

L'ispirazione originale dei tetti verdi contemporanei deriva dall'aspra Islanda, dove i *sod roofs* sono stati usati per centinaia di anni. Lo stile architettonico islandese ha origine da una mancanza di risorse naturali, le tipologie costruttive di abitazioni si basavano sull'utilizzo di materiali locali come zolle e pietra. La tecnologia tradizionale del tetto verde nord europeo prevede la realizzazione del manto di copertura con zolle di terra e erba semplicemente appoggiate ad una struttura lignea con interposta corteccia di betulla. Le popolazioni nord europee predilessero questo tipo di finitura per la semplicità del reperimento della materia prima oltre che per le ottime prestazioni in fatto di coibentazione termica e impermeabilizzazione. Questa soluzione costruttiva era difatti altamente efficiente nell'isolare le piccole unità abitative soggette ad inverni particolarmente rigidi.



Fig. 1.4. Tipici esempi di costruzioni islandesi

Da allora la tecnologia si è notevolmente evoluta lasciando inalterate le caratteristiche e le prestazioni della tradizionale copertura verde.



Fig. 1.5. Costruzioni tipiche del nord Europa

Islanda e Norvegia possono essere definite la patria del tetto verde per il largo uso che se ne fa da secoli, ma la vera e propria diffusione in Europa si è avuta a partire dagli anni Sessanta quando i tetti verdi sono stati sviluppati in Germania e, da questa, ad altri paesi europei.

Il concetto moderno di verde pensile è fatto risalire al 1865, anno in cui l'architetto tedesco Von Rabitz scrisse un trattato sull'impiego del verde pensile come mezzo per raggiungere la salubrità negli ambienti densamente antropizzati, illustrando i vantaggi che possono derivare dall'uso del verde pensile nelle città. Da questo momento in poi, anche se molto lentamente, il verde pensile inizia a percorrere l'itinerario che lo porterà, in tempi recenti, a essere considerato un importante elemento di compensazione e mitigazione urbana, e non solo [4]. Questa importante evoluzione ha avuto origine, nella seconda metà del XIX secolo e nei decenni a seguire, dall'esteso processo di urbanizzazione e industrializzazione che ha portato alla luce in modo evidente il problema della salubrità degli ambienti urbani, sia dal punto di vista della salute fisica che mentale.

Nel 1923 Le Corbusier pubblica i cinque punti sulla base dei quali si fonda il nuovo modo di concepire lo spazio architettonico e di costruire un'abitazione moderna. Uno di questi cinque punti è il tetto-giardino (tetto a terrazza inerbito) che "restituisce" all'uomo il verde, che non è solo sotto l'edificio ma anche e soprattutto sopra. Tra i giunti delle lastre di copertura viene messo il terreno e seminate erba e piante, che hanno una funzione coibente nei confronti dei piani inferiori e rendono lussureggiante e vivibile il tetto, dove si può realizzare anche una piscina. Il tetto giardino è un concetto realizzabile anche grazie all'uso

del calcestruzzo armato: questo materiale rende infatti possibile la costruzione di solai particolarmente resistenti in quanto resiste alla cosiddetta trazione, generata dalla flessione delle strutture (gravate del peso proprio e di quanto vi viene appoggiato), molto meglio dei precedenti sistemi volti a realizzare piani orizzontali (Le Corbusier, *Verso un'architettura*, 1923) [3].



Fig. 1.6. Realizzazione costruttiva secondo il movimento moderno

In Europa la vera e propria diffusione è avuta a partire dagli anni Sessanta quando i tetti verdi sono stati sviluppati in Germania e, da questa, ad altri paesi europei. Esauriti gli spazi al suolo dopo la costruzione selvaggia caratteristica del periodo del secondo dopoguerra, all'inizio degli anni '70, la mancanza di aree verdi urbane ed una parallela crescita della cultura ambientale costringono a volgere l'attenzione alle superfici inutilizzate delle coperture. Le coperture verdi rappresentano un efficace rimedio al consumo di territorio restituendo alle città una superficie filtrante in grado di trattenere dal 50% al 70% dell'acqua piovana e umidificando l'aria, aumentando la superficie verde urbana creando spazi vitali per le piante, gli animali e, soprattutto, l'uomo.

Negli anni 70 la ricerca tecnica sui differenti componenti di una copertura a verde ha subito un notevole sviluppo; sono stati condotti studi sui repellenti anti-radice, membrane impermeabili, strati di drenaggio, substrati a basso peso e sulla vegetazione. Il mercato dei tetti verdi in Germania si è sviluppato rapidamente negli anni 80, con una crescita media annua tra il 15 ed il 20%. Questa crescita notevole è stata promossa grazie alle politiche di incentivazione statali e municipali che hanno garantito contributi economici per ogni metro quadro di tetto verde installato. Altri paesi europei hanno seguito l'esempio tedesco adottando simili strategie di supporto ed inserendo il verde pensile e le pareti vegetate nei propri piani regolatori. La conseguenza diretta è stata lo sviluppo di un nuovo mercato in

Europa riguardo i materiali l'installazione e la manutenzione di soluzioni vegetative. L'Europa vanta trenta anni di ricerca sull'argomento, ma la maggior parte della ricerca è stata svolta in paesi come Germania, Svizzera e paesi Scandinavi e purtroppo non in lingua inglese.

La Germania difatti è stata uno dei primi paesi a dotarsi di normativa specifica riguardo la progettazione, esecuzione e manutenzione di tetti verdi attraverso la "Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen" redatte dall'FLL [5] alla quale fanno riferimento gli esperti del settore di gran parte d'Europa. FLL è la forma breve di Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau o in inglese: the German Landscape Research, Development and Construction Society. I membri del FLL hanno iniziato a sviluppare le linee guida nel 1975 e sono state pubblicate nel 1982 in Tedesco e nel 2002 in inglese.

Oggi giorno i tetti verdi stanno diventando molto popolari negli Stati Uniti. L'introduzione del verde pensile nell'ambiente urbano negli U.S. è avvenuta di recente, guadagnando consenso nelle ultime decadi.

L'industria dei tetti verdi nel Nord America sta da poco iniziando a sviluppare linee guida non ancora comparabili alle FLL. L'associazione ASTM (Association of Standards and Testing Materials) ha rilasciato alcune guide che descrivono le caratteristiche progettuali per i tetti verdi nel nord America includendo le specifiche per i carichi strutturali e una guida per la selezione e manutenzione delle piante. Queste linee guida sono: ASTM E 2397, 2005, ASTM E 2399, 2005, ASTM E 2400, 2006 e ASTM WK 14283.

In Europa l'industria dei tetti verdi ha continuato a crescere ogni anno negli ultimi decenni. In Germania, si stima che il 12% di tutti gli edifici con copertura piana siano coperti da vegetazione, un numero che è in aumento siccome l'industria tedesca dei tetti verdi continua a crescere con un tasso dal 10 al 15% all'anno. Mentre l'industria negli Stati Uniti mantiene un tasso di crescita costante, questa è ancora giovane, con molte aree che necessitano di avanzamento. Molte delle barriere all'espansione dei tetti verdi negli Stati Uniti sono: standard di prestazioni limitati, la mancanza di consapevolezza e di educazione in materia di tetti verdi, costi di installazione elevati, mancanza di politiche governative favorevoli, e limitazione nella caratterizzazione dei benefici di un tetto verde.

Il 21-26% delle aree urbane è rappresentato da tetti, che rappresentano quindi un'opportunità unica per utilizzare questi spazi, spesso inutilizzati, come elemento di compensazione e mitigazione urbana.

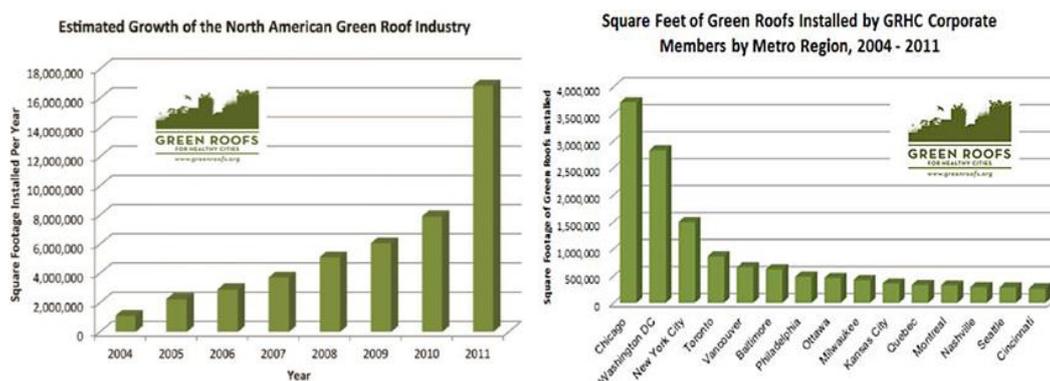


Fig. 1.7. Tasso di crescita dell'industria dei tetti verdi negli U.S.A. e superfici installate

1.2 Politiche sui tetti verdi

In Europa, oltre alla Germania, è possibile trovare diversi esempi di buone pratiche e di politiche nazionali volte all'incentivazione dell'utilizzo di tali tecnologie.

Danimarca: Nella città di Copenaghen è obbligatorio che tutti i nuovi tetti piani o con inclinazione minore di 30°, sia privati che pubblici, debbano essere provvisti di vegetazione. Nel caso di ristrutturazioni, il proprietario dell'edificio può ricevere un sostegno finanziario pubblico per la realizzazione di un tetto verde. La città di Copenaghen ha istituito quattro requisiti per tetti verdi. Gli edifici con tetti verdi dovrebbero essere in grado di soddisfare almeno due dei seguenti effetti:

- Assorbire il 50-80% della precipitazione che cade sul tetto.
- Fornire un effetto di raffrescamento ed isolamento dell'edificio e ridurre la riflessione.
- Contribuire a rendere la città più verde, riducendo l'effetto dell'isola di calore urbana.
- Contribuire ad una variazione architettonica visiva ed estetica che ha un effetto positivo sulla qualità della vita.
- Raddoppiare la vita utile del tetto.

Ad oggi circa 200.000 m² di tetti di Copenaghen sono piani ed almeno 30 edifici presentano vegetazione. Il tasso di crescita dei tetti verdi nei nuovi edifici è stimato in 5.000 m² all'anno ovviamente fortemente legato allo sviluppo della città.

Svizzera: fino al 2005, sono stati realizzati circa 200 progetti per un totale di 10000000 – 15000000 m². Le città di Basilea, Zurigo e Lucerna, per esempio, richiedono che ogni

nuovo tetto piano essere piantato per ogni codice di costruzione. A partire dalla fine del 2005, circa il 20% dei tetti piani erano tetti verdi nella città di Basilea.

U.K.: Londra è in aumento per la sfida, non solo ospitando il recente World Green Roof Congress 2010, ma anche tramite la pubblicazione del “Climate Change Adaptation Strategy” da parte del sindaco Boris Johnson. Questo propone che in tutte le aree della zona centrale delle attività di Londra - che comprende la città di Londra, la maggior parte di Westminster e le parti interne di Camden, Islington, Hackney, Tower Hamlets, Southwark, Lambeth e Kensington e Chelsea - siano tenuti ad avere un tetto verde (e dove non tecnicamente fattibile, un tetto freddo).

A livello mondiale:

Giappone: La città di Tokyo esige che tutte le costruzioni occupanti più di 10.000 m² (929 m²) di terreno siano coperte di vegetali per il 20% della superficie.

Stati Uniti: Sull'esempio del nord Europa, per fronteggiare bisogni molto sentiti quali quello del recupero dell'acqua piovana, del surriscaldamento e della mancanza di spazi aperti si stanno diffondendo le coperture verdi.

L'American Society of Landscape Architects ha promosso i tetti verdi proprio con la realizzazione, nel 2006, di una copertura verde sulla propria sede di Washington DC, visitata da un gran numero di persone. Due strutture rigide sopraelevate sulle due parti del tetto hanno creato due zone dette “onde” orientate in due differenti direzioni e con due diversi microclimi, per i quali sono stati utilizzati diversi suoli ed essenze: una con coltivazione estensiva a base di sedum, e una intensiva e ricca di erbacee perenni. La copertura è stata resa accessibile anche a persone portatrici di handicap, per volontà dei progettisti che lo idearono come un progetto dimostrativo per tutto il Paese. I benefici ambientali di questa copertura sono stati monitorati da un palazzo adiacente di pari altezza ed è risultato che:

- il 75% delle precipitazioni è stato trattenuto in copertura;
- la temperatura sul tetto non ha mai superato i 32 °C, notevolmente inferiore a quella dei tetti in catrame;
- i consumi energetici dell'edificio sono diminuiti, soprattutto in inverno (-10% in inverno e -2-3% in estate).

A New York ci sono già numerosi esempi di coperture verdi:

- Solaire – il primo edificio residenziale con tetto verde e che nel 2004 ha ricevuto il premio per migliore tetto verde dell'anno; una zona accessibile intensiva di 5.000 mq con graminacee, rampicanti e alberi e una inaccessibile di 4.800 mq estensiva a sedum;
- copertura dei Silvercup Studios a Long Island – il più grande tetto verde di New York con 35.000 mq visibili dal ponte di Queensborough e monitorato scientificamente;
- Battery Park City – realizzato nel 2003 con estensione di 9.530 mq che prevede un mix di piantagioni estensive e intensive, all'interno del quale sono stati utilizzati sedum, graminacee, arbusti e alberi. Un sinuoso sentiero di ghiaia offre una vista unica se osservato dall'alto;
- Millennium Tower Residence – con i suoi 39 piani non è visibile dall'alto e nemmeno accessibile ai residenti per cui è realizzato con un sistema estensivo a sedum.

CANADA: In Canada sono ancora pochi gli esempi di coperture verdi in ambito residenziale e commerciale, anche se l'argomento è molto sentito. Le nuove tendenze dell'architettura canadese mirano a migliorare gli spazi urbani rendendo le città più vivibili. Gli evidenti benefici delle coperture verdi in ambito urbano hanno talmente convinto i legislatori di Toronto da indurre il Consiglio della città ad approvare uno statuto con cui si introduce l'obbligo di coltivare, sulla sommità degli edifici di nuova costruzione, dei tetti verdi. Con l'approvazione di questo statuto, Toronto è diventata la prima città del Nord America a imporre la presenza dei tetti verdi. Sono interessati dalle norme in questione tutti gli edifici non industriali con una superficie totale maggiore di 2.000 m²; la percentuale di copertura da dedicare alla coltivazione di tetti verdi, inoltre, cresce all'aumentare delle dimensioni dell'edificio. Nel documento integrale vengono forniti tutti i dettagli tecnici necessari alla progettazione dei tetti, come le impermeabilizzazioni utili a evitare infiltrazioni e percolamenti nei locali sottostanti. Il documento contiene anche indicazioni sul tipo di coltivazione da effettuare, o meglio, oltre a vietare le piante potenzialmente infestanti, si richiede che la copertura vegetale sia progettata in modo che raggiunga l'80% del suo valore definitivo entro tre anni dal completamento.

Infine in Italia un esempio rilevante viene da Bolzano e dal gruppo di lavoro Casa Verde.

BOLZANO: Alla tecnologia delle coperture a verde è stato finalmente attribuito, a diversi livelli, il ruolo di importante ed efficace strumento di mitigazione e compensazione ambientale. Il gruppo di lavoro “Casa verde – Grünes Haus” coordina l’esperienza e l’attività di enti che nel corso degli anni si sono distinti nel campo della ricerca e applicazione del verde pensile. Scopo del gruppo di lavoro è di operare coordinando le proprie attività nella sperimentazione tecnico/scientifica per l’elaborazione di modelli atti a definire le prestazioni delle coperture a verde negli ambiti della gestione sostenibile delle acque meteoriche, della tutela della biodiversità, dell’efficienza energetica, dell’inquadramento paesaggistico, della compensazione degli impatti e della informazione e formazione. Obiettivo prioritario del gruppo di lavoro è anche la redazione di linee guida per la progettazione, esecuzione, manutenzione e collaudo delle coperture a verde che possano utilmente integrare e sviluppare i capisaldi forniti dalla vigente norma UNI 11235 tenendo conto della pratica operativa, delle situazioni climatiche e dei progressi della ricerca. I modelli di certificazione predisposti da “Casa verde – Grünes Haus” saranno, in un secondo tempo, a tutti gli effetti integrati nelle procedure di certificazione di CasaClima.

1.3 Tipologie costruttive di tetto verde

Un tetto verde è un sistema di copertura che prevede l’applicazione di una serie di strati tecnologici che permettono la crescita e lo sviluppo di vegetazione sulla copertura di un edificio. Nel settore del verde pensile vengono comunemente distinte due categorie di sistemi:

- ✓ Inverdimenti Intensivi
- ✓ Inverdimenti estensivi

Anche se la normativa tedesca FLL prevede un’ulteriore categoria, ossia gli *inverdimenti semi-intensivi*.

La suddivisione è di particolare importanza perché le due soluzioni hanno caratteristiche d’uso e campi d’impiego diversi. Le differenze tra i due sistemi, come previsto dalle normative, si riferiscono essenzialmente al livello di manutenzione richiesto dalla struttura

a regime mentre non sono direttamente legate agli spessori della stratificazione o alla dimensione della vegetazione.

Il *verde estensivo* è caratterizzato da spessore ridotto e peso contenuto, basso fabbisogno nutritivo ed energetico, costi relativamente bassi per l'installazione e la gestione.

In virtù della leggerezza del pacchetto dovuta allo scarso spessore del substrato, che va da un minimo di 3 cm ad un massimo 15 cm circa, e della semplicità di installazione risulta applicabile sia ad edifici di nuova costruzione sia ad edifici esistenti con portate della copertura limitate. Il peso di sovraccarico di un rivestimento a verde estensivo va dai 30 ai 100 kg/mq (a capacità massima di acqua). È particolarmente indicato per realizzare l'inverdimento di coperture molto estese, grazie anche al costo contenuto, la scarsa manutenzione, la necessità di irrigazione solo in casi di prolungata siccità.

L'altezza dello strato vegetale arriva ad un massimo di 25 cm e la miscela di essenze conferisce al manto un effetto multicolore molto naturale che si trasforma a seconda della stagione. Il principio è quello di realizzare un tetto verde che necessita di poca manutenzione o intervento umano, una volta a regime le specie vegetative generalmente utilizzate sono il sedum, le piante perenni e le erbacee, in quanto hanno elevata capacità di autopropagazione e resistenza agli sbalzi termici ed idrici, ed hanno quindi necessità minime. Le piante adattate a climi estremi sono spesso un'ottima scelta e possono non richiedere sistemi di irrigazione permanenti. La vegetazione si deve adattare all'elevata aridità, al caldo e al contempo deve essere capace di superare gli inverni umidi. Negli estensivi l'impiego di specie selvatiche autoctone è interessante dal punto di vista ecologico poiché sono molto adatte al tipo di ambiente, forniscono habitat e sono un nutrimento per farfalle insetti e volatili. Questo inverdimento è utilizzato particolarmente su coperture con limitate possibilità di carico, di medie e grandi dimensioni (es. capannoni commerciali ed industriali) o comunque su coperture piane, in sostituzione delle zavorre in ghiaia. In generale, a causa del loro peso leggero, i sistemi estensivi richiedono una quantità minima di supporto strutturale aggiuntivo, migliorando quindi il loro costo-efficacia in caso di retrofitting una struttura esistente. Ampi tetti verdi sono stati realizzati su tetti con pendenze di 30° o superiori. La pendenza determina se il tetto avrà bisogno di ulteriore sostegni per reggere il carico del terreno di coltura e degli altri strati del sistema vegetativo. Tetti ripidi possono trattenere quantità minori di acqua piovana rispetto ad un tetto piano di superficie equivalente.

Questa soluzione si rivela idonea per coperture non praticabili e consente di inverdire qualunque tipo di copertura:

- copertura piana;
- copertura inclinata;
- copertura curva;

su qualunque tipologia di edificio:

- residenziale;
- commerciale;
- capannoni industriali;
- uffici pubblici, scuole, musei, uffici;
- parcheggi e autorimesse;

oltre che nel campo delle infrastrutture, arredo urbano e verde pubblico. Questo tipo di copertura spesso non è calpestabile e non può essere coltivata, ciò ne può rappresentare un limite.

I vantaggi di una copertura a verde estensivo sono:

- riduzione delle escursioni termiche;
- protezione della copertura;
- risparmio energetico;
- maggiore isolamento acustico;
- elevata ritenzione idrica;
- trattenimento delle polveri.

Il costo del verde estensivo è di circa 50 €/mq, inferiore a quello di una copertura piana praticabile con finitura in grès.



Fig. 1.8. Esempi di coperture a verde estensive.

Il *Verde intensivo* è caratterizzato da spessore e peso importante, alto fabbisogno energetico per la condotta, costi relativamente elevati sia d'installazione sia di gestione. Lo strato colturale può variare tra 15-20 cm se è di tipo leggero oppure tra 20-40cm se di tipo

pesante, superando talvolta anche i 50 cm, il peso varia da 220-1200 kg/m². In determinati casi, in cui si ha la necessità di impiegare alberature a sviluppo maggiore, il substrato può raggiungere i 100 cm. I limiti sono costituiti dalla statica dell'elemento portante che deve essere in grado di garantire prestazioni portanti. Le specie vegetali generalmente impiegate non hanno limiti particolari, sono spesso erbacee prative, perenni, cespugli, e anche grandi alberi e arbusti. Questa tipologia richiede una manutenzione frequente, regolari apporti nutritivi ed assidua alimentazione idrica; la fruibilità è massima e sono adatte tutte le piante capaci di resistere al vento e al freddo invernale. Vi sono sempre delle piante "tabù" che non possono essere adoperate in nessuna tipologia di tetto verde a causa dei loro rizomi aggressivi o sviluppo radicale troppo vigoroso, o che necessitano di elevata disponibilità di elementi nutritivi; esempi sono le cosiddette specie pioniere, quali typha, betulla, salici, fichi, pioppi, o livello spinose e le specie bambù di grandi dimensioni. Per entrambe le tipologie di inverdimento la vegetazione vive sempre in condizioni ben differenti da quelle su terra per la mancanza di radici in strati profondi, radicazione limitata, pericolo di ristagno idrico, soprattutto per pendenze ridotte, temperature estreme soggette a forti oscillazioni e maggiore esposizione al vento. Quest'ultimo in particolare influenza l'essiccamento, l'intensità delle sollecitazioni meccaniche, la presenza di umidità dell'aria e formazione di rugiada. I tetti verdi intensivi quindi sono più pesanti e richiedono un maggiore investimento iniziale e una manutenzione più a lungo termine rispetto ai sistemi estensivi. Essi richiedono generalmente un sostegno strutturale maggiore per accogliere il peso del substrato colturale supplementare e l'eventuale uso pubblico. I sistemi intensivi hanno anche bisogno di sistemi di irrigazione che possono utilizzare l'acqua piovana catturata dal tetto o da un'altra fonte. Sono spesso realizzati come fonte di risparmio energetico e per fornire un ambiente gradevole per gli occupanti dell'edificio.



Fig. 1.9. Esempi di coperture a verde intensive.

Il costo per la messa in opera di un tetto verde, varia tra i 40 ed i 130 euro a metro quadro per un prato. Le spese, ovviamente, aumentano per la realizzazione di un giardino pensile con piante. La soluzione a verde intensivo prevede maggiori costi di investimento e di manutenzione.

1.4 Composizione di un tetto verde

Sebbene le tipologie e le proprietà degli strati da utilizzare in una copertura a verde siano definite da apposite normative, si riconosce che comunemente a livello internazionale un tetto verde è composto dai seguenti strati:

✓ Strato antiradice

Nella progettazione di una copertura verde non va sottovalutata la componente aggressiva degli apparati radicali, pena il fallimento del sistema di inverdimento. La radice svolge contemporaneamente due azioni:

- disgregazione meccanica degli elementi costruttivi;
- alterazione e dissoluzione chimica degli elementi costruttivi.

La conseguenza di queste due azioni combinate è la perforazione della guaina impermeabilizzante e la penetrazione negli strati sottostanti causando pericolose infiltrazioni all'edificio. Il rischio che si verifichi questo problema viene notevolmente contenuto grazie all'uso di barriere nella cui composizione chimica sono state inserite delle sostanze repellenti nei confronti delle radici. Un'alternativa allo strato antiradice è rappresentata dalla lamina metallica che, in strati molto sottili, può essere inserita nel pacchetto. Bisogna notare che, però, anche i materiali trattati con sostanze anti-radice possono risultare vulnerabili nei punti di giunzione qualora questi ultimi non dovessero essere realizzati a regola d'arte, per esempio con l'utilizzo di saldature che ne alterano le proprietà. Per questo motivo è necessario che i materiali utilizzati per lo strato antiradice siano certificati e abbiano superato dei test di resistenza come previsto dalla normativa UNI. L'alternativa all'inserimento di uno strato anti-radice è la scelta di essenze vegetali che non sviluppino eccessivamente la struttura ipogea, ma al momento non esiste una classificazione ufficiale di essenze con tali caratteristiche.

✓ **Stato impermeabile**

La guaina impermeabilizzante è uno dei componenti fondamentali del pacchetto di copertura a tetto verde. Essa protegge l'edificio dalle infiltrazioni e, a sua volta, è protetta dal pacchetto verde soprastante nei confronti degli sbalzi termici che ne deteriorerebbero in poco tempo la continuità. È necessario che l'apparato radicale non raggiunga mai la guaina impermeabilizzante trasformando il bitume in nutrimento per le piante e danneggiando la struttura del tetto. Spesso su mercato si trovano pellicole impermeabili resistenti alle radici conformi alle direttive, che svolgono contemporaneamente i due ruoli di antiradice ed impermeabile.

✓ **Strato di drenaggio**

Il drenaggio fa parte degli strati fondamentali per il corretto funzionamento di una copertura verde. Esso va realizzato secondo un'attenta progettazione che si differenzia a seconda delle diverse tipologie di tetto verde e a seconda della morfologia della copertura su cui viene installato. Ha la funzione di:

- drenare l'eccesso di acque meteoriche e di irrigazioni;
- fornire un'adeguata riserva idrica per le piante;
- fornire la corretta aerazione all'apparato radicale;
- proteggere la guaina impermeabilizzante;
- fungere da supporto per parti pavimentate.

Fra tutte le funzioni svolte dallo strato di drenaggio, ugualmente importanti, quella di aerazione dell'apparato radicale spesso viene penalizzata da una scorretta progettazione che porta ad un malfunzionamento dell'intero sistema.

Per lo strato di drenaggio possono essere utilizzati due tipi di materiale:

- materiale incoerente; questo tipo di composizione per gli strati drenanti rappresenta una soluzione assai utilizzata nel passato ma oggi obsoleta;
- pannelli preformati: offrono elevate prestazioni in spessori e pesi contenuti.

I pannelli preformati, a confronto con il materiale sciolto, risultano più performanti per:

- spessori ridotti;
- pesi contenuti;
- migliore gestione del rapporto aria/acqua;
- maggiore accumulo idrico;

- maggiore resistenza meccanica;
- maggiore mantenimento della funzionalità nel tempo;
- ottima tenuta anche in caso di presenza massiccia di radici.

All'interno del pannello preformato l'acqua può accumularsi in interstizi appositamente calibrati modellando il pannello che può essere posizionato sia su una superficie piana, sia su una superficie inclinata. Il dimensionamento degli strati drenanti viene progettato in base a:

- caratteristiche pluviometriche del luogo;
- pendenza della falda;
- posizione, quantità e portata degli scarichi;
- tipologia di vegetazione impiantata.

Una funzione dello strato d'accumulo è fornire una riserva d'acqua a disposizione degli apparati radicali nei momenti di maggiore stress idrico e in assenza di un apposito dispositivo di accumulo. L'altra funzione è quella di proteggere l'impermeabilizzazione sottostante da danni e sollecitazioni meccaniche derivanti dal calpestamento. L'aspetto della protezione meccanica è significativo soprattutto durante le fasi di cantiere di posa del verde pensile, quando lo strato di tenuta resterebbe scoperto.

✓ **Strato filtrante**

Lo strato filtrante svolge la funzione di barriera fra il substrato e il drenaggio impedendo che del materiale possa penetrare nello strato drenante limitandone o compromettendone l'efficienza. Il materiale, una volta penetrato negli strati drenanti, potrebbe favorire l'attecchimento di vegetali all'interno del drenaggio oppure andare ad ostruire gli scarichi causando infiltrazioni e il blocco dell'intero sistema di inverdimento. Per la realizzazione della barriera filtrante è necessario impiegare materiali che presentino le seguenti caratteristiche:

- resistenza alla trazione;
- resistenza al taglio;
- resistenza alla perforazione;
- permeabilità alla pressione del vapore;
- giusto grado di permeabilità all'acqua.

Il grado di permeabilità all'acqua è un fattore molto importante per mantenere nel substrato l'umidità necessaria al funzionamento dell'impianto verde, anche in caso di prolungata siccità ed in assenza di impianto di irrigazione. Se si realizzano separatamente i tre strati - substrato, filtrante e drenante essi con il tempo si consolidano in un unico monostrato, in cui vanno peggiorando le funzioni di drenaggio e permeabilità al vapore. In assenza di permeabilità al vapore può crearsi una situazione di anaerobiosi all'interno degli strati drenanti, condizione dannosa per lo sviluppo dell'apparato radicale.

✓ **Substrato colturale**

Per la composizione del substrato per giardini pensili non è possibile utilizzare gli stessi materiali che si utilizzano nei giardini tradizionali a terra. Il normale terreno di coltivo non si presta per la realizzazione del verde pensile.

Per consentire il corretto sviluppo e la manutenzione dello strato vegetale alle differenti condizioni climatiche, il substrato deve possedere le seguenti caratteristiche:

- elevato potere drenante anche in condizioni di massima saturazione idrica;
- corretto rapporto fra aria e acqua anche in condizioni di massima saturazione idrica;
- una buona capacità di trattenere l'acqua;
- ridotto peso anche in condizioni di massima saturazione idrica;
- stabilità della struttura chimica e fisica;
- ottime proprietà ingelive;
- ottima resistenza alla compattazione nel tempo;
- capacità di eliminare la formazione di fango in condizioni di massima saturazione idrica;
- essere privo di semi;
- idonea composizione chimica in merito al grado di salinità, al pH, alla capacità di assorbimento e al potere tampone;
- presenza di minerali in rapporto alla presenza di materia organica a seconda della tipologia di inverdimento.

Naturalmente le proprietà del substrato variano a seconda delle caratteristiche climatiche del luogo di posa e della sua esposizione (in caso di coperture inclinate). I rischi cui si incorre, anche a breve tempo, nel caso di scelta del substrato sbagliato sono:

- compattamento del substrato;
- squilibrio nel rapporto fra acqua e aria;
- asfissia dell'apparato radicale con conseguente collasso del sistema di inverdimento;
- aumento del peso in condizioni di massima saturazione idrica;
- diminuzione del drenaggio;
- alterazione delle sostanze nutritive.

Tutte queste eventualità sviluppano delle situazioni patologiche nella stratigrafia dell'inverdimento fino a comprometterne l'esistenza.

I materiali che si utilizzano per la realizzazione della parte minerale del substrato sono sempre materiali di origine vulcanica:

- lava;
- pomice.

Questa componente del substrato costituisce, a seconda dei casi, dal 50 al 90% del volume dello strato stesso. In alcuni casi si fa uso anche di laterizio riciclato proveniente dalle demolizioni delle coperture in quanto materiale granulare prodotto, a sua volta, con laterizi selezionati, frantumati, arrotondati e vagliati; questo materiale presenta caratteristiche pari o superiori a quelli di origine vulcanica e il vantaggio aggiuntivo di salvaguardare l'ambiente col riciclo di materiali edili pregiati. Fra un substrato per giardini tradizionali ed uno per giardini pensili c'è una profonda differenza: i terricci tradizionali sono quasi totalmente composti da elementi organici quali torba e compost; al contrario, un substrato per giardini pensili è composto principalmente da sostanze minerali opportunamente frantumate, quali laterizi, lapillo, pomice, ecc., al fine di soddisfare i requisiti necessari per la realizzazione di un tetto verde in merito a peso, spessore, manutenzione, equilibrio delle sostanze chimiche, durata, ritenzione idrica, drenaggio, aerazione, stabilità nel tempo, resistenza alla compressione e all'erosione. Il substrato per verde pensile ha un costo iniziale sicuramente superiore rispetto ad un substrato tradizionale, ma tale investimento iniziale viene assorbito nel tempo dai minori costi di manutenzione e da una maggiore durata dell'impianto.

Il substrato ha spessori e pesi differenti a seconda del tipo di verde che si intende realizzare in coperture e va:

- da 12-14 kg/mc per substrati dello spessore di 8 cm per il verde estensivo;
- a circa 600 kg/mc per substrati dello spessore di 50-60 cm per giardini pensili.

✓ **Vegetazione**

In teoria non esistono limiti nella scelta delle essenze da utilizzare su un tetto verde. In pratica, occorre tener presente che obiettivo di una copertura a verde estensivo è quello di offrire numerosi vantaggi a prezzi relativamente contenuti.

I benefici che offre un tetto verde dipendono strettamente dall'essenza impiantata. Spesso ricreare le condizioni climatiche per una certa essenza richiede costi non più vantaggiosi, per cui occorre scegliere le essenze vegetali che, per loro natura, sono più affini alla zona climatica e al contesto in cui vengono inseriti.

Pertanto, si è ristretto il panorama delle essenze idonee alla realizzazione di un verde pensile estensivo limitatamente a quelle che riescono a massimizzare i vantaggi proporzionatamente a spese comunque contenute.

Le condizioni che influiscono sulla vegetazione di una pianta si possono riassumere in:

Luce. Partendo dal presupposto che la luce è la condizione necessaria per la fotosintesi e che sicuramente su un tetto non mancherà, bisogna spostare l'attenzione sul fatto che alcune specie richiedono un'insolazione diretta, mentre altre prediligono un'illuminazione diffusa senza esposizione diretta ai raggi solari; pertanto lo studio della morfologia della copertura, dell'orientamento e della proiezione delle ombre portate dagli edifici circostanti risulta fondamentale nella scelta dell'essenza più idonea. Una prima distinzione può essere fatta fra:

- piante eliofile
- piante sciafile.

Un altro fattore da tenere in considerazione è la velocità di crescita: se si mescolano essenze con differenti velocità di crescita bisogna porre attenzione al fatto che alcune piante potrebbero poi ombreggiarne altre, sbilanciando lo sviluppo della composizione;

Acqua. Altro elemento che concorre allo sviluppo della pianta. Per far fronte a lunghi periodi di siccità molte piante, le crassulacee per esempio, hanno sviluppato degli adattamenti che consentono loro di sopravvivere. Queste essenze sono indicate per la

realizzazione di coperture verdi in climi secchi senza dover ricorrere a delle annaffiature, riducendo così drasticamente i costi di gestione e di manutenzione. Uno dei motivi per cui si realizzano coperture verdi è quello di trattenere la pioggia in copertura alleggerendo il carico delle falde e umidificando l'aria con un processo evapotraspirativo in copertura che consente di avere sempre a disposizione una riserva idrica. Per assicurare il giusto apporto fra aria e acqua concorrono tre fattori:

- la granulometria del substrato,
- la qualità del sistema di accumulo e drenaggio,
- la presenza e la tipologia di sistemi di irrigazione;

Temperatura. Le escursioni termiche sono fonte di stress per l'impianto di inverdimento. Se la zona climatica contempla temperature al di sotto dello zero che portino al congelamento della riserva idrica occorre orientarsi verso essenze in grado di sopravvivere in stato di quiescenza, proprietà non comune a tutte le specie vegetali. Se, al contrario, la zona climatica contempla lunghi periodi di siccità è l'aridità che, al pari del gelo, causa stress alle piante fino a farle morire a causa della drastica riduzione della capacità di assorbimento dell'anidride carbonica. Occorre, in questo secondo caso, orientarsi su specie in grado di utilizzare in maniera efficiente l'acqua accumulata mantenendo bassa la vitalità come le piante classificate C4 che presentano un adattamento ottimale a tollerare le alte temperature e una buona vitalità anche nei climi secchi.

Il microclima della copertura e la composizione del substrato influiscono notevolmente sulla scelta della giusta essenza soprattutto per quanto riguarda:

- pH,
- salinità,
- nutrienti.

Altro elemento in grado di condizionare le scelte dell'essenza più idonea riguarda la competizione interspecifica, soprattutto in ambienti con risorse limitate quali una copertura; l'effetto è quello di veder crescere solo le specie più competitive ai danni delle altre e vedere vanificati gli sforzi di inverdimento del tetto. Al fine di evitare questo inconveniente si consiglia di ricreare in copertura le stesse associazioni di vegetali già esistenti in natura con l'accortezza di ricreare anche le condizioni il più possibile simili a quelle naturali; l'alternativa è testare preventivamente le combinazioni. Altri elementi di cui è opportuno prendere nota sono:

- la vulnerabilità ai patogeni;

- la capacità di autopropagazione;
- la resistenza al calpestio [3].



Fig. 1.10. Tipici strati di una copertura a verde.

Nel caso di un edificio di nuova costruzione, è necessario stabilire prima la tipologia di copertura verde per poi procedere al corretto dimensionamento delle strutture.

Al contrario, nel caso di un edificio esistente, prima di scegliere la tipologia di copertura verde preferita (intensiva, estensiva o giardino pensile) occorre verificare che essa sia compatibile con la portata dell'ultimo solaio dell'edificio e con le strutture portanti.

Gli elementi da verificare sono:

- ✓ la portata del solaio destinato a tetto verde, comprese le valutazioni dei carichi accessori e accidentali;
- ✓ la forza del vento e le direzioni prevalenti;
- ✓ la localizzazione e la portata dei punti di scarico delle acque;
- ✓ l'identificazione dell'area adibita a tetto verde;
- ✓ la verifica delle pendenze;
- ✓ la verifica della qualità e dello stato di conservazione della guaina impermeabilizzante;
- ✓ l'esistenza e la posizione degli allacciamenti idrici per l'innaffiamento della vegetazione;
- ✓ la collocazione di sistemi di sicurezza e anticaduta per gli interventi di manutenzione del verde.

Anche su un tetto inclinato si può creare uno spazio ricco di vita che porti benefici agli edifici sottostanti (isolamento termico, acustico e dalle radiazioni elettromagnetiche) e alla città nel suo complesso (abbattimento dell'inquinamento e vista più gradevole).

Grazie ad un sistema di trattenuta che garantisca al substrato e alla vegetazione un sostegno sicuro in minimi spessori è possibile realizzare tetti verdi fino ad una inclinazione di 45°.

Sulle coperture inclinate si possono realizzare tetti verdi con il sistema estensivo ma anche giardini pensili veri e propri purché la pendenza non superi i 10-12° e si utilizzi un sistema intensivo leggero.

In questo caso si applica la soluzione a “tetto rovescio”, con peso complessivo saturo fino a circa 230 kg/mq, compresi sistema di trattenuta e strato di isolamento sopra il manto impermeabile.

Se la struttura della copertura è in calcestruzzo si può realizzare un drenaggio in ghiaia ma occorre proteggere il manto impermeabile alla base del muretto di contenimento in calcestruzzo con del polistirene estruso, sul quale, appunto, viene steso il drenaggio in ghiaia.

In caso di realizzazione di giardini pensili con drenaggio alla base della falda ed un elemento di separazione per il trattenimento del pacchetto alla base di questa si può applicare un sistema di verde inclinato intensivo con drenaggio in ghiaia ed elemento di separazione in tufo.

Più comuni sulle coperture con inclinazione superiore ai 15° sono i tetti verdi estensivi dotati di opportuno sistema che eviti lo scivolamento del substrato.

Particolare attenzione progettuale va messa nello studio del dettaglio di bordo contenente l'ispezione dello scarico al quale convergono le tubazioni drenanti. Nel caso di copertura lignea occorre prevedere un drenaggio alla base della falda e un rivestimento impermeabile del travetto di bordo in legno. Nel caso di coperture con bassa inclinazione su cui non si realizza un sistema di trattenuta del substrato si può adottare una soluzione con drenaggio in ghiaia ed elemento di separazione in tufo che isola rispetto al terriccio soprastante.

Esistono diverse tipologie di verde pensile da realizzare sulle coperture degli edifici e per ognuno vi sono diverse soluzioni applicative. Comunemente vengono classificate come:

- ✓ Copertura isolata (tetto caldo);
- ✓ Copertura isolata rovescia;
- ✓ Copertura non isolata;

- ✓ Copertura isolata e ventilata (tetto freddo);
- ✓ Copertura semirovescia o sandwich.

Copertura isolata (tetto caldo)

Tale modello di chiusura superiore orizzontale prevede l'inserimento dello strato termoisolante tra l'elemento di tenuta e gli strati sottostanti. In genere tale strato è caratterizzato da conducibilità termica ridotta e supporta direttamente il manto impermeabile. Tale genere di copertura contribuisce a soddisfare le esigenze di benessere igrotermico nella stagione fredda, limitando le dispersioni termiche e collabora al mantenimento delle temperature interne nel periodo estivo, bloccando il flusso di calore entrante. Tale soluzione inoltre, si configura come una efficace protezione dell'elemento portante dagli sbalzi termici, migliorandone la durabilità. Poiché la presenza del manto impermeabile all'estradosso della copertura aumenta il rischio di condensazione nell'isolante, risulta necessaria la presenza di uno strato di barriera al vapore. La posizione dello strato isolante, infatti, bloccando la maggior parte del flusso di calore che attraversa la copertura, provoca forti innalzamenti della temperatura nel manto impermeabile, che in superficie può raggiungere anche 80 °C, con rischio di fessurazione; pertanto l'adozione del modello è subordinata alla verifica della resistenza a deformazione [6]. La figura 1.11 di seguito riportata rappresenta la sezione di un generico tetto caldo, senza copertura verde, con la descrizione degli strati funzionali che lo caratterizzano.

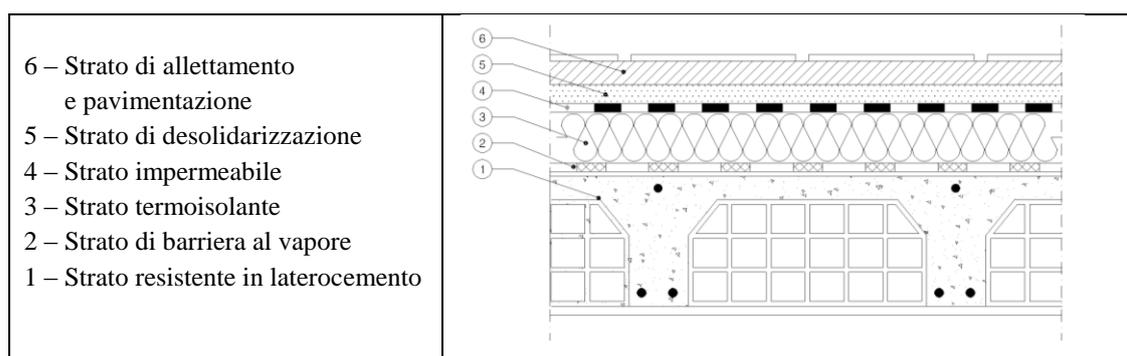


Fig. 1.11. Esempio di copertura isolata

In figura 1.12 è rappresentata invece la stratigrafia di una copertura isolata con verde pensile, in cui la vegetazione può occupare l'intera superficie o integrarsi con zone per il soggiorno e la circolazione pedonale. In tale configurazione è possibile mantenere la stessa stratificazione funzionale della copertura semplice con la sola aggiunta degli strati necessari per la presenza della vegetazione, con uno spessore di substrato di 30 cm per

vegetazione bassa o manti erbosi, ma può arrivare fino al metro per piccoli alberi o arbusti [6].

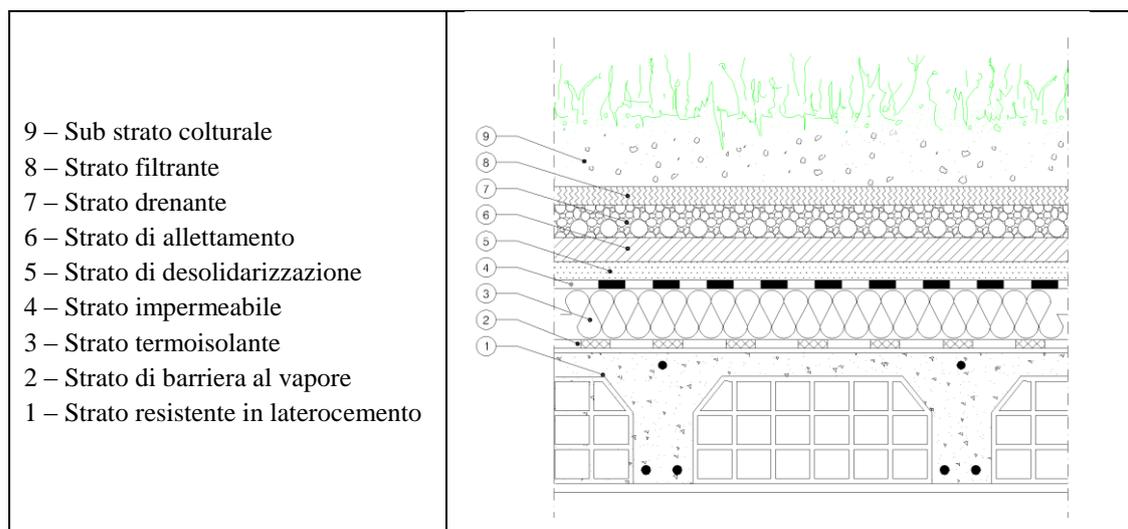


Fig. 1.12. Esempio di copertura isolata con verde pensile.

Copertura isolata rovescia

Tale modello inserisce uno strato di isolante nella successione degli strati funzionali contrariamente alla disposizione tradizionale sopra descritta, da cui la definizione di “rovescia”. L’isolante infatti si colloca al di sopra del manto impermeabile e, non coperto dallo strato di tenuta, provoca l’infiltrazione dell’acqua fino al manto impermeabile. Nel funzionamento estivo, la circolazione dell’acqua al di sotto dell’isolante collabora al raffrescamento degli ambienti sottostanti. La stessa circolazione delle acque e il ristagno di umidità penalizzano peraltro il rendimento termico dell’isolante in inverno (coefficiente di conducibilità termica meno favorevole). Il modello perciò può essere preferito nei climi caldi, anche per la protezione che offre allo strato di impermeabilizzazione dagli sbalzi termici, mantenendo temperature vicino a quello dello strato portante. È inoltre necessario uno strato di desolidarizzazione di separazione per evitare che il manto impermeabile sia sollecitato dai movimenti differenziali dei pannelli isolanti. Il modello permette l’eliminazione della barriera al vapore, la cui funzione è assolta direttamente dallo strato di tenuta, ossia l’impermeabilizzante, come illustrato di seguito (fig. 1.13). Poiché l’isolante è maggiormente esposto alle precipitazioni e agli agenti atmosferici deve essere idrorepellente e con requisiti di resistenza superiori del 10% rispetto ai valori usuali [6].

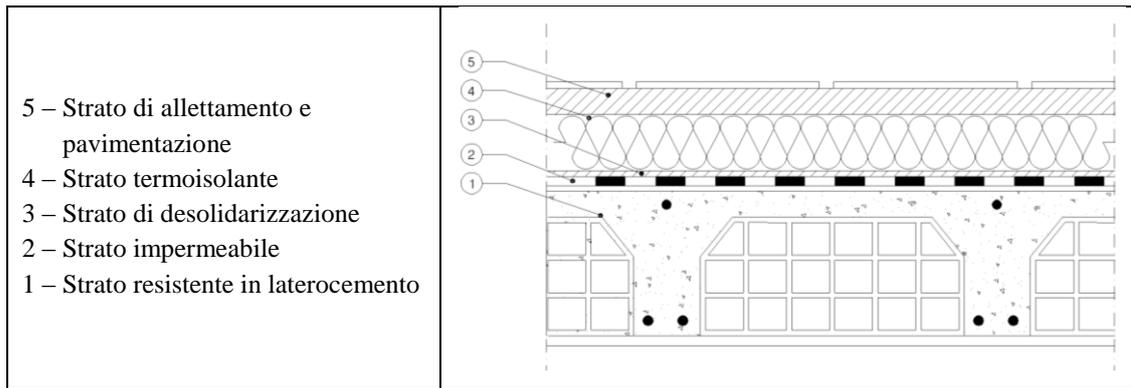


Fig. 1.13. Esempio di copertura isolata rovescia.

La figura seguente mostra come tali tetti possono ricevere direttamente, interponendo uno strato filtrante a protezione dell'isolante, gli strati che caratterizzano il verde pensile. I pannelli isolanti, infatti, costituiscono una ulteriore protezione per l'impermeabilizzazione contro il rischio di perforazione e di aggressione chimica delle radici [6].

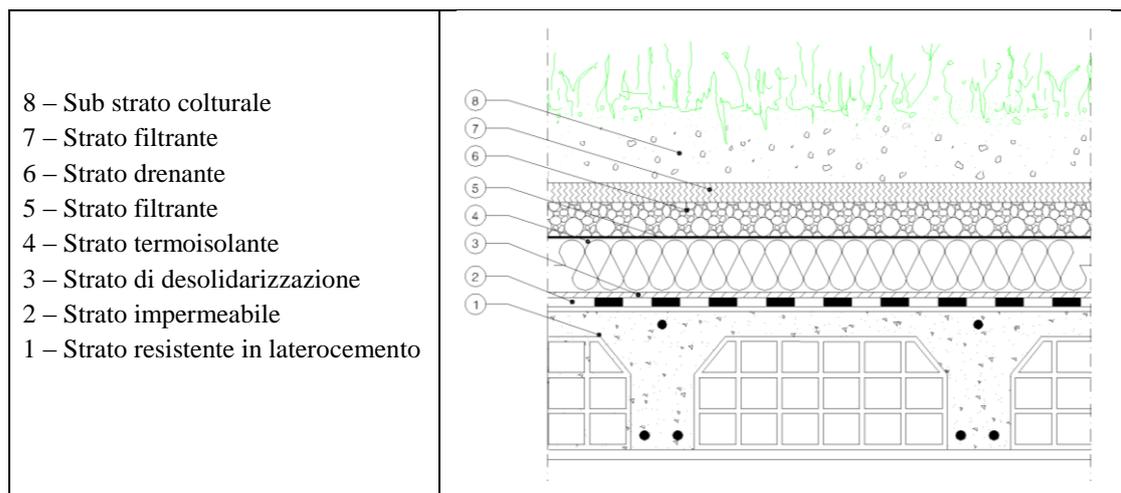


Fig. 1.14. Esempio di copertura isolata rovescia con verde pensile.

Copertura non isolata

L'applicazione del modello della copertura senza strato isolante è oggi molto rara e riservata esclusivamente a grandi spazi pubblici aperti, come tribune o mercati, o aree a destinazione industriale per i quali non è necessario uno specifico controllo delle temperature interne. Lo strato impermeabile è posizionato direttamente al di sopra dell'elemento resistente, evitando così l'impiego di una barriera al vapore, la cui funzione è direttamente assolta dalla membrana impermeabile. Lo strato resistente, d'altra parte, è soggetto a variazioni dimensionali che possono sollecitare in maniera eccessiva il

rivestimento impermeabile a esso associato; pertanto si preferisce inserire uno strato di desolidarizzazione tra i due [6]. La figura 1.15 riporta l'analisi stratigrafica della semplice copertura non isolata:

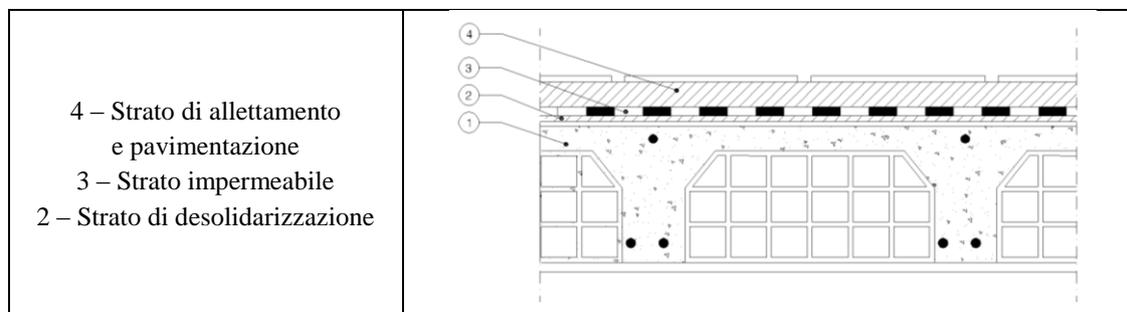


Fig. 1.15. Esempio di copertura non isolata.

Nel caso di applicazione di verde pensile su copertura semplice non isolata, figura 1.16, l'impermeabilizzazione deve essere protetta dalle aggressioni meccaniche e chimiche da uno specifico strato antiradici in asfalto sintetico. Al di sopra di esso è possibile inserire gli strati drenanti e filtranti che precedono la terra vegetale. Lo spessore del substrato può partire da 30 cm e arrivare fino al metro, in funzione del tipo di vegetazione [6].

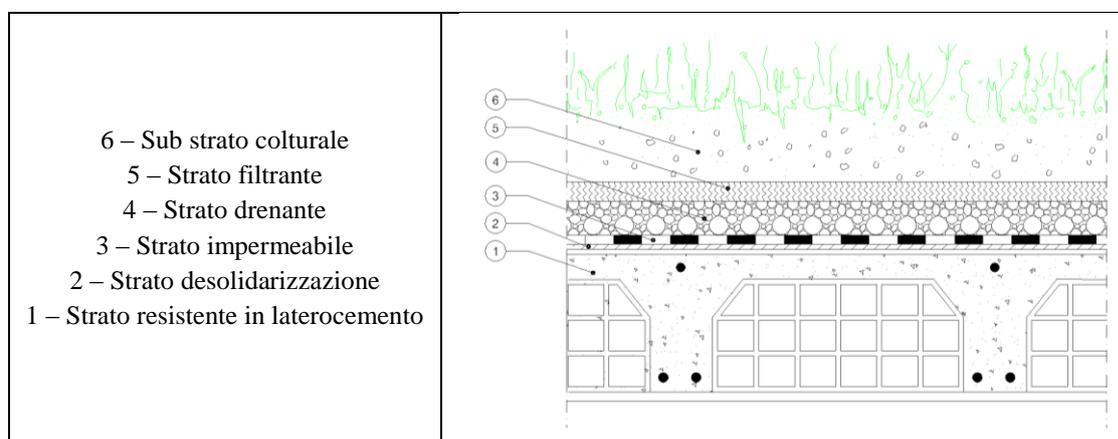


Fig. 1.16. Esempio di copertura non isolata con verde pensile.

Copertura isolata e ventilata

È il modello cosiddetto “freddo”, tradizionalmente riferito a coperture discontinue, ma applicabile anche a quelle continue tramite l'inserimento di uno strato di ventilazione. Questo è collocato tra l'isolamento termico ed il manto impermeabile ed è in diretta comunicazione con l'esterno. Questa disposizione funzionale comporta l'inserimento di

elementi di supporto allo strato di tenuta, che non può essere messo in opera direttamente sull'isolante. L'intercapedine areata deve essere in diretta comunicazione con l'esterno tramite aperture apposite e l'altezza di tale spazio di ventilazione dovrà consentire l'agevole circolazione dell'aria; pertanto avrà dimensioni minime di 6 cm. Nella stagione fredda la ventilazione, facilitando l'evacuazione del vapore acqueo, permette di evitare la condensazione nella massa dell'isolante; nel periodo estivo permette di eliminare il calore in eccesso contribuendo al benessere termico degli ambienti interni. Tale modello di copertura è riservato ad applicazioni su tetti non accessibili e risulta particolarmente adatto alla realizzazione di sottotetti abitati e ai climi caratterizzati da forti escursioni termiche. Di seguito (figura 1.17) si riporta la sequenza stratigrafica di tale copertura [6].

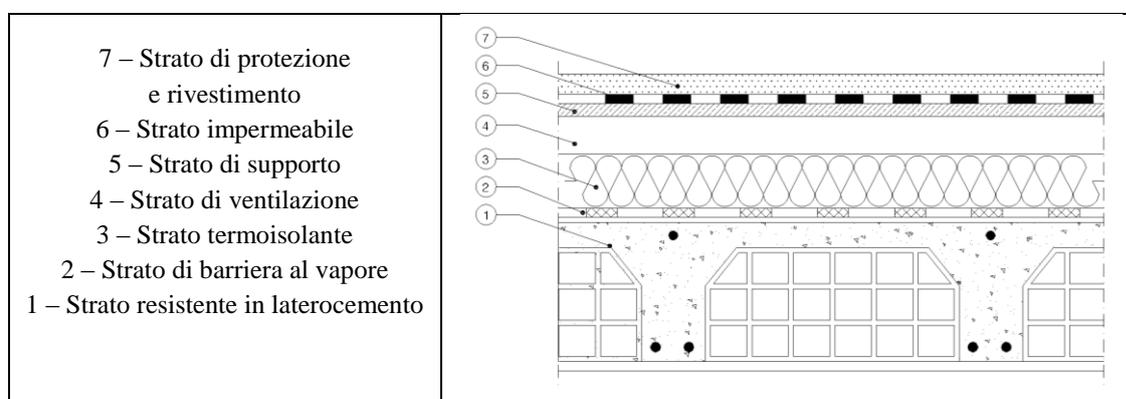


Fig. 1.17. Esempio di copertura isolata e ventilata.

La variante tecnologica di base è il tetto verde ventilato, che ha i normali vantaggi di una copertura ventilata uniti a una coibentazione maggiore dovuta alla presenza del verde. È possibile realizzare il giardino pensile su tale copertura qualora la stratificazione verde non comprometta la ventilazione e non eserciti carichi eccessivi; è quindi esclusa l'adozione del modello con verde intensivo. Si riporta di seguito una stratigrafia tipo di tale soluzione tecnologica [7].

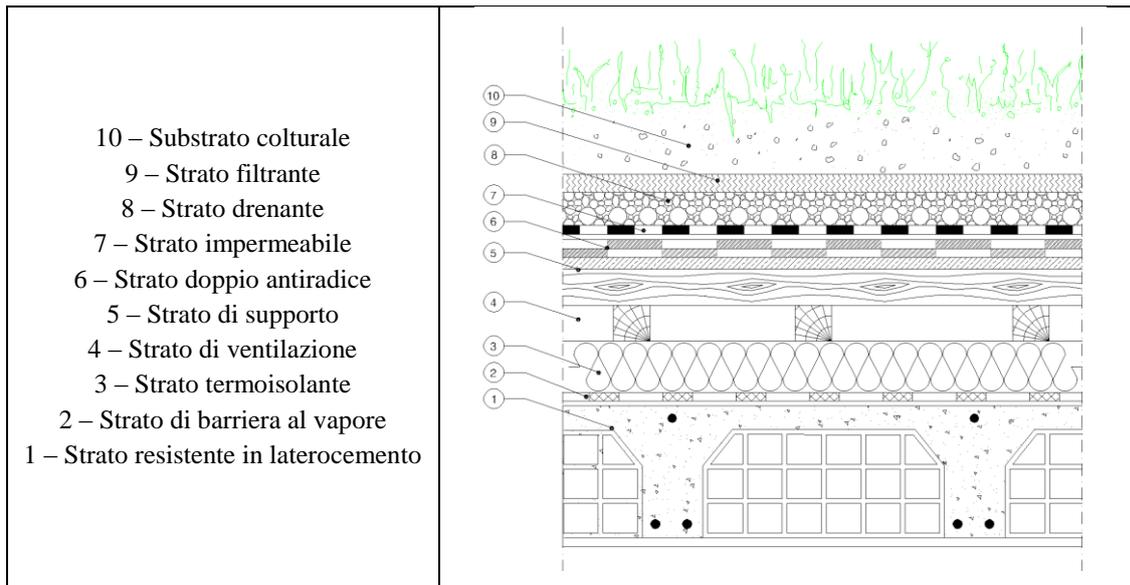


Fig. 1.18. Esempio di copertura isolata e ventilata con verde pensile.

Copertura semirovescia o sandwich

Prevede la guaina impermeabile tra due strati isolanti. La protezione in tal modo è assicurata per la guaina e lo strato isolante inferiore, mentre quello superiore è sollecitato come nel caso del tetto rovescio. Tale soluzione ha lo scopo di offrire una protezione isolante alla membrana impermeabile in presenza di forti escursioni termiche che ne potrebbero compromettere la funzionalità nel tempo. A differenza del tetto rovescio, con tale soluzione si evita il pericolo del dilavamento termico dovuto allo scorrimento dell'acqua piovana al di sotto del materiale isolante. Di seguito si riportano le stratigrafie del tetto semirovescio tradizionale e del tetto semirovescio con la presenza del verde pensile.

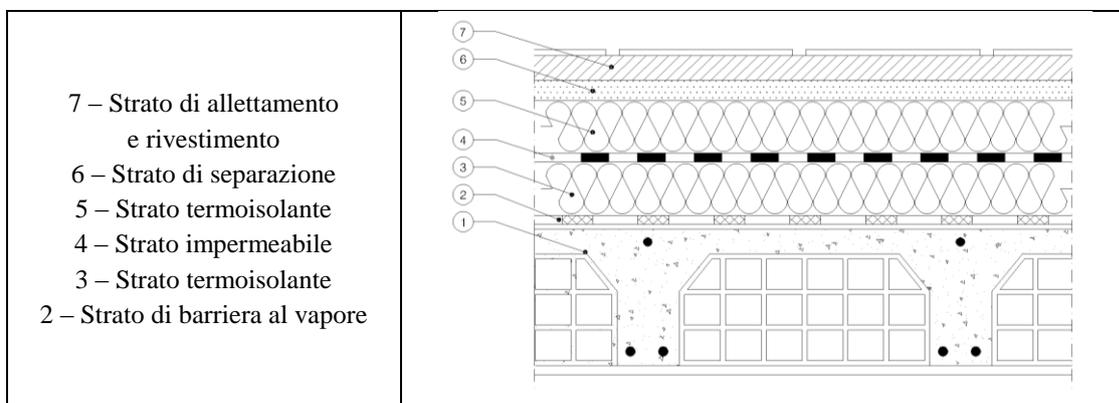


Fig. 1.19. Esempio di copertura semirovescia.

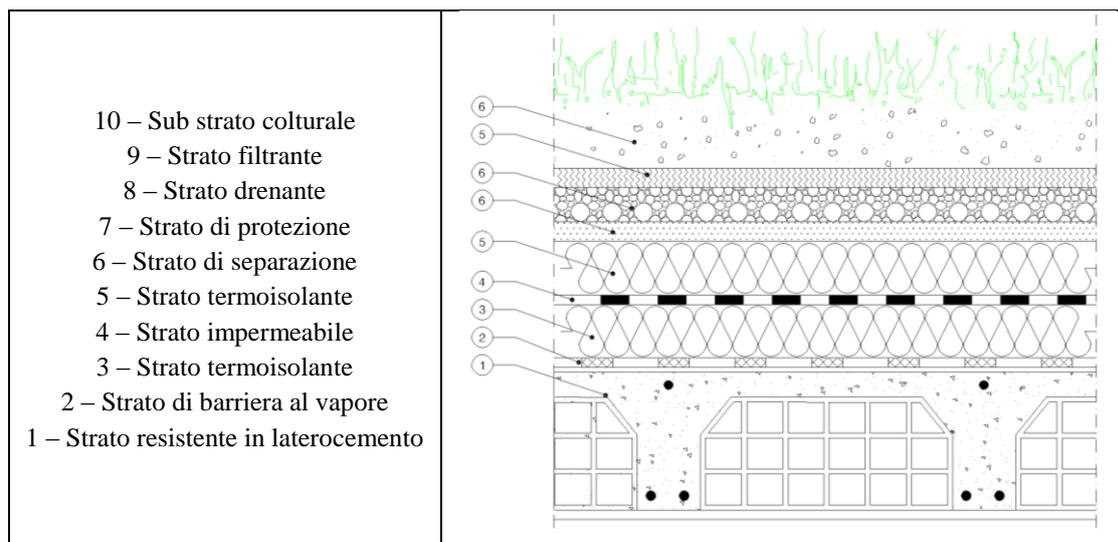


Fig. 1.20. Esempio di copertura semirovescia con verde pensile.

1.5 Normativa in Italia. La UNI 11235.

Fino a pochi anni fa le coperture a verde sono state progettate senza una precisa normativa tecnica di riferimento; le regole, stabilite dalle singole aziende produttrici sulla base di modelli europei, si configuravano non totalmente applicabili in Italia per differenti situazioni culturali, di contesto climatico e di tecnologie costruttive. L'assenza di tali criteri ha purtroppo causato la realizzazione di numerosi tetti verdi con prestazioni insoddisfacenti, senza vantaggio alcuno nell'analisi costo/benefici e addirittura in controtendenza alle aspettative del committente.

Vista la crescita rapida del mercato e considerata l'importanza della copertura verde quale elemento contribuente al risparmio energetico e al comfort igrotermico, l'Ente Italiano di Unificazione (UNI) ha deciso di redigere nel 2007 una norma che si prefigurasse come guida fondamentale per la realizzazione di coperture verde a "regola d'arte.

Tale normativa, coerentemente a quanto definito dalle direttive europee vigenti, intende mettere a disposizione, a tutti gli operatori del settore, informazioni oggettive e chiaramente strutturate, un "codice di pratica" che guidi ogni fase del processo edilizio della copertura a verde in funzione delle particolari situazioni e destinazioni d'uso, contesto climatico e contesto edilizio [8].

La norma ha un approccio di tipo prestazionale in quanto non si limita alla definizione delle caratteristiche dei materiali, ma tiene conto delle interazioni tra i singoli elementi e strati della copertura arrivando, così, a definire caratteristiche e prestazioni dell'intero sistema complesso.

Nella prima parte, in cui sono riportate alcune definizioni correntemente ripetute nella trattazione, si definisce tetto verde di tipo estensivo come *quel sistema che adopera specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali in cui sono poste, con spessori di substrati di coltivazione limitati e minimi interventi di manutenzione* [8].

Essa, poi, si sviluppa in 10 punti fondamentali:

1. Individuazione degli agenti interferenti sul sistema di copertura a verde di cui il progettista deve tener maggiormente conto:
 - Idrici;
 - Biologici;
 - Chimici;
 - Carichi permanenti e sovraccarichi variabili;
 - Termici;
 - Radiativi.
2. Definizione dei requisiti richiesti agli elementi o strati delle coperture a verde:
 - Capacità agronomica;
 - Capacità drenante;
 - Capacità di aerazione dello strato drenante;
 - Capacità di aerazione dello strato colturale;
 - Capacità di accumulo idrico;
 - Resistenza agli attacchi biologici.
3. Analisi delle prestazioni, ottenibili attraverso i requisiti individuati:
 - Fruibilità fisica della copertura: realizzazione di uno spazio per lo svolgimento delle attività;
 - Fruibilità visiva: realizzazione di un elemento avente valenza puramente architettonica e paesaggistica;
 - Compensazione ambientale: capacità della copertura a verde e del sistema architettonico di restituire le valenze che il sistema ambientale originario conferiva al sistema ;
 - Capacità di variazione delle condizioni del contesto ambientale esterno all'edificio: assorbimento acustico, regimazione idrica, mitigazione microclima.
4. Valutazione del contesto da un punto di vista climatico e territoriale per la crescita della vegetazione:
 - Esposizione solare delle specie vegetale e presenza di superfici riflettenti;

- Venti prevalenti;
 - Carichi da neve;
 - Emissioni di aria o fumi da impianti tecnici;
 - Esposizione alla salsedine;
 - Inquinamento da polveri;
 - Analisi delle specie vegetali presenti nel contesto.
5. Classificazione degli strati componenti la copertura a verde e criteri per la progettazione di quelli maggiormente significativi; un sub-componente edilizio, infatti, è composto da elementi sempre presenti, definiti, primari, e da strati secondari introdotti in funzione del contesto d'uso, climatico, merceologico.

Gli elementi o strati primari di una copertura a verde sono:

- Elemento portante;
- Elemento di tenuta;
- Elemento di protezione dall'azione delle radici;
- Elemento di protezione meccanica;
- Elemento drenante;
- Elemento di accumulo idrico;
- Elemento filtrante;
- Strato colturale;
- Strato di vegetazione.

Gli strati secondari e gli impianti complementari costituenti una copertura a verde sono :

- Strato di barriera al vapore;
- Strato di schermo al vapore;
- Strato termoisolante;
- Strato di pendenza;
- Strato di regolarizzazione;
- Strato di imprimitura;
- Strato di continuità;
- Strato di diffusione;
- Strato di irrigidimento o ripartizione dei carichi;
- Strato di separazione e/o scorrimento;
- Strato di protezione;
- Strato di zavorramento;

- Strato antierosione;
- Impianti di irrigazione.

Gli elementi accessori di una copertura a verde sono :

- Elementi di trattenimento dello strato culturale;
- Elementi di trattenimento dello strato drenante;
- Elementi di ancoraggio della vegetazione
- Elementi di barriera al fuoco;

6. Classificazione della copertura a verde in funzione di:

- Fruibilità: al fine di determinare i carichi agenti si distingue tra copertura accessibile ai soli manutentori, all'utenza o carrabile;
- Pendenza superficiale: al fine di determinare i sistemi di ancoraggio degli strati si distingue tra bassa ($p < 5\%$), media ($5 \leq p < 15\%$), alta ($p \geq 15\%$) pendenza;
- Manutenzione del sistema verde: al fine di determinare i costi di gestione si distingue la bassa manutenzione applicabile al verde estensivo e consistente in semplici interventi di controllo e irrigazione occasionale (classe1); la media manutenzione applicabile al verde intensivo leggero e consistente in interventi aggiuntivi, rispetto alla classe precedente, per la corretta gestione delle aree verdi.

7. Definizione per ogni singolo elemento o strato, dei materiali prevalentemente impiegati, indicando per ognuno di essi i requisiti ed il relativo metodo di prova nel rispetto delle altre normative vigenti.

8. Istruzioni per l'esecuzione e l'installazione degli elementi componenti il tetto verde al fine di un corretto funzionamento nel tempo della copertura con particolare attenzione all'elemento di tenuta e allo strato culturale.

9. Istruzioni sul collaudo, al fine di assicurare che gli interventi edili e agronomici rispondano alle prescrizioni di progetto, riguardanti:

- Controllo dello strato di supporto dell'elemento di tenuta per verificare l'adeguatezza alla posa.
- Controllo iniziale dell'elemento di tenuta;
- Controllo finale della tenuta all'acqua del sistema, effettuata al termine dei lavori relativi alla copertura e prima della posa della vegetazione ;
- Controllo delle stratigrafie e degli impianti accessori per verificare la rispondenza qualitativa, prestazionale e dimensionale di quanto previsto in progetto;
- Controllo delle opere a verde, effettuato entro un anno dal termine dei lavori.

10. Istruzione sulla manutenzione, distinta in quattro tipologie:

- Manutenzione di avviamento per il controllo, comprendente tutte le lavorazioni agronomiche necessarie nella fase di avviamento come il controllo dello spessore dello strato colturale, controllo dell'efficienza degli ancoraggi e dei sistemi di irrigazione, ecc ;
- Manutenzione di avviamento a regime, riguardanti tutte quelle opere necessarie per il raggiungimento dello stato di manutenzione ordinaria previsto in progetto;
- Manutenzione ordinaria al fine di mantenere nel tempo la funzionalità della tipologia di inverdimento prevista;

Manutenzione straordinaria, effettuata in occasione di particolari situazioni che dovessero manifestarsi durante la vita del sistema.

1.6 Benefici energetici ed ambientali di una copertura a verde

Le coperture a verde pensile si presentano come una interessante tecnologia costruttiva poiché permettono importanti benefici sia a livello economico che ambientale. Dalla letteratura in materia emerge che un tetto verde è capace di fornire benefici in molteplici settori, che sono di seguito brevemente descritti.

✓ *Mitigazione delle Isole di Calore Urbane (Urban Heat Islands – UHI)*

Le aree urbane e suburbane sono soggette a temperature superiori rispetto agli ambienti rurali circostanti; questa differenza di temperatura è ciò che costituisce un'isola di calore urbana. La temperatura media annuale dell'aria di una città con un milione o più persone può essere da 1 a 3 °C più calda rispetto ai suoi dintorni e in una notte chiara e calma la differenza può arrivare fino a 12 °C. Anche le città più piccole sono soggette alle isole di calore, anche se l'effetto spesso diminuisce con la diminuzione della dimensione della città. In giornata estiva soleggiata il sole riscalda le superfici urbane come tetti e marciapiedi che raggiungono temperature tra 27 e 50 °C maggiori rispetto all'aria, mentre le superfici ombreggiate o umide, spesso negli ambienti rurali vicini, rimangono prossime alla temperatura dell'aria. Le isole di calore urbane sono tipicamente presenti sia di giorno che di notte, ma tendono ad essere più intense durante il giorno. In media, la differenza di temperatura superficiale diurna tra aree sviluppate e rurali è di 10 e 15 °C; la differenza di temperature notturna è tipicamente più piccola, da 5 a 10 °C.

L'ampiezza delle isole di calore urbano varia con le stagioni, a causa dei cambiamenti di intensità del sole così come della copertura del terreno e delle condizioni climatiche. A seguito di tali variazioni, le UHI sono in genere più intense in estate.

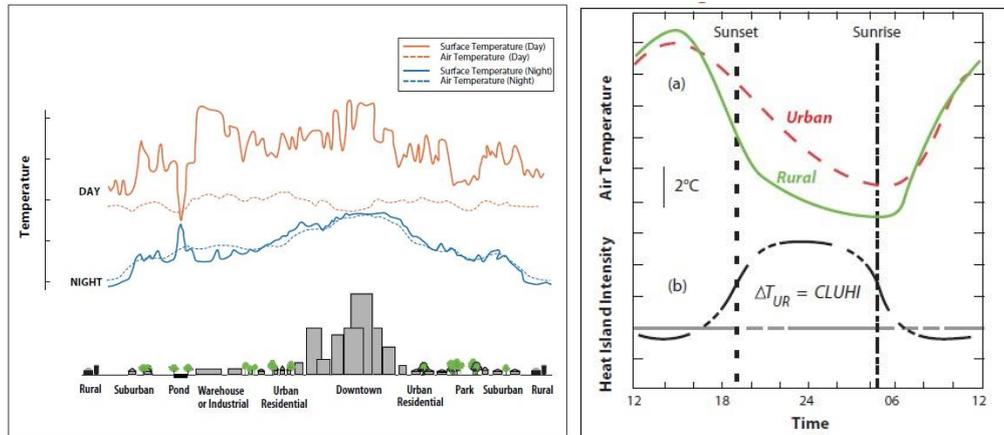


Fig. 1.21. Andamento della temperatura dell'aria e della temperatura superficiale nelle isole di calore.

La temperatura superficiale ha un'influenza indiretta ma significativa sulla temperatura dell'aria, in particolare negli strati più vicini alla superficie. Ad esempio, i parchi e le aree vegetate, che in genere hanno temperature superficiali più fredde, contribuiscono al diminuire la temperatura dell'aria. Aree edificate dense di solito portano a temperature superiori. Poiché l'aria si mescola all'interno dell'atmosfera la relazione tra la temperatura superficiale e dell'aria non è costante, e la temperatura dell'aria generalmente varia meno di quella superficiale.

Un ulteriore fattore che influenza lo sviluppo dell'isola di calore urbana, soprattutto di notte, è la geometria urbana, che si riferisce alle dimensioni e alla spaziatura degli edifici all'interno di una città. La geometria urbana influenza il flusso del vento, l'assorbimento di energia, e la capacità di una data superficie di emettere radiazioni ad onda lunga verso la volta celeste. Nelle aree sviluppate, le superfici e le strutture sono spesso parzialmente ostruite da oggetti, come edifici adiacenti, e diventano grandi masse termiche che non riescono a rilasciare calore facilmente a causa di questi ostacoli. Soprattutto di notte l'aria sopra i centri urbani è in genere più calda di aria sopra le zone rurali.

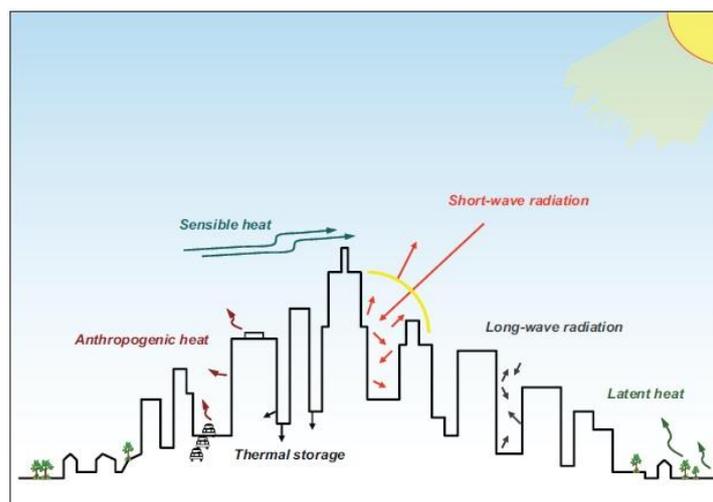


Fig. 1.22. Schematizzazione canyon urbano

I ricercatori spesso si concentrano su un aspetto della geometria urbana chiamato *canyon urbano*, che può essere illustrata da una strada relativamente stretta fiancheggiata da edifici alti. Durante il giorno, i canyon urbani possono avere effetti concorrenti. Da un lato gli edifici possono creare ombra, riducendo le temperature superficiali e dell'aria, dall'altro, quando la radiazione solare raggiunge le superfici nel canyon viene assorbita e riemessa nell'infrarosso di modo che questa energia rimanga intrappolata tra gli edifici essendo riassorbita dagli edifici adiacenti generando un effetto a cascata.

Nelle zone rurali, la vegetazione e i terreni aperti in genere dominano il paesaggio. Gli alberi e la vegetazione generano ombra, che aiuta a mantenere temperature superficiali più basse. Inoltre grazie all'evapotraspirazione, processo in cui le piante rilasciano acqua nell'aria circostante, la vegetazione riesce a dissipare il calore assorbito. Al contrario, le aree urbane sono caratterizzate da, superfici impermeabili secche, quali tetti convenzionali, marciapiedi, strade e parcheggi. Con il continuo sviluppo delle aree urbane, quantità maggiori di verde vengono ad essere eliminate, e conseguentemente sempre più superfici vengono pavimentate o ricoperte di edifici. La variazione della morfologia della copertura del terreno risulta in minore ombreggiamento e minori umidità per mantenere le aree urbane a temperature minori. Nelle aree edificate i processi di evapotraspirazione sono minori, il che contribuisce ad aumentare le temperature superficiali e dell'aria.

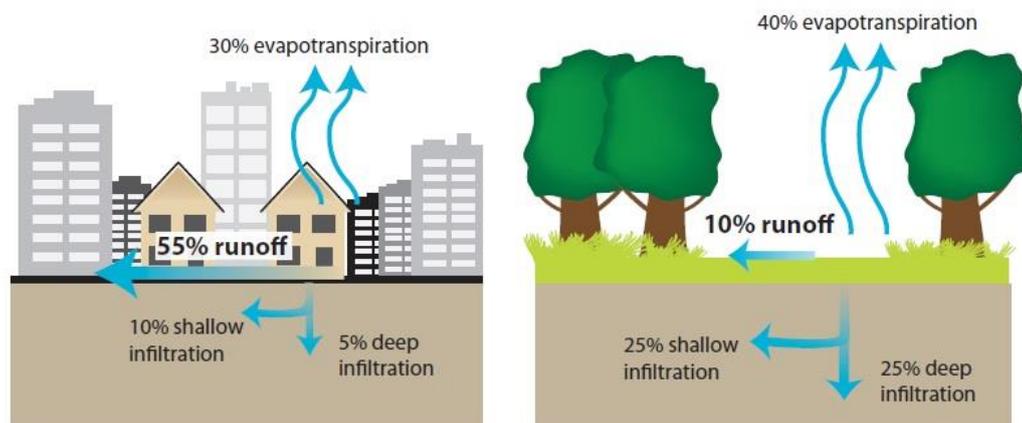


Fig. 1.23. Differenti meccanismi associati alla morfologia urbana

La ricerca di strategie per la riduzione dell'isola di calore si concentra soprattutto su alberi e vegetazione, tetti verdi e tetti freddi [9].

✓ *Mitigazione degli eventi piovosi e gestione delle acque reflue*

Nei paesi sviluppati, il livello di urbanizzazione è in continua crescita e come diretta conseguenza sempre più campi, terre coltivate e foreste sono sostituiti da superfici impermeabili di strade ed edifici intensificando notevolmente il deflusso delle acque meteoriche, diminuendo la ricarica delle falde ed aumentando l'erosione dei canali fluviali. Uno dei principali problemi ambientali dovuti all'urbanizzazione è che il sistema idrologico urbano deve affrontare una quantità estremamente fluttuante di acque di dilavamento superficiali che può diventare estremamente elevata durante i periodi di precipitazione e rimanere bassa durante il resto del tempo. I principali strumenti per ridurre l'elevato deflusso durante le piogge e per aumentare la ritenzione includono serbatoi di accumulo, stagni dove l'acqua può essere temporaneamente accumulata ed aree verdi dove l'acqua può infiltrarsi ed evaporare. Di notevole importanza sono i tetti verdi che riducono e attenuano il deflusso delle acque piovane abbassando i rischi di alluvioni urbane e migliorando il bilancio idrico urbano. Grazie alla loro capacità di stoccaggio dell'acqua i tetti verdi possono ridurre significativamente il picco di deflusso degli eventi piovosi. La riduzione consiste nel ritardare l'inizio del deflusso grazie all'assorbimento dell'acqua nel sistema tetto verde, la riduzione del deflusso totale trattenendo parte della pioggia, la distribuzione del deflusso idrico nel corso di un periodo di tempo più lungo grazie al rilascio più lento dell'acqua in eccesso che è temporaneo immagazzinata nel substrato.

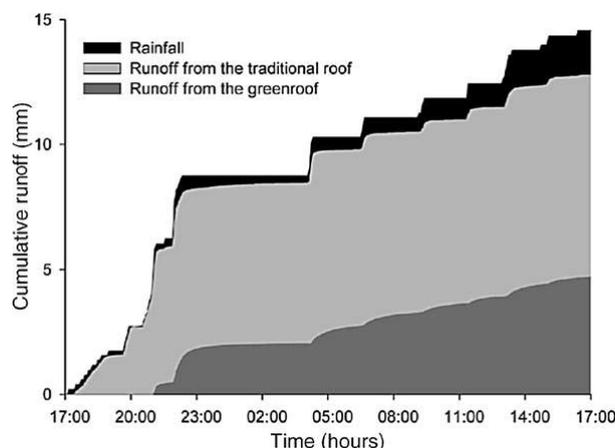


Fig. 1.24. Deflusso cumulato in 24h per diversi tipi di tetto

Una panoramica del deflusso annuale da una serie di tetti presentati in letteratura dimostra chiaramente che il deflusso è principalmente determinato dalla tipologia di tetto e può raggiungere il 91% per tetto tradizionale non inverdito ed partire da 15% per un tetto verde intensivo [10].

Secondo lo studio in [10] la precipitazione annuale, il tipo di tetto, il numero di strati e la profondità del substrato sono significativamente correlati con il deflusso annuo, mentre l'età del tetto verde, l'inclinazione della superficie e la lunghezza non sono significativamente correlati con il deflusso annuo.

Un tetto verde modifica il deflusso delle acque meteoriche rispetto ad un tetto tradizionale attenuando e ritardando il picco dell'evento piovoso. Questo accade perché una parte del volume d'acqua è trattenuto nel tetto verde.

✓ Isolamento acustico

Le zone piantumate offrono un naturale isolamento acustico perché sono in grado di assorbire e disperdere meglio le onde sonore rispetto ad una superficie rigida quale la facciata di un palazzo. I tetti verdi offrono un buon isolamento acustico abbattendo il rumore riflesso fino a circa 3 dB e migliorando l'isolamento acustico di un tetto fino a circa 8 dB. I quartieri situati in prossimità di aeroporti o di rotte di volo, in prossimità di viabilità ad alto scorrimento, autostrade o tangenziali e nelle vicinanze di tutte le attività che sono fonte di rumore quali discoteche, mercati, ecc., traggono enorme vantaggio dalla realizzazione di una copertura verde. Oltre a proteggere dall'immissione di rumore la copertura verde protegge anche dall'emissione di rumore per cui si propone come ottima

tecnica realizzativa come copertura degli edifici con attività particolarmente rumorose quali stadi, fabbriche, palestre, viabilità interrata.

In termini di prestazioni acustiche, i sistemi a verde pensile sono considerati efficaci per ridurre l'inquinamento acustico nelle aree urbane derivante dal traffico stradale, ferroviario e aereo. Nei *street canyons* e nei cortili, la quantità di energia sonora che si propaga sui tetti da lati rumorosi ai lati calmi è determinata principalmente da altezza, larghezza e forma degli edifici. In questo caso, i sistemi a verde sulla sommità di un edificio possono agire come assorbitori soprattutto per le onde sonore difratte tra vie parallele e per questo, studi parametrici hanno dimostrato che questi sistemi sono efficaci per quanto riguarda la mitigazione del rumore e creano quindi tranquillità. Inoltre è stato dimostrato che i tetti verdi possono essere usati per aumentare efficacemente l'isolamento acustico di tetti leggeri.

Alcuni ricercatori in UK, hanno esplorato sistematicamente gli effetti dei vari parametri di progettazione dei tetti verdi a livello stradale sulla riduzione del rumore. Hanno effettuato una serie di misure in camera semi-anecoica utilizzando sistemi a tetto verde proprietari (Zinco) e substrati a base di calcare. Essi sono stati posti su di una struttura con un'altezza di 1200 mm. I parametri studiati comprendono: struttura, superficie, profondità, tipo e posizione del sistema tetto verde, e il tipo di vegetazione. L'esperimento è stato condotto in una camera semi-anecoica con dimensioni di 3,5 m x 3,5 m x 2,4 m (H). Un edificio a basso profilo a livello della strada è stato simulato con una struttura di dimensioni 1,60 m x 3,00 m x 1,20 m (H) situata al centro del pavimento. I tetti verdi sono stati posizionati in apposita struttura a vassoio sulla parte superiore della struttura edifici con un massimo di 5 righe per 4 colonne (fig. 1.25).

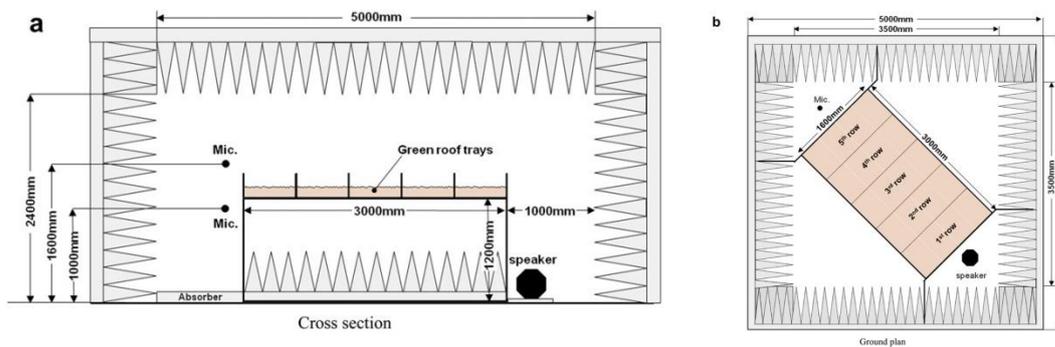


Fig. 1.25. Schema camera anecoica usata negli esperimenti

Lo studio condotto rivela che il sistema a tetto verde sulla struttura può ridurre il livello di pressione sonora SPL (Sound pressure level), anche oltre 20 dB ad alta frequenza per il suono diffratto [11].

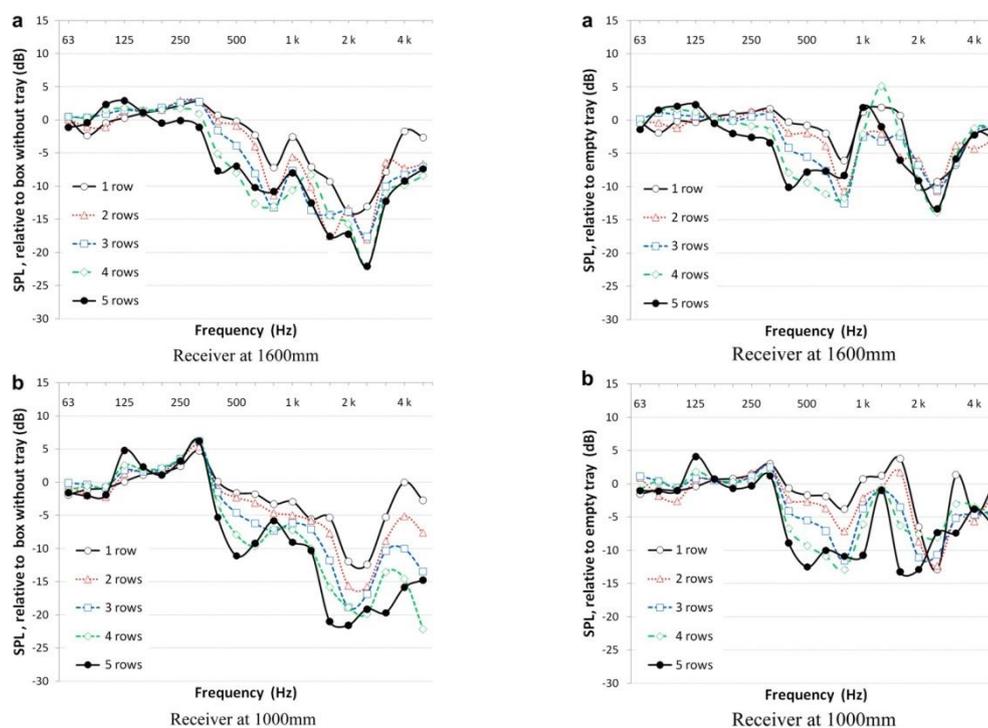


Fig. 1.26. Attenuazione di SPL con l'area del tetto verde (a) e differenza in SPL tra vassoio vuoto e tetto verde (b).

✓ *Fissaggio delle polveri sottili.*

Con l'espressione "polveri sottili" si vuole intendere l'insieme delle sostanze sospese nell'atmosfera quali fibre, particelle carboniose, silice, inquinanti liquidi o solidi, aventi un diametro a partire da 500 micron. La nascita di tali polveri è provocata da molteplici fattori, caratterizzanti l'ambito urbano.

È possibile, in particolare, individuare una matrice naturale:

- polvere e terra sollevata dal vento;
- incendi;
- pollini e spore;
- erosione delle rocce;
- eruzione vulcanica.

Tuttavia è ai fattori antropici che si attribuisce la maggiore responsabilità di produzione di inquinanti atmosferici, derivanti da:

- emissioni della combustione di motori;
- emissioni del riscaldamento domestico come carbone, legna, gasolio;
- lavorazioni meccaniche e dei cantieri;
- inceneritori e centrali elettriche.

Un aspetto da non trascurare è la loro composizione: generalmente il particolato derivante dai processi di combustione, sia naturali che antropici, è il carbonio, che diviene molto nocivo e tossico nel caso in cui derivi da specifiche sostanze, come per esempio quelle di natura plastica.

Secondo i dati dell'APAT, acronimo di Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, riferiti all'ultimo decennio, la produzione di polveri sottili è provocato in Italia per il 49% dai trasporti, il 27% dell'industria, l'11% del settore residenziale e terziario; per il 4% dalla produzione di energia, per il 9% dall'agricoltura.

La copertura verde, quindi, relativamente al settore edilizio, può contribuire ancora una volta al miglioramento della qualità dell'aria, poiché nei confronti dei particolati in movimento e in sospensione produce due differenti effetti:

- effetto diretto, conseguente alla capacità della vegetazione di filtrare e assorbire parzialmente le polveri;
- effetto indiretto, conseguente al minore accumulo e successiva riflessione del calore delle superfici verdi.

Nel primo caso, la polvere che entra in contatto con il sottile strato di aria satura che si forma sulle foglie delle piante, si inumidisce e viene catturata definitivamente. Ciò rappresenta un aspetto favorevole all'ambiente, ma non alla pianta stessa che deve pertanto essere mantenuta costantemente pulita se vive in ambienti particolarmente polverosi.

Nel secondo caso, l'effetto benefico si risente soprattutto in estate quando la temperatura molto elevata produce maggiori moti convettivi che favoriscono la distribuzione nell'ambiente delle polveri accumulate, anche con la complicità del vento. Con l'applicazione di un tetto verde, le temperature superficiali rimangono sempre contenute rispetto a quelle inerti, limitando così i moti convettivi e quindi il diffondersi delle particelle polverose [2]. La capacità di tale struttura di influire sulle polveri atmosferiche dipende molto dal tipo, dallo sviluppo e dalla distribuzione spaziale della vegetazione, tuttavia è quasi impossibile quantificarne i benefici.

Numerosi, infatti, sono oggi gli studi in merito, volti a definire scientificamente percentuali precise, in quanto la presenza di particolati nell'atmosfera, possono generare, attraverso la loro inalazione, problemi salutarmente rilevanti; attualmente si stima, grazie all'introduzione di tale elemento tecnico, un abbattimento delle polveri inquinanti di circa il 10-20%.

✓ *Benefici Sociali*

I giardini pensili non apportano solo vantaggi di tipo ambientale ma anche benefici a livello psicologico. Il paesaggio ha un notevole impatto sulla psiche; è risaputo che il verde è il colore più rilassante e tranquillizzante (perciò viene utilizzato nelle sale operatorie e negli ospedali di tutto il mondo). Nelle grandi città, dove il colore dominante è il grigio, l'introduzione di vaste superfici verdi potrebbe modificare radicalmente il volto degli edifici, influenzando positivamente anche sugli abitanti; ci sono studi che affermano addirittura che il colore verde migliora l'apprendimento da parte dei bambini. Il giardino è sicuramente un ambiente terapeutico anche se, per essere curativo, il giardino deve avere la forma del labirinto perché spinge alla ricerca metaforica della via d'uscita alla propria condizione. La semplice vista di uno spazio verde dalla finestra d'ospedale riduce i tempi di degenza dei pazienti. Anche l'orto, oltre al giardino, svolge non solo una funzione curativa ma anche socializzante. La diffusione degli orti urbani nelle zone periferiche risponde a molteplici esigenze:

- integrazione del salario o della pensione con il lavoro nell'orto;
- occupazione del tempo libero con un'attività sana ed economica, soprattutto per la fascia della terza età e dei bambini;
- fuga dalla solitudine delle mura domestiche.

Oltre all'orto in senso stretto, si assiste anche alla diffusione dell'orto quale componente estetica del paesaggio, un "edible landscape", cioè un paesaggio commestibile, che fa dell'ortaggio un elemento dal valore estetico e paesaggistico al pari delle classiche piante ornamentali. Questo fenomeno è per ora limitato al verde privato, delle scuole e, al massimo, di quartiere, con lo scopo di coniugare esigenze estetiche con la necessità di produrre cibo; sta avendo grande diffusione nelle coperture verdi con l'obiettivo di produrre cibo e ridurre i trasporti dello stesso. A tale scopo si possono utilizzare differenti piante: specie da frutto ed orticole, fiori commestibili, erbe aromatiche e piante

ornamentali in proporzioni variabili in funzione delle condizioni pedoclimatiche e dello spazio a disposizione [3].

✓ *Benefici Energetici*

I benefici energetici derivabili da una copertura a verde sono sostanzialmente legati ai meccanismi particolari che si vengono a sviluppare nel sistema vegetato a causa dei particolari componenti biotici del sistema. I principali meccanismi ritenuti fondamentali per le prestazioni energetiche di una copertura a verde sono: Evapotraspirazione, Ombreggiamento, Fotosintesi ed Inerzia termica.

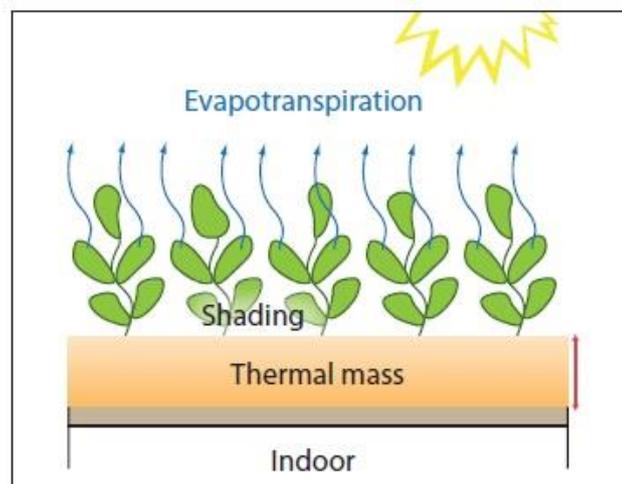


Fig. 1.27. Principali fenomeni fisici associati ad una copertura a verde

Evapotraspirazione. Le piante assorbono acqua attraverso le radici ed emettono vapore attraverso le loro foglie; questo movimento di acqua è chiamato traspirazione. L'evaporazione si verifica anche sulle superfici della vegetazione e del terreno di coltura circostante. Insieme, i processi di evaporazione e traspirazione sono indicati come evapotraspirazione. L'evapotraspirazione si verifica quando c'è una differenza di pressione parziale del vapore tra le piante e l'aria circostante per diffusione e convezione. Grazie a questa differenza di pressione parziale il vapor acqueo si trasferisce dalle superficie delle foglie della vegetazione o del substrato nell'aria, la maggior parte delle perdite di acqua nelle piante avvengono attraverso gli stomi. Gli stomi sono pori aggiustabili sulla superficie delle piante che si aprono e chiudono per controllare il flusso d'acqua ed il rilascio e l'assorbimento di CO_2 . Le piante assorbono la CO_2 per i processi di fotosintesi, difatti fotosintesi ed evapotraspirazione sono connessi.

L'energia necessaria per cambiare lo stato delle molecole di acqua da liquido a gassoso è fornita dall'irraggiamento solare e dall'aria ambiente. Al procedere del fenomeno di evaporazione, l'aria si satura ed il processo tende a rallentare finché l'aria umida non viene rimossa. La sostituzione dell'aria umida satura con aria secca avviene rapidamente ed efficacemente ad opera del vento, e quindi dei fenomeni convettivi; si verifica, invece, più lentamente ed in maniera meno efficace quando la rimozione avviene per fenomeni di equilibrio termofisico. L'evaporazione è di considerevole importanza in quanto riduce il carico termico entrante ed è capace di attivare un flusso di energia che porta verso l'esterno il calore eccedente nel locale sottostante: in questo senso, il tetto verde raffresca "attivamente" l'edificio [12].

Vegetazione e ombreggiamento

Tra i vari contributi offerti dalla vegetazione è fondamentale non trascurare l'ombreggiamento che partecipa alla riduzione del carico termico entrante negli edifici fino al 50%. Tale condizione viene resa particolarmente efficace da un comportamento caratteristico delle piante, detto "fototropismo", secondo cui le foglie tendono a disporsi in modo quanto più favorevole alla intercettazione diretta dei raggi luminosi, al fine di garantire i processi della fotosintesi clorofilliana; pertanto, orientandosi perpendicolarmente allo stimolo luminoso, le foglie impediscono ai raggi solari di raggiungere le superfici a esse sottostanti, diventando uno strato di schermatura mobile che si autoregola in funzione della posizione del sole. Il beneficio conseguente alla riduzione dell'assorbimento della radiazione solare è il contenimento delle temperature superficiali e la riduzione delle emissioni a elevata lunghezza d'onda [13]

Numerosi studi si sono susseguiti negli anni, a conferma di quanto detto. In particolare, dall'esame e dalle simulazioni effettuate sui tetti verdi, recentemente, è emerso che la temperatura del solaio si modifica significativamente con la presenza di terra e vegetazione: in inverno la temperatura del suolo è inferiore a quella esterna di circa 5,6 °C per la presenza del fogliame che funge da isolamento e limita il trasferimento di calore tra il tetto e l'esterno; in estate, invece, il suolo è più freddo di quasi 12,8°C, grazie all'ombreggiamento che offre protezione solare, oltre al fenomeno dell'evapotraspirazione già ampiamente discusso. Nelle immagini che seguono è riportato il confronto dell'andamento delle temperature di suolo, fogliame e ambiente esterno in tre giorni tipici, ossia il giorno invernale più freddo, il giorno invernale soleggiato e il giorno estivo più caldo, con riferimento a un clima temperato oceanico. Dalla loro lettura si evince che la

temperatura del fogliame è più bassa di quella del suolo di quasi 5 °C nel giorno invernale più freddo: ciò accade perché le foglie risultano maggiormente esposte all'aria fredda; nel giorno invernale soleggiato, invece, il fogliame ha una temperatura superiore di 3,8 °C, mentre nella stagione estiva di 13,2 °C, poiché durante il giorno la radiazione solare è ampiamente assorbita dalla vegetazione [13].

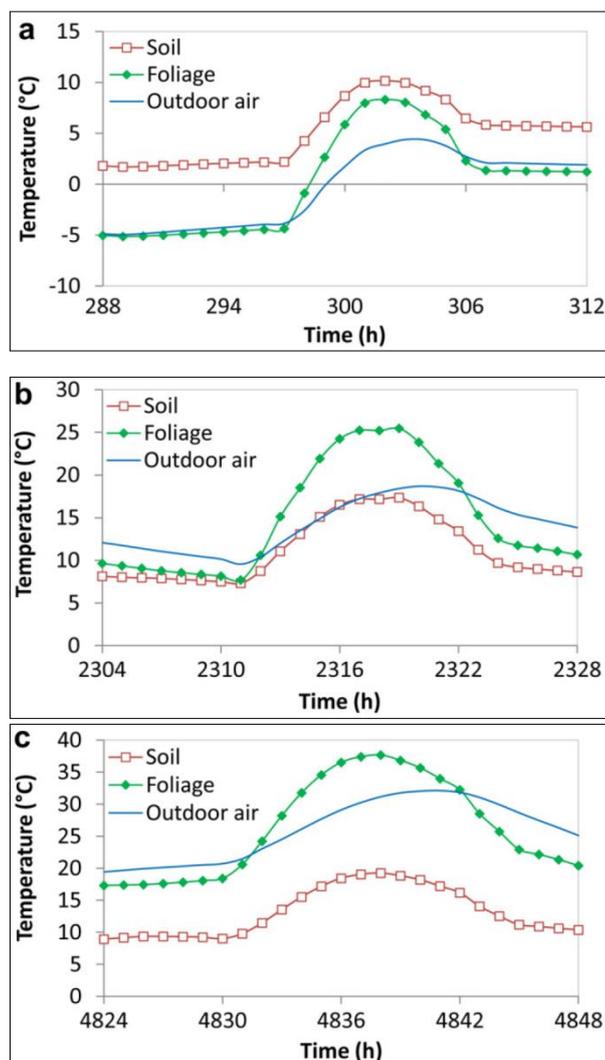


Fig. 1.28. Analisi delle temperature in tre tipici giorni in La Rochelle: (a) inverno freddo, (b) inverno soleggiato, (c) estate calda [13].

Inoltre, uno studio effettuato dall' Università di Singapore nel 2005, nella stessa città di Singapore, ha messo in evidenza attraverso un gruppo di immagini a infrarossi come la temperatura superficiale sia superiore nel tetto verde con vegetazione più rada rispetto a una copertura a verde con elevata densità di piante [14].

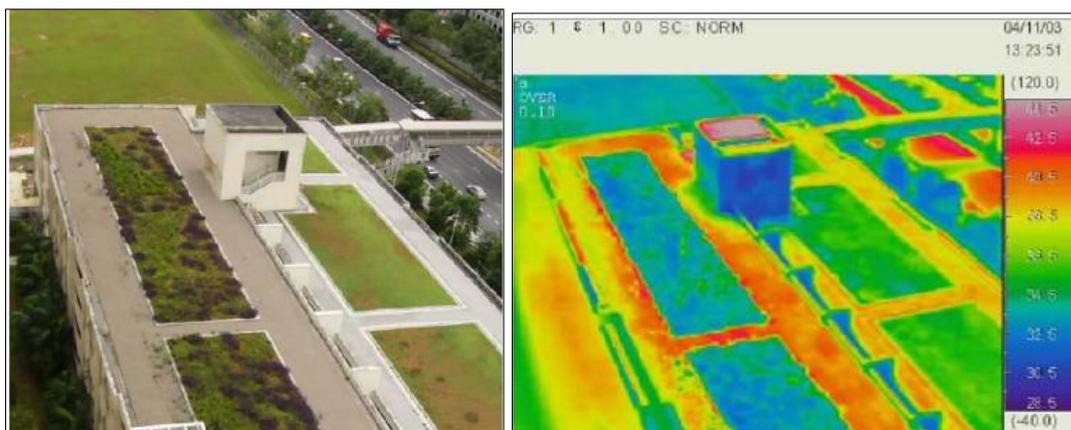


Fig. 1.29. Analisi termica di un tetto verde con e senza vegetazione, Singapore [14].

Un'importante effetto è la riduzione della temperatura superficiale e l'attenuazione delle fluttuazioni. In un tetto tradizionale, infatti, costituito da materiali altamente assorbenti, la superficie esterna presenta temperature molto elevate per la combinazione dell'alta temperatura dell'aria esterna e dell'assorbimento della radiazione solare, ottenendo così carichi termici consistenti. La presenza di un tetto verde, invece, comporta temperature superficiali inferiori, grazie ai fattori influenzati su descritti.

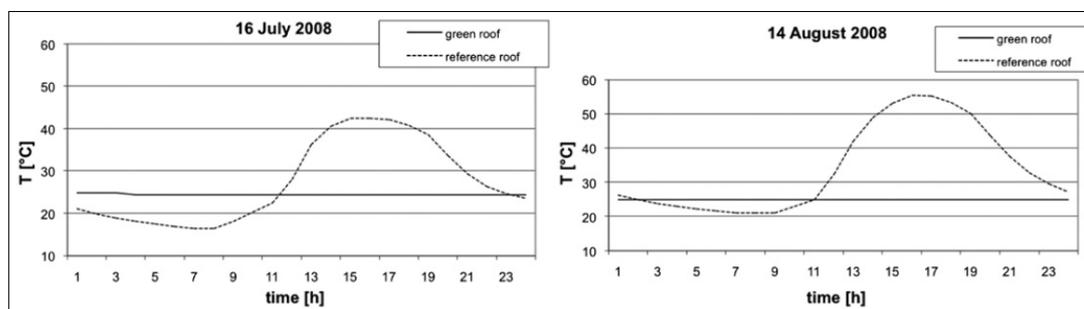


Fig. 1.30. Confronto tra la temperatura esterna del tetto verde e del tetto tradizionale [15].

La figura successiva, inoltre, mostra i flussi di calore valutati nell'arco di un giorno attraverso una copertura verde e una tradizionale: la prima tipologia presenta un contenimento dei picchi, riducendo di conseguenza la richiesta di energia in estate [15].

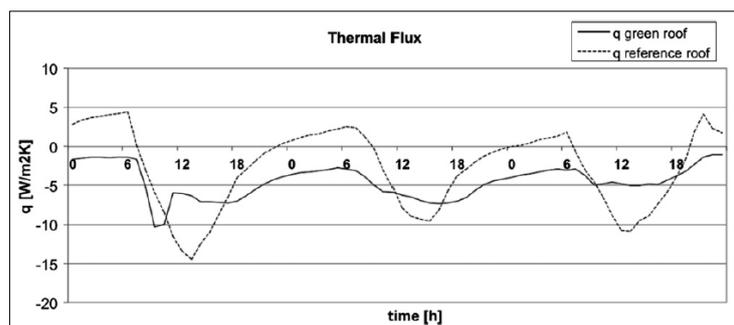


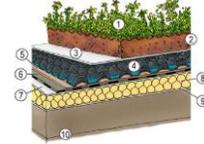
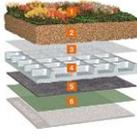
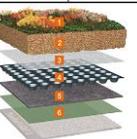
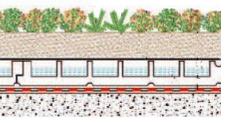
Fig. 1.31. Flussi di calore per tetto verde e tetto tradizionale.

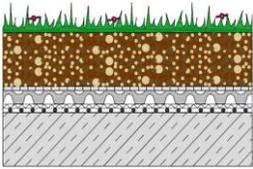
Le prestazioni del tetto verde sono valutate nella maggior parte dei casi con riferimento alle stagioni estive, essendo offerto in tale periodo il suo maggior contributo. In verità anche in inverno si verificano dei benefici, seppur più contenuti, con un risparmio energetico di circa il 22% rispetto a una copertura tradizionale. Tale risparmio, però, si riduce al 5,4 % in presenza di neve [16].

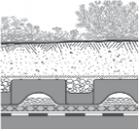
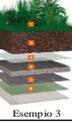
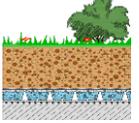
Pertanto, in caso di temperature rigide e soprattutto in presenza di neve il tetto verde riduce bruscamente la sua capacità di isolamento e quindi il rendimento termico, assottigliando notevolmente le differenze tra tetto verde e tradizionale [16].

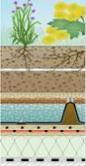
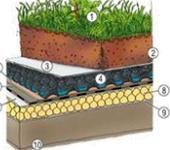
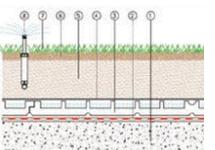
1.7 Tipologie stratigrafiche di coperture a verde sul mercato

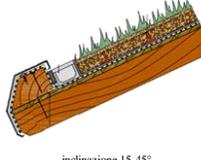
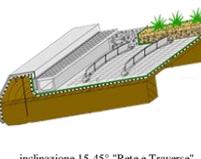
Si riportano nel seguito alcune tabelle contenenti tipologie di tetto verde presenti in commercio, risultanti da un'indagine di mercato effettuata per valutare la migliore configurazione per l'installazione del sito sperimentale. Per uniformare la rappresentazione dei dati, gli strati sono riportati a partire da quello di contatto con la copertura tradizionale.

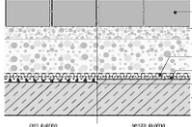
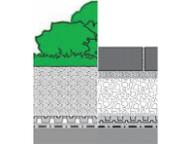
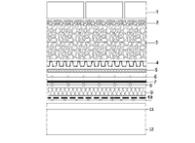
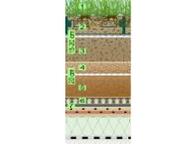
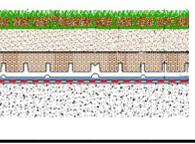
TETTO VERDE ESTENSIVO: rappresenta un sistema tecnico per coperture verdi, caratterizzato da spessori ridotti, pesi contenuti e ridotta manutenzione.												
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PES O SATURO (kg/m ²)	ACCUMULO IDRICO (l/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO	SETTIMO STRATO	OTTAVO STRATO
 Sistema "Tappeto Sedum"	ZinCo - GERMANIA	11	120	30	Telo antiradice WSF 40 con spessore di 0,36 mm, protegge l'isolamento del tetto da radici penetranti.	Filtro protetti ad accumulo SSM 45 con spessore di 5 mm, accumula acqua e nutrienti e migliorano l'isolamento acustico da calpestio.	Elemento di drenaggio Floradrain FD 25-E con spessore di 25 mm, può raccogliere acqua piovana negli lincavi superiori e far defluire in maniera sicura l'acqua in eccesso.	Strato filtrante SF, trasforma uno strato permeabile in uno drenante.	Substrato vegetativo "Tappeto Sedum" adatto agli inverdimenti estensivi con tecniche mono e multistrato e con i tipi di piante dell'elenco "Tappeto Sedum".	Speciali zolle prevegetate con arbusti precoltivati in campo aperto.	-	-
	SEIC/HARPO GROUP - ITALIA	-	-	-	Barriera al vapore.	Isolante termico.	Strato di separazione, geotessile.	Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV.	Feltro di protezione ed accumulo MedioPro MP 300.	Telo filtrante MediFilter MF 1.	Substrato SEIC per inverdimenti estensivi, spessore medio 8/12 cm	Strato vegetale.
 Esempio 1	BAUDER-GERMANIA	13	123,7	44	Strato di separazione PE 02 con spessore 0,2 mm, fornisce protezione al manto di coperta.	Materassino di protezione FSM 600 con spessore di 4 mm, necessario per la protezione dell'impermeabilizzante.	Elemento di drenaggio e accumulo WSP 50 con spessore 50 mm, evita la formazione di ristagni d'acqua.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale.	-	-
 Esempio 2	BAUDER-GERMANIA	10	111,2	32	Barriera al vapore Bauder TEC DBR, impedisce all'umidità di penetrare tra gli elementi costruttivi.	-	-	Materassino di accumulo e drenaggio SDF, progettato per scaricare l'acqua piovana e per accumulare una riserva idrica.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale.	-	-
 Esempio 3	BAUDER-GERMANIA	10	121,1	41,4	Strato di separazione PE 02 con spessore 0,2 mm, fornisce protezione al manto di coperta.	Materassino di protezione FSM 600 con spessore di 4 mm, necessario per la protezione dell'impermeabilizzante.	Elemento di accumulo e drenaggio DSE 20 con spessore di 20 mm, progettato per scaricare l'acqua piovana e per accumulare una riserva idrica.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale.	-	-
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	12-20	220	80	Tappeto protettivo e di accumulo idrico Optima PPT 500.	Elemento drenante e di accumulo idrico Optima FKD 40 con spessore 4 mm, i canali della faccia inferiore permettono un deflusso veloce dell'acqua, quelli superiori consentono un accumulo idrico eccellente.	Tessuto filtrante Optima PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato con alta capacità di ritenzione idrica ed alto potere drenante.	Strato vegetale	-	-	-
	DAKU - ITALIA	16	115	24	Manto impermeabile ed antiradice che fornisce protezione dall'acqua e dall'azione delle radici.	Strato drenante e di accumulo idrico FSD 30 di spessore 80mm, oltre a svolgere la funzione di protezione del manto impermeabile, immagazzinano l'acqua piovana e la restituiscono alla vegetazione attraverso un processo di condensazione e di micro evaporazione definito "acqua di diffusione" che permette alla vegetazione di disporre così di un approvvigionamento d'acqua a lunga durata.	Strato filtrante STABILFILTER SFI, geotessile di spessore 1,45 mm, adatto all'uso come strato di separazione e filtro nella costruzione del verde pensile multistrato tra lo strato di drenaggio e il substrato.	Substrato di base del sistema ROOF SOIL 2, composto da materiale vulcanico viene posato per consentire una rapida radicazione.	Strato vegetale	-	-	

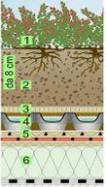
TETTO ESTENSIVO LEGGERO : questo sistema viene utilizzato nel caso in cui non si voglia appesantire eccessivamente la costruzione.										
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ³)	ACCUMULO IDRICO (lt/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO
	OPTIGRÜN - GERMANIA	10-12	145	25	Impermeabilizzante, necessario per la protezione del tetto e utile alla distribuzione dei carichi.	Strato protettivo e di accumulo idrico Optigrün Typ RMS 300, Protegge l'impermeabilizzazione e accumula acqua.	Elemento di drenaggio ed accumulo idrico Optigrün FKD 25 con spessore di 2,5 cm, impedisce la formazione di ristagno idrico su coperture senza pendenza ed elevata lunghezza di falda.	Elemento filtrante Optigrün tipo 105, impedisce alle particelle fini del substrato di scendere nello strato drenante.	Estensivo Optigrün tipo E, necessario per l'inverdimento con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Strato vegetale
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	10	115	25	Tappeto protettivo e di accumulo idrico Optima PPT 500.	Elemento drenante e di accumulo idrico Optima FKD 25 con spessore 2,5 mm, i canali della faccia inferiore permettono un deflusso veloce dell'acqua, quelli superiori consentono un accumulo idrico eccellente.	Tessuto filtrante Optima PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato con alta capacità di ritenzione idrica ed alto potere drenante.	Strato vegetale	-
	BAUDER - GERMANIA	10	70	30	impermeabilizzazione resistente, contro la radicazione.	Elemento di drenaggio e accumulo WSP 50 con spessore 50 mm, evita la formazione di ristagni d'acqua.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato di vegetazione in Porlite (scisto argilloso).	Strato vegetale	-
	ZinCo - GERMANIA	10	60	20	Impermeabilizzante con guaina antiradice, necessario per la protezione del tetto dalle radici.	Felto separatore e protettivo TSM 32 ha la funzione di difendere i teli o le guaine antiradice da eventuali danneggiamenti meccanici; inoltre immagazzina e nutrimenti necessari alla crescita della vegetazione.	Elemento di drenaggio con spessore di 50 mm, è dotato di incavi per l'accumulo idrico.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale	-

TETTO "GIARDINO PENSILE" o INTENSIVO: sistema multifunzionale ad elevato accumulo d'acqua. È adatto per prati, piante perenni e, con substrato più profondo, per arbusti e alberi.												
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m³)	ACCUMULO IDRICO (l/m²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO	SETTIMO STRATO	OTTAVO STRATO
	ZinCo - GERMANIA	27	340	110	Telo antiradice di spessore 0,36, che protegge il tetto da possibili danni provocati dalla penetrazione delle radici. Il telo WSB 100-PO è consigliato per tetti irregolari, con molte sporgenze e rientranze.	Telo protettivo, ha la funzione di difendere i teli o le guaine antiradice da eventuali danneggiamenti meccanici. Il feltro ISM 50, spessore di 6 cm, ha inoltre funzione d'accumulo idrico e di sostanza nutritive.	Elemento di drenaggio Floradrain FD 60 con riempimento Zincolit Plus di spessore 60 mm, può raccogliere acqua piovana negli incavi di grandi dimensioni e far defluire in maniera sicura l'acqua in eccesso.	Strato filtrante SF, trasforma uno strato permeabile in uno drenante.	Substrato standard specifico per inverdimenti intensivi. In base allo spessore è possibile mettere a dimora piante perenni, arbusti più alti e alberi.	Strato vegetale	-	-
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	25-42	280-495	110-160	Tessuto protettivo e di accumulo idrico PPT 500, offre protezione meccanica.	Elemento drenante e di accumulo idrico FKD 60 con spessore di 6 mm, permette il deflusso veloce dell'acqua e nel contempo permette un eccellente accumulo idrico.	Tessuto filtrante PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato ad alta capacità di ritenzione idrica ed elevato potere drenante.	Strato vegetale	-	-	-
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	25-42	280-495	110-160	Tessuto protettivo e di accumulo idrico PPT 300, offre protezione meccanica.	Membrana antiradice con spessore di 0,8 mm, da applicare se l'impermeabilizzante è antiradice.	Sistema drenante Triangel, aumenta il processo drenante e velocizza le operazioni di distribuzione dell'acqua. Composto da pezzo di controllo scarico e profili drenanti.	Materiale drenante e di accumulo idrico Optilite 10/18, favorisce l'accrescimento delle piante, consentendo la risalita capillare.	Tessuto filtrante PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato di vegetazione adatto a realizzazioni intensive, elevate capacità di accumulo idrico ed alta porosità.	Strato vegetale	-
	BAUDERGERMANIA	28	306,5	117,5	Strato di separazione PE 02 con spessore 0,2 mm, fornisce protezione al manto di copertura.	Materassino di protezione FSM 600 con spessore di 4 mm, necessario per la protezione dell'impermeabilizzante.	Elemento di drenaggio e accumulo WSP 75 con spessore 75 mm, evita la formazione di ristagni d'acqua.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale	-	-
	BAUDERGERMANIA	26	326	113	Strato di separazione PE 02 con spessore 0,2 mm, fornisce protezione al manto di copertura.	Materassino di protezione FSM 600 con spessore di 4 mm, necessario per la protezione dell'impermeabilizzante.	Elemento di accumulo e drenaggio DSE 60 con spessore di 60 mm, progettato per scaricare l'acqua piovana e per accumulare una riserva idrica.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale	-	-
	BAUDERGERMANIA	30	389	111	Strato di separazione PE 02 con spessore 0,2 mm, fornisce protezione al manto di copertura.	Materassino di protezione FSM 600 con spessore di 4 mm, necessario per la protezione dell'impermeabilizzante.	Elemento di accumulo e drenaggio minerale.	Tessuto filtrante FV 125, impedisce alle particelle fini di passare dal substrato di vegetazione a quello di drenaggio.	Substrato studiato per accogliere e permettere la crescita della vegetazione scelta.	Strato vegetale	-	-
	SEIC/HARPO GROUP - ITALIA	-	-	-	Barriera al vapore.	Isolamento termico.	Strato di separazione, geotessile.	Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV.	Feltro di protezione ed accumulo MediPro MPH5.	Telo filtrante MediFilter MF 1.	Substrato SEIC per inverdimenti intensivi.	Strato vegetale.
	OPTIGRÜN - GERMANIA	22-30	360	40-90	Suoia protettiva tipo PECT 500, protegge l'impermeabilizzazione ed accumula acqua.	Elemento drenante tipo o FKD 60 con spessore di 60 mm, consente il rapido smaltimento dell'acqua in eccesso, evita la formazione di ristagno idrico su coperture senza inclinazione e con linee di deflusso molto lunghe (lunghezza di falda).	Materiale drenante Optigrün tipo PERL con composizione granulometrica speciale per il miglioramento dell'azione capillare e della capacità drenante.	Suoia filtrante tipo Optigrün 105 impedisce alle particelle fini del substrato di scendere nello strato drenante.	Substrato intensivo Optigrün tipo I con spessore di 23 cm, per inverdimento intensivo con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Strato vegetale	-	-

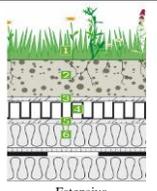
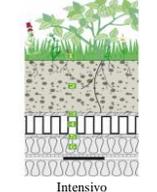
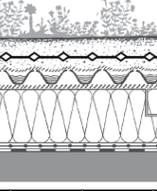
TETTO INTENSIVO LEGGERO : questo sistema viene utilizzato nel caso in cui non si vuole appesantire eccessivamente la costruzione, senza voler rinunciare ad avere un giardino pensile.												
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ³)	ACCUMULO IDRICO (l/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO	SETTIMO STRATO	OTTAVO STRATO
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	15-20	385	110-160	Tessuto protettivo e di accumulo idrico PPT 500, offre protezione meccanica.	Elemento drenante e di accumulo idrico FKD 60 con spessore di 6 mm, permette il deflusso veloce dell'acqua e nel contempo permette un eccellente accumulo idrico.	Tessuto filtrante Optima PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato ad alta capacità di ritenzione idrica ed elevato potere drenante.	Strato vegetale	-	-	-
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	15-20	385	110-160	Tessuto protettivo e di accumulo idrico PPT 300, offre protezione meccanica.	Membrana antiradice con spessore di 0,8 mm, da applicare se l'impermeabilizzante è antiradice.	Sistema drenante Triangel, aumenta il processo drenante e velocizza le operazioni di distribuzione dell'acqua. Composto da pozzetto di controllo scarico e profil drenanti.	Materiale drenante e di accumulo idrico Optilite 10/18, favorisce l'accrescimento delle piante, consentendo la risalita capillare.	Tessuto filtrante PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infiltrarsi nello strato drenante.	Substrato di vegetazione adatto a realizzazioni intensive, elevata capacità di accumulo idrico ed alta permeabilità.	Strato vegetale	-
	SEICHARPO GROUP - ITALIA	-	-	-	Barriera al vapore.	Isolamento termico.	Strato di separazione, geotessile.	Membrana impermeabilizzante sintetica antiradice HarpoPlan ZD UV.	Feltro di protezione ed accumulo MedioPro MP 500.	Telo filtrante MediFilter MF 1.	Substrato SEIC per inverdimenti intensivi, spessore medio 20-25 cm.	Strato vegetale.
	DAKU - ITALIA	24	215	16	Manto impermeabile ed antiradice che fornisce protezione dall'acqua e dall'azione delle radici.	Elemento drenante e di protezione, DAKU FSD 20 con spessore di 62mm, che evita il ristagno idrico dell'acqua piovane e di irrigazione, permette uno stoccaggio dell'acqua fino a 16l/m ² .	Strato filtrante STABILFILTER SFI, geotessile di spessore 1,45 mm, adatto all'uso come strato di separazione e filtro nella costruzione del verde pensile multistrato tra lo strato di drenaggio e il substrato.	Substrato di base del sistema ROOF SOIL 1, composto da materiale vulcanico viene posato con spessore di 15 cm per consentire la posa del prato; maggiori volumi in funzione della vegetazione arbustiva-arborea richiesta.	Substrato di semina, presenta caratteristiche simili al precedente ma con granulometria più fina per permettere la semina del prato.	Strato vegetale	-	-

TETTO INCLINATO: il tetto verde è applicabile anche a copertura inclinate; A differenza dell'estensivo ed intensivo realizzati sulle coperture piane, questa tipologia necessita di apposito sistema di trattamento per il substrato laddove la morfologia della copertura lo richiede e comunque su pendenze superiori ai 10-12° di inclinazione.												
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ²)	ACCUMULO IDRICO (l/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO	SETTIMO STRATO	OTTAVO STRATO
 inclinazione 5-20°	OPTIGRÜN - GERMANIA	14-18	190	33	Suoia di protezione Optigrün RMS 300, salvaguarda l'impermeabilizzazione e accumula acqua.	Elemento drenante e di accumulo idrico Optigrün OSP 75, ideale per tetti con pendenza fino a 20°.	Substrato Optigrün tipo E con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Suoia precoltivata con supporto geotessile biodegradabile idoneo per copertura con pendenza fino a 20°.	-	-	-	-
 inclinazione 15-45°	OPTIGRÜN - GERMANIA	10-12	150	33	Suoia di protezione Optigrün RMS 500, protegge l'impermeabilizzazione e accumula acqua.	Strato drenante Optigrün SSV 800 per il drenaggio mirato dell'acqua in eccesso.	Sistema antiscivolamento, impedisce lo scivolamento a valle dei substrati.	Substrato Optigrün tipo E con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Suoia precoltivata con supporto geotessile biodegradabile idoneo per copertura con pendenza superiore a 15°.	-	-	-
 inclinazione 15-45° "Rete e Traverse"	OPTIGRÜN - GERMANIA	10-12	150	33	Suoia di protezione Optigrün RMS 500, protegge l'impermeabilizzazione e accumula acqua.	Strato drenante Optigrün SSV 800 per il drenaggio mirato dell'acqua in eccesso.	Sistema antiscivolamento Optigrün "rete e traverse", ideale per tetti a due falde e tetti a botte con la stessa lunghezza;	Substrato Optigrün tipo E con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Suoia precoltivata con supporto geotessile biodegradabile idoneo per copertura con pendenza superiore a 15°.	-	-	-
 inclinazione fino a 50° "S"	OPTIGRÜN - GERMANIA	10-12	150	33	Suoia di protezione Optigrün RMS 500, protegge l'impermeabilizzazione e accumula acqua.	Strato drenante Optigrün SSV 800 per il drenaggio mirato dell'acqua in eccesso.	Sistema antiscivolamento Optigrün "S"; Necessario ad impedire lo scivolamento a valle dei substrati su superfici con inclinazione fino a 50°.	Substrato Optigrün tipo E con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e della ritenzione idrica.	Suoia precoltivata con supporto geotessile biodegradabile idoneo per copertura con pendenza superiore a 15°.	-	-	-
 Inclinazione tra 15-20°	ZinCo - GERMANIA	15	140	40	Feltro di accumulo e protezione BSM 64 con spessore di 7 mm, protegge il telo antiradice o la guaina per tetti con una capacità di accumulo idrico molto alta.	Elemento di drenaggio Floraset FS 75 con spessore di 75 mm, è dotato di incavi per l'accumulo idrico, adatto fino ad una pendenza di 25°.	Substrato vegetale adatto alla coltivazione e crescita delle piante.	Rete antierosione in juta JEG, tessuto pesante e a maglia grossa in juta al 100%, impedisce l'erosione dovuta a vento e acqua su superfici da poco ricoperte di humus. Per motivi ecologici il tetto di juta non è ignifugo; per tale motivo è necessario proteggerlo da fuoco e scintille.	Strato vegetale	-	-	-
 "Spiovente" inclinazione tra 20-35°	ZinCo - GERMANIA	12	155	64	Feltro di accumulo e protezione WSM 150 con spessore di 20 mm, protegge il telo antiradice o la guaina per tetti con una capacità di accumulo idrico molto alta.	Sistema antiscivolamento Georaster, composto da polietilene (HD-PE) con una barra centrale rinforzata per lo scarico delle fosse di spinta.	Substrato vegetale adatto alla coltivazione e crescita delle piante.	Speciali zolle prevegetate con arbusti precoltivati in campo aperto.	-	-	-	-

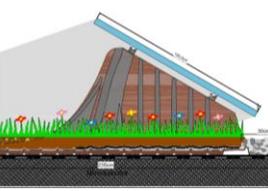
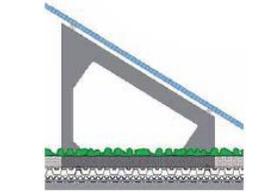
TETTO TRANSITABILE DA AUTOVEETURE: le vie carrabili realizzate su coperture richiedono che la struttura e la costruzione della copertura siano entrambe in grado di sostenere i carichi. Inoltre, il traffico veicolare sulla copertura genera forze orizzontali e movimenti torsionali notevoli, che devono essere assorbiti, per effetto delle sterzate, delle frenate e dell'accelerazione.													NONO STRATO	DECIMO STRATO
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ³)	ACCUMULO IDRICO (l/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO	SETTIMO STRATO	OTTAVO STRATO	NONO STRATO	DECIMO STRATO
	OPTIGRÜN - GERMANIA	18	700	-	Impermeabilizzante Optigrün HDPE®, necessario per la protezione del tetto e utile alla distribuzione dei carichi, con spessore variabile da 1,0 mm a 0,2 mm.	Stuoia drenante FKD 12 di spessore 1,2 cm, evita il ristagno idrico, presenta un'elevata capacità drenante a carico ridotto.	Strato portante di ghiaia di spessore 10-15 mm, assicura la stabilità della pavimentazione, distribuisce il carico e crea la pendenza.	Letto di posa "splitt" di spessore compreso tra 3-5 cm, necessario alla formazione del piano di posa per la pavimentazione.	Pavimentazione di spessore tra i 10-12 cm, finitura con tasselli autobloccanti, piastre in pietra naturale, calcestruzzo, ect.					
	ZinCo - GERMANIA	26	360	100	Telo antiradice di spessore 0,36, che protegge il tetto da possibili danni provocati dalla penetrazione delle radici. Il telo WSB 100-PO è consigliato per tetti irregolari, con molte sporgenze e rientranze.	Telo protettivo, ha la funzione di difendere i teli o le guaine antiradice da eventuali danneggiamenti meccanici. Il feltro ISM 50, spessore di 6 cm, ha inoltre funzione d'accumulo idrico e di sostanza nutritiva.	Telo drenante e di accumulo che consente di raccogliere l'acqua piovana negli incavi superiori e di far defluire in maniera sicura l'acqua in eccesso. Il telo Stablobrain è stato sviluppato proprio per l'uso con grandi carichi come le pavimentazioni carrabili.	Strato filtrante TG, trasforma uno strato permeabile in uno drenante.	Strato di fissaggio necessario per la posa del lastricato.	Strato di cemento o in lastricato che permette il passaggio dei mezzi.				
	SEICHARPO GROUP - ITALIA	-	-	-	Barriera al vapore.	Isolamento termico.	Strato di separazione MediTex MX12	Impermeabilizzazione con membrana antiradice HarpPlan ZD UV.	Strato di scorrimento MediSlide MS.	Tappetino di protezione MediGum MG.	Strato di drenaggio MediDrain MD Protect con spessore di 2,5 cm, abbinato a gotesille di filtrazione.	Fondazione drenante con spessore minimo di 15 cm.	Allettamento in sabbia con spessore di 3-5 cm.	Pavimentazione autobloccante.
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	28-35	390	30-35	Elemento protettivo Optima in PEAD*.	Elemento drenante e di accumulo idrico FKD 12 con spessore di 1,2 cm, evita i ristagni d'acqua.	Materiale drenante e di accumulo idrico Optilite 3/5, favorisce l'accrescimento delle radici, consentendo la risalita capillare.	Substrato ad alta capacità di ritenzione idrica ed elevato potere drenante.	Elemento salvapunto, griglia carrabile in PEAD.	Strato vegetale				
	DARU - ITALIA	26	270	-	Manto impermeabile ed antiradice che fornisce protezione dall'acqua e dall'azione delle radici.	Elemento drenante e di protezione che evita il ristagno idrico dell'acqua piovana e di irrigazione.	Strato di protezione ed accumulo idrico FSD 20 di spessore 62mm, oltre a svolgere la funzione di protezione del manto impermeabile, immagazzinano l'acqua piovana e la restituiscono alla vegetazione attraverso un processo di condensazione e di micro-evaporazione definito "acqua di diffusione" che permette alla vegetazione di disporre così di un approvvigionamento d'acqua a lunga durata.	Lapillo di lava con granulometria compresa tra 3-10 mm, utilizzato insieme agli altri elementi per garantire il drenaggio e aumentare la funzione di filtro del gotesille impedendone l'accumulo di parti fini che lo renderebbero a lungo termine permeabile.	Strato filtrante STABLFILTER SF1, gotesille di spessore 1,45 mm, adatto all'uso come strato di separazione e filtro nella costruzione del verde pensile multistrato tra lo strato di drenaggio e il substrato; ha una struttura fibrosa, omogenea e stabile, ad alta permeabilità e garantisce una filtrazione ottimale delle particelle fini presenti nei substrati.	Substrato di base del sistema, composto da materiale vulcanico viene posato con spessore di 15 cm per consentire la posa del prato; maggiori volumi in funzione della vegetazione arbustiva-arborea richiesta.	Griglia salvapunto HDPE che ne permetta la carrabilità.	Substrato di semina, presenta caratteristiche simili al precedente ma con granulometria più fina per permettere la semina del prato.		

TETTO TERMICO: tetto verde con certificazione energetica, isolamento invernale ed estivo, adatto ad inverdimenti intensivi ed estensivi.										
SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ²)	ACCUMULO IDRICO (l/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	10 (senza isolante)	115	20	Elemento termoisolante, con spessore variabile in base alle specifiche esigenze.	Tappeto protettivo e di accumulo idrico Optima PPT 500, offre protezione meccanica.	Elemento drenante e di accumulo idrico Optima FKD 25 con spessore 2,5 mm, i canali della faccia inferiore permettono un deflusso veloce dell'acqua, quelli superiori consentono un accumulo idrico eccellente.	Tessuto filtrante Optima PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infilarsi nello strato drenante.	Substrato ad alta capacità di ritenzione idrica ed elevato potere drenante.	Strato vegetale
	OPTIMA Giardini Pensili - ITALIA	24-34 (senza isolante)	375	100	Elemento termoisolante, con spessore variabile in base alle specifiche esigenze.	Tappeto protettivo e di accumulo idrico Optima PPT 500, offre protezione meccanica.	Elemento drenante e di accumulo idrico Optima FKD 40 con spessore 4 mm, i canali della faccia inferiore permettono un deflusso veloce dell'acqua, quelli superiori consentono un accumulo idrico eccellente.	Tessuto filtrante Optima PPST 100, impedisce alle particelle fini del substrato di infilarsi nello strato drenante.	Substrato ad alta capacità di ritenzione idrica ed elevato potere drenante.	Strato vegetale

TETTO ROVESCIO: è caratterizzato dal fatto che l'isolante termico si trova al di sopra della guaina impermeabilizzante.

SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ²)	ACCUMULO IDRICO (lt/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO	SESTO STRATO
 Estensivo	OPTIGRÜN - GERMANIA	10	120	25	Lastre di coibentazione, resistente alla compressione.	Strato divisorio Optigrun RS, permeabile alla diffusione.	Elemento drenante FKD 25 con spessore 2,5 mm, permette un rapido smaltimento dell'acqua in eccesso, evita la formazione di ristagno idrico per coperture con inclinazione modesta, inoltre è utile per la ripartizione dei carichi e diffusione delle pressioni di vapore.	Stuoia filtrante I05, impedisce alle particelle fini del substrato di scendere nello strato drenante.	Substrato tipo E per l'inverdimento estensivo con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e di ritenzione idrica.	Strato vegetale
 Intensivo	OPTIGRÜN - GERMANIA	24 (senza isolante)	290	40	Lastre di coibentazione, resistente alla compressione.	Strato divisorio Optigrun RS, permeabile alla diffusione.	Elemento drenante FKD 40 con spessore 4 mm, permette un rapido smaltimento dell'acqua in eccesso, alta capacità drenante con peso ridotto, evita la formazione di ristagno idrico per coperture con inclinazione modesta, inoltre è utile per la ripartizione dei carichi e diffusione delle pressioni di vapore.	Stuoia filtrante I05, impedisce alle particelle fini del substrato di scendere nello strato drenante.	Substrato tipo I per l'inverdimento intensivo con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e di ritenzione idrica.	Strato vegetale
	ZinCo - GERMANIA	13	145	40	Telo antiradice WSF 40 con spessore di 0,36 mm, protegge l'isolamento del tetto da radici penetranti.	Feltro di separazione TGV 21, protegge l'isolamento del tetto dalle forze di trazione e taglio e nell'evitare la formazione di condensa all'interno dell'isolamento termico.	Elemento di drenaggio Floradrain FD 25-E con spessore di 25 mm, può raccogliere acqua piovana negli incavi superiori e far defluire in maniera sicura l'acqua in eccesso.	Strato filtrante SF, trasforma uno strato permeabile in uno drenante.	Substrato standard specifico per inverdimenti intensivi. In base allo spessore è possibile mettere a dimora piante perenni, arbusti più alti e alberi.	Strato vegetale

COMBINAZIONE VERDE PENSILE E FOTOVOLTAICO: i pannelli fotovoltaici convertono la luce solare in energia elettrica. Quando la temperatura supera i 25°C, la loro efficienza si riduce dello 0,5% per ogni grado aggiuntivo. L'effetto rinfrescante del tetto verde può migliorare significativamente l'efficienza dei pannelli solari.

SEZIONE	DITTA - NAZIONE	SPESSORE (cm)	PESO SATURO (kg/m ²)	ACCUMULO IDRICO (lt/m ²)	PRIMO STRATO	SECONDO STRATO	TERZO STRATO	QUARTO STRATO	QUINTO STRATO
	OPTIGRÜN - GERMANIA	10	140	25	Stuoia di protezione RMS 500, protegge l'impermeabilizzazione ed accumula acqua.	Elemento di drenaggio ed accumulo idrico Solarsafe Typ III con profili di fissaggio in acciaio inox.	Substrato tipo E per l'inverdimento estensivo con speciale formulazione per l'ottimizzazione della capacità drenante e di ritenzione idrica.	Strato vegetale	Moduli fotovoltaici.
	ZinCo - GERMANIA	-	-	-	Telo antiradice WSF 40 con spessore di 0,36 mm, protegge l'isolamento del tetto da radici penetranti.	Feltro protetti ad accumulo SSM 45 con spessore di 5 mm, accumula acqua e nutrimenti e migliorano l'isolamento acustico da calpestio.	Substrato di vegetale per la coltura delle piante	Strato vegetale	Moduli fotovoltaici.

Riferimenti Bibliografici

- [1] I.Pittalunga, C.Schenone, A.Palla e L.G.Lanza, *Le prestazioni acustiche del verde pensile:assorbimento sonoro di coperture di diversa configurazione*. Atti del Convegno “2a Giornata di studio sull’acustica ambientale”, 30 Ottobre 2009.
- [2] A. Paolo, *Verde Pensile in Italia ed Europa*, Il Verde Editoriale Milano.
- [3] Realizzare Tetti verdi
- [4] P. Abram, *Giardini Pensili - Copertura a verde e gestione delle acque meteoriche*, Esselibri.
- [5] FLL, *Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites*, 2002.
- [6] *Quaderni del Manuale di Progettazione Edilizia, Le Chiusure Orizzontali -* Gottfried Arie, Hoepli, 2010
- [7] *Bioarchitettura n° 55, pp. 36-37, Febbraio- Marzo 2009*
- [8] UNI 11235, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*
- [9] *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Green Roof -* Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2008.
- [10] Jeroen Mentens, Dirk Raes, Martin Hermy. *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?*. Landscape and Urban Planning 77 (2006) 217–226.

-
- [11] H. S. Yang, J. Kang e M. S. Choi. *Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. Building and Environment*, n. 50, pp. 44-55, 2012.
- [12] *L'evapotraspirazione come sistema di smaltimento delle acque reflue* – Christian Barrella, Nicola G. Grillo, Geva edizioni, 2006.
- [13] *A comprehensive study of the impact of green roof on building Energy performance* - Issa Jaffal, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, University of La Rochelle, France, 2012.
- [14] *Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate* – Wong Nyuk Hiena, Tam Puay Yokb, Chen Yua, Department of Building, School of Design and Environment, National University of Singapore, 2005.
- [15] *Green roof Energy and water related performance in the Mediterranean climate* – R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi, *Building and Environment* n. 45, 2010.
- [16] *Assessment of green roof performance for sustainable buildings under winter weather Conditions* - Mingjie Zhao, J. Srebric, Department of Architectural Engineering, The Pennsylvania State University, USA, 2012.

Capitolo 2. Il sito sperimentale del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale Unical

In questo capitolo viene descritta la realizzazione del sito sperimentale sulla copertura del Cubo 46C del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale dell'Università della Calabria. Sono descritte dapprima le fasi di progettazione delle stratigrafie, del sistema di acquisizione dati e dell'impianto elettrico a corredo. Viene successivamente illustrata la fase di realizzazione del tetto verde e del sistema di monitoraggio con un'accurata descrizione della sensoristica impiegata per il rilievo delle grandezze di interesse.

2.1 Progettazione dei settori e delle stratigrafie

Il sito sperimentale è stato realizzato sulla copertura del cubo 46C dell'Università della Calabria. L'edificio universitario su cui sorge la copertura a verde si sviluppa su una pianta quadrata di lato 21.30 m; ha altezza di 18 metri e si compone di 5 livelli, di cui uno interrato. Ogni piano ha un'altezza di 2.70 m, ad eccezione del piano interrato, alto 4.40 m, e della zona sottostante la copertura, alta 3.60 m.

La copertura a verde è stata predisposta con riferimento alle linee guida della norma UNI 11235, e suddivisa in più settori differenziati per tipologia degli strati con lo scopo di valutare l'influenza di differenti stratigrafie del tetto verde sulle prestazioni energetiche e sulla gestione delle acque meteoriche. In particolare la superficie della copertura è stata suddivisa in 4 settori, di dimensioni di circa 50 m² delimitati perimetralmente da un cordolo in materiale da costruzione leggero.

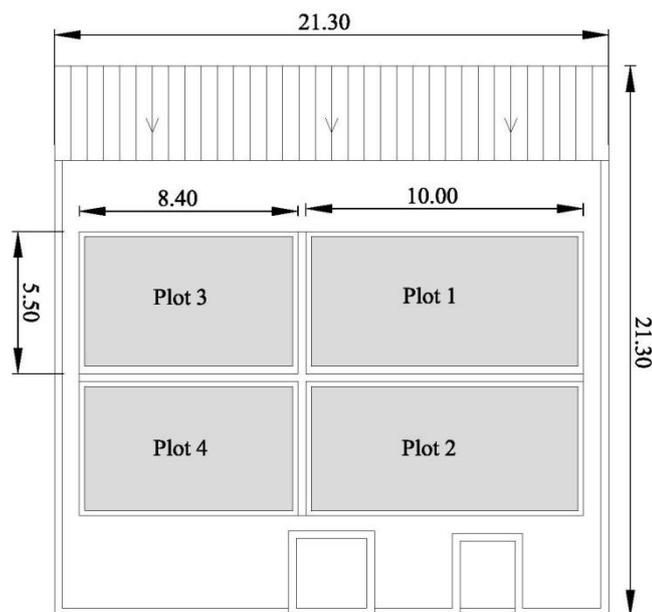


Fig. 2.1. Suddivisione in settori della copertura

In dettaglio, come si evince dalla figura 2.1, si ha:

- ✓ Settore 1 e 2: Area 55 m²
- ✓ Settore 3 e 4: Area 46 m²

A seguito di un'analisi dettagliata dei prodotti offerti dal mercato si è pervenuti a definire la tipologia commerciale dei materiali usati nelle differenti stratigrafie e la composizione delle stratigrafie stesse nei differenti settori. In particolare sono stati selezionati materiali che presentassero proprietà termiche ed idrauliche differenti, privilegiando criteri di sostenibilità (utilizzo di materiali riciclati, riutilizzo di scarti di lavorazioni come il laterizio frantumato, etc.).

Nel settore 4 non è stata installata nessuna stratigrafia, di modo che esso riproponga la copertura originale del tetto, e si ponga ovviamente come riferimento per i confronti tra i diversi settori. Nei settori 1 e 2 è stata installata la stessa composizione stratigrafica, ma sono stati utilizzati materiali con proprietà termofisiche ed idrauliche differenti. Nel settore 3 è stato previsto un ulteriore strato di isolamento termico ed in più non è stata prevista la piantumazione di vegetazione.

Al di sotto di ogni settore è stato previsto un massetto alleggerito con perle di polistirene espanso per la realizzazione di un sottofondo per fornire ai vari settori la giusta inclinazione per una corretta gestione delle acque di dilavamento. Il calcestruzzo leggero è ottenuto dalla

miscelazione di perle di polistirene espanso additivate sferiche e di granulometria controllata, con boiacche di cemento; tale combinazione dà come risultato un materiale leggero con ottime prestazioni meccaniche e di isolamento termoacustico. La densità è pari a 250 kg/m^3 e la conducibilità termica è pari a circa $0,088 \text{ W/mK}$.

SETTORE 1:

- **Strato Antiradice-Impermeabile.** (Defend antiradice della Index Italia) Membrana impermeabilizzante bitume polimero elastoplastomerica di 4 mm di spessore con additivo antiradice phenoxy fatty acid ester, armata con “tessuto non tessuto” di poliestere da filo continuo Spunbond certificata come resistente alle radici dal FORSCHUNGSANSTALT GEISENHEIM secondo le FLL-Verfahren. La membrana ha un carico di rottura a trazione (EN12311-1) L./T. di 650/400 N/50 mm, un allungamento a rottura (EN 12311-1) L./T. del 40/40%, una resistenza al punzonamento dinamico (EN 12691) di 1.250 mm, una resistenza al punzonamento statico (EN 12730) di 15 kg, una flessibilità a freddo di -15°C e supera la prova di resistenza alle radici conforme la norma europea EN 13948.



Fig. 2.2. Strato antiradice bituminoso

- **Strato di protezione e accumulo.** (Zinco TSM32). Feltro indistruttibile in fibre di sintesi in poliestere, utilizzabile ai sensi di DIN 18 195 come strato protettivo su teli antiradici. Immagazzina acqua e nutrienti, compatibile con sostanze bituminose, biologicamente e chimicamente neutro, resistente alle alte temperature, antistrappo; prodotto con fibre riciclate. Classe di resistenza 3, costruzione materiale di classe B2, punto di fusione: 260° ca., capacità di accumulo idrico 3 l/m^2 . Spessore 3 mm, peso 320 g/m^2 .



Fig. 2.3. Feltro di protezione ed accumulo

- **Strato di drenaggio ed accumulo.** (Climagrün, Climadrain 55). Materiale: ESP, spessore 55 mm, peso 460 g/m², resistenza alla compressione 54,60 kPa sec. DIN EN ISO 25619-2, capacità drenante sec. DIN EN ISO 12958, accumulo idrico 11 l/m², capacità di riempimento 18,00 l/m². Realizzato in materiale riciclato.



Fig. 2.4. Strato di drenaggio in polistirene

- **Strato filtrante.** (Zinco TG). Telo filtrante termocompattato in polipropilene/polietilene; alta capacità di carico meccanico. Flusso idrico $Q = 60 \text{ l/m}^2 \times s$ con 10 c m. Classe di resistenza: 3, peso 190 g/m².



Fig. 2.5. Strato filtrante

SETTORE 2:

- **Strato Antiradice-Impermeabile.** (Defend antiradice della Index Italia).
- **Strato di protezione e accumulo.** (Zinco BSM64). Feltro indistruttibile in fibre di sintesi in polipropilene con inserto di membrana protettiva stabilizzante. Utilizzabile come strato di protezione su teli antiradice con una capacità di accumulo idrico particolarmente alto, resistente alle sostanze bituminose, biologicamente e chimicamente neutro, non marcisce, classe di resistenza 3, prodotto con fibre di riciclo. Punto di fusione 165° C, capacità di accumulo idrico ca. 7 l/m², spessore 7 mm, peso 650 g/m².



Fig. 2.6. Feltro di protezione ed accumulo

- **Strato di drenaggio ed accumulo.** (Climagrün, FKD 40). Materiale PE-AD riciclato, con fori per l'aerazione e la diffusione, resistenza alla compressione 144 kN/m^2 secondo EN ISO 25619-2, capacità drenante con 2% di pendenza $2,3 \text{ l/s} \cdot \text{m}$ secondo EN ISO12958, capacità di accumulo idrico $8,7 \text{ l/m}^2$, altezza 40 mm, peso $2,3 \text{ Kg/m}^2$.



Fig. 2.7. Strato di drenaggio in PVC

- **Strato Filtrante.** (CLIMAGRÜN – Stuoia Filtrante 105). polipropilene 100% a filo continuo, coesionato meccanicamente con peso 105 g/m^2 , resistenza alla trazione long./trasv. 8 kN/m secondo EN ISO 10319, resistenza al punzonamento statico 1240 N secondo EN ISO 12236, apertura di filtrazione O90 secondo EN ISO 12956.



Fig. 2.8. Strato filtrante

SETTORE 3:

- **Strato Antiradice-Impermeabile.** (Zinco, Harpoplan ZD UV). Resistente ai raggi UV con elevata resistenza all'invecchiamento e agli agenti ambientali comuni. Presenta elevata stabilità alle variazioni dimensionali $\leq 0,25$ % secondo EN 1107-2 e resistenza alle sollecitazioni meccaniche. Elevata permeabilità al vapore acqueo $\mu=25.500$. Resistenza alla penetrazione delle radici secondo EN 13948. Spessore 1,8 mm.

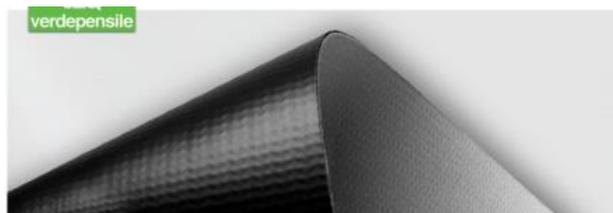


Fig. 2.9. Strato antiradice in PVC

- **Strato di protezione e accumulo.** (Zinco TSM32).
- **Strato di isolamento termico.** (ISOLKAPPA, ISOLPLAN 120). Pannello isolante di 3 cm in polistirene espanso sinterizzato per sistemi di isolamento termico secondo la norma UNI EN 13163:2009. Reazione al fuoco classe E. Conducibilità termica $\lambda= 0,034$ W/mK secondo la norma EN 12667.



Fig. 2.10. Strato di isolamento termico

- **Strato di drenaggio ed accumulo.** (Climagrün, Climadrain 55).
- **Strato Filtrante.** (CLIMAGRÜN – Stuoia Filtrante 105).

SUBSTRATO

Il substrato scelto ed installato nel sito sperimentale è ottenuto dalla miscelazione in opportune percentuali di una parte minerale e di una parte organica. Gli elementi che

compongono la parte minerale, sono costituiti da materiali vulcanici quali lapillo vulcanico e laterizi frantumati, con limitata presenza di pomice e zeoliti. La parte organica presenta elementi quali torba, residui vegetali compostati. Di particolare interesse è l'impiego del laterizio frantumato: si tratta di materiale granulare prodotto con laterizi selezionati, frantumati provenienti da puro scarto di produzione, presenta di conseguenza innegabili vantaggi per la salvaguardia dell'ambiente in quanto contribuisce a non spingere univocamente l'approvvigionamento di materiale in cave e offre, invece, interessanti possibilità per il riutilizzo di un materiale pregiato. Il peso medio del substrato SEIC a norma in condizioni di massima saturazione è di circa 1300/1400 kg/mc (il peso in condizioni di umidità naturale oscilla dai 1100 ai 1200 kg/mc), mentre quello di un terreno naturale è di 1800-2000 kg/mc. La conducibilità termica del substrato è variabile in funzione del contenuto idrico. Dai test in fase di certificazione, si è ricavato un valore medio pari a 0,27 W/(m K). L'accumulo d'acqua massimo è del 40% come da norma UNI11235. La quantità di sostanza organica è inferiore al 6%. Il resto è composto principalmente da lapilli di varia granulometria (fuso granulometrico conforme alla norma UNI11235) con un ridotto contenuto di pomice. I dati di seguito riportati sono stati certificati dal laboratorio MAC (per quanto riguarda la massa volumica apparente) e da analisi condotte da istituti universitari (per quanto riguarda la capacità termica). La massa areica massima comprensiva del substrato e degli altri elementi costitutivi del sistema viene comunque dichiarata dall'ufficio tecnico SEIC per ogni sistema proposto.

	<i>Secco</i>	<i>Saturo d'acqua</i>
ρ	1060 kg/m ³	1360 kg/m ³
c	1227 J/(kg K)	1388 J/(kg K)

VEGETAZIONE

Per la scelta del piano vegetazionale si è fatto riferimento alla fascia altitudinale in cui ricade il sito sperimentale e, tenendo in considerazione una serie di fattori climatici, la selezione delle specie per le associazioni vegetali è avvenuta vagliando le piante autoctone mediterranee, che maggiormente si adattano al nostro clima.

Per il piano vegetazionale per istallazione di tipo estensivo sono numerosi i fattori che limitano la selezione delle specie e la definizione quindi delle associazioni è necessario infatti tener conto di:

- ✓ profondità del substrato
- ✓ caratteristiche fisico-chimiche del terreno
- ✓ clima
- ✓ ventosità
- ✓ esposizione

La scelta della vegetazione nel sito di sperimentazione installato presso l'Università della Calabria ricade dunque in un range ristretto da fattori statici, chimico-fisici e ambientali. Considerando questi parametri le specie vegetali selezionate presentano un'elevata adattabilità alle alte temperature estive e al conseguente stress idrico, al ridotto spessore di substrato (8 cm), alla ventosità, hanno inoltre una notevole capacità di insediamento e di riproduzione. È fondamentale inoltre ribadire che le specie autoctone mediterranee rivestono un ruolo ecologico sostanziale in quanto forniscono un habitat e sono una fonte di nutrimento per molte specie animali. Di seguito vengono quindi riportate le principali caratteristiche delle specie selezionate.

Genere	<i>Carpobrotus edulis</i> – <i>Carpobrotus acinaciformis</i>
Altezza dal terreno	10 cm
Foglie	Le foglie hanno sezione triangolare, con il margine inferiore crenato e dentellato, di colore verde brillante.
Fiori	Di colore porpora o giallo, che diventano rosa col tempo, si aprono soltanto al sole.
Fioritura	Maggio - luglio
Riproduzione	Si riproduce sia per seme che per talee.
Terreno	Prediligono terreni sabbiosi, drenati e poco fertili; nonché richiedono una posizione molto soleggiata.
Note	Il genere è diffuso principalmente nelle zone desertiche del Sudafrica, ma alcune specie (<i>Carpobrotus acinaciformis</i> , detto Fico degli ottentotti, e <i>Carpobrotus edulis</i>) sono state introdotte e si sono naturalizzate nelle aree costiere mediterranee. Le specie del genere <i>Carpobrotus</i> sono adatte alla coltivazione in giardini rocciosi.

Comprende piante succulente perenni che formano cespugli prostrato-ascendenti radicanti ai nodi.

Le due specie differiscono per il colore dei fiori e per alcune caratteristiche delle foglie

Genere	<i>Cerastium tomentosum</i>
Altezza dal terreno	10-15 cm
Foglie	Oblunghe - spatolate, leggermente lanose e argentate.
Fiori	I fiori sono larghi 1-1,5 cm, con lobi stretti portati su fusti sottili e ramificati.
Fioritura	Maggio – luglio
Riproduzione	La moltiplicazione avviene facilmente sia per talee che per seme.
Terreno	Questo genere preferisce terreni ben drenati, in posizione soleggiata.
Note	
Genere di 60 specie di piante erbacee, perenni e rustiche, molte di queste sono invasive ed infestanti, ma la specie descritta è adatta per il giardino roccioso e per formare bordure basse.	

Genere	<i>Dianthus granthianopolitanus</i> sin. <i>Dianthus caesins</i>
Altezza dal terreno	10-20 cm
Foglie	Foglie opposte lanceolate, molli e piane, rigide e caniculate, di colore verde grigiastro.
Fiori	I fiori sono rosa, molto profumati, sfrangiati, larghi 2,5 cm.
Fioritura	Maggio – luglio
Riproduzione	Si moltiplicano con la semina, per mezzo di talea e per divisione dei cespi.
Terreno	Il garofano esige esposizione soleggiata, terreno ricco di sostanze organiche e minerali, compatto, calcareo e asciutto.
Note	
Il genere comprende oltre 300 specie di piante erbacee o sublegnose, annuali, biennali e perenni, originarie delle zone temperate del globo, di altezza tra i 25 e i 100 cm.	
Il <i>Dianthus granthianopolitanus</i> è una pianta molto ornamentale e profumata, presenta fusti striscianti e radicanti. Risulta essere la più longeva tra le specie di <i>Dianthus</i> .	

Carpobrotus edulis - Carpobrotus acinaciformis

Pianta diffusa su tutto il territorio del bacino del Mediterraneo, in particolare nell'Italia centro-meridionale e le isole dove copre ormai vaste estensioni. Ha portamento strisciante con cauli articolati, radicanti ai nodi, che possono estendersi fino a 2 m di lunghezza ricoprendo quindi vaste porzioni di substrato. Tollera ampiamente l'esposizione al sole e resiste anche a lunghi periodi di siccità grazie ad adattamenti morfologici e fisiologici propri di questa specie. Non è soggetta a particolari infestazioni di parassiti animali e vegetali, considerando inoltre la sua rusticità, le eventuali patologie difficilmente ne influenzano il corretto sviluppo.



Fig. 2.11. Pianta di *Carpobrotus edulis*.



Fig. 2.12. Pianta di *Carpobrotus acinaciformis*.

Cerastium tomentosum

Pianta spontanea diffusa in tutto il sud dell'Europa, non ha portamento strisciante ma cresce in modo compatto e raramente arriva ai 15 cm di altezza dal suolo. Viene spesso utilizzato per la formazione di un tappeto erboso ed uniforme a ridotta manutenzione, infatti non necessita di particolari interventi di manutenzione sia per quanto riguarda le esigenze nutrizionali sia per eventuali parassitosi.



Fig. 2.13. Pianta di *Carpobrotus acinaciformis*.

Dianthus granthianopolitanus

Questa pianta è molto apprezzata da un punto di vista estetico in quanto molto ornamentale e profumata. I fusti sono ad andamento strisciante e presentano delle radichette tali da consentire l'ancoraggio della pianta al substrato durante lo sviluppo orizzontale. Può essere soggetta a infestazioni di parassiti animali, ma essendo una pianta rustica presenta una buona resistenza alle diverse patologie, non richiedendo quindi particolari interventi di manutenzione ordinaria.



Fig. 2.14. Pianta di *Dianthus granthianopolitanus*.

La vegetazione selezionata presenta le seguenti caratteristiche:

- ✓ Resistenza allo stress idrico,
- ✓ Resistenza allo stress termico,
- ✓ Basse esigenze nutritive,
- ✓ Resistenza all'irraggiamento solare,
- ✓ Resistenza a patologie e parassitosi,
- ✓ Massimo ombreggiamento,
- ✓ Portamento strisciante,
- ✓ Erbacee a piccolo sviluppo,
- ✓ Ridotta manutenzione,
- ✓ Facilità di propagazione.

Di seguito si riportano le sezioni dettagliate dei singoli settori con allegata indicazione delle principali caratteristiche dei singoli strati.

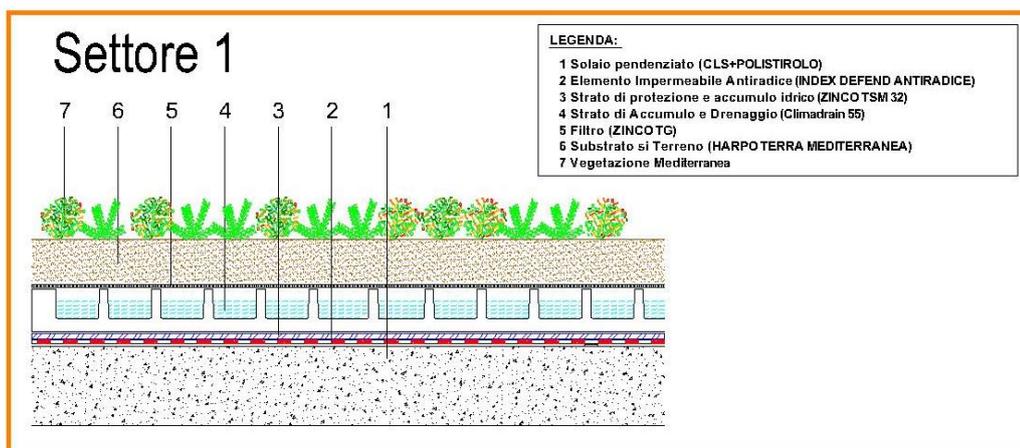


Fig. 2.15. Stratigrafia settore 1

Settore 1				
Strato	Spessore [mm]	Proprietà	Valore	Unità di Misura
Terreno	80	Conducibilità	0.27	W/m K
		Calore specifico	1307	J/kg K
		Densità	1210	kg/m ³
Climadrain 55	55	Resistenza termica	0.4	m ² K/W
TSM 32	3	Resistenza termica	0.71	m ² K/W
Index Defend	4	Conducibilità	0.2	W/m K
		Calore specifico	1925	J/kg K
		Densità	900	kg/m ³
Massetto in pendenza	20	Conducibilità	0.098	W/m K
		Calore specifico	1000	J/kg K
		Densità	400	kg/m ³
Impermeabilizzazione Icopas	3	Conducibilità	0.17	W/m K
		Calore specifico	1700	J/kg K
		Densità	1030	kg/m ³

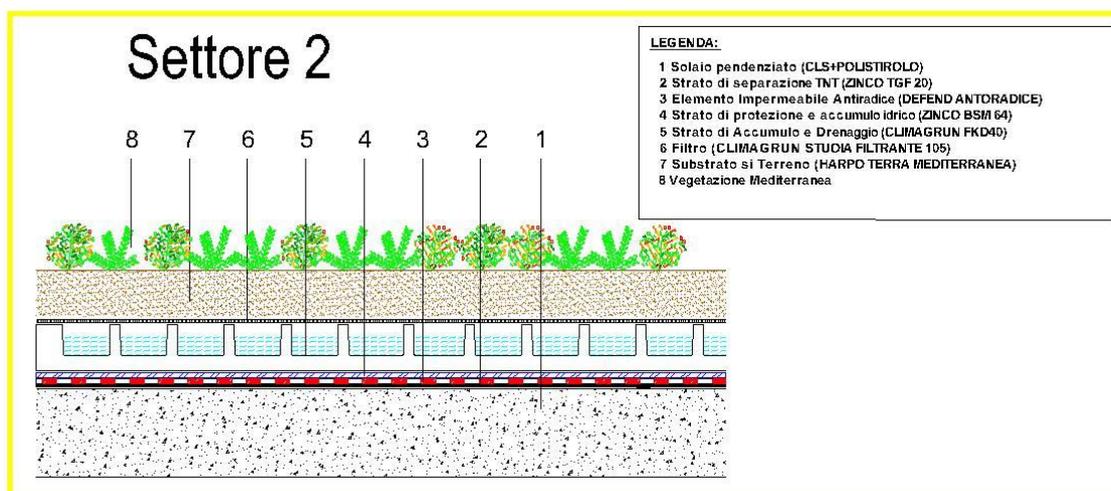


Fig. 2.16. Stratigrafia settore 2

Settore 2				
Strato	Spessore [mm]	Proprietà	Valore	Unità di Misura
Terreno	80	Conducibilità	0.27	W/m K
		Calore specifico	1307	J/kg K
		Densità	1210	kg/m ³
FKD 40	40	Resistenza termica	0.4	m ² K/W
BSM 64	7	Resistenza termica	0.71	m ² K/W
Index Defend	4	Conducibilità	0.2	W/m K
		Calore specifico	1925	J/kg K
		Densità	900	kg/m ³
Massetto in pendenza	20	Conducibilità	0.098	W/m K
		Calore specifico	1000	J/kg K
		Densità	400	kg/m ³
Impermeabilizzazione Icopas	3	Conducibilità	0.17	W/m K
		Calore specifico	1700	J/kg K
		Densità	1030	kg/m ³

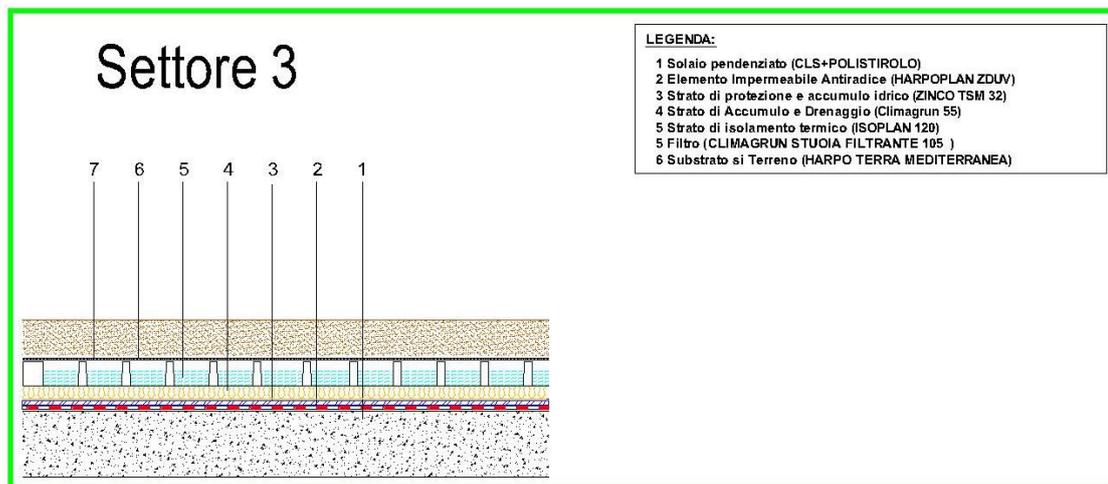


Fig. 2.17. Stratigrafia settore 3

Settore 3				
Strato	Spessore [mm]	Proprietà	Valore	Unità di Misura
Terreno	80	Conducibilità	0.27	W/m K
		Calore specifico	1307	J/kg K
		Densità	1210	kg/m ³
Climadrain 55	55	Resistenza termica	0.4	m ² K/W
Isoplan	30	Resistenza termica	0.91	m ² K/W
TSM 32	3	Resistenza termica	0.71	m ² K/W
Harpoplan ZD UV	1.8	Conducibilità	0.16	W/m K
		Calore specifico	1200	J/kg K
		Densità	1400	kg/m ³
Massetto in pendenza	20	Conducibilità	0.098	W/m K
		Calore specifico	1000	J/kg K
		Densità	400	kg/m ³
Impermeabilizzazione Icopas	3	Conducibilità	0.17	W/m K
		Calore specifico	1700	J/kg K
		Densità	1030	kg/m ³

2.2 Progettazione del sistema di monitoraggio e del sistema DAQ

2.2.1 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è sostanzialmente costituito da un congruo numero di sensori atti a misurare una serie di grandezze nei vari strati del tetto verde e nell'ambiente circostante.

Le grandezze climatiche monitorate sono:

- ✓ Velocità e direzione del vento;
- ✓ Temperatura dell'aria;
- ✓ Le precipitazioni;
- ✓ La pressione atmosferica;
- ✓ L'umidità relativa;
- ✓ La radiazione solare sul piano orizzontale.

L'analisi di tali variabili climatiche consente di valutare le condizioni al contorno del sistema tetto verde e l'interazione del sistema edificio-tetto.

Le grandezze termofisiche monitorate, per quanto riguarda la stratigrafia del tetto verde e ambienti ad esso connessi, sono:

- ✓ Temperatura superficiale esterna del solaio;
- ✓ Temperatura superficiale del massetto alleggerito;
- ✓ Temperatura del terreno;
- ✓ Contenuto volumetrico d'acqua del terreno;
- ✓ Presenza acqua nella vaschetta di drenaggio.

L'analisi di tali variabili consente di valutare l'influenza della copertura a verde sul comportamento termofisico dell'edificio e di quantificare l'interazione del sistema edificio-tetto. Le misure delle varie grandezze (climatiche, termofisiche, idrologiche) sono effettuate mediante appositi sensori:

- ✓ La velocità e direzione del vento tramite tachoanemometro;
- ✓ Le precipitazioni tramite pluviometro;
- ✓ La pressione atmosferica tramite barometro;

- ✓ La temperatura e umidità dell'aria tramite termoigrometro;
- ✓ La radiazione solare e le sue componenti tramite apposita sensoristica dotata di filtro;
- ✓ La temperatura degli strati tramite termoresistenze al platino pt100.

Nella figura seguente è mostrato lo schema del posizionamento dei vari sensori sulla copertura a verde. In ogni settore sono stati individuati quattro punti, equidistanti dai bordi del settore, in cui sono posizionati diversi sensori lungo la sezione stratigrafica del tetto.



Fig. 2.18. Posizionamento sensori sulla copertura a verde

In base alla nomenclatura definita, con la sigla $T_{i,j,k}$ si indicano le termoresistenze al platino PT100, in cui il pedice i identifica il numero del settore, il pedice j identifica il punto nella sezione (A, B, C o D) ed il pedice k identifica l'ordinalità del sensore, a partire dal basso. Seguendo la stessa logica, la sigla $URT_{i,j,k}$ indica i sensori di temperatura ed umidità relativa del terreno. È altresì presente per ogni settore un albedometro (misura della radiazione riflessa) ed un pirometro (termometro ad infrarosso).

Si nota anche, dalla figura, la presenza di un banco sul quale sono posizionati i diversi sensori per la misura delle componenti della radiazione solare, e la presenza in ogni settore di un albedometro.

Le figure seguenti mostrano invece la disposizione dei sensori di temperatura e umidità relativa del terreno e dei sensori di temperatura superficiale lungo la sezione della stratigrafia.

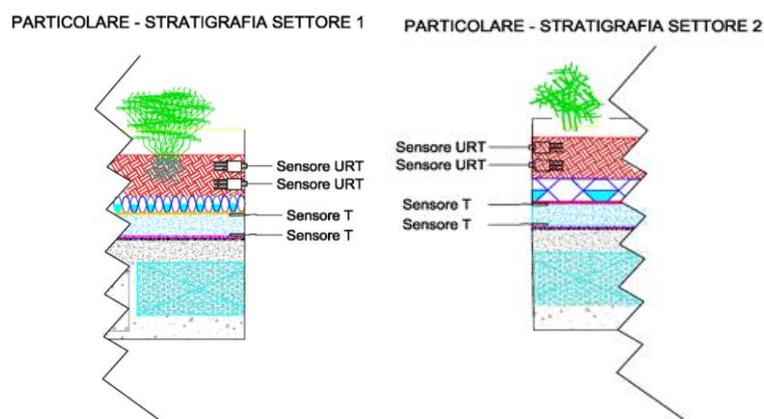


Fig. 2.19. Disposizione sensori lungo la sezione – Settore 1 e 2

Per ogni punto del settore 1 sono presenti quindi quattro sensori, di cui due termoresistenze posizionate al di sopra e al di sotto del massetto delle pendenze e due sensori URT posizionati all'interno del substrato culturale.

Nel settore 2 la disposizione dei sensori lungo la sezione si presenta identica a quella del settore 1. Nel settore 3, a causa della presenza aggiuntiva dello strato di isolamento in polistirene espanso, è presente un'ulteriore termoresistenza posizionata proprio al di sopra del pannello termoisolante.

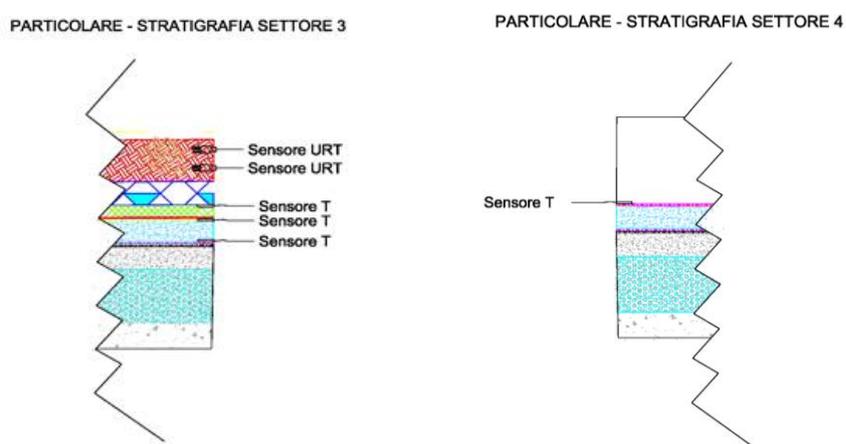


Fig. 2.20. Disposizione sensori lungo la sezione – Settore 3 e 4

Per quanto riguarda il settore 4, in cui non è presente nessuna stratigrafia relativa al tetto verde è sufficiente solo il monitoraggio della temperatura superficiale della copertura, tramite termoresistenza inserita in un'apposita piastra di alluminio.

Il sistema di monitoraggio prevede anche l'installazione di sensori negli ambienti interni. Nell'ultimo piano del cubo 46C sono state individuate quattro stanze, adibite ad uso ufficio, che corrispondono spazialmente ai quattro settori sulla copertura. I locali sono identificati con le lettere progressive da A a D, ed in questi sono monitorate:

- Temperatura superficiale interna del solaio con sensore provvisto di termoresistenza al platino e datalogger interno;
- Temperatura ed umidità dell'aria interna tramite termo-igrometro corredato di datalogger interno.

L'analisi di tali variabili consente di valutare l'effetto della copertura a verde sulle condizioni climatiche interne, in modo da verificare l'efficacia di tale soluzione costruttiva in termini di comfort interno ed in termini di risparmi energetici conseguibili. Nella figura seguente è mostrata l'ubicazione dei locali interni monitorati tramite la suddetta sensoristica. Come da nomenclatura indicata nella precedente reportistica i locali sono denominati A, B, C e D. I locali presentano le seguenti superfici:

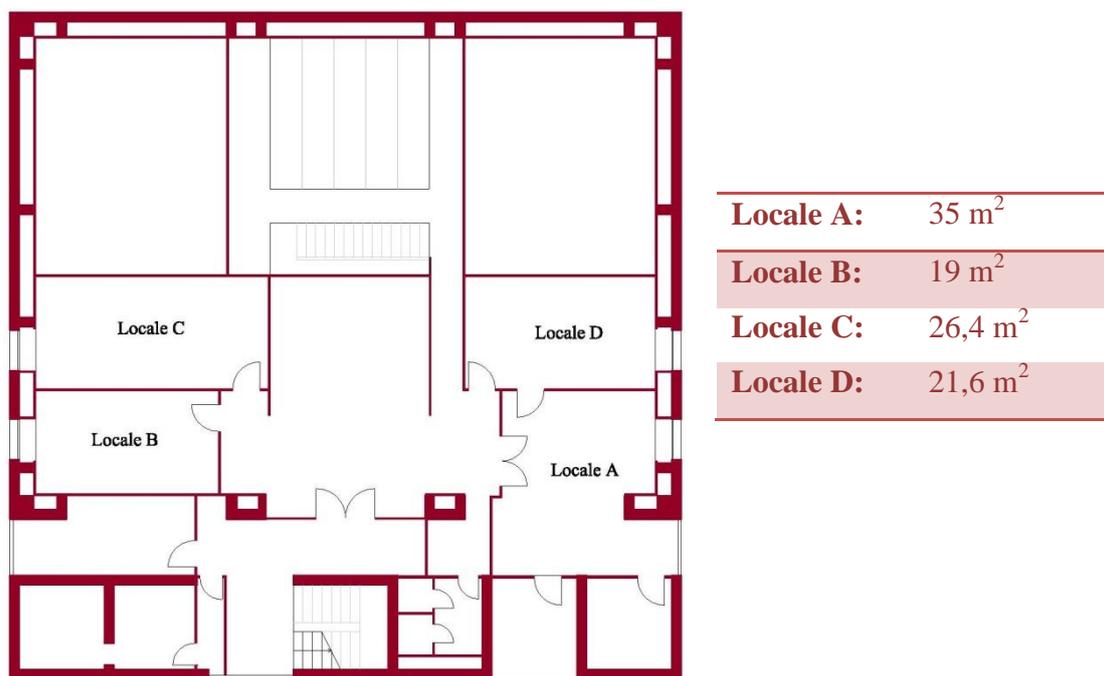


Fig. 2.21. Pianta Quarto piano cubo 46C

Come si nota, a causa dell'elevato numero di sensori e per la necessità di alimentazione degli stessi, il sistema di monitoraggio risulta molto complesso.

2.2.2 Sensori per la misura delle variabili termiche della copertura a verde

Per la misura della temperatura negli strati sono state adottate termoresistenze al platino pt100. Sono dotate di elevata accuratezza. Il loro intervallo di funzionamento va da $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il sensore è costituito da un solo elemento; la sezione della sonda complessiva è 6 mm. I fili di alimentazione sono 4 e la lunghezza della guaina complessiva che riveste la sonda è 5 cm. Il giunto interno è costituito in resina epossidica. Il valore della resistenza a 0°C è pari a $100\ \Omega$ con una tolleranza di $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 0°C e $\pm 0,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 100°C . Il cavo di alimentazione teflonato (FEP) ha una lunghezza variabile da 7 m a 25 m in funzione della distanza dal punto di analisi rispetto alle cassette di acquisizione.



Fig. 2.22. Termoresistenza al platino pt100

Per quanto riguarda la posa in opera dei sensori, si percepisce facilmente la difficoltà nel posizionare elementi di dimensioni diametrali minori del centimetro all'interno di stratigrafie articolate come quelle dei settori del tetto verde, sopra definiti. Per ovviare a ciò, ogni termoresistenza, è stata inserita all'interno di una piastra di alluminio di dimensioni $10 \times 10\text{ cm}$ con spessore $0,8\text{ cm}$ in cui è stato praticato un apposito foro ($\varnothing 6\text{ mm}$) riempito con pasta termoconduttiva.



Fig. 2.23. Piastra di alluminio per pt100

Da notare in particolare il rivestimento con termoretraibile in PTFE della giunzione elemento-cavo di estensione, che permette di installare i sensori in tutta sicurezza in ambienti umidi, e previene inoltre rotture della giunzione a causa di eventuali sollecitazioni meccaniche.



Fig. 2.24. Particolare del rivestimento nella giunzione

Le termoresistenze sono state tarate tramite bagno termostatico, al fine di ottenere la curva caratteristica dei sensori stessi.

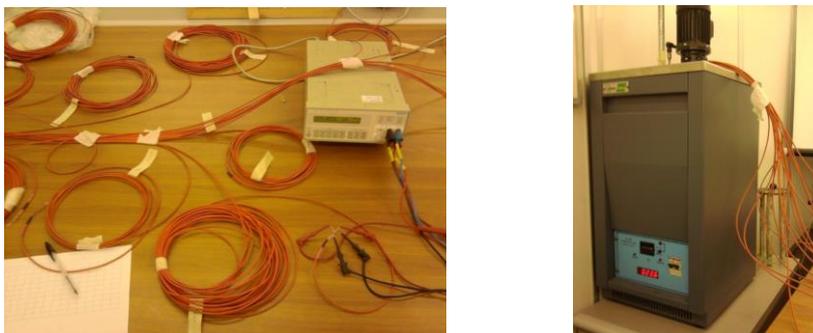


Fig. 2.25. Taratura Termoresistenze e Bagno termostatico

Al termine dell'operazione di taratura si è ottenuto per ogni PT100 la curva T(R) che associa ad ogni valore di temperatura [°C] il corrispondente valore di resistenza [Ω].

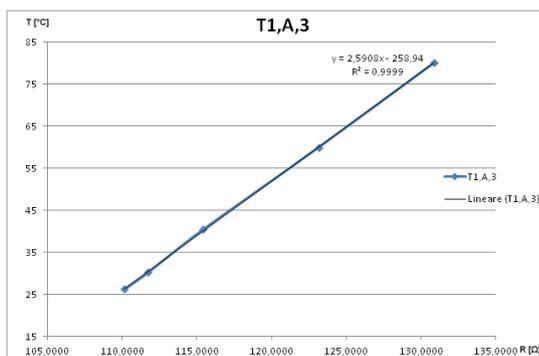


Fig. 2.26. Curva Caratteristica PT100

Per la misura della temperatura e dell'umidità relativa del terreno si è utilizzato un sensore combinato. Il sensore determina la percentuale di acqua presente nel terreno circostante, attraverso la misura della costante dielettrica relativa. Ogni misura viene effettuata a seguito di una autocalibrazione interna del sensore, svolta in modo automatico, tesa a eliminare qualsiasi errore o imprecisione dovuti a variazioni termiche o al decadimento naturale dei

componenti. Il design “a forchetta” con quattro denti permette di ottenere misure più accurate, esponendo una maggiore superficie di contatto con il terreno. Il sensore risulta coperto con uno strato protettivo, in modo da essere immune ad attacchi di ioni e sali disciolti nel suolo. Il sensore di umidità e temperatura del terreno ha dimensioni 50x 141 mm con spessore del sensore pari a 1,5 mm. Il sensore di umidità del suolo ha un range operativo da -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$, con un'accuratezza di $\pm 2\%$ ed un output da 0 a 80 % VWC. Il sensore di temperatura ha un'accuratezza dell'1 % con una risoluzione di 1°C ed un output: $-50 + 50^{\circ}\text{C}$. Il grado di protezione è IP67. L'alimentazione elettrica avviene tra 4.5 e 18 VDC. Il consumo tipico risulta minore di 30 mA. Uscita: due canali analogici, uscita in tensione (0.5 – 3 V per WVC, e 0 – 3 V per T). Il sensore effettua una autocalibrazione prima di ogni nuova misura per minimizzare gli errori di lettura.

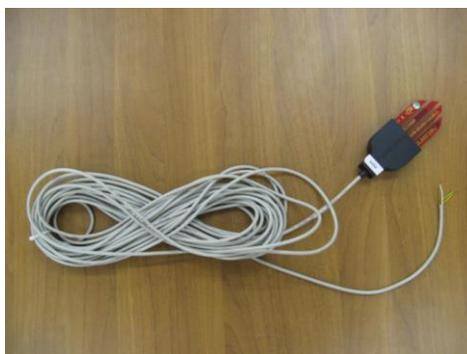


Fig. 2.27. Sensore temperatura e umidità relativa del terreno

Per questi sensori viene fornita dalla casa costruttrice la curva caratteristica e le formule di conversione tra tensione di uscita e WVC % (water volume content) e tra tensione di uscita e temperatura del terreno, per cui non risulta necessaria un'operazione di taratura.

$$1) \text{WVC (\%)} = 80 \times (\text{Vout} - 0.5) / 2.5$$

$$2) \text{T (}^{\circ}\text{C)} = (100 \times \text{Vout} / 3) - 50$$

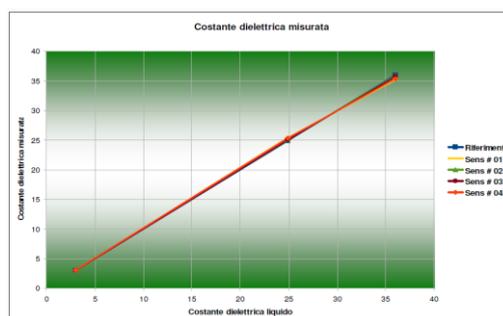


Fig. 2.28. Curva Caratteristica Sensori URT

Si è proceduto quindi ad effettuare semplicemente un test per verificare la risposta (tramite sistema acquisizione dati) dei sensori in aria e immersi completamente nel liquido, ottenendo una buona corrispondenza rispetto alla curva indicata dal costruttore.

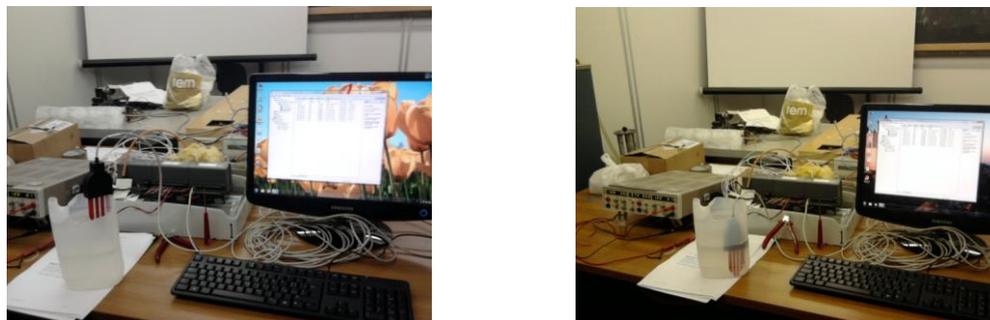


Fig. 2.29. Test in Aria ed in Acqua

Il pirometro effettua una misura, senza contatto, della temperatura di oggetti non metallici o di oggetti rivestiti di metallo. Il sensore posizionato nella testina è di acciaio inox, il campo di vista può essere di 10:1 o 2:1. Il sensore può essere utilizzato con temperature ambiente fino 180 ° C.



Fig. 2.30. Pirometro

Tutti i parametri disponibili possono essere impostati tramite tastiera integrata, oppure parametrizzati tramite interfaccia.

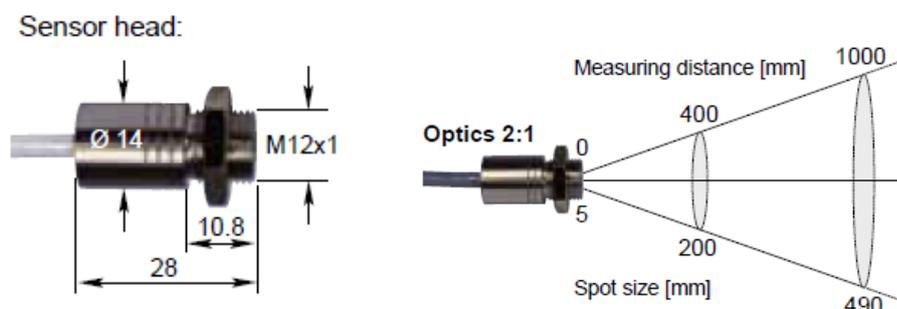


Fig. 2.31. Testina del sensore e ottica 2:1

Nella tabella seguente sono indicate le principali caratteristiche del sensore:

Technical Data			
Temperature range:	-40 ... 700°C	Temperature display (only IN 510 / 530):	LCD, 4 digit, 3 values per second, display illumination permanent
Sub range:	Adjustable; min. range 51°C; ex works preadjusted to 0 ... 500°C	Resolution:	1/10°C (1/10°F, 1°F > 1000°F measur. temp.)
Spectral range:	8 ... 14 µm	Measurement uncertainty:	0 ... 700°C: 0.8% of reading in °C or 1° C ⁻¹ 0 ... -20°C: 2°C; -20 ... -40°C: 3°C T _C : 0.03%/°C or 0.05°C/°C (25°C) With thermocouple output: min. 2.5°C T _{amb} =15...30°C
Optics:	10:1 or 2:1	Repeatability:	0.5% of reading in °C or 0.5°C ⁻¹
Power supply:	10 ... 30 V DC, ripple < 0.5 V, current consumption max. 60 mA	Max. ambient temp. converter:	0 ... 65 °C (storage temperature: -20 ... 70 °C)
Analog output:	Linear current (0/4 ... 20 mA), voltage (0 ... 5 V) or thermocouple (type J or K)	Max. ambient temp. sensor head:	types 510: 0 ... 85°C types 520: 0 ... 180°C types 530: 0 ... 180°C (short-time 210°C) (storage temp.: -20 ... 85°C / 180°C)
Output for sensor head temperature:	10 mV/°C	Relative humidity:	10 ... 95%, non condensing
Load:	Max. 700 Ω at 24 V power supply (for current output) (500 Ω / 20 V)	Protection class:	IP65 (converter, sensor head 10:1, IN 520 and IN 530-sensor head 2:1) IP20 (IN 510-sensor head 2:1)
Output impedance:	100 Ω (for thermocouple or voltage output)	Weight:	320 g
Relays contact:	Isolated relays contact, 50 V DC, 0.2A; temperature and hysteresis adjustable	Housing:	Aluminium (converter) stainless steel (sensor head)
Digital interface:	switchable RS232/RS485	*) The larger value is valid. The sensor head must be in constant ambient temperature for at least 15 min.	
Emissivity ε:	10 ... 120% adjustable in steps of 0.1%		
Max. / minimum value storage:	Clear time: OFF; 0.1 s; 0.25 s; 0.5 s; 1 s; 5 s; 25 s; extern; auto		
Response time t ₉₀ :	180 ms; switchable: 0.5 s; 1 s; 2 s; 5 s; 10 s or 30 s		

2.2.3 Sensori per la misura delle variabili climatiche

Per la misura della radiazione globale sul piano orizzontale è stato installato un piranometro. Il piranometro è un radiometro progettato per misurare la radiazione globale su superficie piana derivante da flussi radianti nella gamma di lunghezza d'onda da 300 nanometri (nm), o meno, fino a 3000 nm. Il sensore del piranometro si basa su una termopila. Il vento, la pioggia e le perdite termiche verso l'ambiente esterno incrementano facilmente la temperatura, pertanto il sensore è schermato da due cupole; queste consentono una uguale trasmissione della componente diretta per ogni posizione del sole nella sfera celeste.

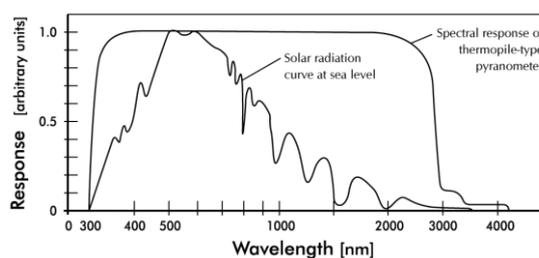


Fig. 2.32. Piranometro e risposta spettrale

Il piranometro fornisce un'ampia risposta spettrale; il 97-98% dell'energia totale è assorbita dal sensore. Nella tabella seguente le principali caratteristiche del piranometro.

Specifications		CMP 3	Other specifications	
ISO 9060:1990 CLASSIFICATION		Second Class	Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
Response time (95 %)		< 18 s	Impedance	20 to 200 Ω
Zero offsets (a) thermal radiation (200 W/m^2) (b) temperature change (5 K/hr)		< 15 W/m^2 < 5 W/m^2	Level accuracy	1 °
Non-stability (change/year)		< 1 %	Operating temperature	-40 °C to +80 °C
Non-linearity (0 to 1000 W/m^2)		< 1 %	Spectral range (50 % points)	300 to 2800 nm
Directional error (up to 80 ° with 1000 W/m^2 beam)		< 20 W/m^2	Typical signal output for atmospheric applications	0 to 20 mV
Temperature dependence of sensitivity		< 5 % (-10 °C to +40 °C)	Maximum irradiance	2000 W/m^2
Tilt error (at 1000 W/m^2)		< 1 %	Expected daily uncertainty	< 10 %

Il pirgeometro misura la radiazione infrarossa termica proveniente dal cielo e dalle nuvole. Analogamente ai due precedenti, il sensore del pirgeometro si basa su di una termopila

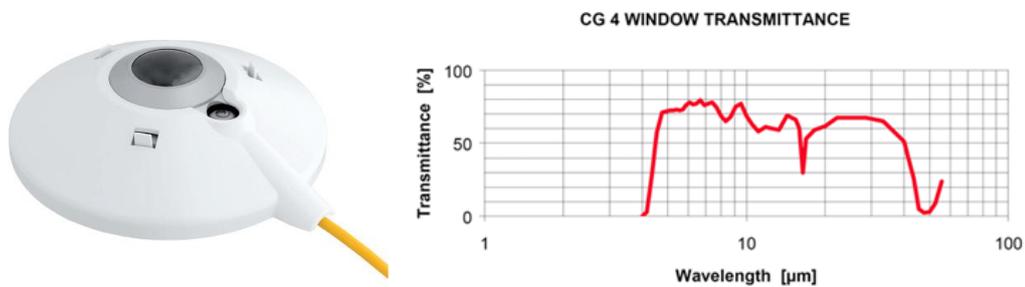


Fig. 2.33. Pirgeometro e proprietà spettrali

Lo strumento misura la radiazione atmosferica ad onda lunga; la gamma spettrale è 4,5-42 micron, dove è presente la maggior parte di questa radiazione. Il pirgeometro, montato in prossimità della copertura a verde, ha le seguenti specifiche tecniche:

- Sensibilità : ca. 4 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$,
- Impedenza : ca. 700 Ohm,
- Dipendenza dalla temperatura : $\pm 1\%$ su un range di temperatura ambiente da -20 a +40 ° C,
- Linearità : $\pm 1\%$ 0-700 Wm^{-2} ,
- Tempo di risposta : 2 secondi (1 segnale / e),
- Coseno : migliore del 5 % ,
- Calibrazione: corpo nero di riferimento,
- Dimensioni: 5,75 pollici di diametro, 3,5 cm di altezza.

Le principali grandezze climatiche dell'ambiente esterno sono monitorate tramite una stazione meteo-climatica installata sulla copertura del cubo 46C, provvista di un termoigrometro, un anemometro, un sensore di radiazione solare ed un pluviometro. La centralina permette la

misura di: velocità e direzione del vento, temperatura e umidità dell'aria, punto di rugiada e temperatura a bulbo umido, probabilità di brinata, pressione atmosferica e radiazione solare globale. La stazione è costituita da una scheda madre embedded, su cui sono montate schede microprogrammate per la gestione dei singoli sensori e schede per la trasmissione dati mediante protocollo TCP/IP. La trasmissione avviene mediante antenne on board su rete GSM di terza generazione. Tutte le stazioni comunicano ad un server centrale, ubicato nell'Area Servizi Tecnologici Integrati e Servizi Statistici a Supporto delle Decisioni dell'Università della Calabria.

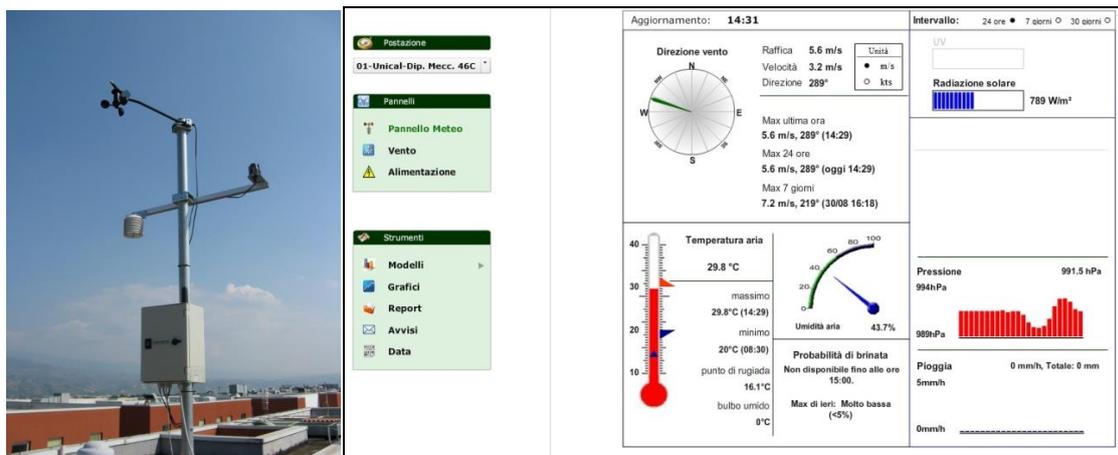


Fig. 2.34. Fig. 2.26. Centralina meteo sulla copertura del 46C ed interfaccia utente

Il pluviometro con funzionamento a bascula auto svuotante ha un'area di raccolta di 214 cm^2 e una risoluzione di $0,2 \text{ mm}$. L'accuratezza è di $\pm 4\%$ tra $0,2$ e 50 mm/h e di $\pm 5\%$ tra 50 e 100 mm/h di pioggia. Il sensore di temperatura e umidità dell'aria è dotato di uno schermo solare, resistente ai raggi ultravioletti. Il sensore misura la temperatura dell'aria, l'umidità dell'aria e calcola il punto di rugiada. Il sensore di temperatura con un range di misura tra -40 e $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ha un'accuratezza di $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ed una risoluzione di $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ con un tempo di risposta massimo di 30 secondi. Il sensore di umidità ha un'accuratezza di $\pm 3\%$ ed una risoluzione di $0,05\%$ ha un tempo di risposta massimo di 8 secondi. Il sensore di radiazione solare misura la radiazione globale sommando la componente diretta e diffusa. Il range di misura va da 0 a 1800 W/m^2 . La risposta spettrale è tra 400 e 1100 nm mentre il range di temperature sopportato va da -40° a $+65^\circ \text{ C}$. L'accuratezza è del $\pm 5\%$ del fondo scala. L'anemometro è provvisto di un sensore di velocità ed uno di direzione. Il range di misura è tra $0,5$ e 89 m/s e tra 0 e 360° . L'accuratezza del sensore di velocità è di $\pm 1 \text{ m/s}$, mentre quella del sensore di direzione è di 1° . I tempi di campionamento sono di $2,25$ ed 1 secondi rispettivamente.

2.2.4 Sensori per la misura delle variabili interne

La misura ed il monitoraggio delle grandezze relative agli ambienti interni sottostanti il tetto verde, vengono effettuate tramite appositi sensori. In particolare, sono state installate due tipologie di sensori, entrambi dotati di datalogger interno. Un sensore misura la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente interno; il secondo misura invece la temperatura superficiale del soffitto. La sonda di temperatura lavora nel range da -50 a 125 °C con una risoluzione di $\pm 0,1$ °C ed un'accuratezza di $\pm 0,5$ °C. La sonda dell'umidità relativa presenta invece un'accuratezza del 2%. Le figure seguenti mostrano la disposizione di tali sensori negli ambienti, mentre informazioni più dettagliate sulle tipologie di sensori si possono trovare nel seguito di questo documento.



Fig. 2.35. Disposizione dei sensori negli ambienti

Si noti in particolare l'uso della piastra in alluminio per la misura della temperatura superficiale del soffitto, con le stesse finalità descritte al riguardo delle termoresistenze PT100.

2.2.5 Il sistema DAQ

Lo scopo di un Sistema per l'Acquisizione Dati (DAQ) è quello di misurare grandezze fisiche, per esempio, differenze di potenziale elettrico, correnti elettriche, temperature, pressioni, radiazioni elettromagnetiche, etc. L'acquisizione dati avviene, generalmente, mediante l'utilizzo di data logger proprietari, che presentano numerose limitazioni, tra cui l'assenza di comunicazione tra dispositivi diversi, difficoltà per la scalabilità del sistema, mancanza di flessibilità nella gestione da parte dell'utente dei dati acquisiti. Rispetto ai sistemi di acquisizione dati di tipo tradizionale, generalmente chiusi ed embedded, si è deciso di utilizzare un sistema basato sulla modularità e scalabilità, in modo da ottenere maggiore flessibilità ed interoperabilità.

I sistemi di acquisizione (DAQ), basati su Personal Computer, usano una combinazione di Hardware (PC, moduli DAQ etc.) e Software per acquisire grandezze in maniera totalmente automatizzata. Tale configurazione garantisce la massima flessibilità, replicabilità e scalabilità. La piattaforma tecnologica del sistema di Acquisizione (DAQ) risulta essere costituita da più componenti hardware e software:

- ✓ SENSORI per l'acquisizione del puro segnale (tensione o corrente);
- ✓ MODULI HW per il condizionamento del segnale;
- ✓ chassis DAQ per la gestione di array di segnali, provenienti da i singoli moduli hw;
- ✓ Bus dati per il trasferimento dei segnali, provenienti dai singoli moduli hw con rete Ethernet 1000 Base T (IEEE 802.3), verso il PC dedicato;
- ✓ Personal Computer;
- ✓ Applicazione Software, ovvero LabView, software dotato di interfaccia di comunicazione con i singoli moduli e funzioni per lo storage e la reportistica dei dati.

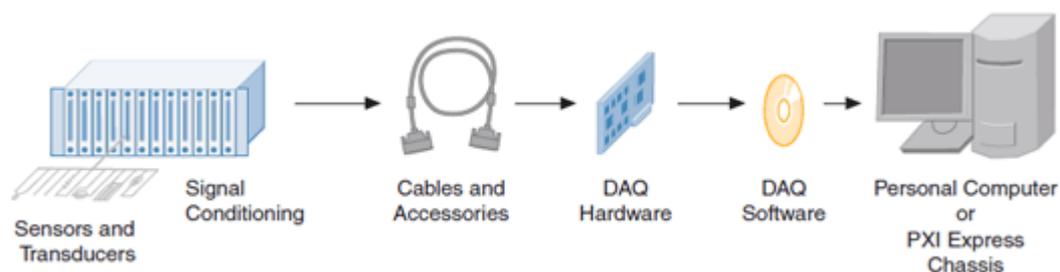


Fig. 2.36. Schema logico di un sistema DAQ

Il segnali relativi alle grandezze da acquisire sono dislocati su una superficie ampia (c.a. 200 m²) in più punti di raccolta, il che porta a preferire un sistema di acquisizione (DAQ) distribuito, (**Distributed I/O**) basato su Moduli Network e Moduli di condizionamento del segnale. Il sistema DAQ scelto si basa su una serie di componenti hardware denominati “CompactDAQ” che superano tecnologicamente il concetto di FieldPoint. I componenti sono National Instruments NI.

Un sistema NI CompactDAQ include uno chassis e dei moduli I/O NI. Lo chassis si può collegare ad un computer host tramite USB, Ethernet o 802.11 Wi-Fi. Lo chassis NI CompactDAQ permette di controllare la temporizzazione, la sincronizzazione e il trasferimento dati tra un computer integrato o esterno e fino a un massimo di otto moduli I/O della famiglia C Series.

Un singolo chassis NI CompactDAQ permette di gestire multipli time engine per l'esecuzione di un massimo di sette task I/O separati con temporizzazione hardware a diverse velocità, nello stesso sistema. Per la realizzazione del sistema di monitoraggio del tetto verde è stato scelto uno Chassis Ethernet, che permette di estendere la portata di azione delle misure di tensione/corrente tramite sensori remoti. È stato adottato uno chassis ad otto slots ideale per sistemi di misura distribuiti che utilizzano infrastruttura Ethernet standard. I moduli sono disponibili per un'ampia gamma di misure di sensori incluse termocoppie, RTD, estensimetri, trasduttori di pressione e carico, celle di torsione, accelerometri, microfoni e flussometri.



Fig. 2.37. Chassis cDAQ-9188

Molti dispositivi possono misurare la temperatura, tensione, corrente. Il sistema NI CompactDAQ può integrare tutte queste misure in un unico dispositivo, che acquisisce e trasmette tutti i dati tramite bus dedicato. I dati vengono a loro volta trasmessi al PC host tramite Ethernet, che offre due vantaggi rispetto ad altri comuni del PC bus periferici:

- Cablaggio affidabile di lunghezza variabile,
- Infrastrutture distribuita.

L'Ethernet è ideale per effettuare misure a distanze superiori a 5 m, limite presente per un cavo USB. Infatti un singolo cavo CAT 5E Ethernet può raggiungere i 100 metri prima di aver bisogno di uno switch o di un router per portare il segnale a distanze superiori.

Di seguito sono elencati i diversi moduli NI scelti per l'acquisizione ed il condizionamento dei diversi segnali fisici della copertura a verde.

NI 9205

Il modulo NI 9205 è dotato di 32 input analogici a terminazione singola o di 16 differenziali, risoluzione a 16 bit e una frequenza massima di campionamento di 250 kS/s. Ogni canale include intervalli di input programmabili da ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V, e ± 10 V.

NI 9217

Il modulo di input analogico NI 9217 RTD dispone di 4 canali e risoluzione a 24 bit di risoluzione per misure RTD da 100Ω . È possibile configurare il modulo NI 9217 per due diverse modalità di frequenza di campionamento. Il modulo è compatibile con le termoresistenze a 3 e 4 fili ed è in grado di rilevare automaticamente il tipo di RTD collegata al canale e di configurare ogni canale per la modalità appropriata. Il modulo fornisce 1 mA di corrente di eccitazione per canale ed una precisione con un errore inferiore ad 1°C durante l'intero ciclo operativo di intervallo di temperatura.

NI 9481

Il modello NI 9481 National Instruments è un modulo di output digitale sourcing a 4 canali SPST (single-pole single-throw) per ogni tipo di chassis NI CompactDAQ. Ogni canale dispone di un accesso ad un relay elettromeccanico per lo switch dei segnali fino a segnali 30 VDC (2 A), 60 VDC (1 A), 250 VAC (2 A) e di un isolamento canale a canale da 250 Vrms. Ogni canale dispone inoltre di un LED che indica lo stato del suddetto canale. La principale applicazione di questo modulo nella copertura a verde è di gestire il sistema di irrigazione in base ai valori forniti dal sensore di presenza acqua nella vaschetta di drenaggio.



Fig. 2.38. Moduli cDAQ NI 9205, 9217 e 9481.

Infine il software utilizzato per l'acquisizione, l'analisi e la presentazione dei dati è il "LabVIEW", della National Instruments Corporation. LabVIEW permette la trasmissione di dati mediante l'uso di porte seriali oppure mediante il protocollo di comunicazione TCP/IP.

LabVIEW presenta alcuni vantaggi rispetto ad un linguaggio di programmazione tradizionale:

- Permette di dare al codice una struttura modulare che consente di suddividere programmi complessi in sottoprogrammi più semplici che possono essere riutilizzati,
- Consente di raccogliere i VI in librerie, ovvero in un insieme di sub-VI utilizzabili da altri VI e velocemente inseribili nel codice sorgente dal programmatore.

2.3 Progettazione dell'impianto elettrico

La realizzazione di un adeguato sistema di monitoraggio e acquisizione dati, oltre a garantire la continuità dell'acquisizione e prevenire possibili danni al sistema DAQ, prevede la presenza di una rete di alimentazione sia per i sensori e sia per tutti i dispositivi elettronici a supporto.

Ai fini del posizionamento della sensoristica nei vari comparti individuati sulla copertura, si rende necessaria l'adozione di quadri modulari a tenuta stagna ad alto grado di protezione termostatati e ventilati, per la realizzazione di una rete di distribuzione dell'energia elettrica a 220 V – 50 Hz, necessaria per l'alimentazione della strumentazione del sistema di acquisizione dati. Come si può vedere dalla figura successiva, sulla copertura sono presenti:

- ✓ Un quadro generale UPS,
- ✓ Quattro quadri di settore,
- ✓ Un quadro banco, per la gestione dei sensori a termopila.

L'alimentazione proviene dal Quadro Elettrico Generale presente nel Locale di Acquisizione Dati nel piano sottostante, e mediante opportuna e adeguata canalizzazione giunge nel Quadro Generale UPS sul piano di copertura, dove si divide in cinque rami che alimentano i vari quadri dei settori (Quadro Settore 1, Quadro Settore 2, Quadro Settore 3, Quadro Settore 4, Quadro Banco).

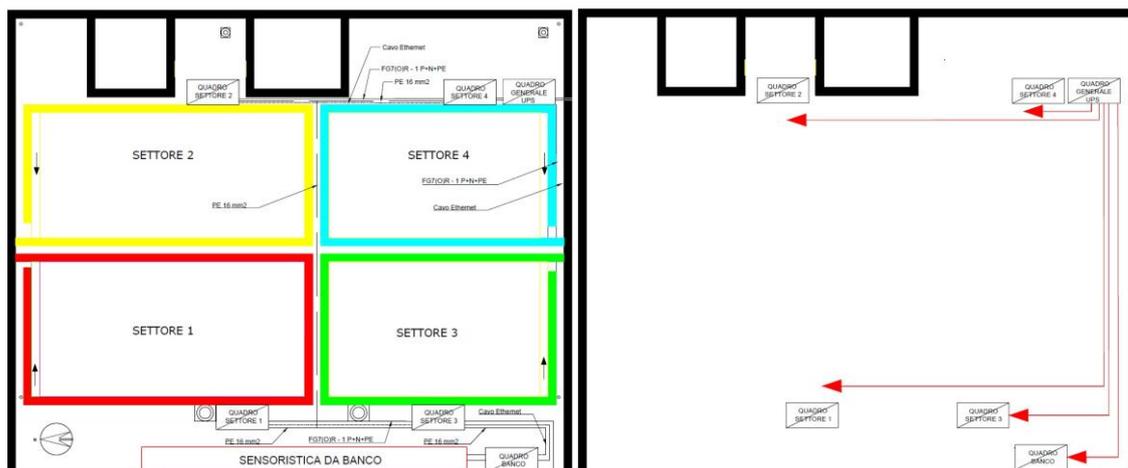


Fig. 2.39. Pianta elettrica copertura.

Dal locale acquisizione dati partono due linee sotto UPS e la linea a 220V senza UPS ciascuna protetta da un magnetotermico differenziale.

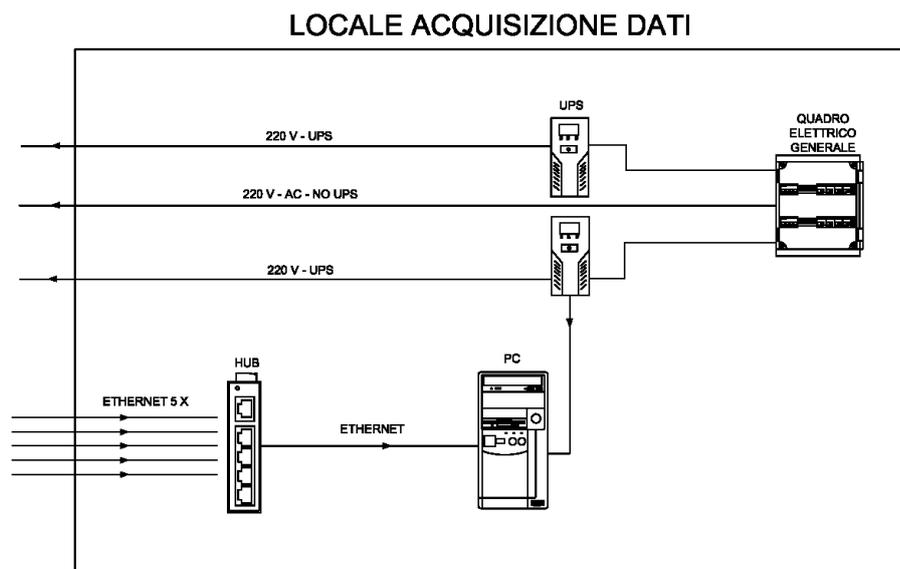


Fig. 2.40. Schema Locale Acquisizione Dati.

Una delle linee sotto UPS e la linea a 220V senza UPS sono convogliate tramite canalina, visibile nel prospetto sud della seguente, sul piano della copertura dove giungono al Quadro Generale UPS.

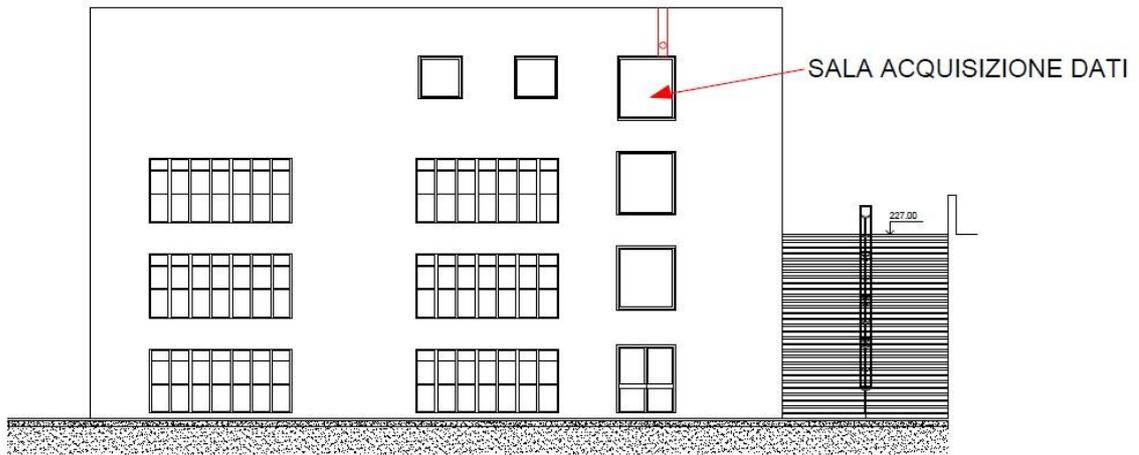


Fig. 2.41. Prospetto Sud Cubo 46C

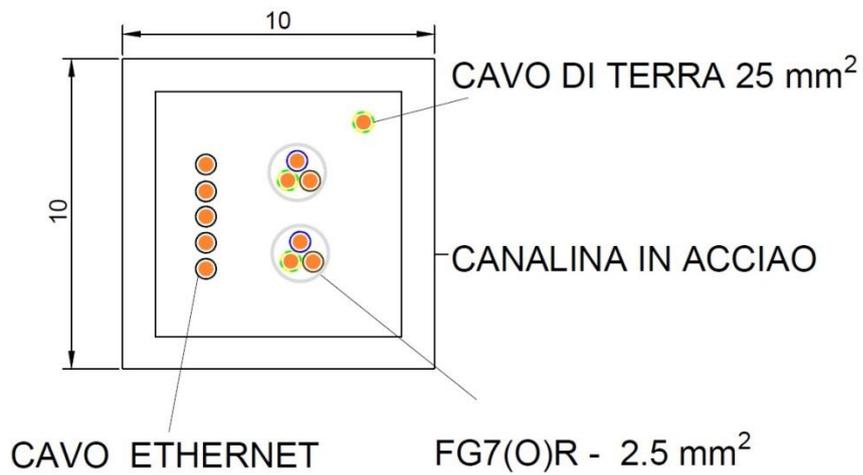


Fig. 2.42. Linee Alimentazione Copertura

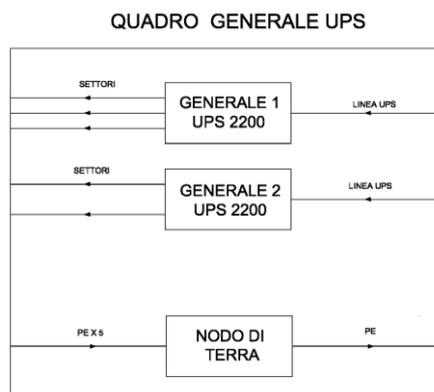


Fig. 2.43. Quadro Generale UPS

Le due linee sotto UPS, dal Quadro Generale UPS si diramano in cinque linee che andranno ad alimentare i quadri dei settori ed il quadro banco (fig. 2.39).

Come sistema di protezione, in ogni quadro sarà presente un interruttore magnetotermico MT ed un scaricatore di sovratensione (SPD) di classe II. A titolo di esempio, è mostrato nella figura seguente lo schema a blocchi del settore 4, esemplificativo anche degli altri quadri settore.

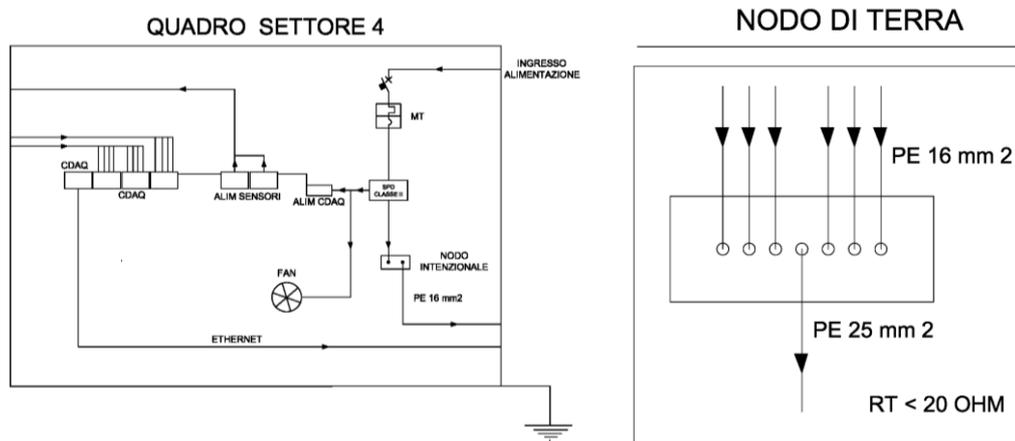


Fig. 2.44. Schema a blocchi del quadro settore 4 e nodo di terra.

In ogni quadro, a valle dello scaricatore SPD di classe II é previsto un nodo equipotenziale, collegato tramite cavo di terra di diametro 16 mm² al nodo di terra presente nel quadro generale UPS, (vedi fig.2.44). Il nodo di terra andrà poi a scaricare nel pozzetto di dispersione tramite cavo di terra di sezione 25 mm². I quadri sopra individuati sono connessi tramite cavo per esterni. La trasmissione dei dati avviene invece tramite cavo Ethernet schermato.

Entrambe le linee di alimentazione e di trasmissione dati sono protette da canaline in acciaio fissabili a pavimento/parete.

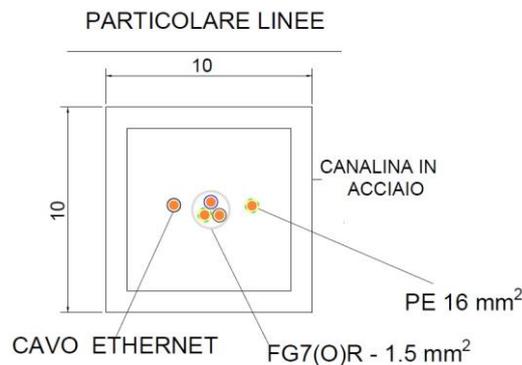
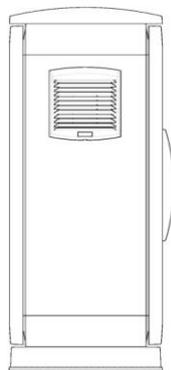


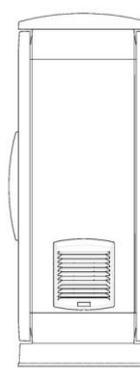
Fig. 2.45. Particolare Linee di Alimentazione, Terra e Trasmissione.

Le linee di trasmissione dati provenienti dai quattro quadri dei settori (Quadro 1, 2, 3, 4 e Banco) sono convogliate, tramite opportuna canalizzazione in acciaio e in PVC, in un unico corrugato verso il locale di acquisizione dati. Quindi, tale soluzione tecnica prevede un'unica conduttura verso il locale DAQ, come sopra indicato nel prospetto SUD del cubo 46C. Le UPS andranno ad alimentare tutta la sensoristica sulla copertura ed un PC per l'acquisizione dati, posizionato nella stanza DAQ; inoltre la linea a 220 V, non sotto gruppo UPS, giunta sulla copertura alimenterà le prese di corrente presenti solo nel quadro settore 4 e nel quadro settore 1. Il collegamento a 220 V NO UPS tra il quadro settore 4 e quadro settore 1 dovrà essere realizzato mediante morsettiera dedicata (su guida DIN) da posizionare nel quadro settore 4. Il quadro settore è costituito da un armadio in poliestere IP65 totalmente sigillato ed isolato di dimensioni 750x750x320 mm. Presenta un pannello di rinforzo interno in alluminio su cui sono stati assemblati tutti i componenti elettrici e i dispositivi di acquisizione dati. Per evitare surriscaldamenti estivi il quadro è stato opportunamente termostato e ventilato mediante un sistema di raffrescamento, con relativo termostato di controllo, costituito da una griglia di ventilazione in convezione naturale sul lato superiore ed una ventola in convezione forzata sul lato inferiore.

VISTA LATERALE SINISTRA



VISTA LATERALE DESTRA

*Fig. 2.46. Viste laterali dei quadri di acquisizione*

QUADRO SETTORE 2

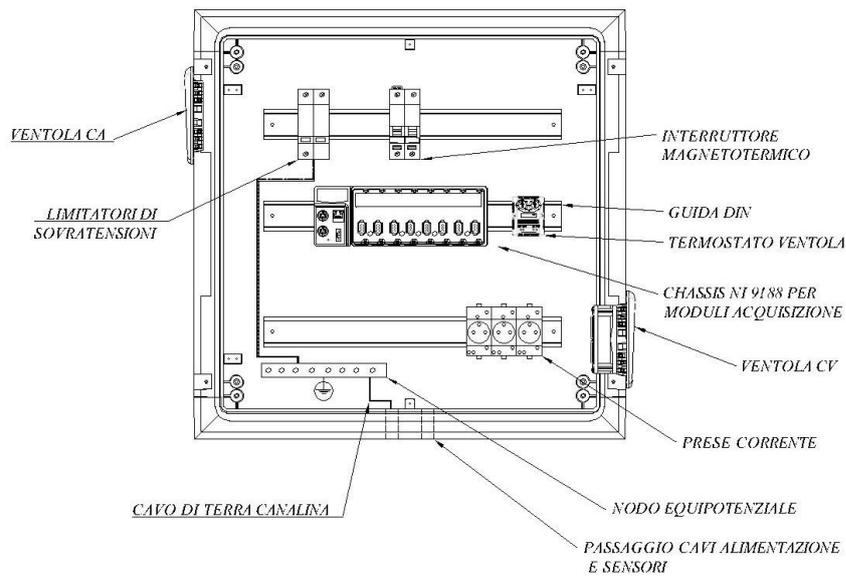


Fig. 2.47. Schema del Quadro Settore 2

Altresì si è prevista la messa a terra delle canalizzazioni in alluminio tramite viti autofilettanti, collegate tramite cavo di terra di 16 mm^2 ai nodo di terra dei vari quadri.

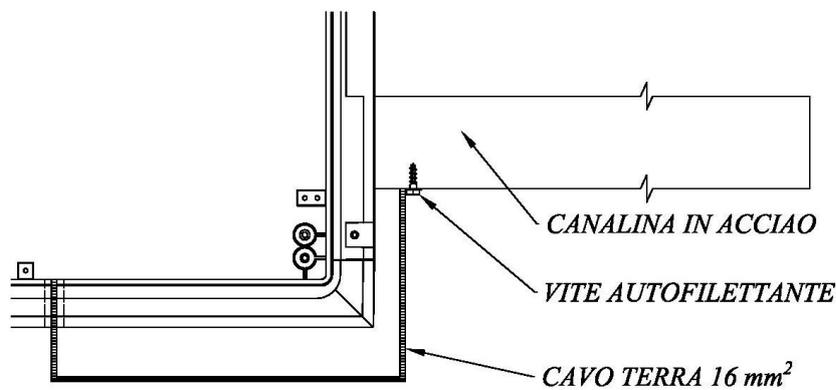


Fig. 2.48. Messa a terra del pannello di rinforzo

La figura seguente mostra lo schema topografico dell'impianto, con la tracciature delle diverse linee di alimentazione e dati.

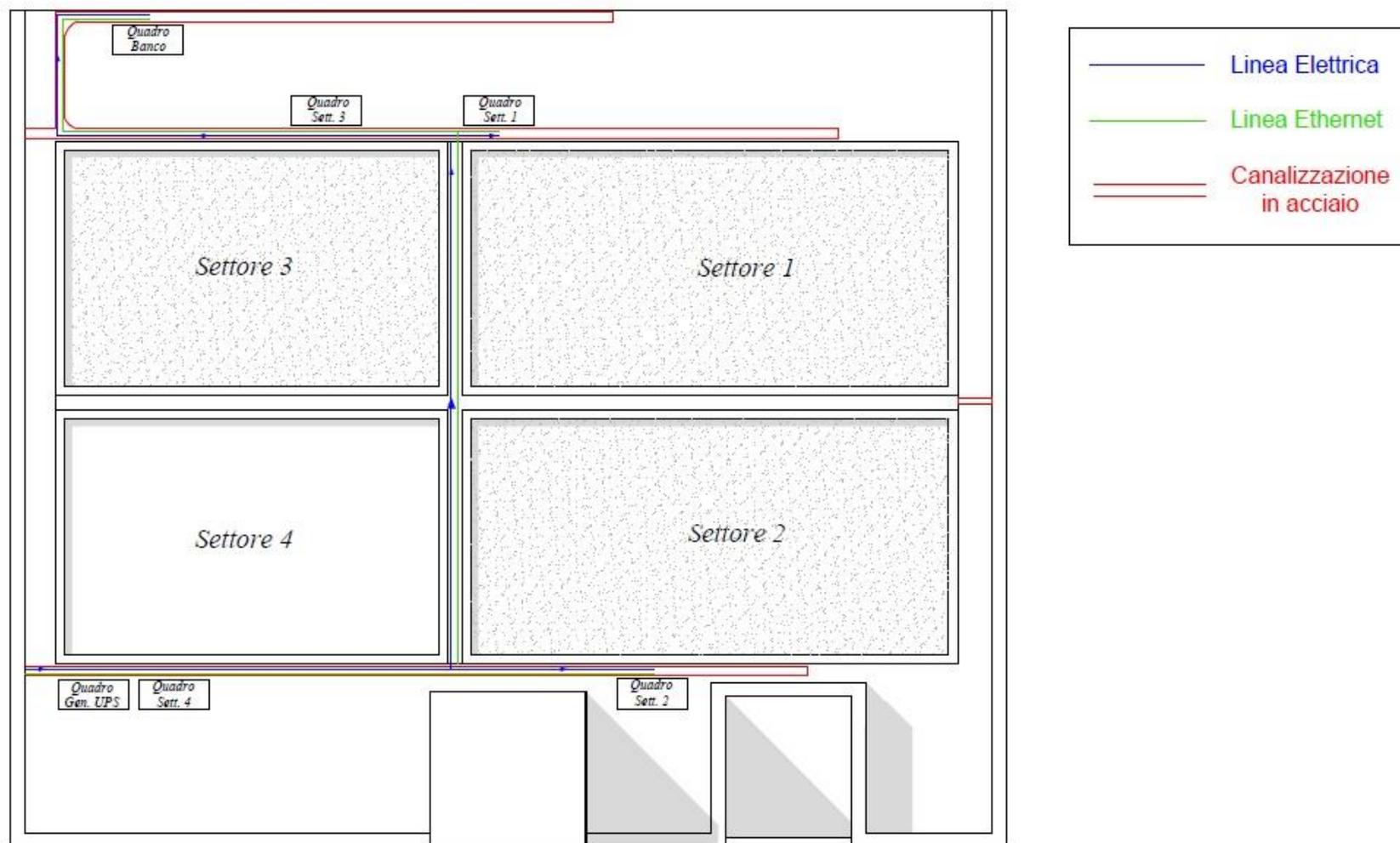


Fig. 2.49. Linee alimentazione e dati sulla copertura

2.4 Realizzazione del sito sperimentale

Brevemente vengono ripercorse le fasi che hanno portato alla realizzazione del sito sperimentale sulla copertura del cubo 46C.

Come operazione preliminare alla realizzazione delle varie sezioni di tetto verde sulla copertura del cubo 46C, si è resa necessaria un'azione di recupero e ripristino del vecchio manto impermeabile tramite una membrana elastobituminosa in fase solvente. Successivamente si è passati alla suddivisione in settori della copertura tramite blocchi di Gasbeton.



Fig. 2.50. Suddivisione della copertura in settore

In seguito è stato realizzato il massetto alleggerito delle pendenze, al di sotto e sopra del quale sono state posizionate le termoresistenze.



Fig. 2.51. Massetto alleggerito delle pendenze

La fase successiva ha previsto l'installazione degli strati antiradice-impermeabili nei diversi settori.



Fig. 2.52. Membrane antiradice bituminosa ed in pvc

Al disopra di questi sono stati posizionati i feltri di accumulo (strato di protezione e accumulo) e le vaschette di accumulo e drenaggio. Come su descritto in dettaglio, sono state scelte due tipologie di feltro a diversa capacità di accumulo e due tipologie di vaschette di drenaggio in: polistirene espanso e pvc.



Fig. 2.53. Feltro di protezione ed accumulo

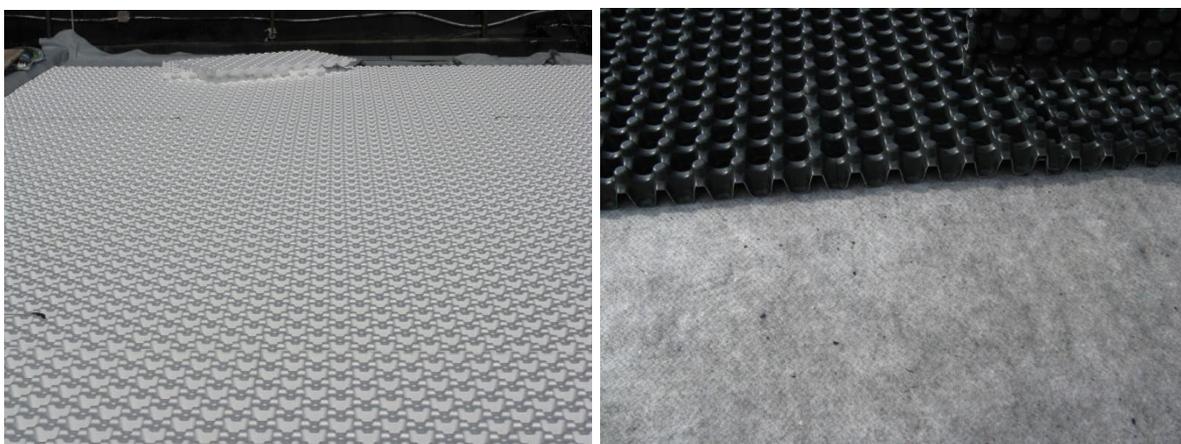


Fig. 2.54. Strato di protezione ed accumulo: in EPS e PVC

In questa stessa fase sono stati inseriti i sensori per la misura della presenza acqua nelle vaschette, visibili nelle seguenti figure.

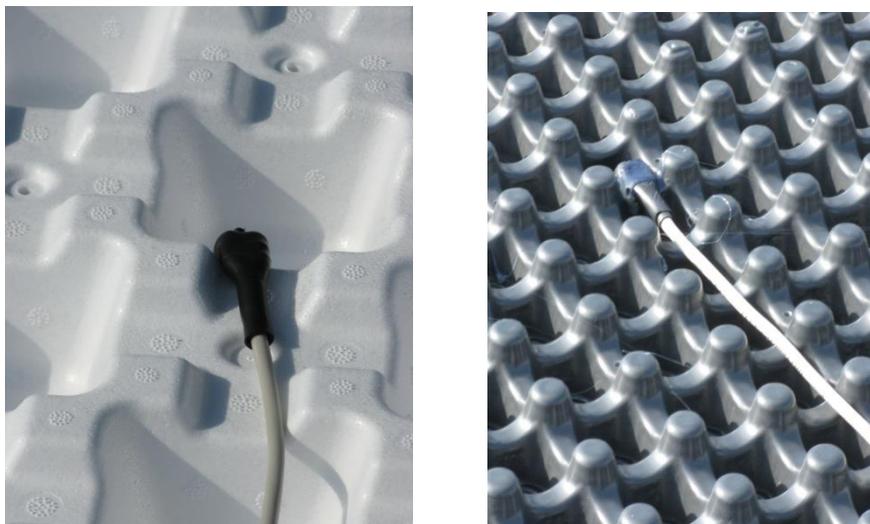


Fig. 2.55. Installazione sensori presenza acqua

Nel settore 3 è stato installato un ulteriore strato di isolamento termico, al di sopra del quale è stata posta una termoresistenza.



Fig. 2.56. Strato di isolamento termico

Al di sotto del substrato culturale è stato posizionato lo strato filtrante ed infine sono state messe a dimora le specie vegetali.



Fig. 2.57. Strato filtrante



Fig. 2.58. Substrato culturale e sensori URT



Fig. 2.59. Vegetazione

Le figure seguenti mostrano a titolo di esempio uno dei quadri settore realizzati. In esso è possibile distinguere tutti gli elementi definiti in fase di progettazione, e sono riportati in particolare lo chassis-9188, la morsettiere per il cablaggio dei vari sensori, la ventola

termostata per il controllo della temperatura all'interno del quadro e il nodo di terra equipotenziale.



Fig. 2.60. Quadro Settore



Fig. 2.61. Particolari chassis-9188 e morsetti



Fig. 2.62. Particolari chassis-9188 e nodo di terra

Per quanto riguarda il software di acquisizione dati, in prima istanza è stata implementata una versione del programma di acquisizione non modulare per motivi di velocità di realizzazione, con lo scopo di non perdere i dati relativi ai mesi luglio, agosto e settembre 2013. Per facilitarne l'uso è stata realizzata una interfaccia grafica, che mappa i quattro settori della copertura a verde. Per ogni settore sono visualizzati in opportuni display digitali le varie temperature ed umidità relativa del terreno e le varie temperature della stratigrafia. Nel settore denominato come quinto si realizza l'acquisizione delle grandezze solari mediante pirgeometro e piranometri.

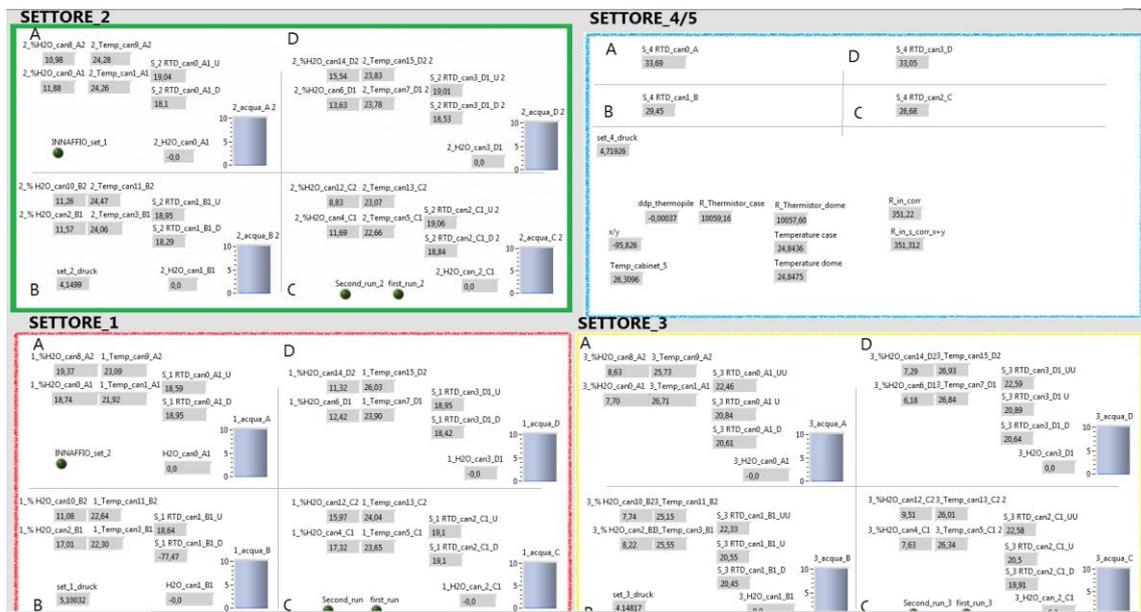


Fig. 2.63. Pianta VI LabView

La versione finale del sistema DAQ ha una veste grafica user friendly. L'elemento principale è una *tab-Control* suddivisa in sette pagine. La prima consente di configurare delle variabili globali sui tempi di campionamento di tutti i sensori presenti sul tetto; infatti mediante una semplice list box è possibile selezionare l'opportuno tempo di campionamento, in un range da 30 s a 15 minuti. A questi tempi di campionamento sono associati dei *task*, ovvero dei processi a livello software che acquisiscono e processano i segnali dai singoli sensori, memorizzandoli nel file system del PC, che gestisce l'applicazione DAQ.

Per rendere l'applicazione estremamente fruibile e semplice, è stata progettata ed implementata la possibilità di mappare i sensori sui task mediante il caricamento di un file testuale (di estensione txt), che associa ad ogni singolo sensore il task, il settore del tetto di appartenenza, il punto di acquisizione con relativo livello nella stratigrafia del tetto ed il

canale fisico di comunicazione. Questa scelta realizzativa consente di poter inserire in corso d'opera ulteriori sensori senza dover riscrivere l'intero codice, ma semplicemente di aggiungere una riga sul file di configurazione con le specifiche funzionali del sensore in esame, ovvero la curva caratteristica.



Fig. 2.64. VI Configurazione LabView

Inoltre è presente una box che permette di selezionare il percorso di salvataggio del file in formato testo tabulato delle grandezze acquisite, utilizzabile da qualsiasi software di post processing ed elaborazione dati, nonché software di implementazione di Data Base (DBMS). Mediante la seconda pagina dell'elemento *tab-Control* è possibile visualizzare tutti le grandezze in fase di acquisizione dei sensori. Inoltre nelle pagine successive sono visualizzate le grandezze nei vari settori mediante termometri, display, manometri etc.

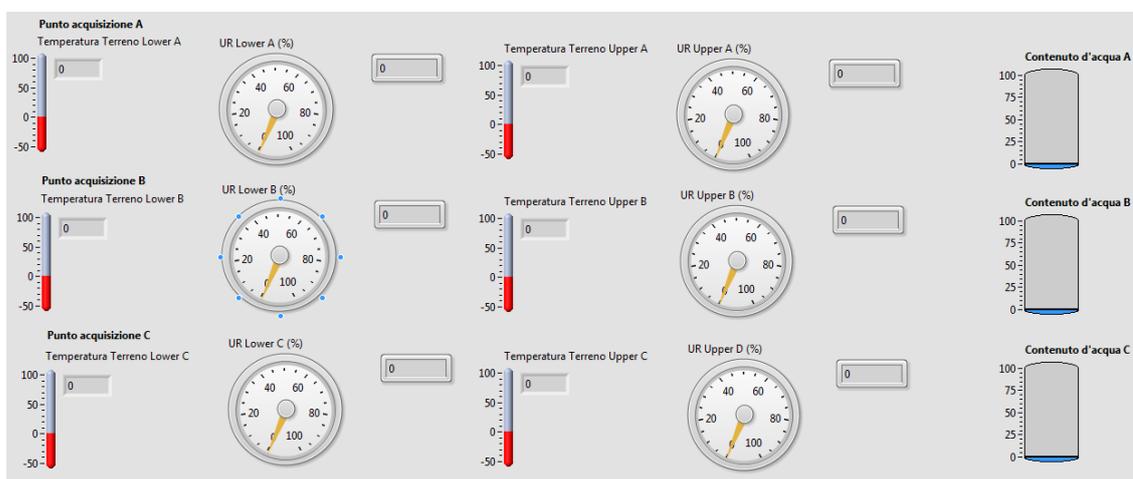


Fig. 2.65. VI Graphic user interface

I dati vengono memorizzati su un file di formato testo, che viene generato automaticamente alle 00:00, e ordinati in funzione della data, che è la chiave primaria per la ricerca e l'ordinamento nel file system. La chiave è composta da anno, mese e giorno con l'ora; tutti questi *attributi* consentono di poter agevolmente effettuare delle operazioni di analisi ed

elaborazioni dati. Di ogni grandezza viene calcolata la deviazione standard, per verificare l'accuratezza della misura stessa.

Capitolo 3. Analisi dei dati sperimentali

In questo capitolo vengono presentati i risultati derivanti da analisi di dati sperimentali di diverse coperture a verde. È dapprima effettuata un'accurata analisi delle performances estive ed invernali del tetto verde sperimentale realizzato sulla copertura del cubo 46C. Si riportano dettagliate considerazioni sul comportamento termico dei diversi strati nei settori con diversa stratigrafia, e viene quantificato l'effetto della copertura a verde sugli ambienti interni sottostanti la copertura, ovvero nell'ultimo piano dell'edificio considerato. Successivamente è illustrata l'analisi sperimentale condotta su di un sito situato presso l'Università di Lleida in Spagna, presso la quale è stato svolto un periodo di ricerca e la descrizione di alcuni esperimenti per la misura delle proprietà termiche di diverse tipologie di substrato effettuati presso la stessa istituzione.

3.1 Attività di ricerca sperimentale condotta sul sito Unical

Le caratteristiche del tetto verde realizzato sulla copertura dell'edificio universitario cubo 46C e le grandezze monitorate sono state ampiamente descritte nel capitolo 2. Si riportano di seguito i principali risultati relativi all'analisi dei dati sperimentali.

3.1.1 *Analisi termica delle stratigrafie*

Per investigare le performances estive ed invernali della copertura a verde, sono state individuate due settimane di riferimento caratterizzate da condizioni climatiche severe nelle due stagioni.

Si riportano nuovamente i particolari delle stratigrafie con l'indicazione della nomenclatura dei vari sensori per una maggiore chiarezza di lettura nei grafici seguenti. Nel seguito con il pedice *s* si indicano le grandezze relative al substrato, con i pedici *top* e *bot* si indicano le grandezze al di sopra ed al di sotto dello strato considerato, con il pedice *ins* si indica la grandezza al di sopra dello strato di isolante termico, con *sup* si indica la grandezza superficiale e con *WC* si indica il contenuto volumetrico d'acqua del substrato.

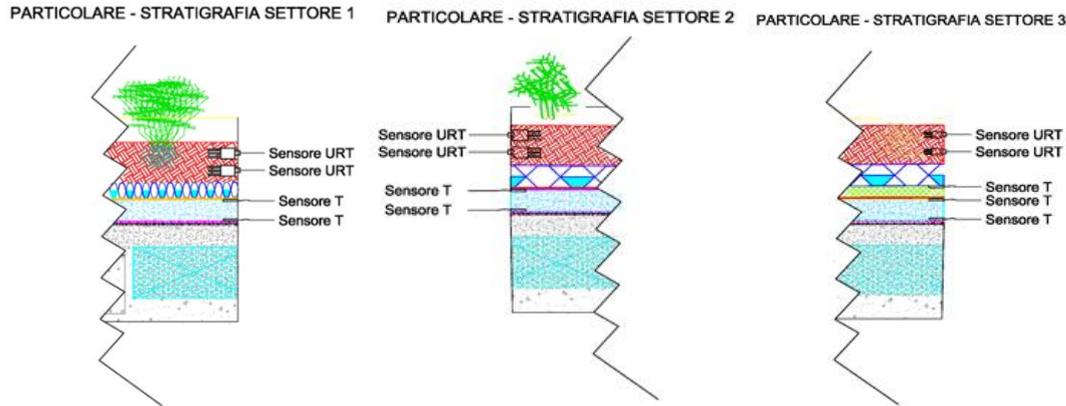


Fig. 3.1. Posizione dei sensori nelle stratigrafie

Di seguito si riportano le condizioni climatiche per la settimana estiva, caratterizzata da valori elevati di radiazione solare, condizioni di cielo sereno (assenza di precipitazioni) e picchi stagionali massimi della temperatura dell'aria esterna. La radiazione solare globale sul piano orizzontale ha raggiunto il valore massimo di 862 W/m² mentre la temperatura dell'aria esterna è variata tra 19,9 °C e 32,8 °C.

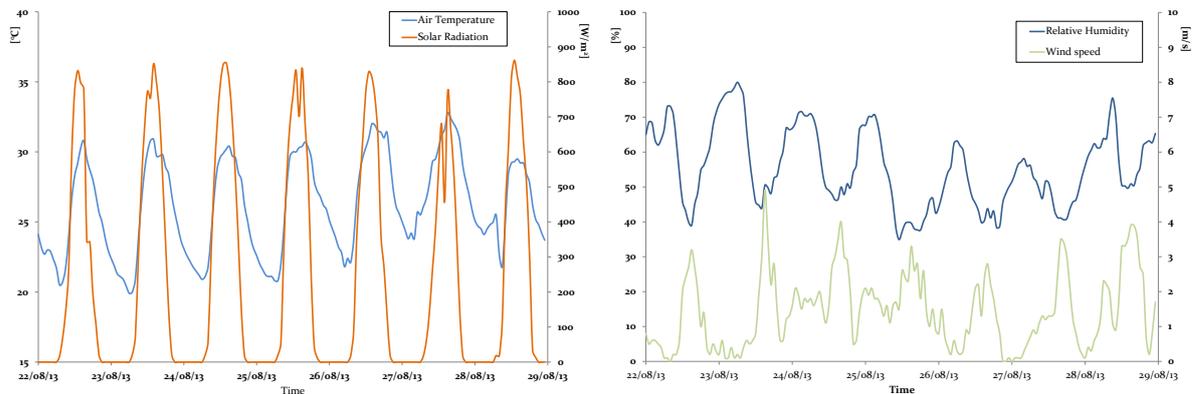


Fig. 3.2. Condizioni climatiche esterne nella settimana di riferimento estiva

Le seguenti figure riportano gli andamenti di temperatura nel terreno e i relativi contenuti d'acqua per due punti di acquisizione (C e D) nel settore 1.

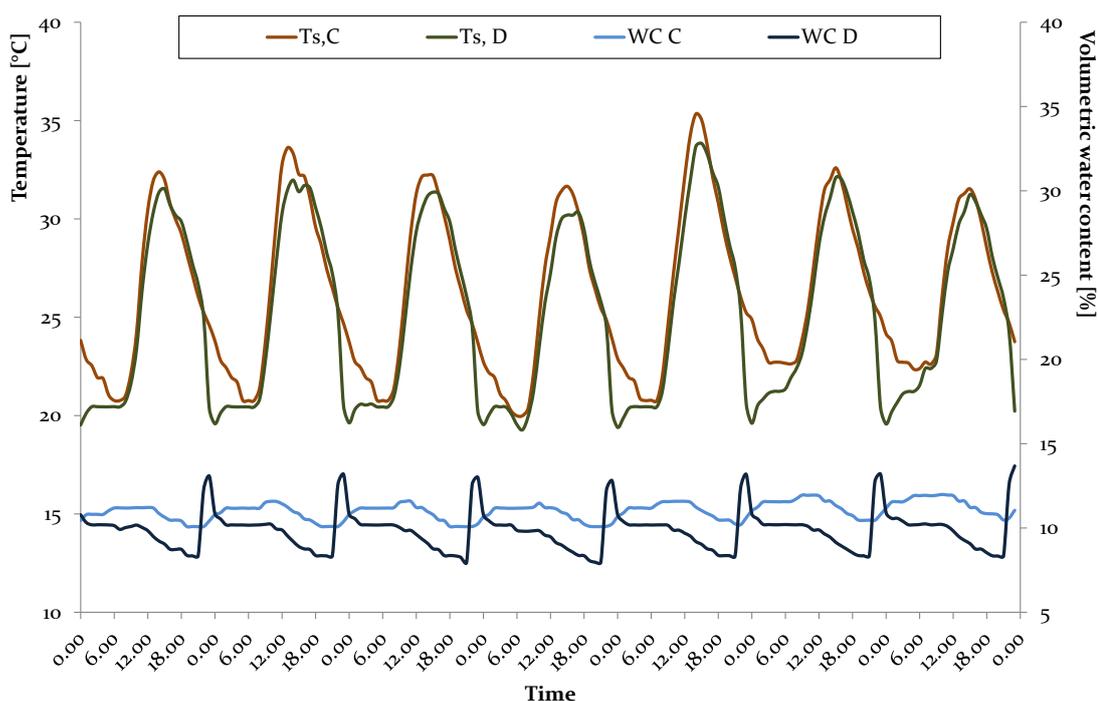


Fig. 3.3. Andamenti di temperatura e contenuto d'acqua nel terreno nel settore 1

La temperatura del substrato segue l'andamento della temperatura dell'aria esterna e varia tra 20,0 °C e 35,3 °C nel punto C e tra 19,3 °C e 33,8 °C nel punto D. A causa della particolare dimensione delle sonde installate nel substrato, che del resto è di spessore limitato, non si apprezzano sostanziali differenze lungo la sezione verticale di un singolo punto di acquisizione. Di conseguenza si riportano per ogni punto considerato le medie tra i valori misurati dai due sensori posizionati nello stesso punto. Il sistema di irrigazione, installato solo sui settori con vegetazione, è di tipo “a goccia”, per cui i punti di misura lungo la superficie risentono in maniera differente dell'attivazione dello stesso. La particolarità del sistema di irrigazione permette di valutare l'influenza del contenuto d'acqua (WC) sui profili di temperatura del terreno. Emerge chiaramente dalla fig. 3.3 che a valori maggiori del contenuto d'acqua WC sono legate temperature del substrato più basse. Il punto D, evidentemente posizionato in prossimità di un ugello di erogazione, risente maggiormente dell'effetto dell'irrigazione: quando questo inizia ad operare il contenuto d'acqua sale bruscamente a valori intorno al 13,7% e poi declina durante il giorno a causa degli effetti dell'evapotraspirazione. La diretta conseguenza dell'aumento di WC è l'immediata caduta della temperatura, che scende al valore minimo giornaliero. Nel punto C in cui WC è soggetto a minori variazioni giornaliere, variando tra il 10% ed il 12%, la temperatura corrispondente del substrato mostra valori leggermente più elevati soprattutto durante il funzionamento del sistema di irrigazione. Si nota quindi come esista una correlazione tra il contenuto d'acqua e la

temperatura del substrato. Considerando che comunque i livelli di umidità del substrato sono relativamente bassi nel periodo estivo, si può concludere che maggiori valori di contenuto d'acqua potrebbero portare a differenze di temperatura più apprezzabili. La figura seguente mostra invece i valori di temperatura registrati al di sotto e al di sopra del massetto alleggerito delle pendenze.

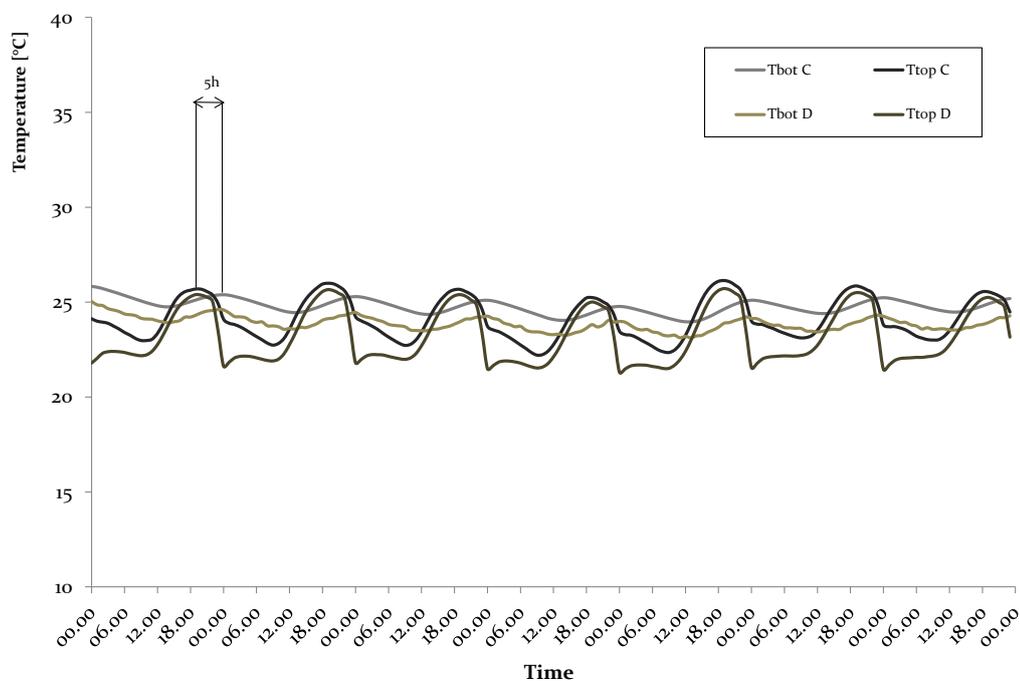


Fig. 3.4. Temperature al di sopra e al di sotto dello strato di alleggerimento nel settore 1

L'andamento della temperatura sulla parte superiore dello strato di calcestruzzo alleggerito indica la capacità degli strati superiori (substrato e drenaggio) di attenuare le oscillazioni di temperatura. L'ampiezza giornaliera è considerevolmente inferiore con $T_{C,top}$ che varia tra 22,2 °C e 26,1 °C e $T_{D,top}$ tra 21,3 °C e 25,7 °C. Un ulteriore notevole contributo di attenuazione è dato dal calcestruzzo alleggerito, dove la temperatura misurata al di sotto di questo può essere considerata abbastanza stabile intorno ai valori medi di 24,9 °C nel punto C e 24,0 °C nel punto D. L'effetto dell'umidità del substrato nel ridurre le temperature lungo la sezione verticale viene rilevato anche negli strati inferiori della stratigrafia essendo $T_{C,bot}$ in media 0,9 °C inferiore a $T_{D,bot}$. Inoltre la presenza dello strato di alleggerimento produce uno sfasamento temporale del picco di temperatura registrato sullo strato soprastante pari a 5 ore, come visibile in figura.

Risultati analoghi si riscontrano nel settore 2, dove però il sistema di irrigazione opera ad orari differenti. In questo caso i maggiori valori di WC conducono a minori temperature nel

substrato, ma non si osserva il drastico abbassamento osservato nel settore 1. La temperatura del substrato varia tra 20,9 °C e 36,1 °C nel punto B e tra 19,3 °C e 34,3 °C nel punto D.

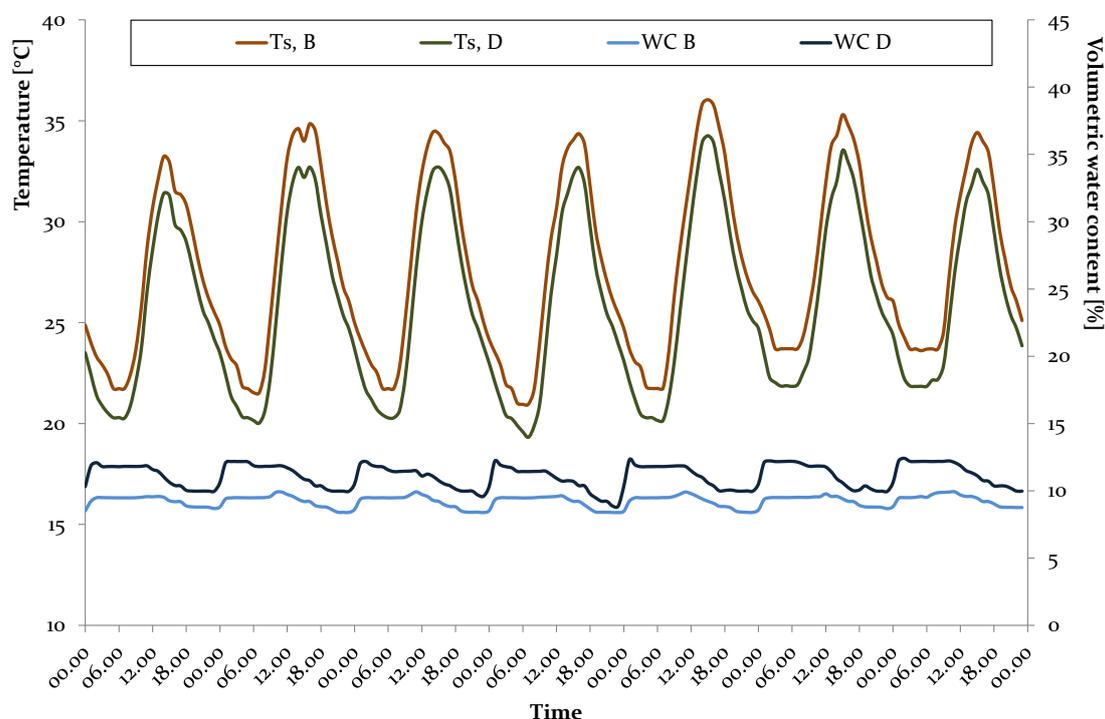


Fig. 3.5. Andamenti di temperatura e contenuto d'acqua nel settore 2

Anche in questo caso la temperatura al di sopra dello strato di calcestruzzo alleggerito risulta attenuata rispetto al substrato, variando tra 26,7 °C e 21,6 °C nel punto B e tra 26,3 °C e 21,5 °C nel punto D. L'effetto dell'umidità del substrato nel diminuire le temperature lungo la sezione verticale del tetto verde si rileva anche negli strati sottostanti; la temperatura misurata al di sotto dello strato di alleggerimento è minore nel punto D, anche se la differenza è molto ridotta. Anche in questo caso lo sfasamento deli picco di temperatura al di sopra e al di sotto dello strato di alleggerimento risulta pari a 5 ore.

Nel settore 3 l'effetto combinato di assenza della vegetazione e della presenza di un ulteriore strato di isolamento termico posizionato al di sotto dello strato di drenaggio, determina temperature nel substrato relativamente più alte rispetto agli altri settori. Inoltre, l'assenza di irrigazione induce bassi livelli di WC, che risulta più o meno stabile intorno al valore di 3,5%.

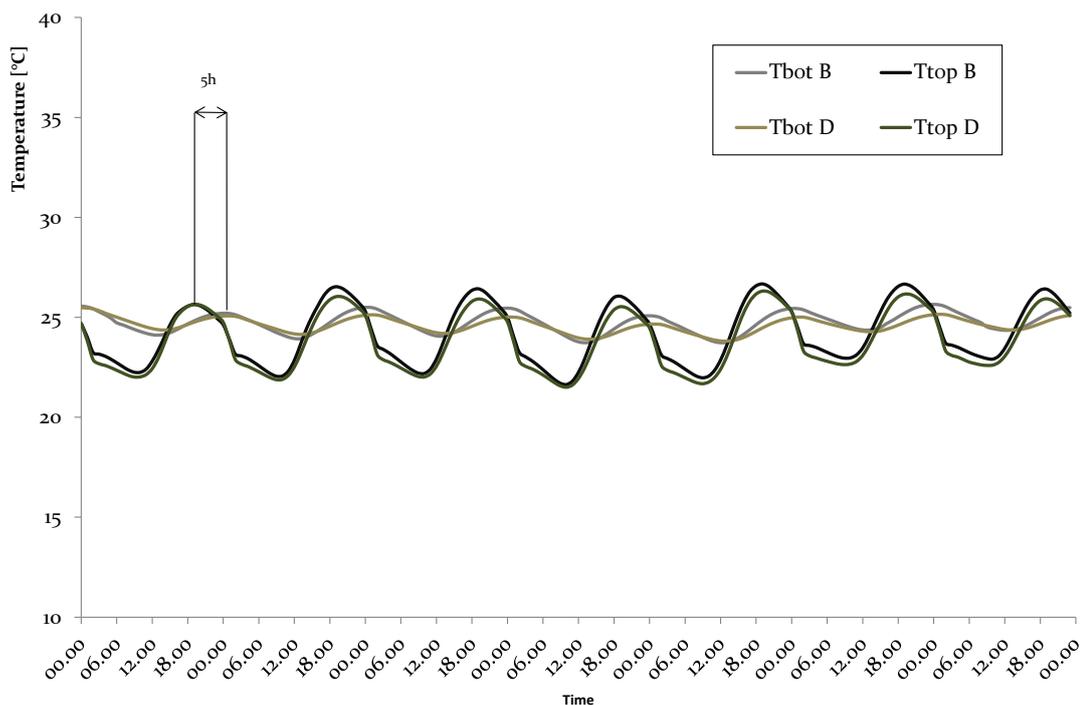


Fig. 3.6. Temperature al di sopra e al di sotto dello strato di alleggerimento nel settore 2

In questo settore non sono rilevate differenze significative di temperatura tra i diversi punti di acquisizione, per cui si riportano gli andamenti esclusivamente del punto A.

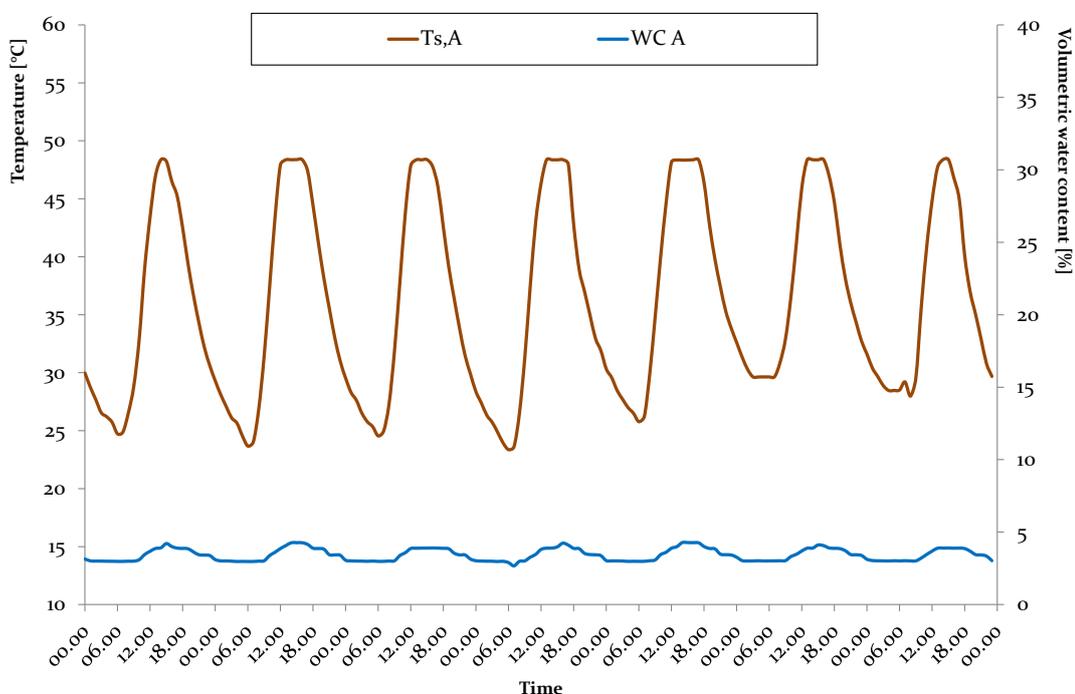


Fig. 3.7. Temperature e contenuto d'acqua nel substrato nel settore 3

Nel settore 3 i valori ridotti di WC non sono in grado di produrre effetti rilevanti di raffreddamento evaporativo. Questo è un ulteriore fattore che contribuisce ad innalzare la

temperatura nel substrato che arriva ad eccedere i limiti operativi del sensore di misura (50°C). La temperatura misurata al di sopra dell'isolante varia tra $24,4^{\circ}\text{C}$ e $37,3^{\circ}\text{C}$. L'effetto di questo strato nel smorzare l'oscillazione di temperatura è chiaramente visibile nel profilo della temperatura al di sopra dello strato di alleggerimento che varia tra $27,4^{\circ}\text{C}$ e $30,4^{\circ}\text{C}$. Di nuovo la temperatura al di sotto di questo strato può essere considerata ragionevolmente costante, oscillando intorno al valore di $28,8^{\circ}\text{C}$. Lo sfasamento del picco di temperatura prodotto dallo strato di isolante è di 2 ore, mentre quello prodotto dallo strato di alleggerimento è di 4 ore.

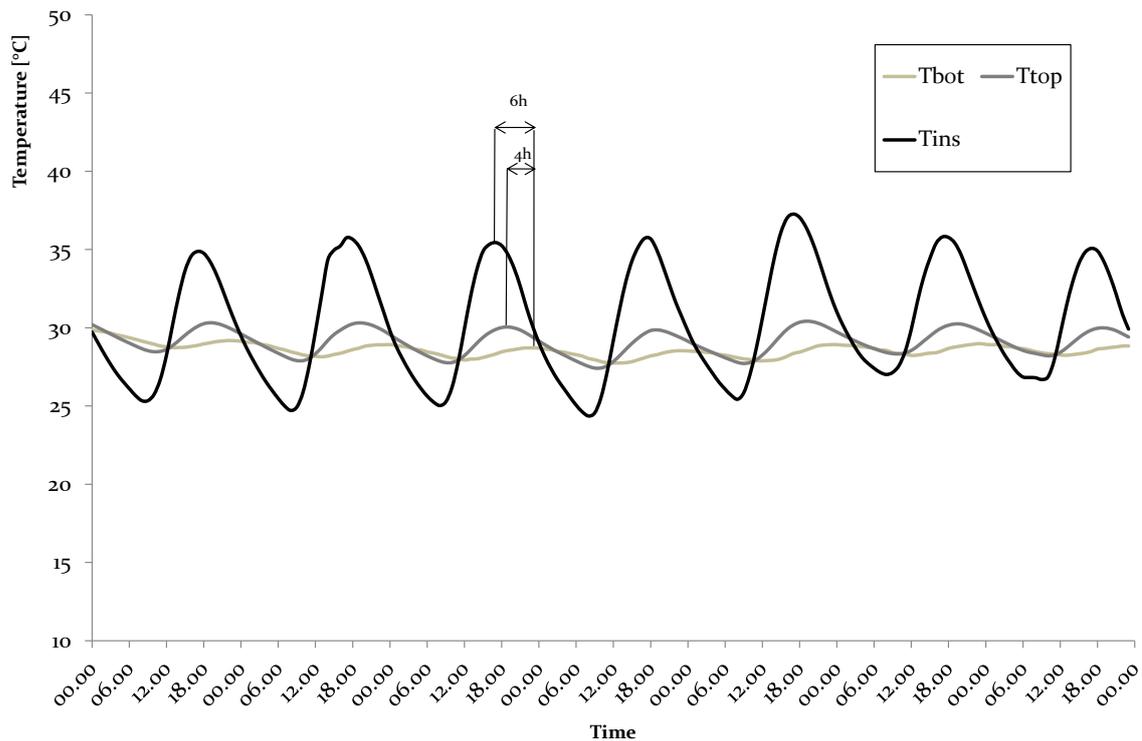


Fig. 3.8. Temperature al di sotto dello strato di drenaggio nel settore 3

Nel settore 4, grazie all'effetto della temperatura dell'aria esterna e della radiazione solare, unitamente agli elevati valori del coefficiente di assorbimento della superficie, la temperatura raggiunge valori considerabilmente più elevati e mostra fluttuazioni più grandi, variando tra $17,7^{\circ}\text{C}$ e $64,8^{\circ}\text{C}$.

Se si effettua un confronto tra la temperatura superficiale (T_{sup_4}) del settore di riferimento (settor 4) e la temperatura alla base della soluzione costruttiva a verde si riconosce immediatamente l'effetto benefico della presenza di una copertura a verde nel smorzare le fluttuazioni di temperatura e garantire mediamente livelli di temperatura più bassi alla base del tetto vegetato.

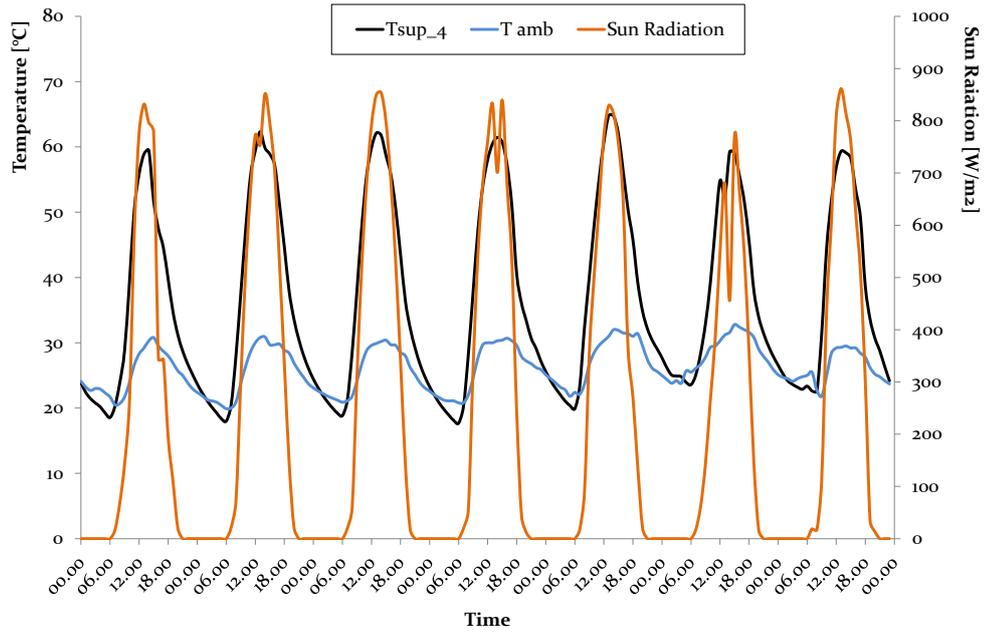


Fig. 3.9. Temperatura superficiale del settore 4

Il Settore 1 ed il settore 2 presentano, alla base della stratigrafia a verde, valori medi circa uguali nella settimana di riferimento estiva. In tali condizioni climatiche le proprietà di accumulo idrico e le differenze nelle proprietà termiche risultano poco influenti sulla prestazione complessiva della stratigrafia. Il settore 3 mostra invece una temperatura media di circa 4 °C più elevata rispetto agli altri settori inverditi. Le ragioni, come spiegato in precedenza, sono da attribuire all'assenza di vegetazione e di irrigazione che riducono gli effetti di ombreggiamento e i fenomeni evapotraspirativi ed alla presenza dello strato di isolante aggiuntivo che limita il raffreddamento notturno degli strati sottostanti.

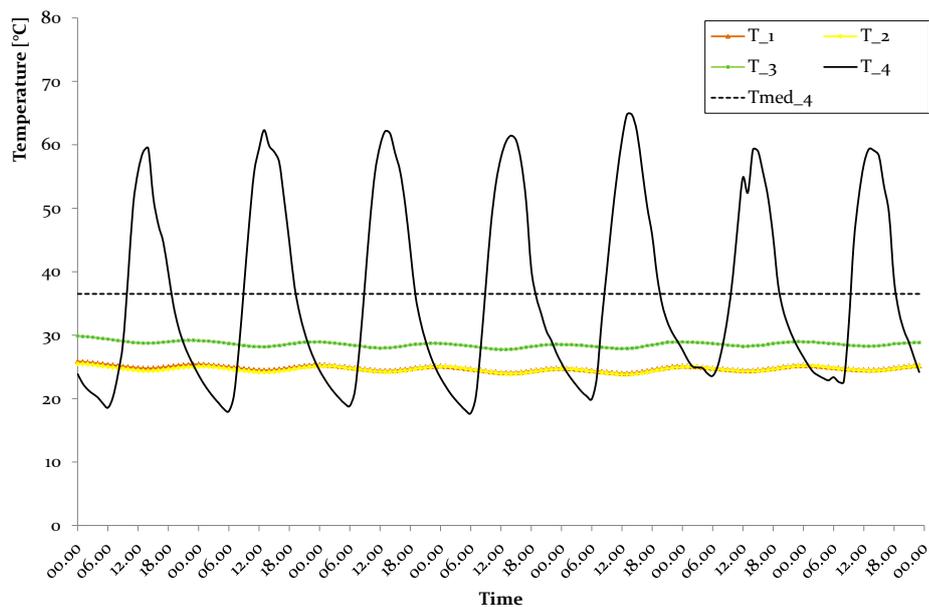


Fig. 3.10. Temperature alla base del tetto verde e temperatura e superficiale del settore 4

La temperatura media nel settore 4 risulta invece 36,5 °C, di circa 12°C superiore alla temperatura corrispondente negli altri settori.

Le seguente figura mostra le condizioni climatiche esterne della settimana invernale di riferimento. La radiazione solare raggiunge il picco di 569 W/m², la temperatura dell'aria esterna varia tra 1,4 °C e 15,3 °C e l'umidità relativa tra 40,3% e 90,8%. È presente un evento piovoso nel giorno 28/01/2014 con due picchi di circa 2 mm/h ed uno più limitato giorno 29/01/2014.

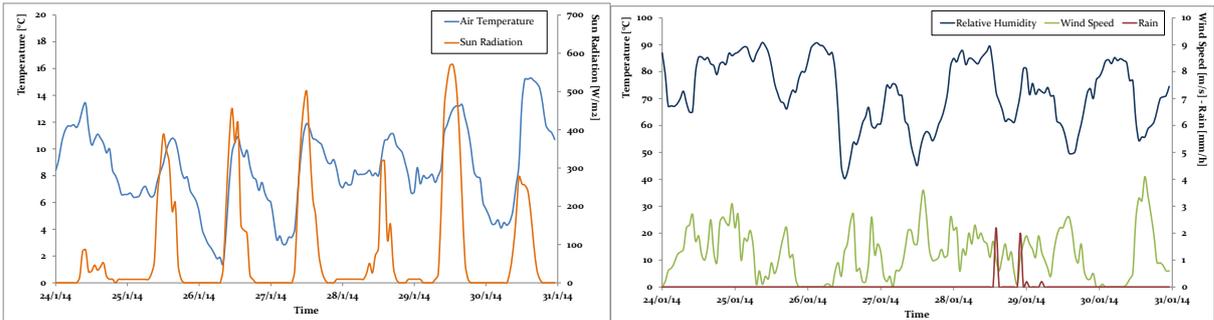


Fig. 3.11. Condizioni climatiche esterne nella settimana invernale

La figura seguente mostra l'andamento della temperatura nel substrato ed il relativo contenuto d'acqua per due punti di acquisizione (B e D) nella settimana di riferimento invernale.

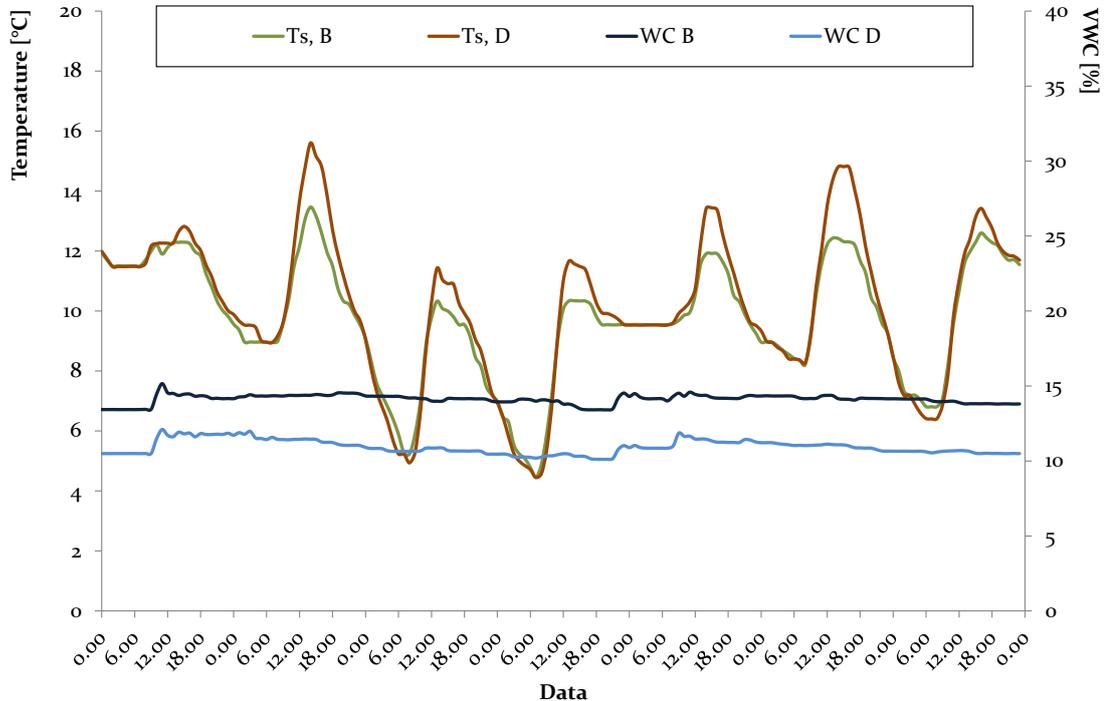


Fig. 3.12. Temperature e contenuto d'acqua nel substrato nel settore 1

Come nel caso estivo la temperatura dello strato colturale segue l'andamento dell'aria esterna, variando tra un minimo di 4,5 °C ed un massimo di 13,5 °C nel punto B e tra 4,5 °C e 15,6 °C

nel punto D. WC varia tra il 10 % ed il 12 % nel punto D mentre si mantiene mediamente pari a 3 punti percentuali più elevati nel punto C. È interessante notare come i valori minimi di temperatura del substrato siano circa uguali nei due punti mentre i valori massimi risultano più elevati nel punto D dove si nota un maggiore valore del contenuto d'acqua. L'effetto del contenuto d'acqua sulle temperature del substrato si nota anche nel periodo invernale, tuttavia la differenza di temperatura tra i due punti non risulta notevole. Di fatto, un maggiore contenuto d'acqua contribuisce a diminuire la temperatura del substrato durante il giorno in presenza di radiazione solare, a causa dei fenomeni evapotraspirativi mentre non produce effetti rilevanti durante le ore notturne.

Al di sopra dello strato di alleggerimento si possono osservare piccole fluttuazioni giornaliere in entrambi i punti di acquisizione: la temperatura varia tra 8,6 °C e 12,7 °C nel punto B e tra 9 °C e 13,2 °C nel punto D. La differenza media tra i valori registrati nei punti B e D al di sopra del calcestruzzo alleggerito è trascurabile.

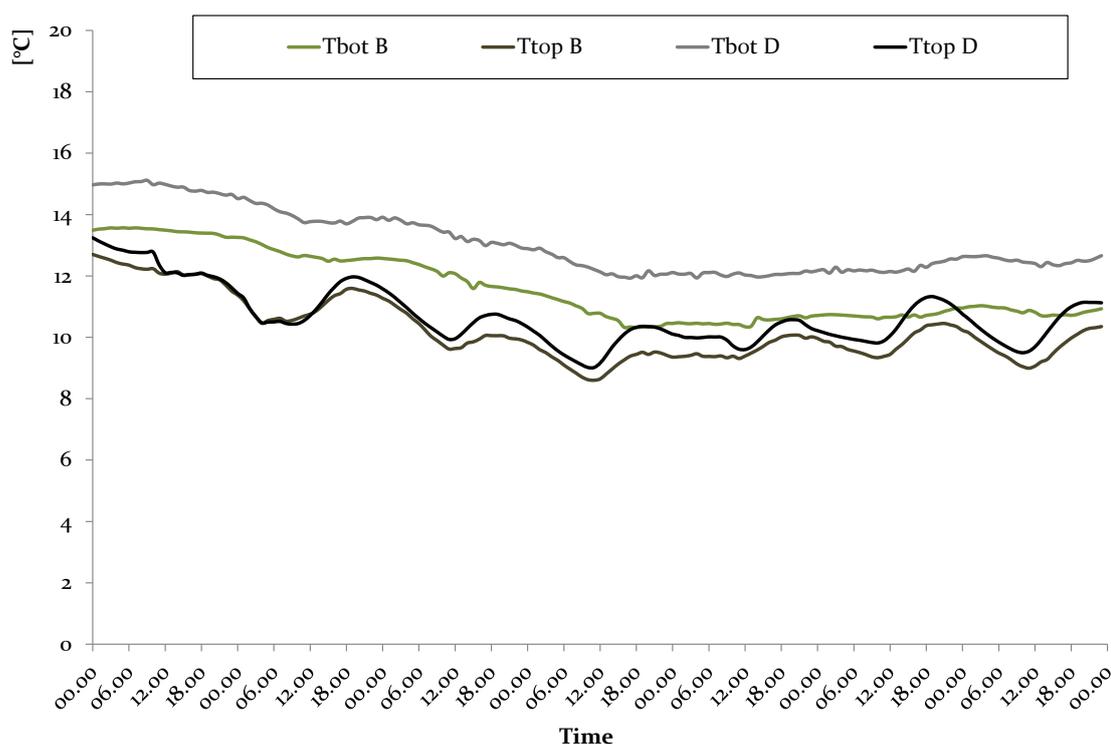


Fig. 3.13. Temperature al di sopra e al di sotto dello strato di alleggerimento nel settore 1

Una maggiore differenza si osserva al di sotto dello strato di alleggerimento ma in questo caso la temperatura potrebbe risentire dell'effetto delle condizioni climatiche interne. Da ricordare che a differenza del caso estivo, nella settimana invernale osservata sono attivi gli impianti di climatizzazione.

Nel settore 2 nel punto con contenuto d'acqua maggiore la temperatura del substrato mostra un andamento sempre inferiore al punto con contenuto d'acqua inferiore. Nel punto D, WC si mantiene in media 4 punti percentuali rispetto al punto A.

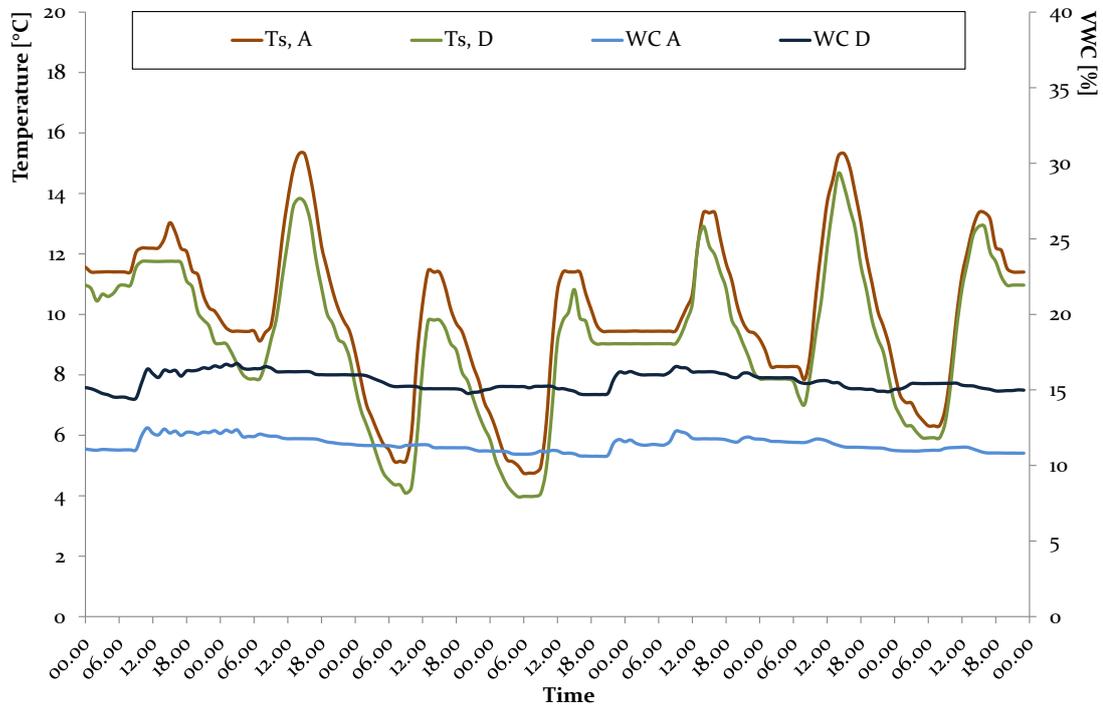


Fig. 3.14. Temperature e contenuto d'acqua nel substrato nel settore 2

La temperatura varia tra 4,7 °C e 15,3 °C nel punto A e tra 4,0 °C e 14,7 °C nel punto D mentre il WC varia tra 10,5 % e 12,5 % nel punto A e tra 13 e 15,5% nel punto D. Per quanto riguarda le temperature degli strati sottostanti si nota dalla figura seguente che sia al di sopra che al di sotto dello strato alleggerito i valori di temperatura, nonostante mostrino andamenti simili a quelli registrati nel settore 1, si mantengono mediamente su valori più bassi. Al di sopra del massetto alleggerito le temperature nei due punti si presentano quasi coincidenti con valori compresi tra 6,6 °C e 12,0 °C. Al di sotto di questo strato si registra una leggera differenza tra gli andamenti nei due punti: la temperatura varia tra 9,1 °C e 13 °C nel punto A e tra 10,0 °C e 13,4 °C nel punto D.

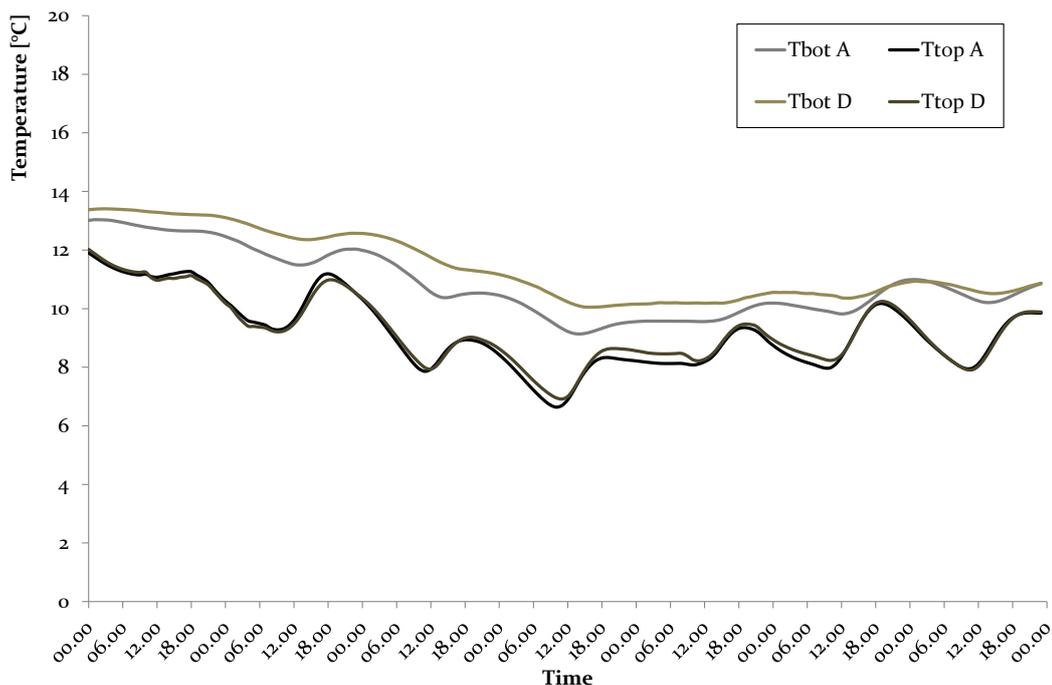


Fig. 3.15. Temperature al di sopra e al di sotto dello strato di alleggerimento nel settore 2

Nel settore 3 nella settimana invernale a causa delle limitate differenze dei valori di WC la temperatura del substrato nei punti di acquisizione mostra piccole differenze.

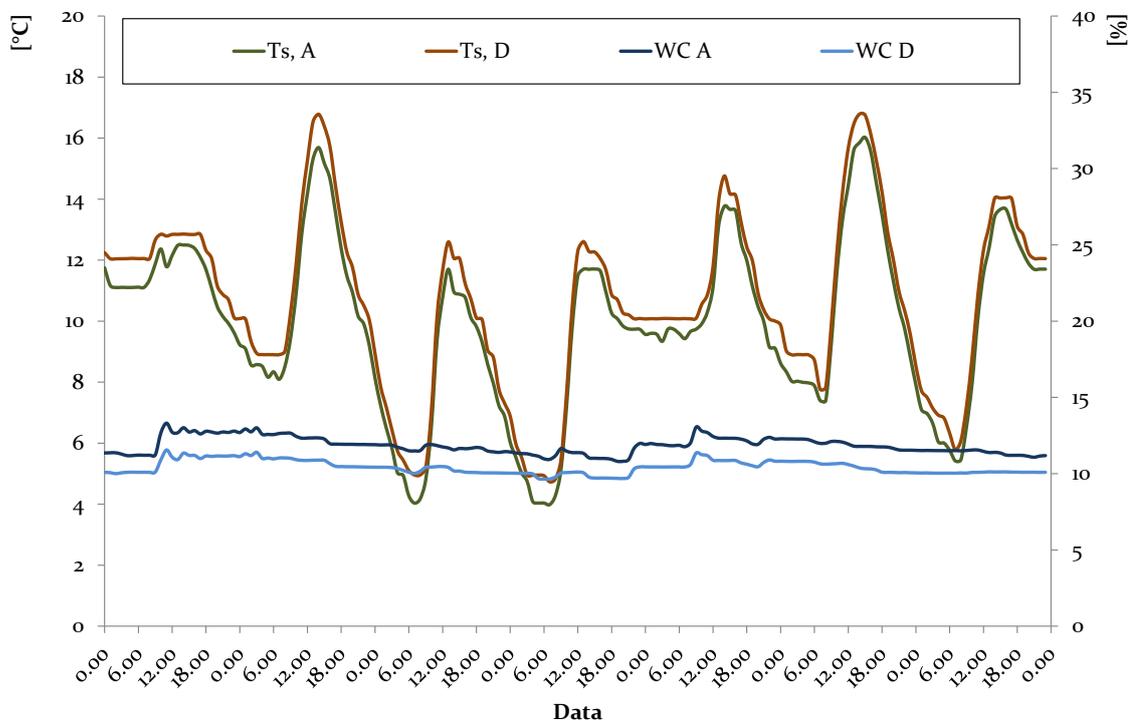


Fig. 3.16. Temperature e contenuto d'acqua nel substrato nel settore 3

La temperatura varia in questo caso tra 4,0 °C e 16,0 °C nel punto A e tra 4,7 °C e 16,8 °C nel punto D. WC varia in maniera limitata tra il 11% e il 13% nel punto A e tra il 10 % ed il 12 % nel punto D.

Più interessante si presenta l'analisi delle temperature al di sotto del substrato. Al di sopra dello strato di isolante la temperatura, in accordo con l'andamento della temperatura del terreno, presenta oscillazioni giornaliere e varia tra 7,6 °C e 13,8 °C. L'isolamento termico aggiuntivo nella stratigrafia smorza notevolmente i flussi termici, e di conseguenza la temperatura misurata al di sopra del massetto alleggerito presenta fluttuazioni notevolmente ridotte variando nel range 12,5 °C – 16,3 °C, ma con valori già superiori a quelli registrati negli altri settori vegetati.

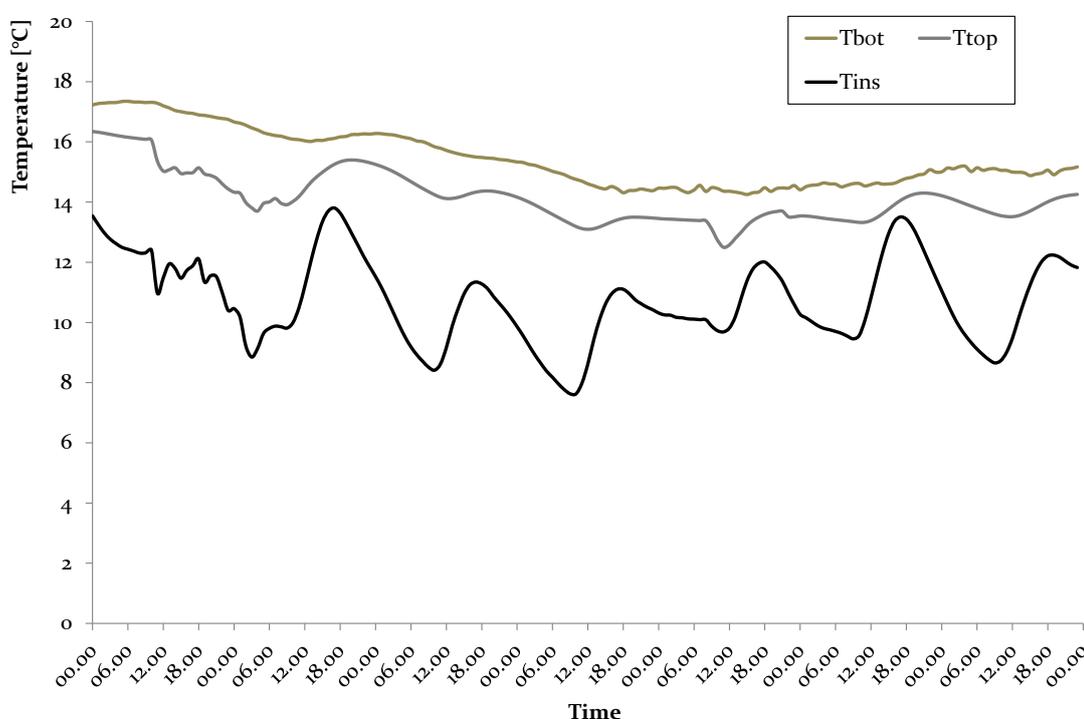


Fig. 3.17. Temperature al di sotto dello strato di drenaggio nel settore 3

L'ulteriore contributo dello strato di alleggerimento porta la temperatura a livelli ancora superiori. Al di sotto di questo strato la temperatura varia tra 14,3 °C ed 17,3 °C.

Nel settore 4 la temperatura superficiale è strettamente legata alle condizioni climatiche esterne. Analogamente al caso estivo si riportano i valori di temperatura di un punto di acquisizione. Si nota dalla figura seguente come la membrana esterna raggiunga il picco giornaliero di temperatura in corrispondenza dei valori massimi della radiazione solare, mentre nelle ore notturne è evidente l'effetto degli scambi termici convettivi con l'aria esterna e radiativi con la volta celeste.

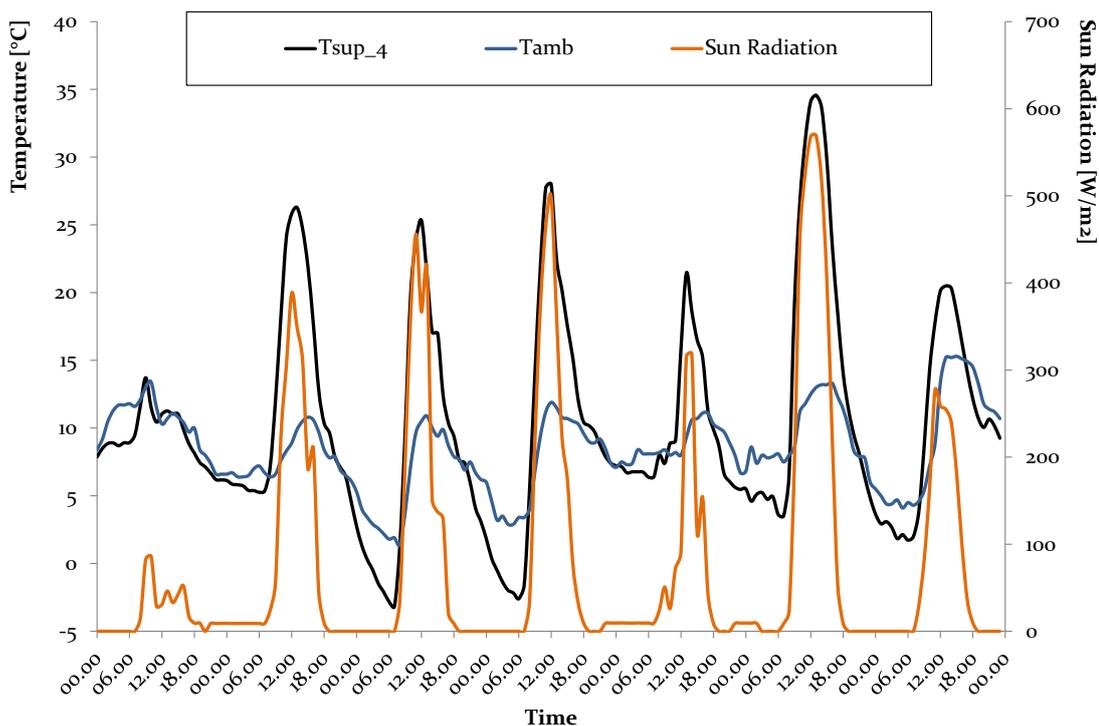


Fig. 3.18. Temperatura superficiale del settore 4

La temperatura della membrana impermeabile del settore 4 varia nella settimana di riferimento tra $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $34,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

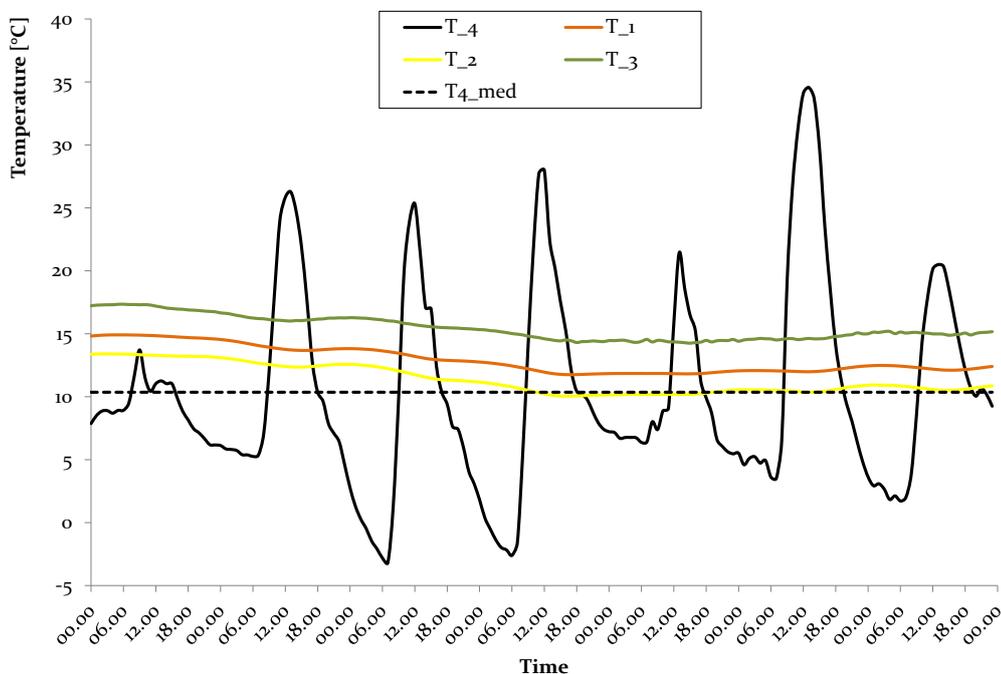


Fig. 3.19. Temperature alla base del tetto verde e temperatura superficiale del settore 4

Se si pongono a confronto le temperature misurate alla base delle stratigrafie a verde con la temperatura superficiale del settore 4 si può concludere che il tetto verde è in grado di fornire

un efficace isolamento termico aggiuntivo, in quanto le temperature alla base dei settori inverditi si trovano a livelli di temperatura media più alti rispetto al tetto di riferimento. Come atteso, il settore 3 è quello che mostra le migliori performances grazie alla presenza dello strato di isolamento aggiuntivo, con una temperatura media di 15,4 °C. Il settore 1 presenta comunque ottime prestazioni con una temperatura media di 12,9 °C mentre il settore 2 mostra le minori performances, con una temperatura media di 11,4°C contro una temperatura media del settore 4 di 10,4 °C.

3.1.2 Effetto delle stratigrafie sulle variabili climatiche interne

Per valutare l'effetto della presenza di una copertura a verde sugli ambienti interni sono mostrati nel seguito gli andamenti delle variabili climatiche interne misurate nei locali dell'ultimo piano del cubo 46C corrispondenti ai vari settori sulla copertura. Si indica nel seguito con Locale 1 la stanza corrispondente al settore 1, e così di seguito per gli altri locali. Una prima fase ha previsto il confronto dei dati interni nei vari locali nel caso di presenza ed assenza del tetto verde. Il monitoraggio delle variabili interne è iniziato nell'aprile del 2012, di conseguenza si dispone di dati in assenza di copertura a verde solo per la stagione estiva del 2012. Sono state dunque selezionate una settimana estiva per l'anno 2012 ed una per il 2013 di modo che presentassero condizioni climatiche esterne quanto più prossime in termini di temperatura dell'aria esterna e di radiazione solare. In entrambi gli anni la settimana dal 03 al 09 Agosto ha registrato i più alti valori di temperatura. Nelle figure seguenti sono mostrate le condizioni climatiche esterne per le due settimane considerate. La temperatura dell'aria esterna nella settimana del 2012 ha mostrato valori leggermente superiori a quelli relativi al 2013, mentre l'umidità relativa ha mostrato valori più elevati nel 2013.

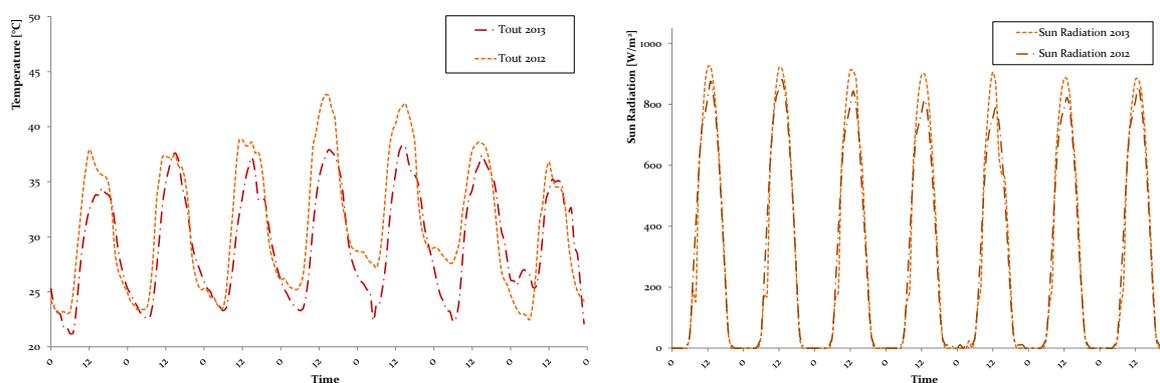


Fig. 3.20. Temperatura dell'aria esterna e radiazione solare nelle settimane considerate

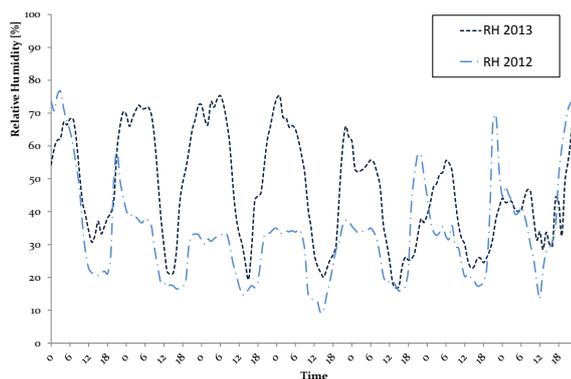


Fig. 3.21. Umidità relativa dell'aria esterna nelle settimane considerate

Nel locale 2 per l'intero periodo considerato la temperatura dell'aria interna ha assunto valori minori nel 2013 con una differenza media di 3,6 °C ed una deviazione standard di 1,34 °C.

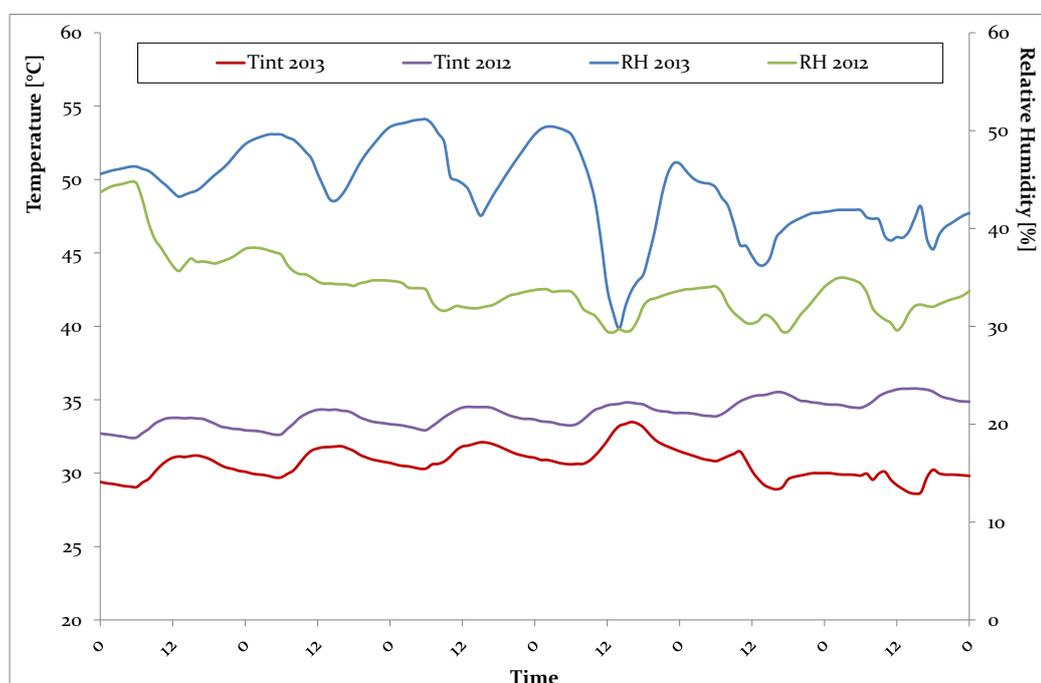


Fig. 3.22. Temperatura e RH interne nel Locale 2

Nel 2012 l'umidità relativa presenta valori superiori al 2013 con valori minimi e massimi del 28,1% e 44,8%. Nel 2013 in accordo con l'andamento dell'umidità relativa dell'aria esterna si sono registrati valori del 29,8 % e 51,2%.

Nel locale 3 la differenza media di temperatura è stata 2,9 °C con una deviazione standard di 0,78 °C. Analogamente ai risultati precedenti l'umidità relativa ha mostrato valori più elevati durante la settimana estiva del 2013 con valori massimi e minimi di 60,0% e 30% rispetto al 50,8% e 23,7% del 2012.

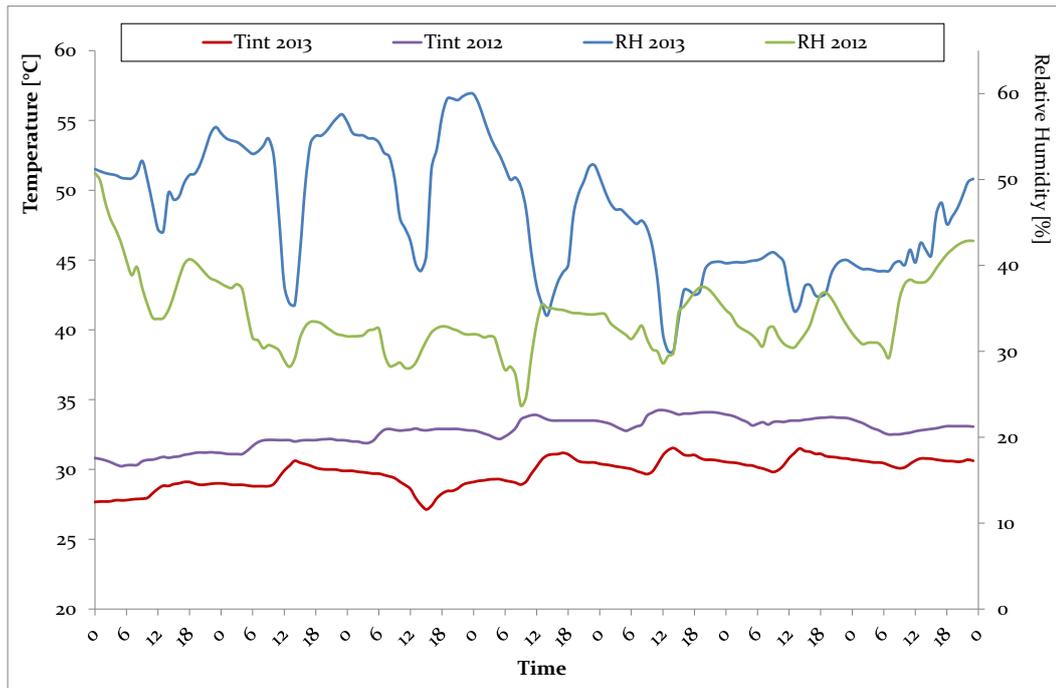


Fig. 3.23. Temperatura e RH interne nel Locale 3

La figura seguente mostra gli andamenti della temperatura dell'aria interna nei quattro locali, nella settimana estiva considerata per l'analisi delle stratigrafie (22/08/2013 – 29/08/2013). Da tenere presente che in tutto il mese di agosto l'edificio non è risultato occupato, di conseguenza i valori delle variabili interne registrati rappresentano le condizioni di free floating.

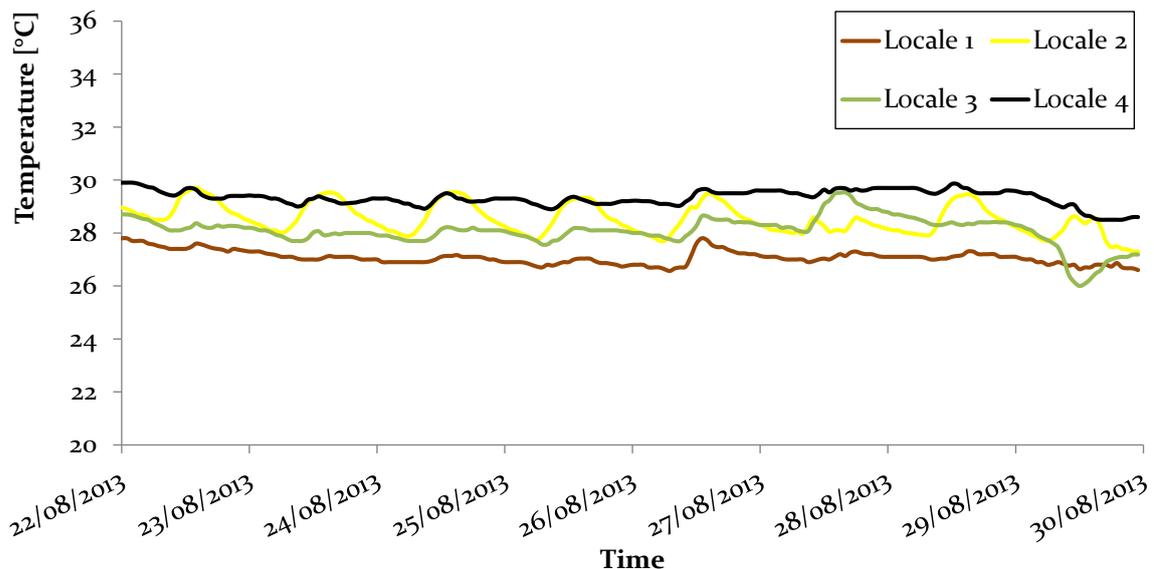


Fig. 3.24. Andamento della temperatura interna nei 4 locali

Si riconosce come il locale sottostante il settore 4 presenti temperature più alte rispetto agli altri locali. In particolare il locale 1 e 3 presentano una temperatura media dell'aria interna

pari a 27,1 °C e 28,1 °C rispettivamente, mentre nel locale 4 assume il valore di 29,3 °C. Il locale 2 presenta oscillazioni giornaliere più accentuate, dovute alla diversa configurazione della stanza che presenta le maggiori superfici esterne disperdenti e maggiori superfici vetrate, in cui nel momento del picco la temperatura assume valori uguali a quelli registrati nel locale 4. Ciononostante il valor medio nella settimana risulta pari a 28,5 °C ossia di 0,8 °C minore rispetto al locale di riferimento. Nel periodo estivo quindi la copertura a verde si dimostra efficace nel diminuire la temperatura degli ambienti interni e smorzare le fluttuazioni della temperatura la quale presenta una differenza massima dal valor medio di 2,2 °C.

Un'ulteriore conferma dell'efficacia della copertura a verde deriva dall'analisi dei valori della temperatura interna per l'intero mese di agosto. Il seguente grafico mostra la distribuzione della frequenza cumulata inversa della temperatura dell'aria interna dei quattro locali, per l'intero mese di agosto. In ordinata sono riportati i valori percentuali di tempo, nell'intero periodo considerato, ai quali corrisponde una temperatura maggiore del valore corrispondente riportato in ascissa.

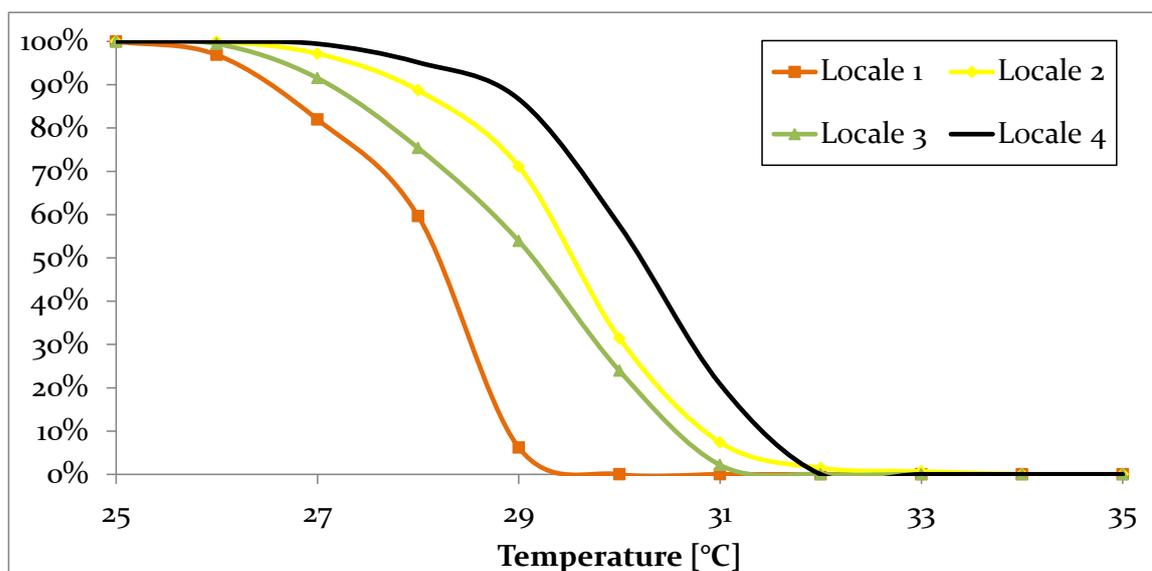


Fig. 3.25. Distribuzione cumulata inversa della temperatura dell'aria interna. Agosto 2013

Si osserva come la presenza dei diversi settori sulla copertura induce livelli di temperatura inferiori anche negli ambienti interni. In particolare la distribuzione del locale 4 si presenta nettamente come la peggiore delle quattro analizzate. A causa delle forti sollecitazioni esterne la temperatura interna nell'intero mese presenta valori sempre superiori ai 25 °C in tutti gli ambienti. Salendo a valori superiori si nota che temperature superiori ai 28 °C sono osservate con le seguenti percentuali: 95% per il locale 4; 60% per il locale 1; 89% per il locale 2; 75% per il locale 3.

Frequenza Cumulata %				
T [°C]	Locale 1	Locale 2	Locale 3	Locale 4
25	1.00	1.00	1.00	1.00
26	0.97	1.00	0.99	1.00
27	0.82	0.97	0.92	0.99
28	0.60	0.89	0.75	0.95
29	0.06	0.71	0.54	0.87
30	0.00	0.31	0.24	0.58
31	0.00	0.07	0.02	0.21
32	0.00	0.01	0.00	0.00
33	0.00	0.01	0.00	0.00
34	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00

Valori di temperatura superiori ai 30 °C sono osservati con le seguenti percentuali: 58% per il locale 4; 0% per il locale 1; 31% per il locale 2; 24% per il locale 3.

Il locale 2, in accordo con i risultati precedenti, è quello che beneficia meno della presenza della copertura a verde; tuttavia è indubbio l'effetto migliorativo sulle condizioni climatiche interne.

Per dare indicazione sulle prestazioni ottenute nella stagione invernale si riporta la distribuzione cumulata inversa per il mese di Gennaio 2014. Da sottolineare che in questo caso l'edificio risulta occupato, e quindi le condizioni interne sono influenzate dai sistemi di condizionamento.

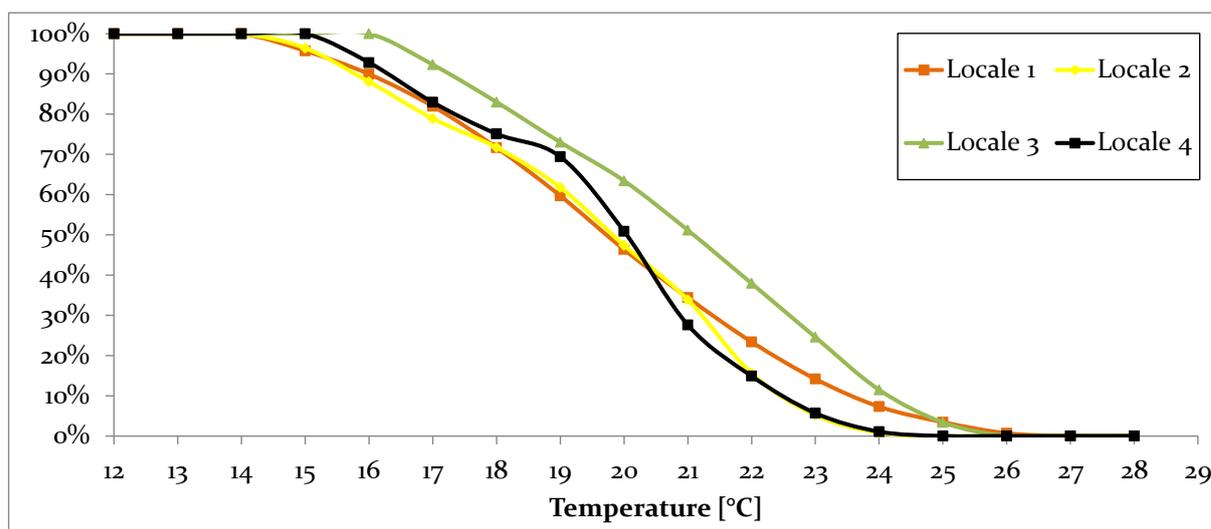


Fig. 3.26. Distribuzione cumulata inversa della temperatura dell'aria interna. Gennaio 2014

In ogni caso si riscontrano risultati positivi anche nel periodo invernale. A partire dal valore di 21 °C il locale 4 inizia a mostrare valori percentuali minori rispetto agli altri ambienti. A 23 °C corrisponde un valore del 6% mentre del 14% e del 25% per i locali 1 e 3 rispettivamente.

Analogamente al caso estivo il locale 2 riporta i risultati peggiori con una curva prossima a quella del locale di riferimento, mentre, come atteso anche in luce dei risultati forniti dall'analisi delle stratigrafie, il locale 3 è quello che beneficia maggiormente della presenza del tetto verde.

Frequenza Cumulata %				
T [°C]	Locale 1	Locale 2	Locale 3	Locale 4
14	1	1	1	1
15	0.96	0.96	1.00	1.00
16	0.90	0.88	1.00	0.93
17	0.82	0.79	0.92	0.83
18	0.72	0.72	0.83	0.75
19	0.60	0.62	0.73	0.69
20	0.46	0.47	0.63	0.51
21	0.34	0.34	0.51	0.28
22	0.23	0.16	0.38	0.15
23	0.14	0.05	0.25	0.06
24	0.07	0.01	0.11	0.01
25	0.03	0.00	0.03	0.00
26	0.01	0	0	0
27	0	0	0	0

I risultati forniti comunque inducono ad affermare che la presenza della copertura a verde è in grado di garantire temperature interne superiori e quindi produrre un effetto migliorativo anche nel caso invernale.

3.2 Attività di ricerca sperimentale sul sito di Lleida

Nel seguito si riportano i risultati dell'analisi dei dati sperimentali di una copertura a verde situata a Lleida in Spagna. Il lavoro è frutto di un periodo di ricerca all'estero presso l'istituto di ricerca GREA. È dapprima descritto brevemente il sito sperimentale e sono riportati successivamente i principali risultati dell'indagine sperimentale condotta.

3.2.1 Descrizione del sito sperimentale

Il tetto verde oggetto di studio presenta una superficie di 2000 m² ed è il risultato di un progetto di ristrutturazione del Parco Scientifico e Tecnologico Gardeny della città di Lleida (Spagna). (Progetto Agrifood Technological Science Center, Lleida 2009). Il sistema a verde utilizzato è di tipo commerciale "ecological roof" e consiste nei seguenti strati:

- ✓ strato di protezione (feltro geotessile),
- ✓ strato impermeabilizzante,
- ✓ cisterna/camera d'aria,
- ✓ strato filtrante (feltro geotessile),
- ✓ strato isolante (lastra costituita da due strati, uno 'isolante e l'altro realizzato in calcestruzzo poroso),
- ✓ substrato e vegetazione.

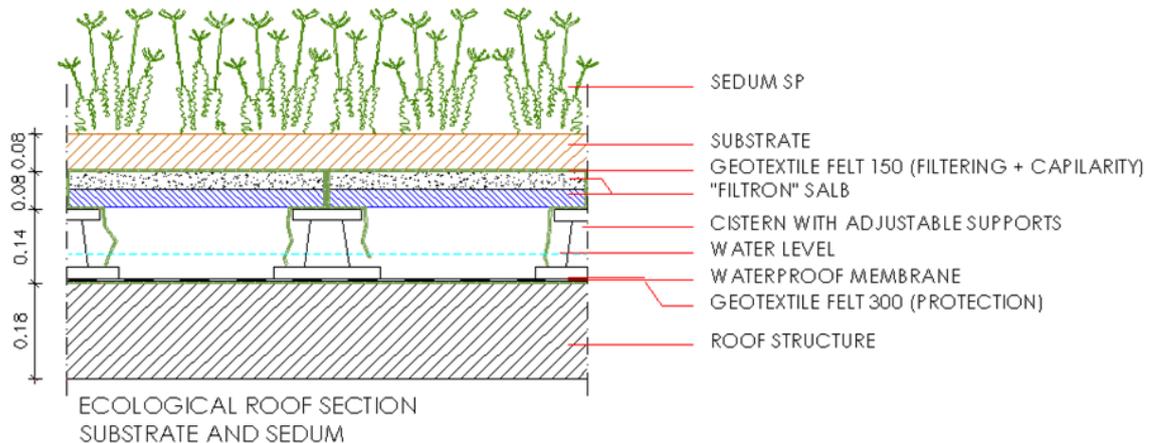


Fig. 3.27. Stratigrafia del sito sperimentale di Lleida

La particolare caratteristica di questo sistema è che lo strato filtrante cadendo attraverso i giunti della cisterna agisce non solo come filtro, evitando il passaggio di particelle di substrato nello strato di drenaggio, ma permette anche l'ascesa per capillarità verso il substrato dell'acqua immagazzinata nella cisterna che diventa disponibile per le piante. In questo particolare progetto, l'ampio tetto verde presenta due diversi tipi di finitura della superficie superiore: un'area verde non calpestabile ed un'area pedonale rifinita in ghiaia (figura 3.28). Nella zona pedonale, la vegetazione ed il substrato sono stati sostituiti da un unico strato di ghiaia e 8 cm.

Il substrato utilizzato è composto dal un mix di paccime, ottenuto dalla decomposizione e fermentazione di vari materiali vegetali, fibre di cocco, e particelle fini riciclate dalla ghiaia. La percentuale di sostanza organica è del 40%, mentre la parte minerale è il 60%. Le specie vegetali originari utilizzati in questo progetto sono di tipo sedum, ben adattate al clima della zona. In percentuale, le specie coltivate sono il 40% album Sedum, Sedum rupestre, Sedum e moranense e per il restante 60% è stata utilizzata una composizione di Sedum spurium atropurpureum, Sedum sediforme, Sedum acre, Sedum album coral carpet. La piantumazione

ha avuto luogo nel 2009; nel 2010 le piante erano in fase di crescita, finendo lo sviluppo nel corso del 2011.



Fig. 3.28. Tetto verde estensivo del Gardeny Science and Technological Park

Lleida ha un clima secco classificato come Mediterraneo continentale, caratterizzato da grandi variazioni stagionali. Ha scarse precipitazioni, divise in due stagioni, la primavera e l'autunno e ha un regime termometrico con grandi differenze tra un lungo inverno (tra la primavera e l'ultimo gelo possono trascorrere più di 160 giorni) e un'estate molto calda. La precipitazione media annua è compresa tra 350-550 mm, e le temperature medie annue oscillano tra i 12-14 °C, con ampiezze di 17-20 °C. Una menzione speciale deve essere fatta alla nebbia, tipica della regione nei mesi di novembre, dicembre e gennaio che possono generare un periodo fino a 55 giorni in assenza di luce solare.

Il tetto è completamente monitorato in tre punti, due sono stati collocati in una zona vegetata (C1 e C3) mentre il terzo è posto nella superficie rifinita con ghiaia (C2). Da sottolineare che i punti C2 e C3 sono situati sullo stesso lato del tetto e sono esposti alla radiazione solare durante il mattino e risultando ombreggiati nel pomeriggio, mentre il punto C1 situato sull'altro lato del tetto, risulta ombreggiato durante le prime ore del mattino.

I dati sono stati registrati ogni cinque minuti per tutto il 2010 ed il 2012 per ciascun parametro. Per l'analisi dei dati sono stati scelti giorni o settimane rappresentative dei dati sperimentali sia nel 2012 che nel 2010. Nel corso del 2010 gli uffici interni non risultavano occupati, quindi i valori di temperatura e umidità interni riflettono le condizioni di evoluzione libera senza impianto di condizionamento (riscaldamento o raffreddamento). Nel corso del 2012 invece gli uffici risultavano operativi.

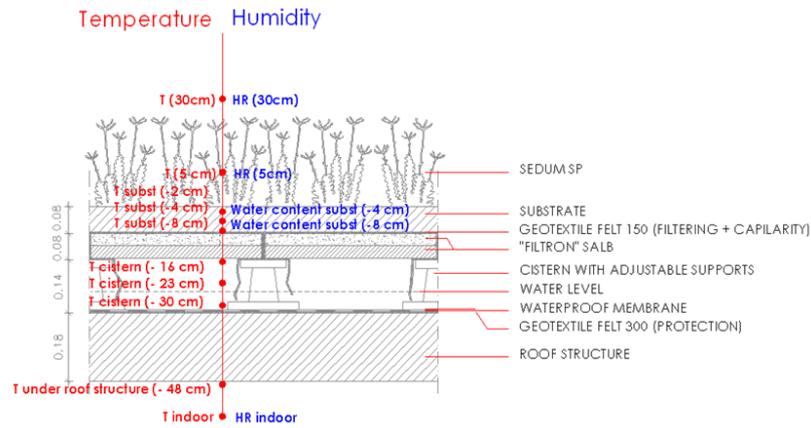


Fig. 3.29. Sensori installati nella zona vegetata

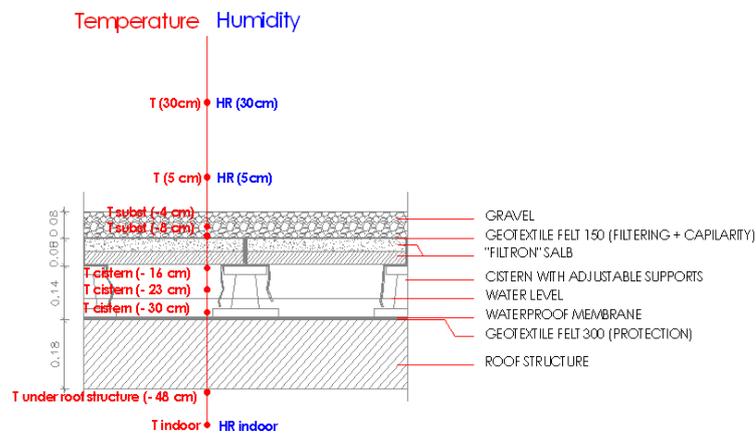


Fig. 3.30. Sensori installati nella zona pedonale

La tabella seguente riassume tutti i parametri monitorati.

Tab. 4.1 Parametri monitorati e relativi strumenti di misura

Parameter	Unit	Instrumentation	Recording point	
			Green areas (Plot C1 and C3)	Gravel area (Plot C2)
Outdoor temperature at 30 cm over the substrate surface	°C	Testo 6651	Yes	Yes
Outdoor temperature at 5 cm over the substrate surface	°C	Testo 6651	Yes	Yes
Substrate temperature at 2 cm below the substrate surface	°C	Temperature sensor PT-100	Yes	No
Substrate temperature at 4 cm below the substrate surface	°C	Temperature sensor PT-100	Yes	Yes
Substrate temperature at 8 cm below the substrate surface	°C	Temperature sensor PT-100	Yes	Yes
Under roof structure temperature at 48 cm below the substrate surface	°C	Surface temperature sensor GE9020 0000 000004	Yes	Yes

Indoor temperature	°C	Testo 6651	Yes	Yes
Relative Humidity 30 cm over the substrate surface	%	Testo 6651	Yes	Yes
Relative Humidity 5 cm over the substrate surface	%	Testo 6651	Yes	Yes
Indoor Relative Humidity	%	Testo 6651	Yes	Yes
Volumetric water content in the substrate at 4 cm below the substrate surface	%	Water soil content ECH2O EA-10	Yes	No
Volumetric water content in the substrate at 8 cm below the substrate surface	%	Water soil content ECH2O EA-10	Yes	No
Water level in the cistern	cm	Water level (buoy valve)	*	*

3.2.2 *Analisi delle prestazioni termiche della copertura a verde*

In una prima fase è stato studiato lo sviluppo annuale dello strato vegetale, attraverso tre sezioni quadrate di 1 m² (Plots) nelle stesse posizioni in cui si trovano i sensori per registrare i parametri di temperatura.

Nel 2010 le piante erano in fase di crescita, essendo la frazione di copertura vegetale pari al 10% della superficie. Nel 2011 le piante sedum erano già completamente sviluppate, raggiungendo una copertura pari all'80%. Nel corso del 2012 la copertura vegetale è rimasta stabile, anche se si è registrata l'apparizione di un gran numero di specie vegetali locali. Vale la pena ricordare che la frazione di copertura vegetale non ha mai raggiunto il 100%. Il fatto che un ampio tetto verde totalmente consolidato non raggiunga la totale copertura della vegetazione può influire negativamente sulle prestazioni termiche del tetto, perché in aree prive di vegetazione il substrato è completamente esposto alle condizioni meteorologiche esterne. I risultati mostrano che ci sono due fattori principali che stanno dietro le differenze nella composizione floristica, la ricchezza e la diversità trovati tra le specie: da un lato, il fattore temporale e dall'altro il fattore spaziale, rappresentato dalla posizione dei plots. Temporalmente si possono osservare cambiamenti fenologici nel corso dell'anno che si riflettono nei valori di copertura delle specie. In estate, le temperature elevate e la mancanza di precipitazioni provocano la rimozione di praticamente tutte le specie annuali in tutti i plots, mentre all'inizio della primavera vi è un rapido aumento della frazione di copertura delle piante.

Con l'obiettivo di studiare l'effetto delle variazioni della frazione di copertura della vegetazione sul comportamento termico del tetto verde, è stato effettuato un confronto tra i dati registrati nel corso del 2010, con una copertura vegetale del 10%, con i dati registrati nel corso del 2012, con una copertura vegetale dell'80%. Dato che la copertura vegetale e la

composizione floristica presentano un andamento stagionale, sono stati analizzati separatamente i dati estivi ed invernali.



Fig. 3.31. Frazione vegetale in estate (foto a sinistra) ed inverno (foto a destra) nel 2010



Fig. 3.32. Frazione vegetale in estate (foto a sinistra) ed inverno (foto a destra) nel 2012

L'analisi estiva è stata effettuata per una settimana nel 2010 ed una nel 2012. Le settimane scelte sono caratterizzate da temperature elevate dell'aria esterna, elevato irraggiamento solare e assenza di precipitazioni.

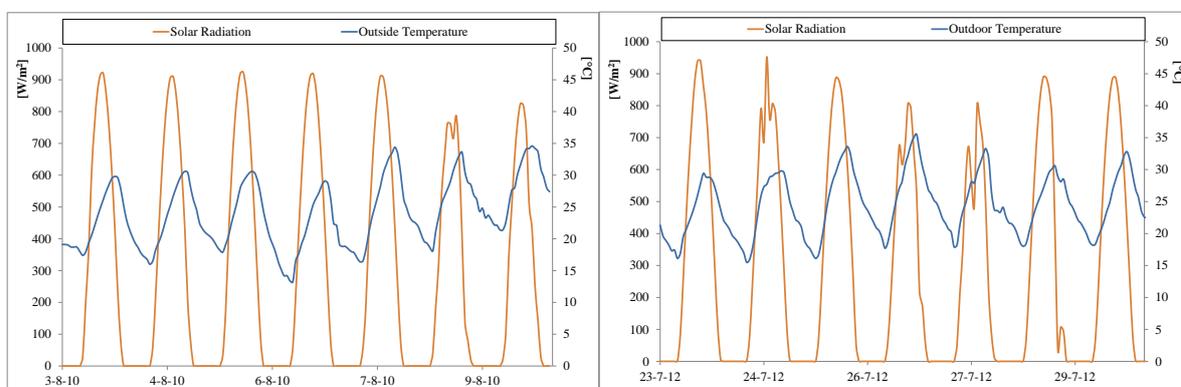


Fig. 3.33. Condizioni climatiche nelle settimane estive. 2010 e 2012

La figura seguente mostra i profili di temperatura a 30 cm al di sopra zona verde ed al di sopra della ghiaia per una tipica settimana estiva nel 2012. Non si apprezzano differenze sostanziali negli andamenti giornalieri delle due temperature. Lo stesso comportamento viene osservato a 5 cm dalla superficie. L'umidità relativa esterna segue il tipico andamento estivo, raggiungendo il valore massimo durante la notte ed il minimo durante il giorno. Nonostante i bassi livelli di umidità relativa dell'aria permetterebbero ai fenomeni evapotraspirativi di aver luogo, nessun effetto considerevole è stato trovato come risultato dell'analisi della temperatura dell'aria. La ragione può essere attribuita allo scarso effetto del raffreddamento per evaporazione, a causa del contenuto d'acqua limitato nel substrato. In accordo ai risultati riportati in [1], quando il substrato è asciutto l'effetto di raffreddamento evaporativo può essere marginale.

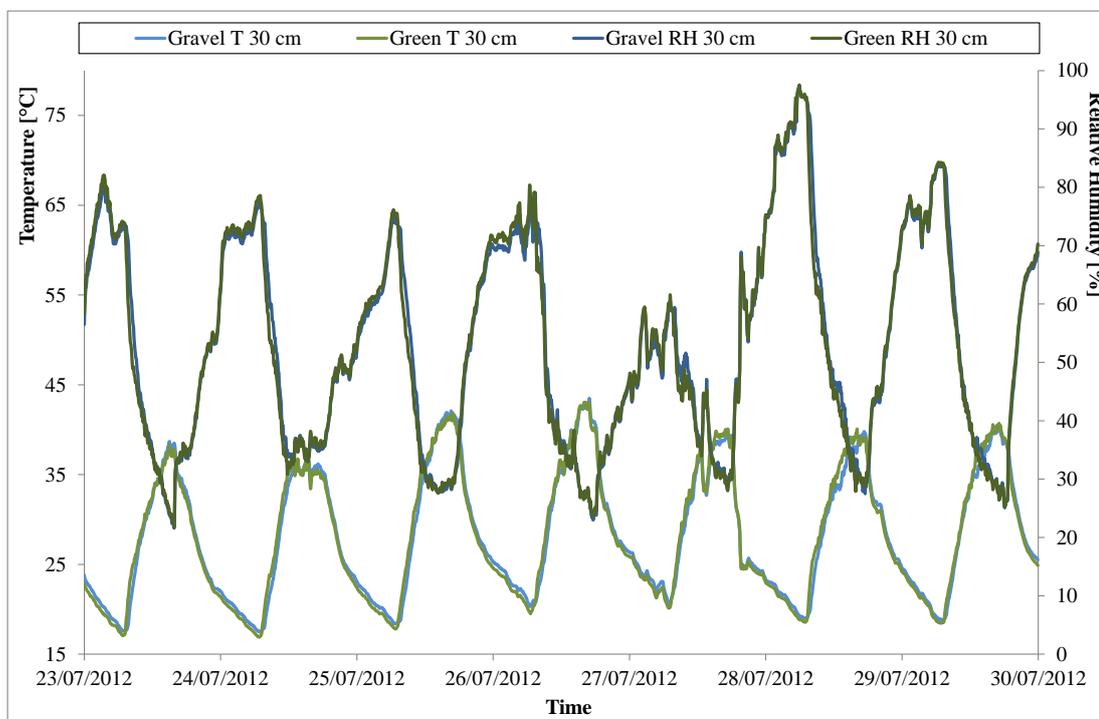


Fig. 3.34. Temperatura ed umidità relativa a 30 cm sopra la superficie. Estate 2012

Il confronto con la temperatura dell'aria quando il tetto verde era in condizioni di copertura vegetativa bassa (10%) non permette di apprezzare delle differenze negli andamenti a 30 cm. Gli stessi risultati si riscontrano per le temperature a 5 cm. Analogamente ai dati registrati nel 2012, il raffreddamento evaporativo limitato, dovuto allo scarso livello di umidità nel substrato, non può essere apprezzato nella differenza tra l'aria sopra i due tipi di superfici di copertura (area verde e ghiaia). In tal senso, si può concludere che il ruolo di umidità del terreno è molto più importante della percentuale di copertura della vegetazione in merito all'effetto sulla temperatura dell'aria ambiente sovrastante. Di fatti, anche se nel 2012 il tetto

verde mostra un' aumentata presenza di vegetazione, il contenuto di acqua limitato nel substrato non ha permesso di sfruttare il potenziale della vegetazione per attivare i processi evapotraspirativi.

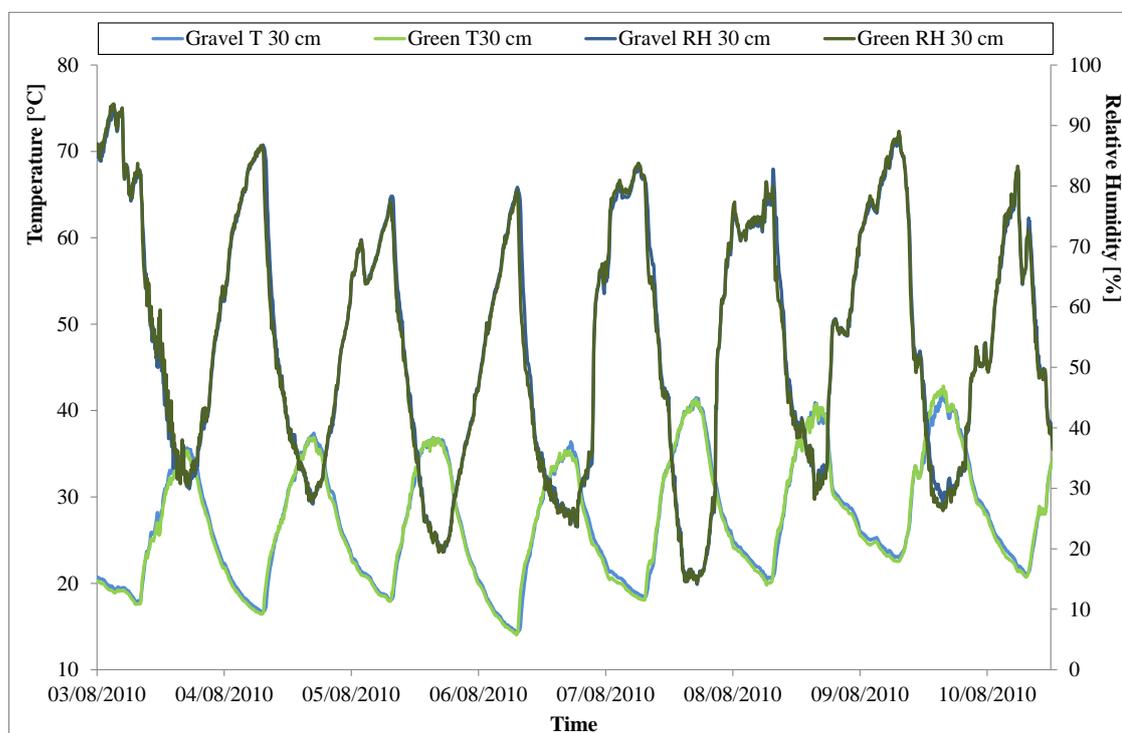


Fig. 3.35. Temperatura ed umidità relativa a 30 cm sopra la superficie. Estate 2010

Nella figura seguente è presentata l'evoluzione della temperatura del substrato a tre diverse profondità (T -2 cm, T -4 cm, T -8 cm), il contenuto d'acqua volumetrico del substrato (VWC) e la temperatura dell'aria esterna (T_{out}). Il substrato mostra una caratteristica curva a campana, che indica l'accumulo di calore dopo l'alba, aumentando gradualmente la temperatura del suolo fino al picco massimo nel primo pomeriggio per poi raggiungere un valore minimo il mattino presto [2]. A -2 cm il profilo raggiunge valori di picco notevolmente superiori rispetto all'aria ambiente esterna, con temperature massime tra 47.6 °C e 52.4 °C e minime tra 23.1 °C e 25.8 °C. La fluttuazione media giornaliera è di 25,6 °C. Il substrato è più influenzato dalle condizioni esterne a -2 cm e -4 cm, questo è evidente osservando i profili di temperatura che seguono l'andamento dell'aria esterna. Il profilo a -8 cm, tuttavia, dimostra l'effetto di inerzia termica del substrato di coltivazione. La figura indica anche lo smorzamento delle fluttuazioni di temperatura attraverso la sezione verticale; l'ampiezza massima giornaliera registrata si riduce da 28,8 °C a -2 cm a 14,9 °C a -8 cm, ed il picco di temperatura è sfasato dalle 16:30 alle 17:30.

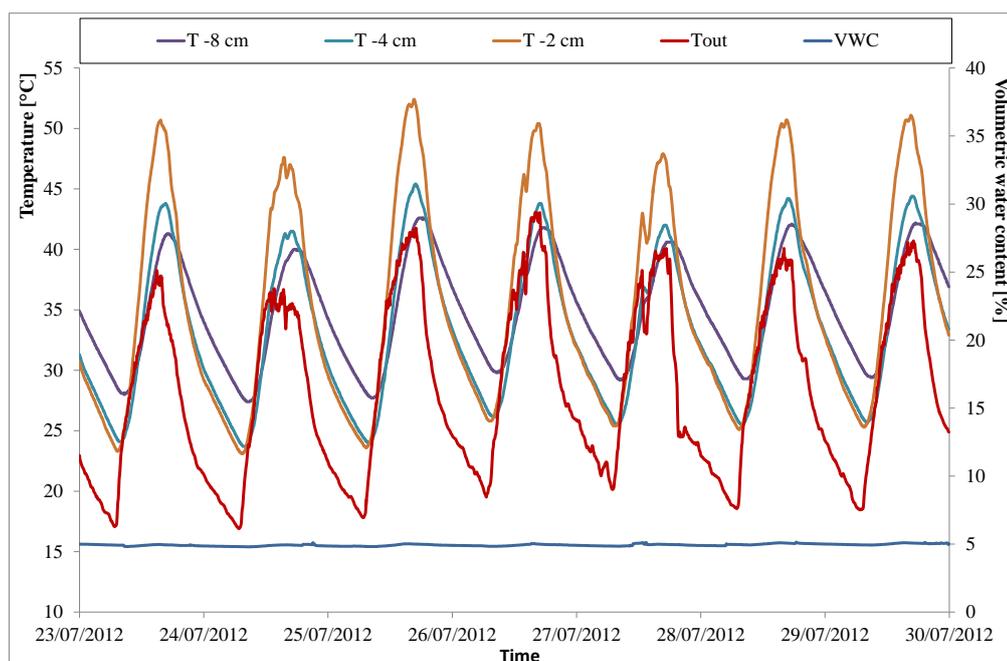


Fig. 3.36. Temperature nel substrato e contenuto volumetrico d'acqua. Estate 2012

Questo suggerisce il ruolo importante del substrato nel stabilizzare la temperatura e migliorare le prestazioni termiche di un tetto verde. Anche se in letteratura sono presentati sfasamenti temporali maggiori, spesso legati a tutto il sistema tetto verde compresi tutti gli strati, i risultati sono in accordo con Liu K e Minor J [3] dove è indicato che un substrato più spesso può generare prestazioni termiche migliori. Secondo Theodore G. Theodosiou [4] l'effetto principale dello spessore del terreno sulle caratteristiche termiche del tetto è l'inerzia termica; tetti verdi più spessi possono essere riconosciuti da sfasamenti maggiori e valori più piccoli di flusso termico.

Le alte temperature registrate nei pochi centimetri al di sotto della superficie, possono influenzare il normale sviluppo della copertura vegetale, soprattutto nei primi anni di crescita. Questo fenomeno ha influenzato la varietà di piante del tetto, che è stato invaso da specie colonizzanti che germinano fortemente in primavera ed all'inizio dell'estate, per scomparire rapidamente a causa sia della mancanza di piogge e delle alte temperature superficiali creando buchi di vegetazione sullo strato vegetale, e di conseguenza lasciando esposto il substrato.

In simili condizioni climatiche esterne, il substrato si comporta in modo diverso quando la copertura vegetale è maggiore. La figura seguente mostra la temperatura a diverse profondità del substrato per una tipica settimana estiva nel 2010. A -2 cm e -4 cm il substrato si riscalda e raffredda molto rapidamente con una rapida caduta della temperatura dopo il picco

quotidiano, mentre a -8 cm, similmente alla tendenza osservata nel 2012, si osserva l'inerzia termica del terreno.

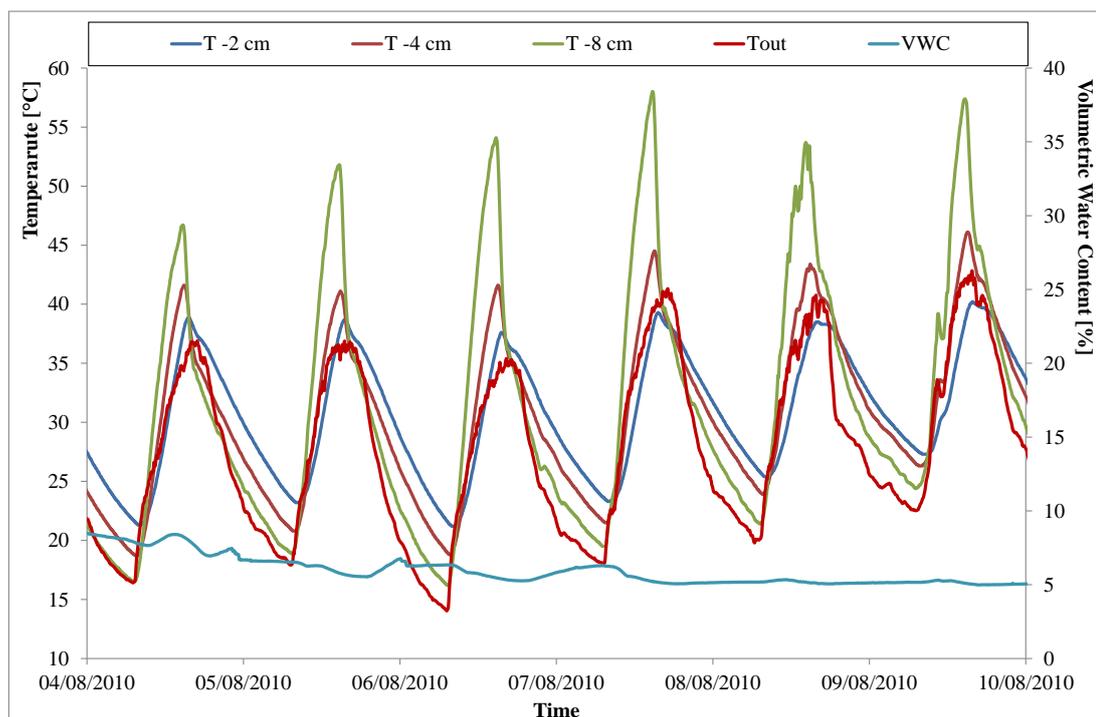


Fig. 3.37. Temperature nel substrato e contenuto volumetrico d'acqua. Estate 2010

Il profilo a -2 cm raggiunge valori visibilmente superiori nel 2012 con valori di picco giornalieri variabili tra 46.7 °C e 57 °C. Una differenza importante si nota anche nei valori giornalieri minimi di temperatura che variano tra 16,5 °C e 24,4 °C, notevolmente inferiori rispetto ai dati del 2012. La fluttuazione media diurna è di 34.1 °C. La maggiore presenza di vegetazione, nonostante serva come schermatura della radiazione solare durante il giorno, potrebbe indurre una limitazione nel raffreddamento notturno del substrato. Ciò potrebbe spiegare i picchi maggiori e le temperature minime più basse in condizioni di bassa copertura vegetale (10% nel 2010), dove si osserva un aumento della fluttuazione giornaliera di 8,5 °C.

La figura seguente mostra l'andamento dei profili di temperatura misurata nei diversi strati per una tipica settimana estiva 2012. La presenza di uno strato isolante appena sotto il substrato, e della cisterna principalmente riempita d'aria, limita fortemente i flussi di calore verso l'alto e verso il basso rendendo l'influenza degli strati superiori verso l'ambiente interno trascurabile. Come già osservato da altri autori [5], se il tetto verde è posizionato al di sopra di un tetto ben isolato, il bilancio energetico del tetto verde è disaccoppiato da quello della costruzione, ed il tetto verde avrà un impatto principalmente sull'ambiente esterno. Come si può osservare, la temperatura superficiale del soffitto interno risulta piuttosto stabile durante

tutta la settimana con un valore medio di 30,8 °C. Anche la temperatura interna mostra piccole fluttuazioni intorno al valor medio di 29,9 °C.

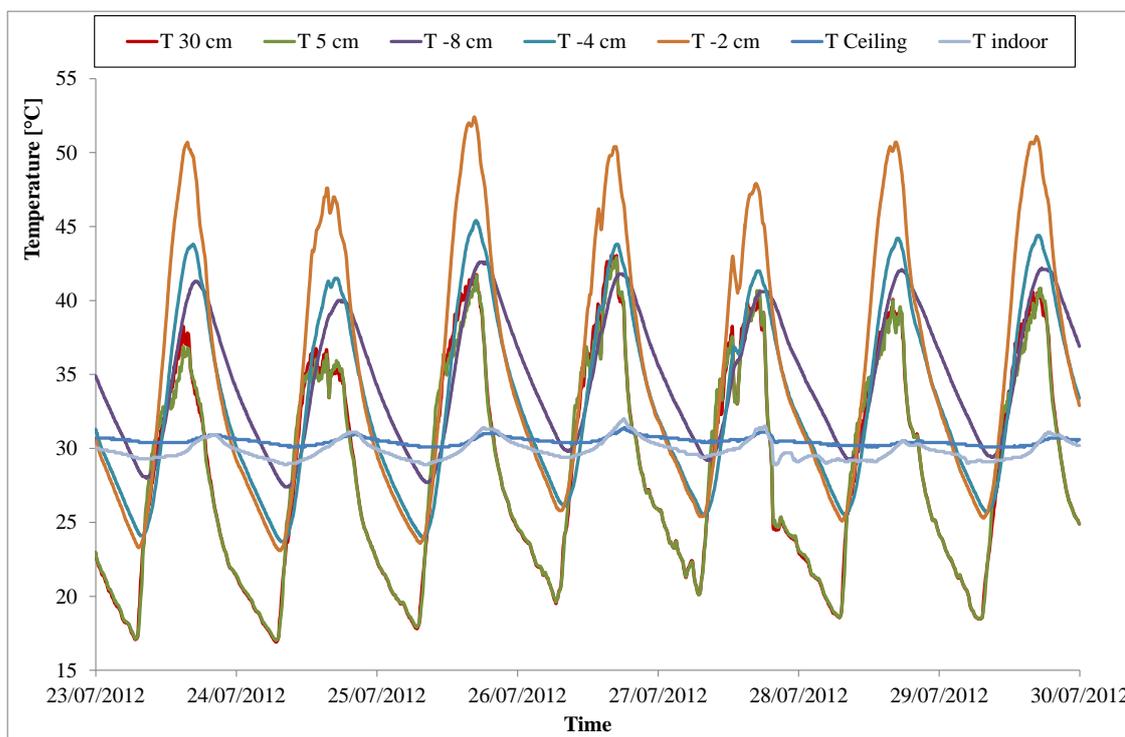


Fig. 3.38. Profili di temperatura lungo la sezione verticale del tetto verde. Estate 2012

Le seguenti figure mostrano gli andamenti delle variabili climatiche esterne per la settimana di riferimento invernale nel 2010 e nel 2012. Le settimane invernali scelte sono caratterizzate da condizioni climatiche esterne simili, senza precipitazioni e con temperatura dell'aria esterna leggermente inferiore nel 2012 rispetto al 2010.

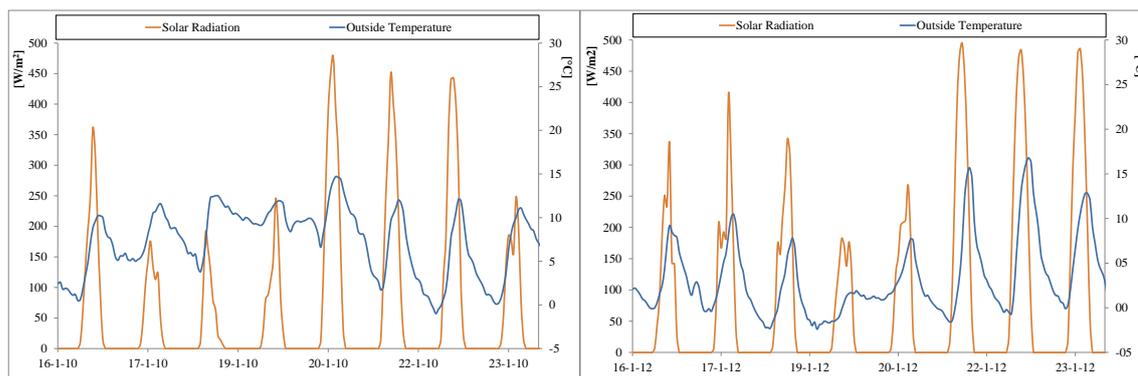


Fig. 3.39. Condizioni climatiche nelle settimane invernali. 2010 e 2012

In inverno si osserva una differenza tra la temperatura dell'aria sopra la zona verde e sopra la ghiaia sia a 30 cm che a 5 cm. La temperatura dell'aria sopra la ghiaia mostra una differenza massima di 5,7 °C nel primo pomeriggio (15:40). La differenza è più accentuata a -5 cm, comprovando il raffreddamento evaporativo del tetto verde. Non si nota nessuna differenza

nei valori minimi giornalieri, e ciò può essere spiegato considerando il ruolo dell'umidità relativa (RH).

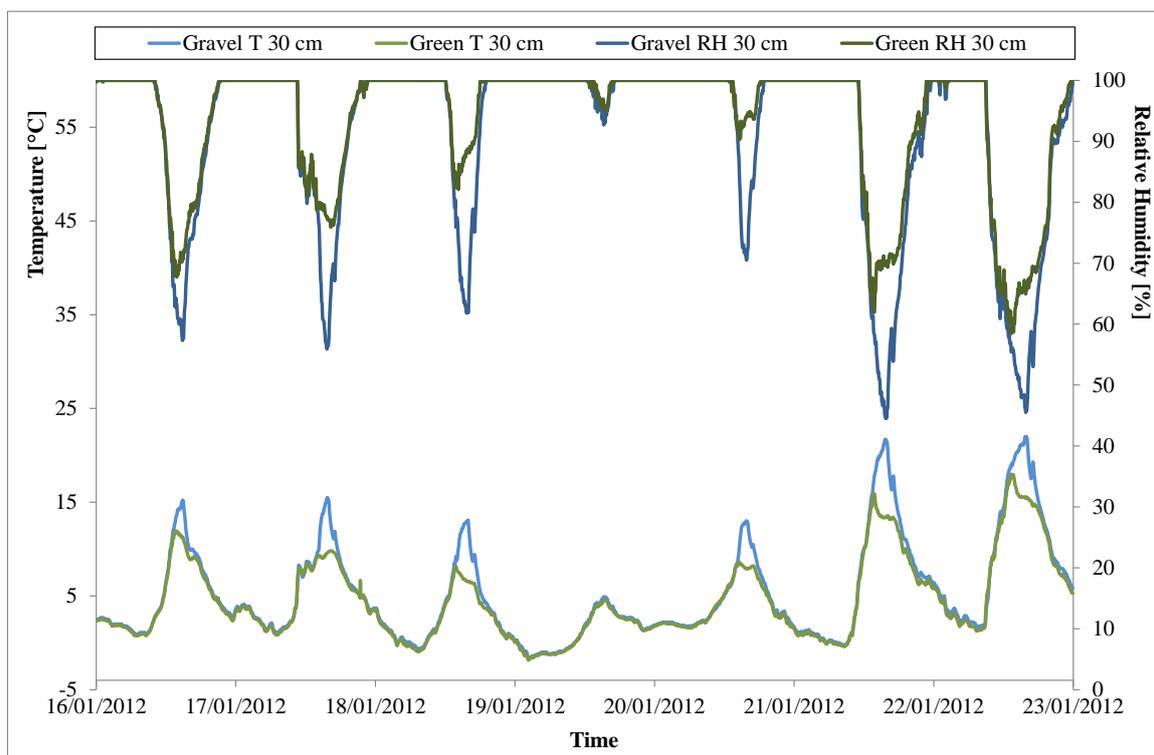


Fig. 3.40. Temperatura ed umidità relativa a 30 cm sopra la superficie. Inverno 2012

Durante la notte a causa della bassa temperatura, l'aria esterna è completamente satura e quindi l'umidità relativa assume il valore di 100%, mentre durante il giorno il graduale aumento della temperatura dell'aria induce una diminuzione della umidità relativa permettendo all'evapotraspirazione di aver luogo. Si riconosce facilmente che RH assume valori maggiori sopra l'area verde rispetto alla ghiaia, a causa dei processi sopra citati. In altri lavori [4] è stato dimostrato che l'umidità relativa è il fattore climatico più importante per i processi di raffreddamento passivo di una copertura a verde.

In condizioni di bassa copertura vegetale sono stati trovati risultati simili, ma la temperatura dell'aria sopra la ghiaia è tra 1 °C e 3 °C superiore rispetto all'area verde. La maggiore copertura vegetativa (80%) nel 2012 ha determinato un aumento dei fenomeni evapotraspirativi; si può dedurre che l'effetto di traspirazione delle piante aggiunto all'evaporazione del substrato migliora globalmente il raffreddamento dell'aria sopra l'area verde.

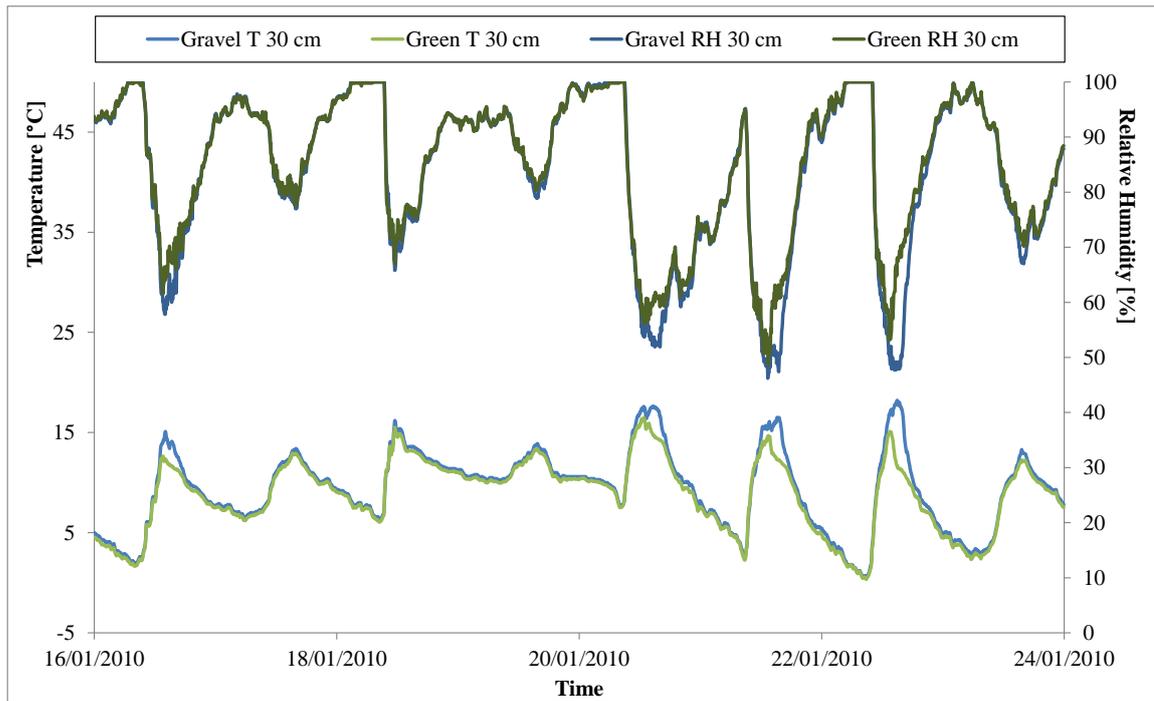


Fig. 3.41. Temperatura ed umidità relativa a 30 cm sopra la superficie. Inverno 2010

In inverno, le temperature del substrato sono più variabili rispetto all'estate seguendo l'andamento della temperatura dell'aria esterna. Il valore massimo raggiunto a -2 cm durante la settimana analizzata è 20.6 °C e 12.9 °C a -8 cm, mentre i minimi rispettivamente di -1.1 °C e 1,7 °C. Anche in questo caso il substrato sembra essere più influenzato dalle condizioni esterne a -2 cm e -4 cm di profondità, dove si riscalda e raffredda rapidamente. Le temperature minime coincidono con i minimi dell'aria esterna, mentre i valori dei picchi giornalieri risultano più alti. Ciò può essere spiegato considerando che in inverno alcune piante possono appassire, soprattutto le specie colonizzatrici annuali, e la vegetazione *Sedum sparis* si trova allo sviluppo annuo minimo, rispetto alle condizioni estive. Di conseguenza gli scambi radiativi notturni e gli scambi di calore sensibile possono essere più efficaci nell'abbassare la temperatura del substrato.

L'aumentata copertura vegetale nel 2012 non ha dato luogo a un diverso comportamento invernale. A -8 cm si osserva l'effetto di massa termica così come la riduzione dell'ampiezza della temperatura giornaliera di cui il valore massimo è 8,8 °C. Si conferma la capacità del tetto verde di stabilizzare la temperatura alla base del substrato e di agire come un dispositivo di isolamento termico. Come riportato da altri autori [6] il tetto verde offre un efficace isolamento termico in inverno.

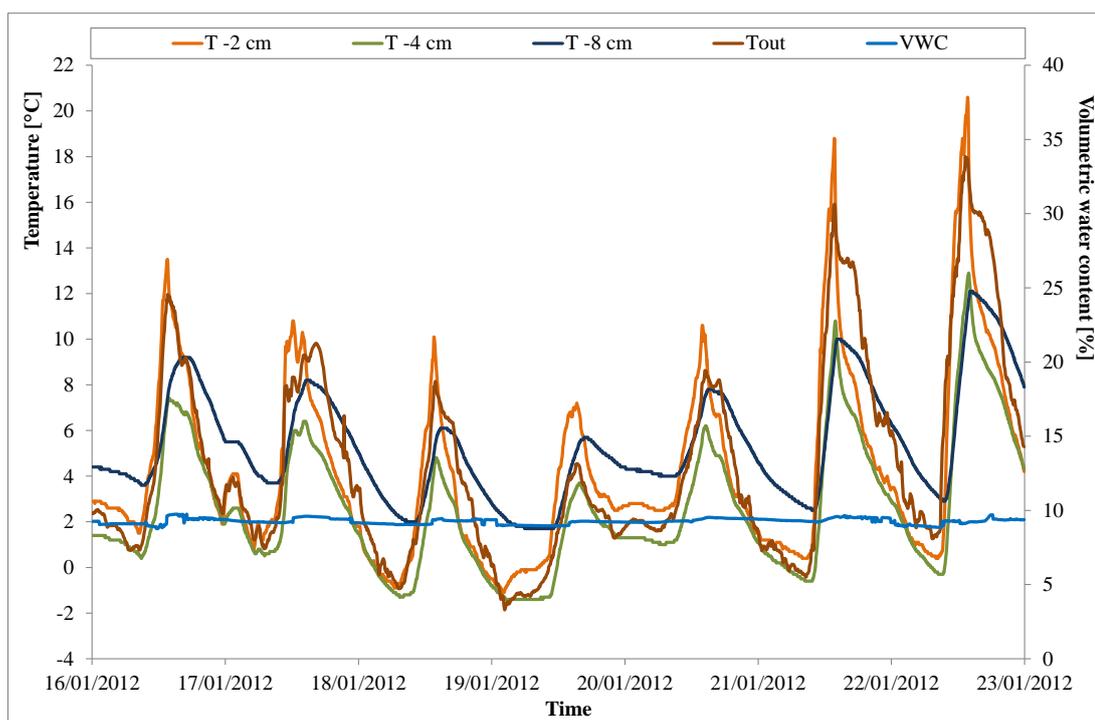


Fig. 3.42. Temperature nel substrato e contenuto volumetrico d'acqua. Inverno 2012

Il comportamento invernale del substrato in condizioni di bassa copertura vegetale nel 2010 è simile a quello osservato nel 2012.

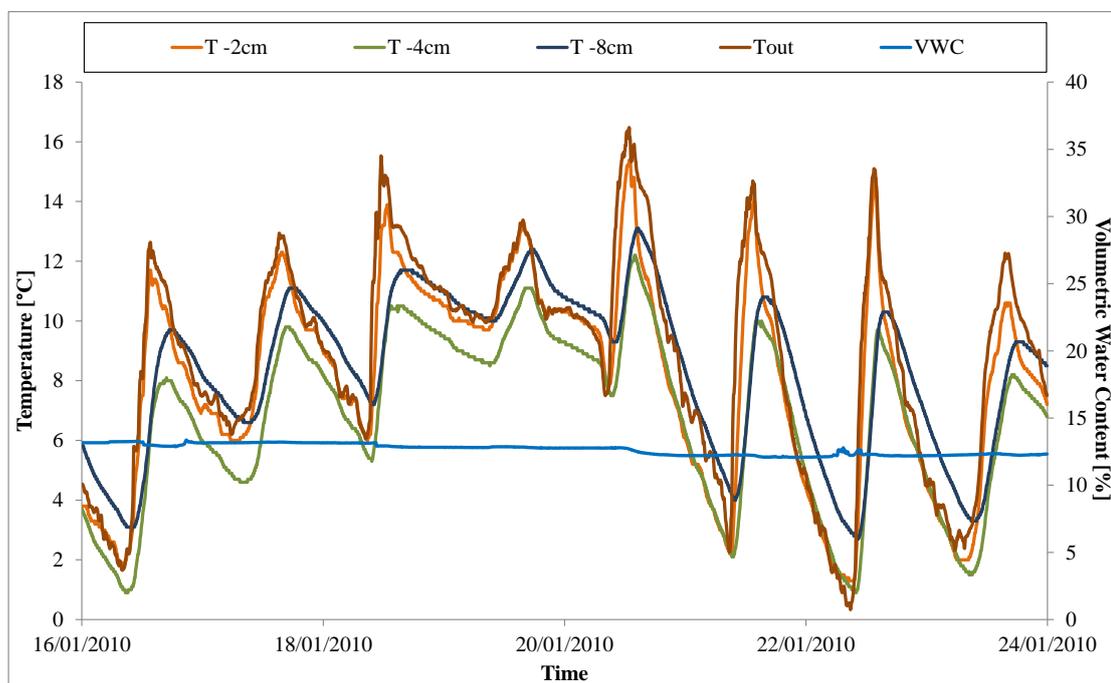


Fig. 3.43. Temperature nel substrato e contenuto volumetrico d'acqua. Inverno 2010

In inverno la principale forzante del bilancio energetico di un tetto verde, cioè la radiazione solare, è limitata; così il ruolo principale del tetto verde è di agire come strato di resistenza termica aggiuntiva e prevenire la dissipazione del calore verso l'ambiente esterno. Nella

settimana in esame, il substrato guadagna e perde rapidamente il calore negli strati superficiali, ma conserva comunque la capacità di mantenere temperature più elevate alla base del tetto. Confrontando i dati 2010 e 2012 si può notare che le condizioni climatiche esterne sono differenti. In questo caso la differenza di sviluppo della vegetazione nel 2010 e nel 2012 non ha portato ad una un considerevole differenza nel comportamento del substrato. I diversi valori massimi e minimi di temperatura sono sostanzialmente legati alle diverse condizioni climatiche esterne nelle due settimane. I grafici per gli strati sottostanti non sono riportati in quanto non possono essere dedotte informazioni rilevanti.

3.3 Misure delle proprietà termiche di substrati di coltivazione

Dati dettagliati sulle proprietà termiche dei terreni naturali sono disponibili nella letteratura scientifica, ma non ci sono informazioni sufficienti per quanto riguarda le proprietà termiche dei terreni per tetti verdi. Esistono infatti molte varianti di substrati di coltivazione disponibili e utilizzati in diverse aree geografiche, la cui composizione dipende anche dalla disponibilità di materia prima.

In una seconda fase del periodo di ricerca a Lleida sono stati caratterizzati alcuni substrati per coperture a verde, fornendo parametri termofisici che possono essere utilizzati nei modelli numerici di simulazione termica della copertura. Per questo scopo è stato utilizzato un apparato sperimentale per determinare le proprietà di diversi materiali disaggregati per tetti verdi estensivi. L'apparecchiatura è stata creata e assemblata dal gruppo di ricerca GREA presso l'Università di Lleida [7]. Essa permette di calcolare la trasmittanza termica in regime stazionario (U-value), la capacità di accumulo termico e la risposta termica dinamica ad oscillazioni giornaliere di temperatura.

L'apparato utilizzato per eseguire gli esperimenti è basato su una struttura di legno con dimensioni esterne di 32 cm x 28 cm x 61 cm. Il telaio è realizzato con profili in legno di 35 x 35 mm. I pannelli esterni in legno (3 mm) sono isolati con 35 mm di pannelli sottovuoto (RC 0.14 m²K/W) e 20 mm di Pyrogel (k = 0,013 W/mK). Il volume interno è diviso in due cavità, che sono utilizzate per simulare le condizioni interne ed esterne di un involucro edilizio. I campioni esaminati sono di forma cilindrica ed hanno le dimensioni di Ø 75 × 75 millimetri e sono posizionati nel centro di una struttura isolata (19 x 19 x 8 cm) che forza il flusso di calore ad essere unidimensionale attraverso il campione.

Entrambe le cavità sono dotate di serpentine di raffreddamento in rame collegati a bagni termostatici programmabili in grado di simulare diverse condizioni termiche, come: la

variazione giornaliera della temperatura ambiente, temperatura controllata nella cavità e diverse rampe di raffreddamento e riscaldamento. Inoltre quattro piccoli ventilatori a bassa velocità mescolano l'aria in entrambe le cavità per evitare fenomeni di stratificazione dell'aria. La posizione dei sensori utilizzati è mostrato nella figura seguente. La temperatura della cavità, superficiale e le temperature in tre diverse altezze del campione sono misurate tramite termocoppie di tipo T di 0,5 millimetri, con un errore di $\pm 0,75\%$. Per misurare i flussi di calore in ingresso ed uscita dal campione sono stati fissati alle superfici del campione due termoflussimetri (Hukseflux HFP01) con una precisione di $\pm 5\%$.

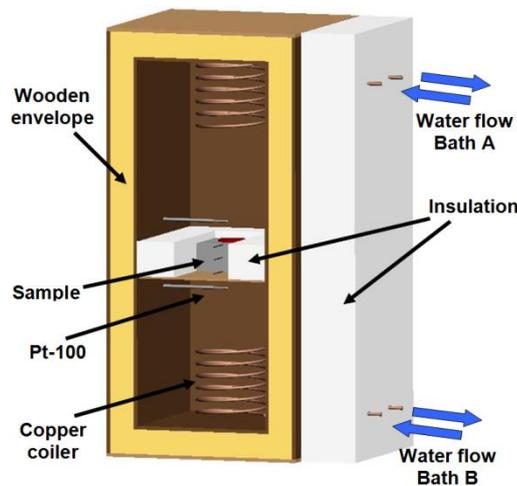


Fig. 3.44. Apparato sperimentale per la misura delle proprietà termiche dei substrati

Sono stati condotti tre diversi tipi di esperimenti per valutare le prestazioni termiche dei campioni. Il primo esperimento ha permesso di calcolare la trasmittanza termica del campione in regime stazionario, nota anche come U-value. La capacità di accumulo termico dei campioni è stata misurata nel secondo esperimento ed infine il terzo esperimento è stato eseguito per valutare la risposta termica dinamica. I diversi esperimenti sono programmabili semplicemente impostando diverse temperature del bagno termostatico come di seguito illustrato.

✓ Esperimento 1 - U_{value}

In questo esperimento le temperature iniziali di entrambi i bagni d'acqua sono impostate a 20 °C finché non sono raggiunte le condizioni stazionarie. Successivamente si programma una rampa di riscaldamento utilizzando il bagno inferiore (da 20 °C a 50 °C), mentre il bagno superiore è impostato per mantenere la cavità superiore dell'apparato ad una temperatura

costante di 20 °C. Come è stato accennato in precedenza, il valore U-value del campione è calcolata da in questo esperimento utilizzando il gradiente termico tra le superfici in condizioni di regime stazionario.

$$U_{sample} = \frac{q_{sample}}{A(T_{up} - T_{down})}$$

✓ **Esperimento 2 – Heat storage capacity**

Nel secondo esperimento, come nella configurazione precedente, il campione è riscaldato da una temperatura iniziale di circa 20 °C ad un valore di 40 °C programmando rampe di riscaldamento in entrambe le cavità. Da notare che prima dell'avvio ed dopo la fine dell'esperimento vengono raggiunte e mantenute condizioni stazionarie (temperature uniformi e costanti). La capacità di accumulo termico media del campione può essere determinata da questo esperimento non essendoci gradiente di temperatura nel campione alla fine dell'esperimento.

Essendo misurati i flussi di calore per metro quadrato, che passano attraverso le superfici superiore ed inferiore del campione, la quantità di calore immagazzinato nel campione può essere ricavata in qualsiasi momento dalla differenza tra questi due flussi. Dal momento che la temperatura del campione aumenta da T_i a T_f , la capacità termica media ($C_{p, sample}$ [J/kgK]), può essere calcolata come segue:

$$c_{p, sample} = \frac{q_{acc}}{m_{sample}(T_i - T_f)}$$

dove q_{acc} è la quantità di calore accumulato e m_{sample} è la massa del campione.

✓ **Esperimento 3 – Dynamic thermal response**

La risposta termica dinamica dei campioni testati è stata valutata nel terzo esperimento. La temperatura della cavità d'aria superiore dell'apparato è guidata dal bagno termostatico programmabile che crea un'oscillazione giornaliera tra 60 °C e 15 °C, per simulare le condizioni estive. In questo caso la camera superiore simula le temperature generate sui tetti dall'effetto combinato di aria esterna e la radiazione solare. Il bagno termostatico inferiore non viene utilizzato durante l'esperimento di modo che la cavità inferiore si presenti in condizioni di evoluzione libera. La risposta termica del campione è stata valutata analizzando il ritardo temporale tra i picchi della temperatura interna ed esterna, i flussi di calore e lo smorzamento

dell'onda di temperatura (coefficiente di stabilità termica TSC [8]), che può essere calcolato come rapporto tra la ampiezze termiche interne ed esterne.

Sono stati analizzate le risposte termiche di substrati commerciali con diversa composizione utilizzati per tetti verdi in clima mediterraneo.

- ✓ Il substrato 1 è utilizzato nel set-up sperimentale di Puigverd de Lleida (Spagna). Ha una densità di 788 kg/m^3 in condizioni asciutte ed è composto da fibre di cocco, compost, particelle fini riciclate da materiale da costruzione e sabbia a grana.
- ✓ Il secondo substrato (GR-S2) è composto da 25% fibre di cocco, 25% di compost, 40% di materiale da costruzione frantumato ed il 10% di sabbia a grana grossa. La densità a secco è di 850 kg/m^3 , ed il contenuto organico è il 6,77%.
- ✓ Il substrato 3 è utilizzato nel sito sperimentale situato presso l'Università della Calabria (Italia). Questo terreno è composto principalmente da lapillo con varia granulometria ed un ridotto contenuto di pomice con una percentuale di sostanza organica minore del 6%. La densità a secco è di 960 kg/m^3 ed il contenuto massimo d'acqua è del 40%.

RISULTATI

Per quanto riguarda il primo esperimento si sono raggiunte condizioni stazionarie dopo 7h dall'inizio dell'esperimento per i tre substrati analizzati. Il flusso di calore che attraversa le pareti laterali del campione è risultato circa il 6,5% del flusso termico che attraversa verticalmente il campione da 8 cm. Sono state osservate deviazioni minori del 3% nelle diverse misure per i diversi campioni.

La tabella seguente mostra le temperature superficiali ($T_{\text{surface_top}}$, $T_{\text{surface_bot}}$), le temperature interne del campione ($T_{\text{sample_top}}$, $T_{\text{sample_bot}}$), i flussi termici sulla superficie superiore (q_{top}/A) e inferiore (q_{bottom}/A) ed U-value calcolato per il substrati testati. Sono mostrate anche le temperature dell'aria nelle cavità superiore ed inferiore ($T_{\text{env_top}}$, $T_{\text{env_bot}}$). Il substrato 3 mostra il valore più alto di trasmittanza termica pari a $2,59 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ seguito dal substrato 2 (GR-S2) con $1,91 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ed infine il substrato 1 (Puigverd) con $1,84 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

	1 st measurement			2 nd measurement		
	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3
T_{env_top}	20.73 °C	21.53 °C	20.94 °C	20.43 °C	20.78 °C	20.67 °C
$T_{surface_top}$	24.17 °C	24.59 °C	24.74 °C	24.00 °C	23.87 °C	24.38 °C
T_{sample_top}	28.14 °C	28.20 °C	- °C	28.04 °C	27.43 °C	- °C
T_{sample_bot}	33.92 °C	33.67 °C	31.31 °C	33.91 °C	32.84 °C	31.05 °C
$T_{surface_bot}$	38.87 °C	38.70 °C	38.67 °C	39.00 °C	37.83 °C	38.45 °C
T_{env_bot}	42.29 °C	44.62 °C	42.78 °C	42.56 °C	43.89 °C	42.63 °C
$q_{top/A}$	26.04 W/m ²	26.07 W/m ²	36.25 W/m ²	26.74 W/m ²	25.66 W/m ²	36.62 W/m ²
$q_{bottom/A}$	27.98 W/m ²	27.93 W/m ²	36 W/m ²	28.00 W/m ²	27.02 W/m ²	36 W/m ²
U_value	1.84 W/m ² °C	1.91 W/m ² °C	2.59 W/m ² °C	1.82 W/m ² °C	1.89 W/m ² °C	2.58 W/m ² °C

La figura seguente mostra i valori di potenza termica accumulata durante l'esperimento 2 dai tre diversi substrati. Le potenze sono calcolate come la differenza tra il flusso termico entrante nel campione ed il flusso termico uscente dal campione. Il substrato 3 mostra le potenze più alte seguito dal substrato 1 ed infine dal substrato 2.

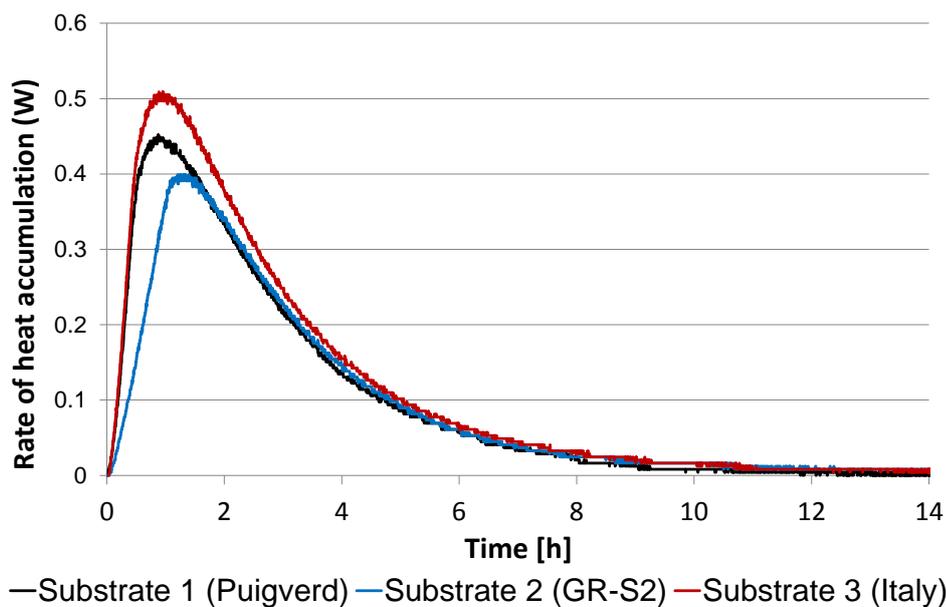


Fig. 3.45. Risultati dell'esperimento 2

Il tempo necessario per raggiungere le condizioni stazionarie è risultato di 13 h (con una corrispondente potenza di accumulo pari a circa zero) per i tre substrati. Analogamente all'esperimento 1, si osservano alcune perdite di calore nella direzione laterale con un tasso costante di circa 2 W/m². Queste perdite di calore sono state considerate per il calcolo del calore totale immagazzinato in ciascun campione.

Le deviazioni risultano del 2,1%, 1,6% e meno dell'1% rispettivamente per i substrati 1, 2 e 3.

Il substrato 3 mostra il valore più elevato di energia immagazzinata pari a 6 063 J, il substrato 1 ha accumulato 5181 J mentre il substrato 2 mostra 4 874 J.

	1 st measurement			2 nd measurement		
	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3
T_{initial}	19.08 °C	19.01 °C	18.78 °C	18.96 °C	18.15 °C	19.29 °C
T_{final}	43.26 °C	42.11 °C	42.96 °C	43.26 °C	42.73 °C	43.00 °C
AT_{sample}	24.18 °C	23.1 °C	24.18 °C	24.31 °C	24.58 °C	23.71 °C
q_{TOT}	5,181 J	4,874 J	6,063 J	5,316 J	5,108 J	6,002 J
Cp_{sample}	883.7 J/kg·K	807.3 J/kg·K	850.2 J/kg·K	902.1 J/kg·K	794.9 J/kg·K	858.4 J/kg·K

La risposta termica dinamica dei campioni sottoposti ad una oscillazione giornaliera esterna tra 60 °C e 15 °C è stata valutata nell'esperienza 3. L'evoluzione termica delle temperature interne ed esterne dei campioni testati è mostrata nella seguente figura e permette di calcolare i coefficienti di stabilità termica (TSC) dei tre substrati analizzati.

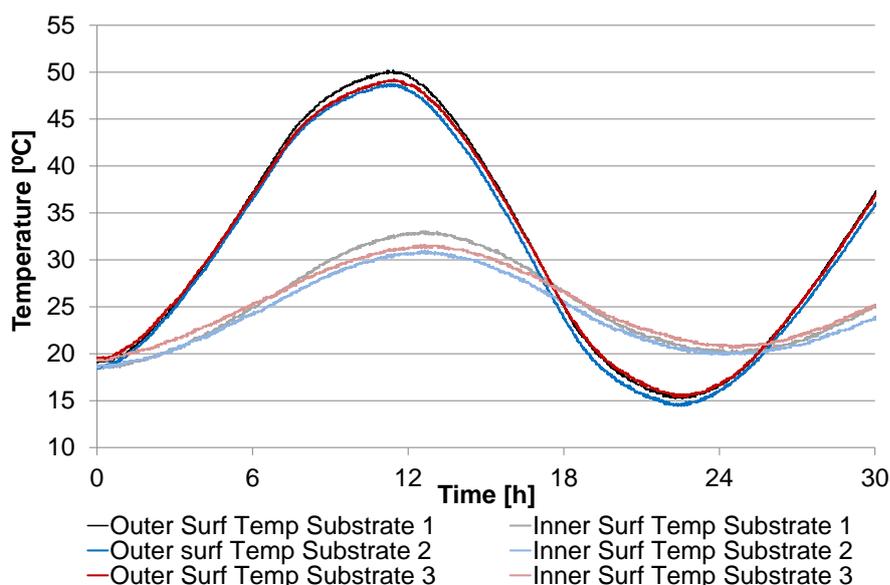


Fig. 3.46. Risposta termica dinamica dei tre substrati

Invece di confrontare il ritardo del picco tra la temperatura interna ed esterna, è stato preso in considerazione l'intervallo di tempo tra i picchi della temperatura della cavità e del flusso termico entrante. La diversa composizione del substrato 3 porta ad un aumento del 23% del flusso termico rispetto al substrato 2 ed al substrato 1 che non mostrano apprezzabili differenze. I coefficienti di stabilità termica risultano 0,43, 0,41 e 0,36 per il substrato 1, 2 e substrato 3 rispettivamente. Il substrato 3 si dimostra più efficace nel smorzare le oscillazioni di temperatura, con il valore più basso di TSC. Appare che la maggiore densità del substrato di coltivazione conduca a valori inferiori di TSC. Per quanto riguarda il *time lag*, tutti e tre i

substrati analizzati mostrano valori simili: 1,22 h per i substrati 1 e 3, mentre 1,33 h per il substrato 2. Le altre proprietà fisiche del substrato potrebbero influenzare questo parametro termico, sono necessarie quindi ulteriori indagini per comprendere meglio questo fenomeno.

	Substrate 1	Substrate 2	Substrate 3
TSC [-]	0.43	0.41	0.36
Time lag [h]	1.22	1.33	1.22

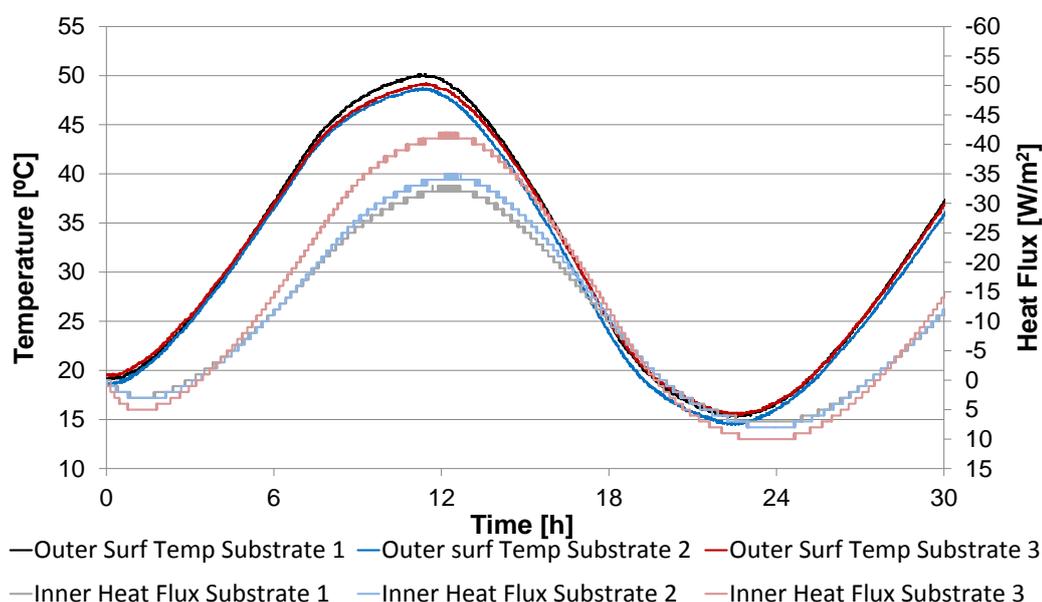


Fig. 3.47. Sfasamento temporale dei tre substrati analizzati

Sebbene alcuni dati relativi ai substrati utilizzati nei tetti verdi possono essere trovati in letteratura, non sono disponibili informazioni utili per substrati utilizzati in clima mediterraneo. La composizione del substrato infatti dipende dalla disponibilità locale dei materiali e varia fortemente secondo le raccomandazioni nazionali. Una composizione diversa comporta differenti proprietà termiche del substrato e, di conseguenza, di tutto il sistema tetto verde. Per questo motivo è importante disporre di informazioni precise sui substrati di coltivazione, soprattutto nella fase di progettazione quando vengono utilizzati modelli numerici che spesso richiedono tali informazioni. Spesso la misura di alcune proprietà come la conduttività termica ed il calore specifico vengono eseguite con sonde specifiche basate su metodi transitori. Questi tipi di strumenti sono spesso costosi e non consentono un controllo completo delle condizioni al contorno degli esperimenti. Rispetto ai metodi tradizionali, l'apparato utilizzato presenta un vantaggio: permette di verificare la risposta termica dinamica

di un materiale sottoposto ad oscillazioni termiche giornaliere. È stata trovata una differenza apprezzabile nel valore U-value calcolato tra i diversi substrati, mostrando come la scelta di questo componente può influenzare fortemente le prestazioni termiche dell'intero sistema. Si può concludere che non è esatto assumere uguali proprietà termiche per diversi tipi di substrati, che vengono spesso considerati come uno strato generico. Sono tuttavia necessarie ulteriori ricerche per valutare con maggiore precisione le proprietà termiche dei materiali del tetto verde, come ad esempio l'analisi del comportamento dei substrati al variare del contenuto d'acqua [9].

Riferimenti bibliografici

- [1] Wong Nyuk Hien, Tan Puay Yok, Chen Yu, Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate, *Building and Environment* 2007; 42:25–54.
- [2] C. Y. Jim. Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof. *Landscape Ecological Engineering* 2012; 8:173–187.
- [3] Liu K, Minor J., Performance evaluation of an extensive green roof. Toronto: National Research Council of Canada; 2005.
- [4] Theodore G. Theodosiou. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique, *Energy and Buildings*. 2003; 35:909–917.
- [5] Umberto Berardi, AmirHosein GhaffarianHoseini, Ali GhaffarianHoseini. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 2014; 115:411–428
- [6] Teemusk A, Mander U. Green roof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. *Building and Environment* 2009; 44:643–50.
- [7] De Gracia A, Barreneche C, Farid M.M, Cabeza L.F. New equipment for testing steady and transient thermal performance of multilayered building envelopes with PCM, *Energy and Buildings* 2011;43(12):3704-3709
- [8] A. de Gracia, A. Castell, M. Medrano, L.F. Cabeza, Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system, *Energy Conversion and Management* 2011;52:2495–2500
- [9] J. Coma, Piero Bevilacqua, M. De Simone, A. de Gracia, G. Pérez, L. F.Cabeza. Thermal characterization of different materials for extensive green roofs. *EUROTHERM99*, 28-30 May 2014 LLeida, Spain.

Capitolo 4. Prestazioni energetiche della copertura a verde

In questo capitolo viene dapprima effettuata un'analisi di letteratura sugli studi più rilevanti riguardo i risparmi energetici conseguibili attraverso l'utilizzo di coperture a verde. Successivamente sono presentati i risultati di simulazioni energetiche effettuate tramite software di simulazione dinamica che valutano i fabbisogni di riscaldamento e di raffrescamento dell'edificio universitario su cui è realizzato il sito sperimentale, con l'obiettivo di quantificare gli effetti della presenza della copertura vegetata sui fabbisogni di energia per la climatizzazione estiva ed invernale dell'edificio.

4.1 Analisi di letteratura

- ✓ *Analysis of green roof thermal properties and investigation of its energy performance.* A. Niachou, K. Papakostantinou, M. Santamouris, T. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou. 2001.

MATERIALI E METODI

Lo studio presenta un'analisi delle proprietà termiche di un tetto verde e i risultati delle sue performance termiche con l'obiettivo di stimare l'impatto del tetto verde sui consumi energetici totali di un edificio.

La strumentazione utilizzata comprende:

- Termocamera per la misura delle temperature superficiali;
- Termometri ad infrarosso per la misura per la misura delle temperature superficiali interne ed esterne;
- Termoigrometro per la misura di temperatura e umidità relativa dell'aria;
- Sensori per la misura della temperatura negli ambienti interni.

I dati selezionati si riferiscono al periodo 30 giugno – 17 agosto, misurati con un intervallo di 30 minuti su diversi edifici con e senza isolamento termico e con la presenza o meno del tetto verde.

RISULTATI

L'intervallo di temperatura superficiale del tetto verde, nel caso di isolamento termico, varia da 26 a 40°C, a seconda del tipo di copertura vegetativa. Le temperature minori, tra 26-29°C,

sono state registrate in punti caratterizzati da una fitta vegetazione, e quindi più in ombra. Le temperature maggiori, tra 36-38°C, si sono riscontrate in punti ricoperti da scarsa vegetazione, mentre sul nudo terreno del tetto verde, la temperatura si è avvicinata a 40°C. Le temperature superficiali delle superfici esterne di edifici con tetto isolato termicamente, senza copertura verde, vanno tra 27 °C per pareti bianche non ombreggiate a 40°C per suolo non ombreggiato. Quindi, non ci sono significative variazioni di temperature tra superfici esterne di edifici isolati con e senza copertura verde.

Nelle figure seguenti sono riportati i risultati riguardanti il tetto verde isolato e non isolato; sono presentanti sia i diagrammi che riportano la temperatura superficiale e le tabelle nelle quali sono riportate le temperature registrate in precisi punti del tetto.

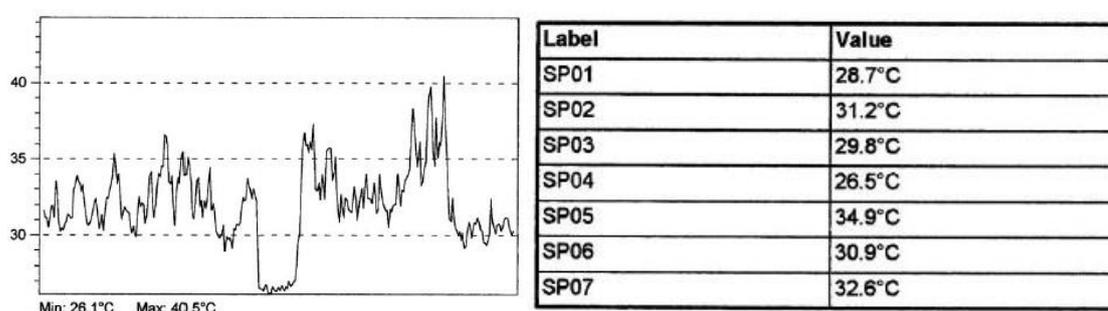


Fig. 4.1. Temperature superficiali del tetto verde isolato termicamente

I risultati ottenuti per il tetto non isolato, ma coperto con copertura verde, vanno da 28 a 40°C; analogamente, per un tetto non isolato termicamente, ma privo di copertura verde, si sono registrate delle temperature tra i 42-48°C.

La riduzione di temperature, tra i due casi, suddetti, e nell'ordine di 10°C; quindi, l'effetto del tetto verde, su un edificio non isolato termicamente, è particolarmente favorevole.

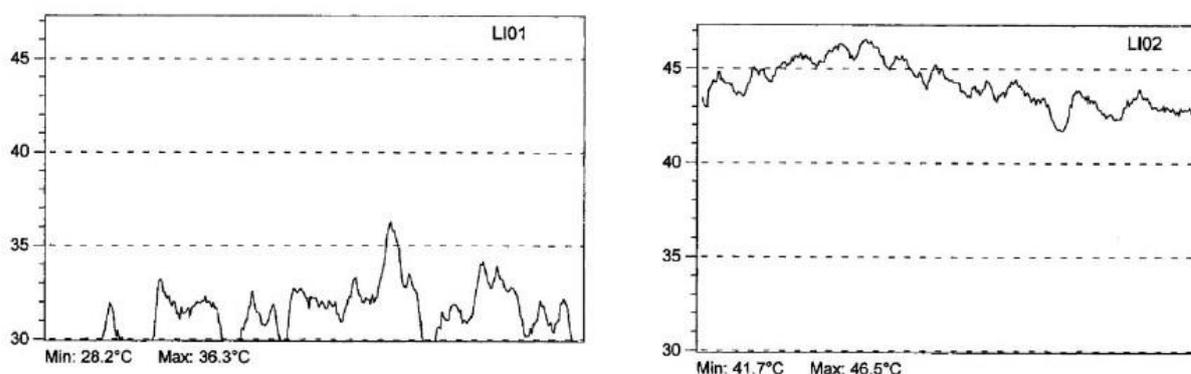


Fig. 4.2. Temperature delle superfici non isolate con e senza tetto verde

Ulteriori analisi sono state condotte sulle prestazioni di confort termico tramite le misure delle temperature dell'aria interna in due edifici con isolamento termico simile con e senza tetto

verde. I risultati presentati nelle figure mostrano che per tutto il periodo di tempo scelto per le misurazioni, i valori della temperatura interna in un edificio con tetto verde, sono più bassi durante il giorno, eccetto in alcuni giorni a causa delle variazioni di l'utilizzo di sistemi di condizionamento. Sono mostrati anche gli andamenti per delle giornate particolari in cui gli edifici risultavano non occupati per eliminare l'errore indotto dai sistemi di condizionamento. Si è dedotto che le condizioni di confort degli edifici con tetto verde sono migliorate di 2°C.

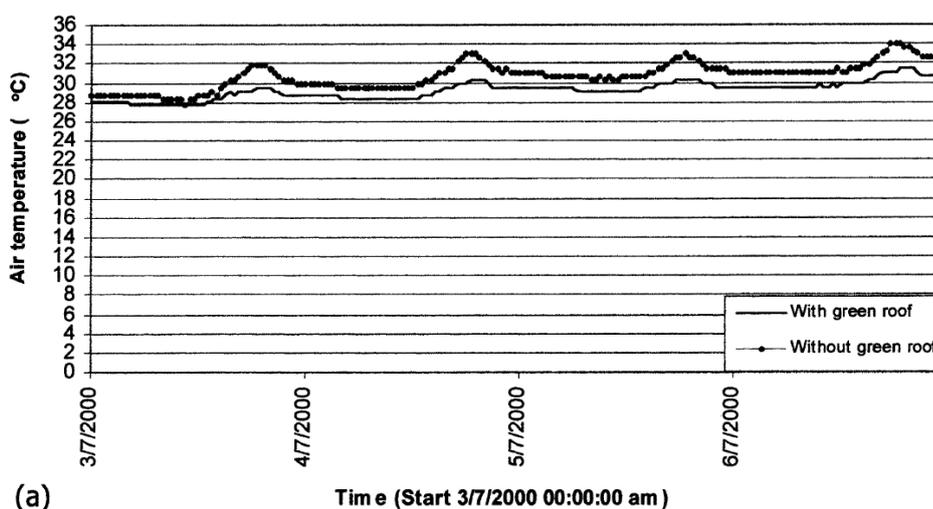


Fig. 4.3. Andamento della temperatura dell'aria interna in free floating

Dopo una dettagliata analisi dei dati monitorati è stato visto che su 2325 misurazioni effettuate sull'edificio con e senza tetto verde, 419 casi hanno superato il valore di 30°C per tetto senza copertura verde, e solo in 115 registrazioni per il tetto verde. Così, nel periodo tra il 3-6 luglio, la temperatura massima dell'aria ha superato 30°C nel 68% dei casi, mentre, per edifici con tetto verde tale percentuale raggiunge solo il 15%; analoghi risultati si sono registrati per il periodo 10-13 Luglio.

Le prestazioni termiche degli edifici sono state simulate tramite il software TRNSYS definendo tre diversi scenari:

- scenario base : senza ventilazione notturna,
- scenario 1: la ventilazione notturna è stata applicata nel periodo estivo con 4 ACH.
- scenario 2: la ventilazione notturna è stata applicata nel periodo estivo con 10 ACH.

È stato concluso che, nel caso di scenario base, i risparmi energetici variano dal 9% per gli edifici con tetti ben isolati al 45% per tetti non isolati. I corrispondenti valori, calcolati per il raffreddamento, variano da un risparmio trascurabile per gli edifici ben isolati, al 45% per edifici non isolati.

Nel caso degli scenari 1 e 2, la percentuale di energia risparmiata nel periodo estivo, varia dal 54% con 4 ACH al 61% per 10 ACH, per edifici non isolati. I corrispondenti valori, per edifici moderatamente isolati, variano dal 9% con 4 ACH al 12% con 10 ACH. Per gli edifici ben isolati, il risparmio sul consumo energetico per raffreddamento è quasi nullo per entrambi gli scenari. Gli istogrammi seguenti mostrano i risparmi energetici annuali nei diversi scenari e per i diversi livelli di isolamento termico dell'edificio. [1]

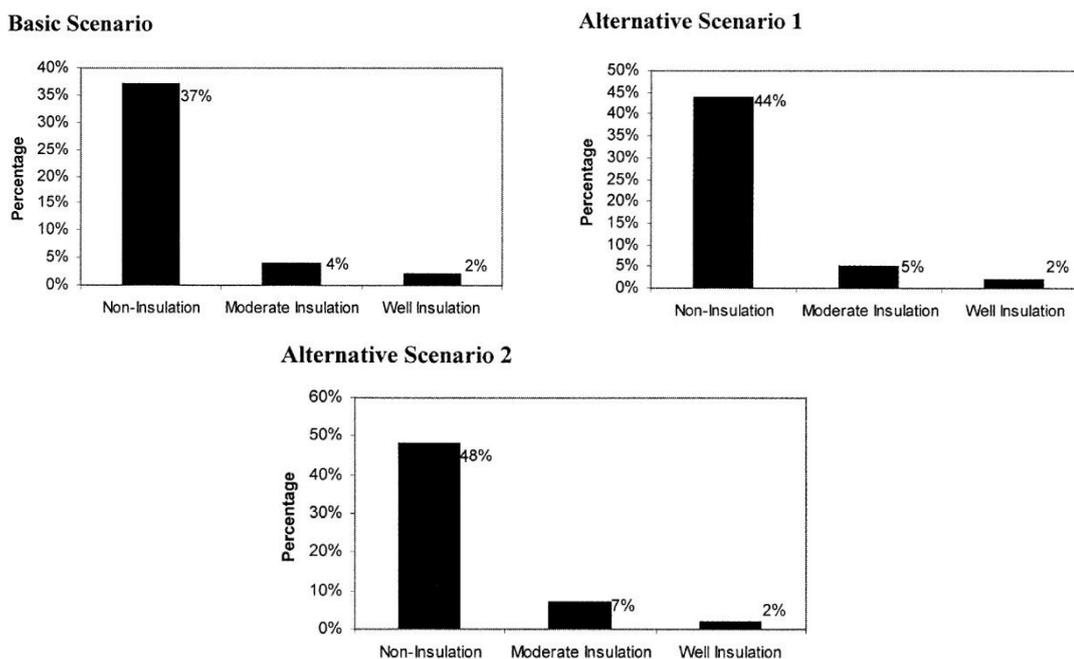


Fig. 4.4. Risparmi energetici conseguibili

- ✓ *The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore.* Wong NH, Cheong DKW, Yan H, Soh J, Ong CL, Sia A. 2003.

L'obiettivo dello studio è di identificare i benefici di una copertura vegetata nel ridurre i flussi termici verso l'interno di un edificio e di quantificare l'impatto di una copertura a verde sui consumi energetici dell'edificio stesso.

MATERIALI E METODI

È stato utilizzato il software di simulazione DOE-2 per determinare i consumi energetici di un edificio commerciale a cinque piani con diverse tipologie di tetto. La copertura dell'edificio è di 966 m². Sono stati simulati tre differenti tipologie di tetto: tetto esposto, tipico tetto piano e copertura vegetata e simulati gli effetti della variazione di vegetazione e dello spessore del

substrato. Nelle simulazioni la presenza degli strati aggiuntivi di terreno e vegetazione è stata considerata inserendo un opportuno valore di R-value. Il calcolo delle resistenza termica aggiuntiva, dovuta a vegetazione e terreno, è stato possibile grazie ai valori misurati sperimentalmente delle temperature superficiali in diversi punti di un sito sperimentale.

RISULTATI

I risultati hanno mostrato che la tipologia di copertura influenza fortemente i flussi termici attraverso il tetto. Nel caso di confronto tra tetto esposto e vegetato, il consumo annuale di energia si riduce di 19 MWh (10%) nel caso di inverdimento in erba e di 29 MWh (15%) nel caso di cespugli. Il fabbisogno di energia per il raffrescamento si riduce di 93 MWh (47%) nel caso di erba e di 155.9 MWh (79%) nel caso di cespugli. Nel caso di confronto tra tetto piano e vegetato il consumo si riduce di 1 MWh (1%) nel caso di inverdimento in erba e di 3 MWh (2%) nel caso di cespugli. Il fabbisogno di energia per il raffrescamento si riduce di 7.9 MWh (17%) nel caso di erba e di 21.8 MWh (47%) nel caso di cespugli. Il confronto tra diversi spessori di substrato indica che l'incremento di spessore riduce i guadagni di calore nell'edificio. La riduzione varia da 7.5 MWh (16%) per uno spessore di 100 mm fino a 29.6 (64%) per uno spessore di 900 mm [2].

Comparison of different types of roofs for a five-story commercial building

Type of roofs	Annual energy consumption (MWh)	Space load component (total building load) (MWh)	Peak space load (total building load) (kW)
Exposed roof	200	197.3	91.9
Exposed roof covered by 100% turfing	181	104.3	48.8
Exposed roof covered by 100% shrubs	171	41.4	19.4
Exposed roof covered by 100% trees	174	62.9	29.5
Typical flat roof	171	46.4	21.7
Typical flat roof covered by 100% turfing	170	38.5	18.1
Typical flat roof covered by 100% shrubs	168	24.6	9.1
Typical flat roof covered by 100% trees	169	31.3	11.5

Fig. 4.5. Consumi di energia annuali al variare della copertura

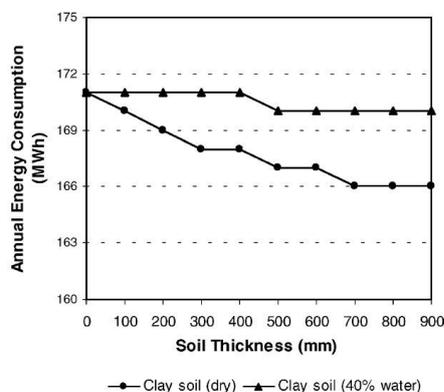


Fig. 4.6. Consumo di energia annuale al variare dello spessore del substrato

✓ *Performance evaluation of an extensive green roof.* Liu K, Minor J. 2005.

MATERIALI E METODI

Il tetto verde è stato costruito sulla copertura di una scuola, che ha un tetto industriale a bassa pendenza. L'area di 460m² del tetto è stato divisa in due sezioni in cui sono stati installati due sistemi per tetti verdi (G ed S). Il tetto di una stanza adiacente è stato utilizzato come riferimento. Il sistema G è costituito da un polimero semi-rigido composito drenaggio e feltro e un tappetino-radice di ancoraggio. Ha 100 mm di terreno di coltura leggero contenente piccoli granuli di colore chiaro. Il sistema S è costituito da pannelli di drenaggio di polistirolo espanso e un tessuto filtrante geotessile. Ha 75 mm di terreno leggero di colore scuro contenente granuli di ceramica porosa. Le tre sezioni del tetto sono state strumentate per misurare il profilo di temperatura nei diversi strati, il flusso termico attraverso il sistema di copertura ed il microclima creato dalla. La stazione meteo è stata installata sul tetto per monitorare le condizioni atmosferiche.

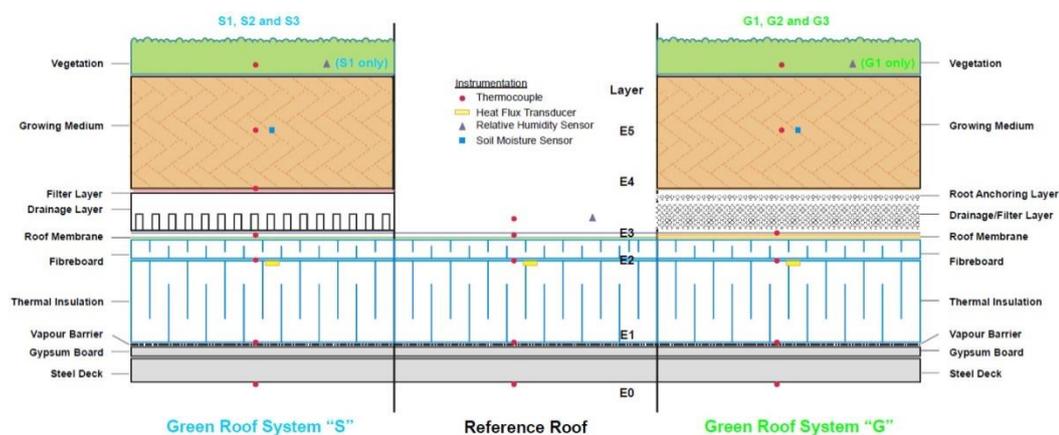


Fig. 4.7. Sito sperimentale con sezioni G ed S

RISULTATI

In estate la membrana del tetto di riferimento assorbe energia solare e si porta ad una temperatura di 66 °C intorno alle 14:00. I tetti verdi abbassano significativamente la temperatura della membrana del tetto e ne ritardano il picco. La temperatura della membrana del tetto raggiunge i 38 °C alle ore 18:30 per il tetto S ed i 36 °C alle ore 19:30 per il tetto G. Nel tetto di riferimento il calore comincia ad entrare nell'edificio attraverso dopo l'alba (circa 6:00), raggiungendo l'intensità massima di circa 15 W/m² e continua fino al tramonto (intorno alle 18:00), quando il flusso termico si inverte. La figura 4.9 e mostra come i tetti verdi

riducono significativamente il flusso termico (sia guadagno e perdita) attraverso la copertura ad un picco massimo di $2,5 \text{ W/m}^2$. Il tetto G ha un substrato più spesso e più chiaro (100 mm) del tetto S (75 mm). La temperatura del substrato nel tetto S aumenta più velocemente ed i dati dei flussi termici hanno confermato che il tetto G subisce guadagni e perdite di calore leggermente inferiore al sistema S. Poiché non sono osservabili grandi differenze nella vegetazione, le osservazioni indicano che substrati più profondi migliorano le prestazioni termiche del sistema tetto verde in estate.

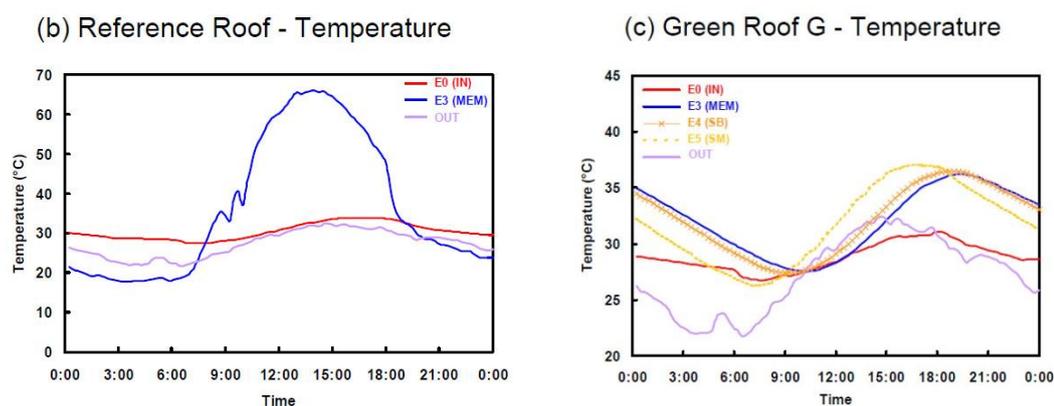


Fig. 4.8. Temperature sul tetto di riferimento e nella sezione G.

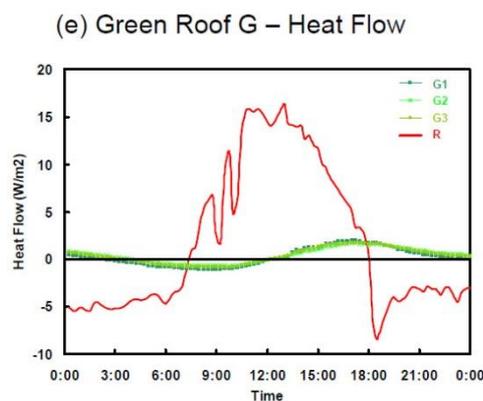


Fig. 4.9. Flussi termici nella sezione G e nel tetto di riferimento

Le seguenti figure mostrano i flussi termici attraverso le coperture in una tipica giornata d'inverno con una copertura di neve leggera (meno di 25 mm). Tutte e tre le sezioni del tetto perdono calore durante il giorno. Il tetto di riferimento mostra un flusso costante di circa $8 - 9 \text{ W/m}^2$ a causa della copertura di neve. I Tetti verdi riducono le perdite di calore dall'edificio a circa $6-8 \text{ W/m}^2$. Nonostante il tetto G abbia un substrato più profondo del tetto S, il terreno risulta congelato e non contribuisce all'isolamento supplementare per il sistema di copertura in inverno. Tuttavia, il pannello di drenaggio in polistirolo nel sistema S fornisce un

isolamento supplementare rispetto al tappeto drenante polimerico semi-rigido nel sistema G, come indicato dalle temperature della membrana di copertura: 4 °C e 2,5 °C per S e G rispettivamente. I flussi termici risultano ridotti per il tetto S ad un tasso di 1 W/m² costante durante il giorno, che riconferma l'isolamento aggiuntivo fornito dal pannello di drenaggio in polistirolo.

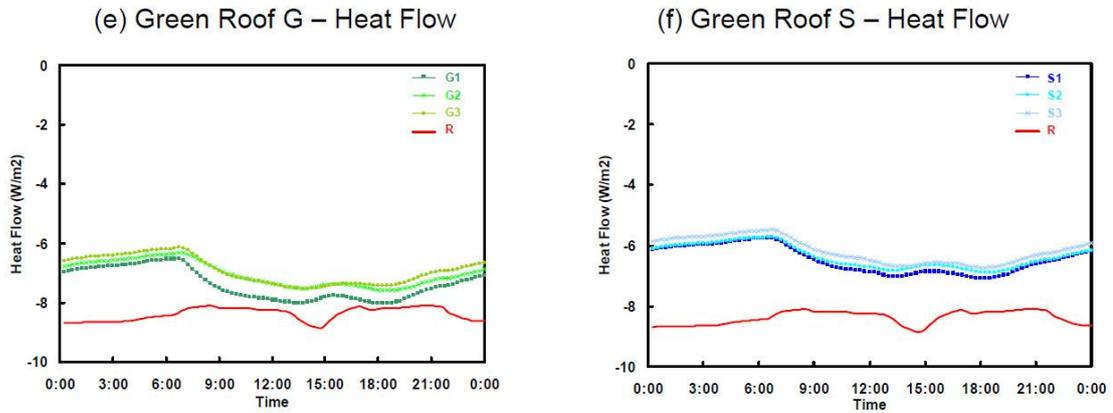


Fig. 4.10. Flussi termici in inverno

Infine dai dati dei flussi termici sono stati calcolati i flussi termici medi giornalieri normalizzati attraverso le sezioni del tetto durante il periodo di osservazione (kWh/m² anno). I tetti verdi hanno permesso di ridurre costantemente il flusso termico medio giornaliero attraverso il tetto durante tutto l'anno con riduzioni più pronunciate in estate (70-90%) e meno in inverno (10-30%). Nel primo anno di monitoraggio, i tetti verdi hanno permesso di ridurre i guadagni totali di calore attraverso il tetto del 95%, ma solo il 23% per le perdite di calore [3].

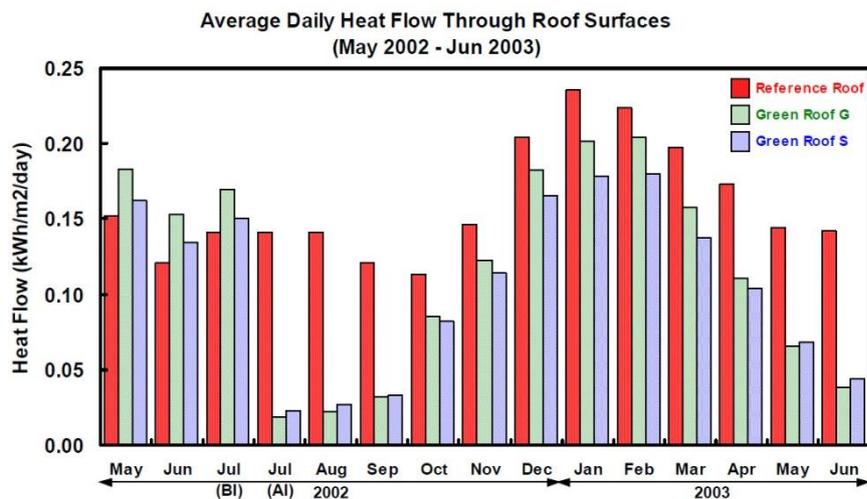


Fig. 4.11. Flussi termici giornalieri medi

✓ *Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon.* Graig Spolek 2008.

Sono stati monitorati tre ECOROOOF situati a Broadway, sulla copertura di un dormitorio per studenti nel campus Portland State University. Gli ECOROOOFs sono stati installati su una superficie di 1 800 m² di cui circa 500 m² sono monitorati.

MATERIALI E METODI

Sono stati installati sensori di temperatura di resistenza (RTD) sulle superfici superiore e inferiore del tetto, come illustrato nella figura successiva. Il confronto è fra tetto verde e tetto tradizionale in cui l'ultimo strato è sostituito con una zavorra di roccia.

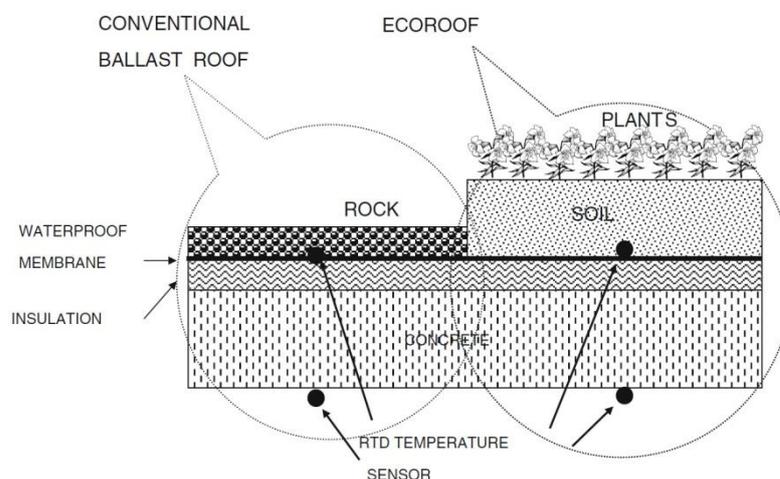


Fig. 4.12. Copertura del campus monitorata

RISULTATI

La temperatura superficiale è stata misurata solo sulla costruzione di Broadway, e sono stati calcolati i flussi termici entranti ed uscenti dallo spazio condizionato. È stata quindi confrontata la temperatura alla base della roccia e la temperatura sotto il substrato con la temperatura dell'aria immediatamente sopra il tetto. A causa dell'ombreggiamento delle piante e dell'effetto dello strato isolante, la temperatura del tetto verde assume valori più moderati rispetto alla temperatura dell'aria esterna. Al contrario, il guadagno solare durante il giorno e perdite radiative notturne conducono a sbalzi di temperatura più elevati per il tradizionale tetto in roccia.

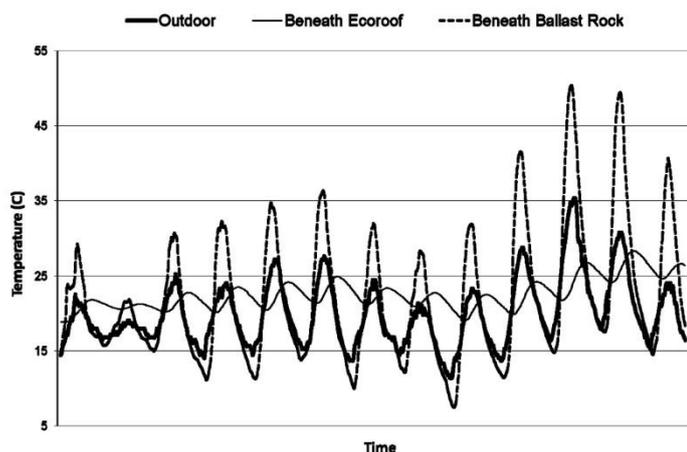


Fig. 4.13. Andamenti delle temperature nel tetto verde e tradizionale

Il flusso termico verso lo spazio condizionato causato da picchi di temperatura relativamente alti aumenta notevolmente il flusso termico estivo entrante nell'edificio che deve essere successivamente rimosso dall'impianto di condizionamento. I picchi di temperatura sono 4-6 h fuori fase per i due tipi di tetto. Questo ritardo potrebbe essere importante durante i periodi in cui gli edifici hanno bisogno di riscaldamento durante la notte e di raffreddamento durante il giorno. La seguente figura mostra i flussi termici integrati in un periodo di un mese (il segno positivo indica flussi termici convogliati all'interno dello spazio condizionato, mentre il segno negativo indica flussi uscenti). Due importanti risultati possono essere dedotti: (1) il flusso termico medio invernale è cinque volte più grande del flusso termico estivo. (2) La riduzione percentuale di flusso termico per il tetto verde è molto più grande in estate che in inverno. Durante le estati miti e secche di Portland, la copertura verde riduce il flusso termico del 72%, in media. Le prestazioni invernali sono più basse con una riduzione media di 13%. Questa differenza è probabilmente dovuta al terreno che essendo asciutto in estate produce un migliore isolamento. Ciononostante, il risparmio assoluto in estate e in inverno sono paragonabili, ma siccome Portland ha gradi-giorni di riscaldamento dieci volte maggiori di quelli di raffrescamento il principale beneficio dell'ecoroof a Portland avviene durante l'inverno [4].

Table 4 Comparison of ecoroof and conventional rock ballast roof heat transfer by season

Rooftop heat flux	Month	Year	Ecoroof	Conventional	Average	Average reduction (%)
			Average hourly heat flux (W/m ²)			
Winter	Dec	2005	-3.73	-4.22	-3.74	13
	Jan	2006	-2.89	-3.39		
	Feb	2006	-3.35	-3.79		
	Jan	2007	-4.33	-4.92		
	Feb	2007	-3.12	-3.70		
Summer	Jul	2006	0.77	1.59	0.75	72
	Aug	2006	0.25	1.05		
	Jul	2007	0.59	1.56		
	Aug	2007	0.18	0.87		
	Sep	2007	0.06	0.56		

Fig. 4.14. Flussi termici nel tetto tradizionale e nell'ecoroof

- ✓ *Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. Aikaterini Sfakianaki, Elli Pagalou, Konstantinos Pavlou, Mat Santamouris and M. N. Assimakopoulos. 2009*

Lo studio presenta i risultati e un'analisi sperimentale sulle prestazioni specifiche e sulle caratteristiche di due coperture vegetate applicate in due diversi edifici in Atene. Lo studio è stato condotto in due diverse fasi. Durante la prima fase sono state effettuate misurazioni accurate in entrambi gli edifici per indagare le caratteristiche climatiche, energetiche ed ambientali dei tetti verdi e degli interi edifici, mentre durante la seconda fase sono state effettuate analisi e simulazioni termiche dettagliate per valutare i risparmi energetici e i benefici derivanti dall'uso di coperture a verde.

MATERIALI E METODI

Le misurazioni sono state eseguite in due edifici situati nell'area principale di Atene ed in particolare nelle periferie Psichico e Peristeri. Il residence Psichico è un edificio a due piani con una superficie di 150m² a piano. Il tetto verde è costituito dai seguenti elementi:

1. Vegetazione sedum fino a arbusti esigenti, cespugli e alcuni alberi,
2. Substrato completamente minerale a base di laterizio frantumato, arricchito con materiale organico,
3. Filtro,
4. Strato drenante,
5. Strato di protezione ed accumulo idrico,

6. Barriera anti-radice.

Il residence Peristeri è un appartamento all'ultimo piano di un edificio a più piani dove il tetto è in parte coperto da un sistema a verde. La superficie totale dell'appartamento è 295 m²; il tetto verde copre quasi 100 m² della superficie. Il tetto verde installato in questo residence è simile al precedente. Entrambi gli edifici sono completamente riscaldati nel periodo invernale mentre d'estate operano in *free floating conditions*.

Sono state monitorate la temperatura superficiale interna ed esterna e la temperatura ambiente in entrambi gli edifici per diverse condizioni atmosferiche. Le condizioni climatiche esterne sono abbastanza simili in entrambe le località. In particolare, la radiazione solare misurata è risultata essere simile in entrambe le aree, mentre nella zona Peristeri la temperatura ambiente è risultata circa 1°C superiore a quella in Psichico, specialmente a mezzogiorno. Le misure di temperatura superficiale sono state eseguite utilizzando camere termografiche a infrarossi mentre la temperatura dell'aria ambiente è stata misurata utilizzando termometri.

RISULTATI

L'analisi della temperatura superficiale del tetto verde ha condotto alle seguenti conclusioni:

In una giornata soleggiata di primavera, quando la temperatura ambiente è prossima a 23°C, la temperatura superficiale media del tetto verde è di circa 6,5 °C e 9°C inferiore a quella delle superfici grigie o marroni circostanti.

La temperatura superficiale delle zone non ombreggiate con erba fitta è notevolmente inferiore a quella in cui sono presenti cespugli o arbusti.

La temperatura superficiale varia tra 3,5 e 7 °C quando la temperatura dell'erba è intorno a 22°C e 16°C rispettivamente.

L'ombreggiamento della vegetazione riduce la temperatura superficiale di 4-7°C.

L'irrigazione ha un effetto minore sulla riduzione di temperatura. La differenza media di temperatura terreno asciutto e umido risulta di 1,4 °C.

Sono state inoltre simulate le performances energetiche dell'edificio in presenza ed assenza del tetto verde e calcolati i livelli di comfort termico. Le simulazioni sono state eseguite con il software TRNSYS. Dai risultati è emerso che:

In free floating, il tetto verde contribuisce ad aumentare la temperatura dell'aria interna durante il periodo invernale. Per la residenza di Psichicon, la copertura a verde contribuisce ad innalzare la temperatura interna fino a 0,4 °C. Per la residenza Peristeri è stato osservato un simile comportamento. In questo caso l'aumento di temperatura è vicino a 0,2°C. La copertura verde inoltre contribuisce ad abbassare la temperatura durante il periodo estivo. Per

il residence Psichicon la riduzione di temperatura simulata è di circa 0.4°C e in alcuni casi aumenta fino a $0,6^{\circ}\text{C}$. Per quanto riguarda la residenza Peristeri, l'impatto sugli ambienti interni nel periodo estivo risulta non risulta significativo siccome la variazione della temperatura interna oscilla tra $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Sono stati infine calcolati i consumi di energia nel caso di impianto di climatizzazione attivo con temperature di set points di 26°C e 19°C in estate ed inverno rispettivamente. La riduzione dei carichi di riscaldamento e raffreddamento a causa della presenza del tetto verde è pari a 2 e 11%, rispettivamente. Nel caso invernale la riduzione dei consumi per il riscaldamento varia tra il 2 ed il 4%. Per quanto riguarda la residenza Peristeri, la riduzione dei consumi nel periodo di riscaldamento e di raffrescamento è risultata 1.6% e 1% rispettivamente. Oltre a ridurre i fabbisogni energetici questi sistemi sono in grado di produrre importanti benefici di comfort termico. Per valutare gli eventuali miglioramenti del grado di comfort termico interno, principalmente in free-floating, sono state condotte simulazioni sul Predictive Mean Vote (PMV) per la residenza Psichico. Una migliore sensazione termica può essere raggiunta a causa delle minori temperature interne e dalla diminuzione della temperatura media radiante del tetto. La presenza del tetto verde diminuisce il valore assoluto del PMV di 0,1 a cui corrisponde un miglioramento dei livelli di comfort dall'8 al 12% per giugno, tra il 5% e l'8% per luglio e tra il 3% e il 5% per agosto con una diminuzione media annua della percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) tra 4% e il 5% [5].

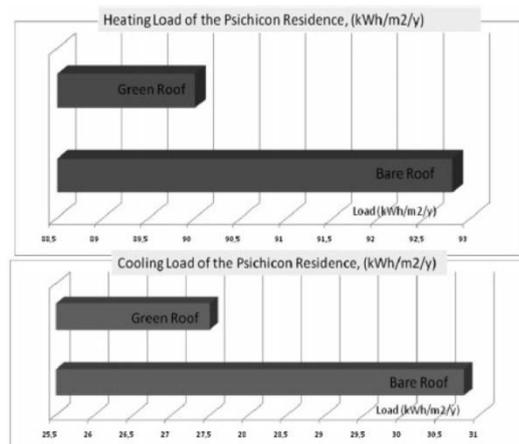


Fig. 4.15. Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento con e senza tetto verde

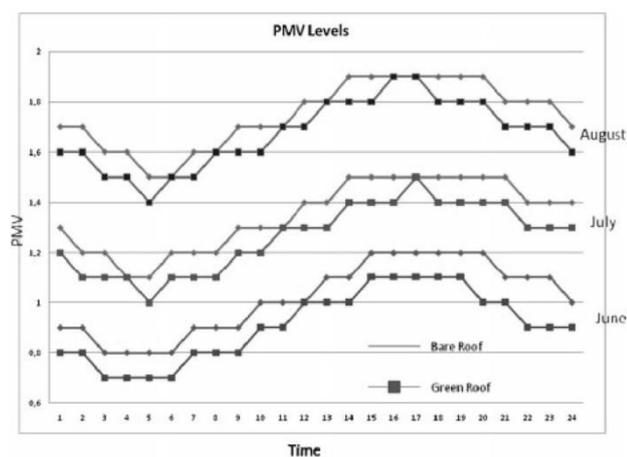


Fig. 4.16. Variazione giornaliera del PMV

- ✓ *Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate.* Fioretti R, Palla A, Lanza LG, Principi P. 2010.

Sono presentati due siti sperimentali realizzati in area mediterranea per quantificare qualitativamente e quantitativamente le performances energetiche e nella gestione delle acque di tetti verdi in ambiente urbano.

MATERIALI E METODI

È stato effettuato un confronto eseguito tramite il simultaneo monitoraggio di due parti del tetto, il tetto verde ed un tetto di riferimento, rivestito di lastre di cemento. Entrambi i tetti presentano identico strato strutturale, costituito da piastrelle e calcestruzzo, uno strato isolante in polistirene e uno strato impermeabile. Una serie di sensori misurano le condizioni climatiche esterne, le temperature nei vari strati, i flussi termici verso l'interno, le temperature superficiali interne e la temperatura dell'aria interna a diverse altezze.

RISULTATI

In primo luogo è stata valutata la riduzione della radiazione solare dovuta alla vegetazione tramite confronto tra la radiazione solare globale sulla superficie orizzontale e la radiazione solare misurata sotto il fogliame. I benefici dovuti all'ombreggiamento delle piante sono evidenti. Infatti, la presenza di fogliame crea un'ombra sul terreno, che permette di diminuire la radiazione solare incidente sulla superficie esterna del tetto, riducendo la temperatura e i flussi termici. Un'altra valutazione è stata fatta dal confronto della temperatura a bulbo secco misurati sotto il fogliame e sul suolo e la temperatura monitorata dalla stazione

meteorologica, per valutare il microclima sotto la vegetazione. Uno degli effetti più importanti creati da un tetto verde è la riduzione della temperatura superficiale e l'attenuazione delle fluttuazioni di temperatura. In un tetto tradizionale, fatto di materiali ad alto assorbimento, la superficie orizzontale esterna può raggiungere temperature molto alte grazie all'effetto combinato della temperatura dell'aria e dell'assorbimento di radiazione solare, che determina un forte carico termico.

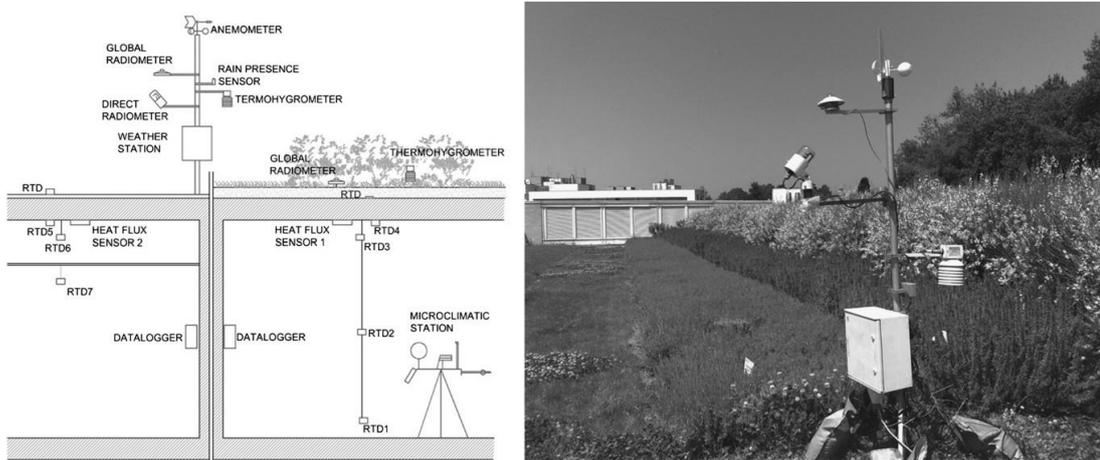


Fig. 4.17. Sito sperimentale nelle Marche

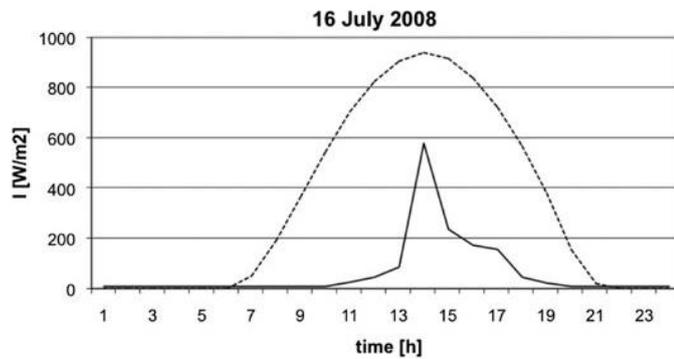


Fig. 4.18. Andamento della radiazione solare sotto la vegetazione

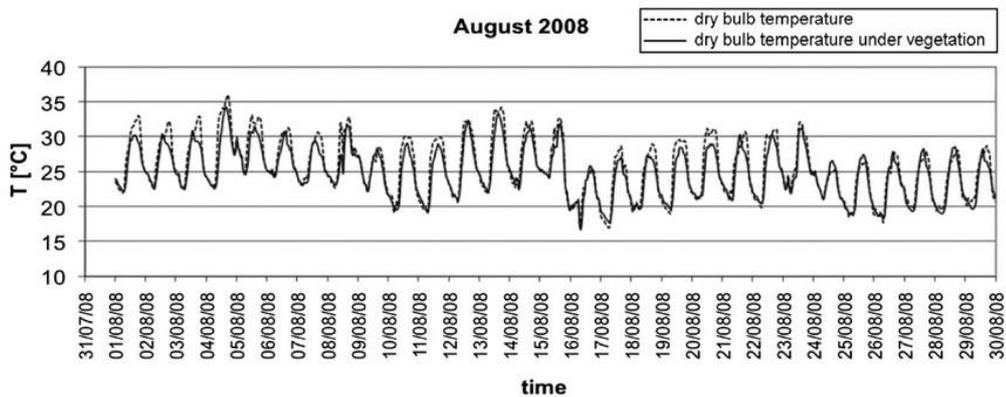


Fig. 4.19. Andamento della temperatura a bulbo secco sotto la vegetazione

Le prestazioni termiche del tetto verde (vegetazione, suolo e strati drenanti) sono state valutate tramite confronto tra la temperatura della superficie esterna sul tetto tradizionale e la temperatura sotto gli strati aggiuntivi del tetto verde, utilizzando un sensore posizionato sotto lo strato di drenaggio, direttamente a contatto con la membrana impermeabile. Osservando le fluttuazioni giornaliere della temperatura superficiale esterna del calcestruzzo del tetto di riferimento e quelle del terreno sotto il sistema di vegetazione, è evidente che il tetto verde ha un livello di temperatura inferiore a causa dell'ombreggiamento delle piante, dell'isolamento ed evapotraspirazione del fogliame. Per completare la caratterizzazione del comportamento energetico del tetto verde, sono stati valutati gli effetti sulle condizioni ambientali interne. Nella figura successiva è mostrato il flusso termico giornaliero valutato sulla superficie del tetto dove si percepisce come il tetto verde riduce il fabbisogno energetico quotidiano. Confrontando il flusso termico attraverso il tetto convenzionale e il tetto verde, si può notare che si verifica una notevole riduzione delle fluttuazioni del flusso e, conseguentemente, dei picchi positivi e negativi durante la stagione estiva [6].

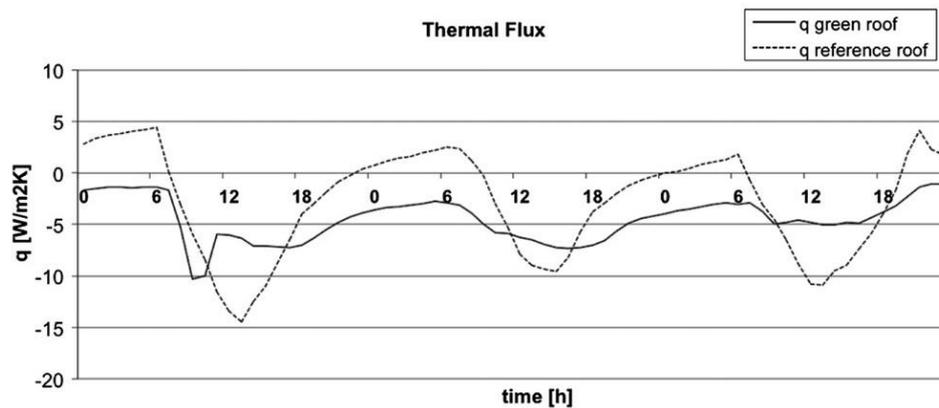


Fig. 4.20. Andamento giornaliero dei flussi termici nel tetto verde e di riferimento

- ✓ *On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece.* A. Spala, H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou. 2008.

Lo studio indaga il potenziale energetico di un edificio dotato di un sistema a verde situato nell'area metropolitana di Atene calcolando il consumo energetico sia durante l'inverno che durante il periodo estivo utilizzando un modello matematico accurato.

MATERIALI E METODI

L'edificio si trova in un sobborgo nord-orientale della città di Atene non densamente popolato. È un edificio rettangolare a due piani; piano terra e il primo piano dell'edificio hanno una superficie di 210 m². Le pareti esterne ed interne sono realizzate con blocchi in laterizio con isolamento in polistirene espanso e un sottile strato di cemento sulle superfici interne ed esterne. Il sistema tetto verde installato sul tetto dell'edificio è realizzato con diversi strati. Nelle simulazioni si sono tenute in conto le seguenti considerazioni:

- La lana di roccia è un materiale che agisce come un serbatoio di acqua all'interno del sistema per cui il valore di conducibilità termica è stato posto uguale a quello dell'acqua pari a 0.58W/m K.
- La resistenza termica della membrana impermeabile e del geotessile essendo di spessore molto piccoli non sono presi in considerazione.
- Il coefficiente di copertura che è la percentuale di tetto coperto dal sistema tetto verde, è stato pari a 60%.

Materials of the green roof system	
Green roof layers from outside to inside	
Plants	Local 'wild' plants are picked based on: (a) length of blooming (b) site conditions (c) water and care demands
Soil substrate	Substrate mixes are chosen based on their nutritive qualities, and minimal weight
Irrigation system	Distributes water efficiently. Its placement minimizes evaporative losses
Stonewool	Hydroponic stonewool is a good growing medium for plants. It is also light and has a very good water storage capacity
Geotextile	Acts as a drainage layer and protects the waterproofing membrane
Waterproofing	Polymeric membrane: acts both as a secure watertight layer and as an impenetrable root repellent
Geotextile	Protects water proofing membrane from wear and tear against roof

Fig. 4.21. Descrizione del sistema vegetato

Il tasso di infiltrazione considerato varia tra 0,2 e 0,5 ricambi d'aria per ora mentre il tasso di ventilazione per il periodo considerato è stato posto tra 1 e 1,5 ricambi d'aria all'ora. Le prestazioni termiche dell'edificio appena descritto, equipaggiato con il sistema tetto verde, sono state simulate utilizzando il programma TRNSYS. I fabbisogni energetici dell'edificio sono stati calcolati sia nel periodo estivo che nel periodo invernale, prima e dopo l'installazione del tetto verde. Sono stati considerati i valori di temperatura di set point pari a 21 °C per il periodo di riscaldamento e 27 °C per il periodo di raffrescamento. Gli output considerati sono il carico di raffreddamento dell'edificio per il periodo estivo, per tutta la

costruzione così come per l'ultimo piano e in secondo luogo, il carico termico per il periodo invernale, per l'intero edificio e per l'ultimo piano.

RISULTATI

Le immagini seguenti illustrano le variazioni dei fabbisogni energetici dell'edificio e dell'ultimo piano a causa dell'utilizzo del sistema tetto verde. I valori negativi corrispondono a una diminuzione del carico di raffreddamento. Si nota una notevole riduzione del carico di raffreddamento durante il periodo estivo nell'anno successivo all'installazione del sistema tetto verde. La riduzione del carico di raffreddamento oscilla per l'intero edificio tra il 15% e il 39% mentre per l'ultimo piano raggiunge il 58%. Il sistema tetto verde può essere utilizzato come sistema di raffrescamento passivo a causa della sua influenza effettiva sul microclima. Analogamente per il periodo invernale i valori negativi osservati corrispondono ad una diminuzione del carico termico.

The cooling load variation as a percentage (%), for the whole building and for its last floor

Month	Cooling load variation (%) for the whole building	Cooling load variation (%) for the last floor
January		
February		
March		
April		
May	-29	-46
June	-39	-58
July	-30	-48
August	-15	-31
September	-16	-27
October		
November		
December		

The heating load variation as a percentage (%), for the whole building, as well as for its last floor

Month	Heating load variation (%) for the whole building	Heating load variation (%) for the last floor
January	1	4
February	-2	-5
March	7	15
April	-6	-14
May		
June		
July		
August		
September		
October	-8	-17
November	3	7
December	5	16

Fig. 4.22. Variazione dei fabbisogni di raffrescamento e di riscaldamento determinati dal tetto verde

Si osserva un piccolo aumento in alcuni mesi mentre una diminuzione è stata ottenuta per i restanti mesi del periodo di riscaldamento. L'aumento osservato del carico termico a causa del sistema tetto verde è arrivato fino al 7% per il mese di marzo per l'intero edificio, mentre per l'ultimo piano, il corrispondente aumento è arrivato al 16% per il mese di dicembre. Inoltre, la diminuzione del carico termico oscilla tra il 2% e l'8% per l'intero edificio e tra il 5% e il 17% per l'ultimo piano. Pertanto, la variazione del fabbisogno termico invernale, causato dall'installazione del tetto verde, risulta piuttosto piccola e, quindi, l'influenza del sistema sul carico di riscaldamento durante il periodo invernale non è significativo. Questo può essere considerato un risultato molto incoraggiante siccome, in genere, qualsiasi operazione che mira a ridurre il carico di raffrescamento di un edificio, causa un aumento del suo carico di riscaldamento [7].

✓ *Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate.*

Getter KL, Rowe DB, Andresen JA, Wichman IS. 2011.

L'obiettivo dello studio è di quantificare le proprietà termiche di un tetto verde su un tetto rovescio e di confrontarle con un tetto tradizionale in ghiaia zavorrato, installati nel tipico clima del Midwestern degli Stati Uniti caratterizzato da estati umide calde e inverni nevosi e freddi.

MATERIALI E METODI

Il tetto verde di 325,2 m² è stato installato su una porzione del tetto di un edificio del Michigan State University campus a East Lansing. Il tetto verde è costituito da una membrana antiradice installato su l'isolamento del tetto esistente, una stuoia di drenaggio seguita da un feltro di ritenzione idrica. Il substrato di coltivazione e le piante sono stati installati tramite tappetini pre-coltivati di vegetazione che contengono 5 cm di substrato. Il sistema di monitoraggio prevede la misura di temperatura, flussi di calore, umidità del suolo, condizioni climatiche ambientali. Nella porzione di ghiaia del tetto e nella parte vegetata sono state installate tre stazioni di misurazione con cinque termocoppie nelle seguenti posizioni del profilo verticale: 1 m, sopra il tetto, sulla superficie del substrato (o ghiaia), al di sopra della coibentazione, sulla membrana di copertura e all'interno dell'edificio sul soffitto.

Una sonda di umidità del suolo è stata installata orizzontalmente in ogni sito direttamente sulla parte superiore del tessuto ritenzione idrica (per il tetto verde) o direttamente sopra l'isolante (per il tetto in ghiaia). I dati sono stati mediati e riportati ad intervalli di un'ora. I dati di precipitazione sono stati registrati ogni minuto, poi sommati e riportati ad intervalli di un'ora. Sono stati esclusi i dati relativi ai mesi invernali, a causa della incapacità dei sensori di misurare precipitazioni solide. La radiazione solare è stata misurata con un piranometro.

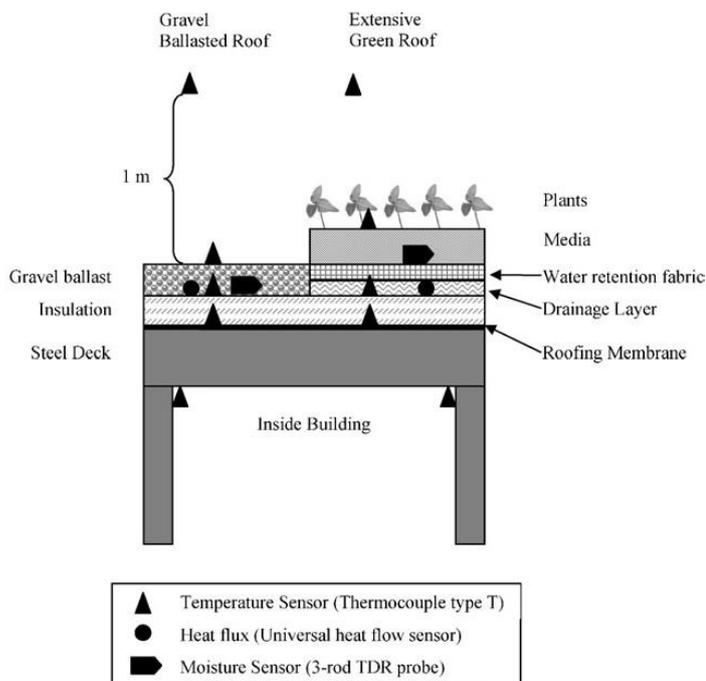
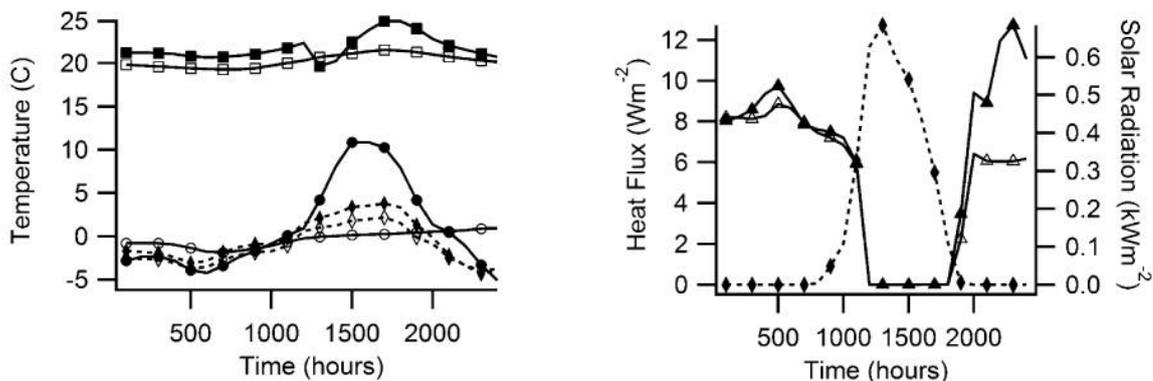


Fig. 4.23. Sito sperimentale

RISULTATI

In inverno le temperature al di sopra dello strato isolante senza copertura nevosa sono molto più variabili rispetto a giorni con copertura nevosa, soprattutto in condizioni di soleggiamento. Quando sia il tetto verde che il tradizionale sono coperti di neve, le temperature al di sopra dell'isolamento e superficiali mostrano valori quasi identici. In generale i flussi termici nel tetto verde sono minori rispetto a quello in ghiaia.

(A) Winter Sunny, No Snow Cover (21February2006)



(C) Winter Cloudy, both green roof and gravel roof are snow covered (12 December 2005)

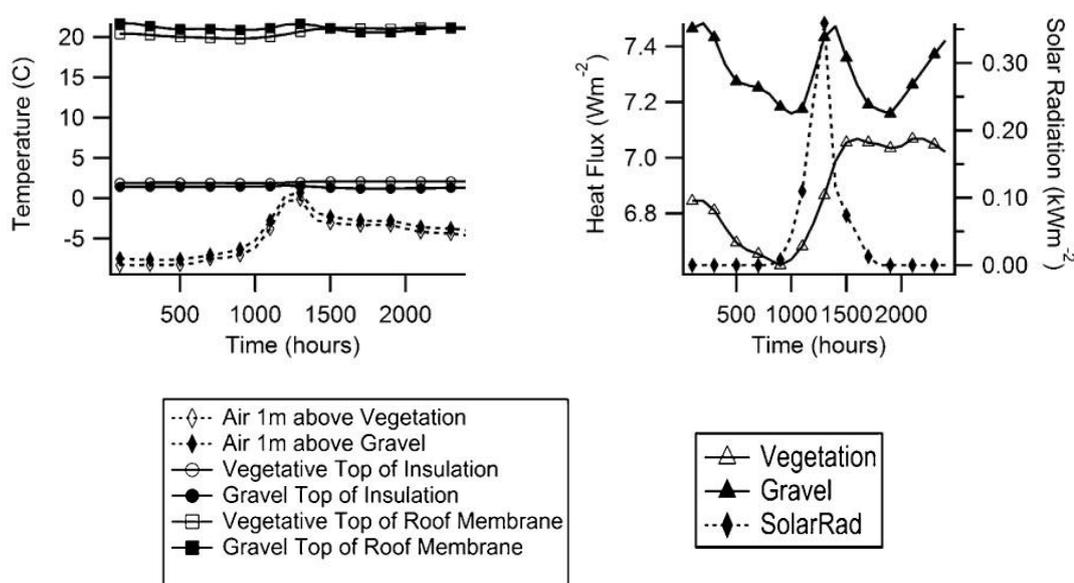


Fig. 4.24. Temperature e flussi termici nel periodo invernale

Le temperature dell'aria ambiente ad 1 m al di sopra della ghiaia e tetto verde nella stagione estiva sono simili alle tendenze in primavera. Le temperature sopra l'isolante mostrano tendenze simili a quelle in primavera, ma le differenze di picco tra ghiaia e tetto verde sono notevolmente più grandi in estate (fino a 20 °C) rispetto alle altre stagioni. La temperatura superficiale mostra valori simili per la ghiaia e il tetto verde. Il flusso termico nel tetto in ghiaia è costantemente inferiore a quello relativo al tetto verde durante il giorno (più calore che entra nell'edificio) e quasi uguale durante la notte. La differenza nei flussi termici tra tetto verde e in ghiaia durante l'estate in presenza di pioggia non risulta uguale a quella esibita durante la primavera, nonostante le grandi differenze nel contenuto volumetriche d'acqua. Il contenuto d'acqua del tetto in ghiaia raggiunge velocemente il 10%, ma diminuisce fino a quasi zero altrettanto in poche ore, considerando che nel tetto verde rimane tra il 20% e il 30%. Non sorprende che i guadagni di calore in estate siano inferiori nelle giornate nuvolose e con pioggia rispetto alle giornate di sole, che indica una forte dipendenza dalla radiazione solare. Tuttavia, nei giorni di pioggia, questa riduzione potrebbe essere causata anche dai fenomeni di raffreddamento per evaporazione o evapotraspirazione [8].

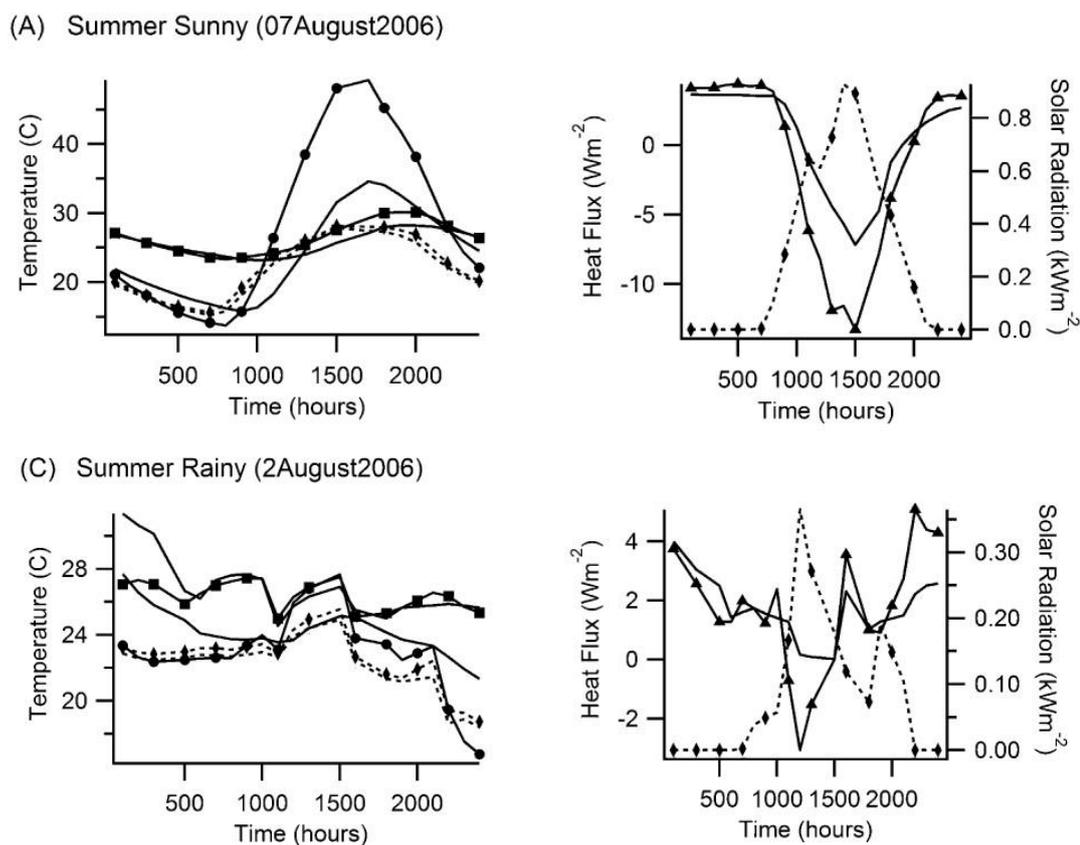


Fig. 4.25. Temperature e flussi termici in estate

- ✓ *Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?* Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo de' Rossi, Gianluca Turni, Giuseppe Peter Vanoli. 2013.

Lo studio verifica l'utilità dei tetti verdi, sotto il profilo ambientale ed energetico, considerando tutti gli aspetti che influenzano le loro performances. Un'ampia analisi parametrica valuta la fattibilità tecnica ed economica di tetti verdi applicati ad un edificio moderno adibito ad uffici, considerando varie tipologie di vegetazioni e diversi rivestimenti esterni, con riferimento a diversi climi, diverse intensità di precipitazioni e irrigazione.

MATERIALI E METODI

L'edificio modellato è tipico della tradizione europea. L'uso ufficio implica il riscaldamento e il raffreddamento durante le ore diurne. Le temperature di set-point sono state impostate su valori tipici per il comfort termico secondo la teoria di Fanger. Il tasso di ventilazione, pari a $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$, implica una qualità dell'aria interna soddisfacente con una tipica densità di persone

di 0,06 persona/m². La superficie lorda è pari a 986 m². L'altezza complessiva è pari a 4,3 m, il volume netto è 3339 m³. Sono state modellate varie tipologie di tetto verde e confrontate con le prestazioni energetiche realizzabili di una copertura tradizionale. È stato considerato anche un tetto standard con rivestimento ad alta riflessione ($\alpha_{SOL} = 0.2$, $\epsilon_{INFRARED} = 0.9$).

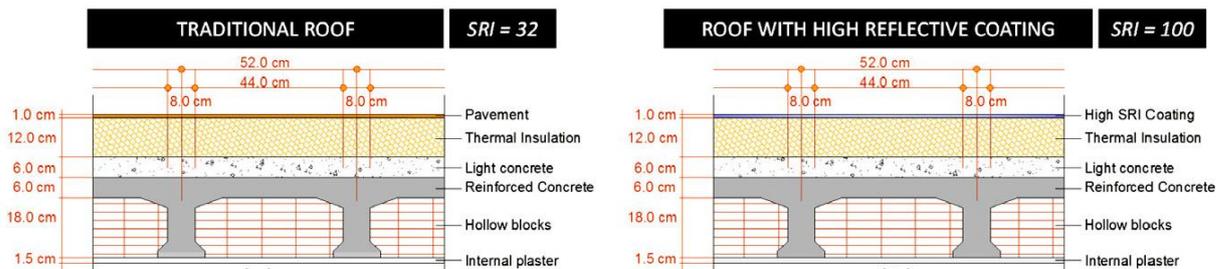
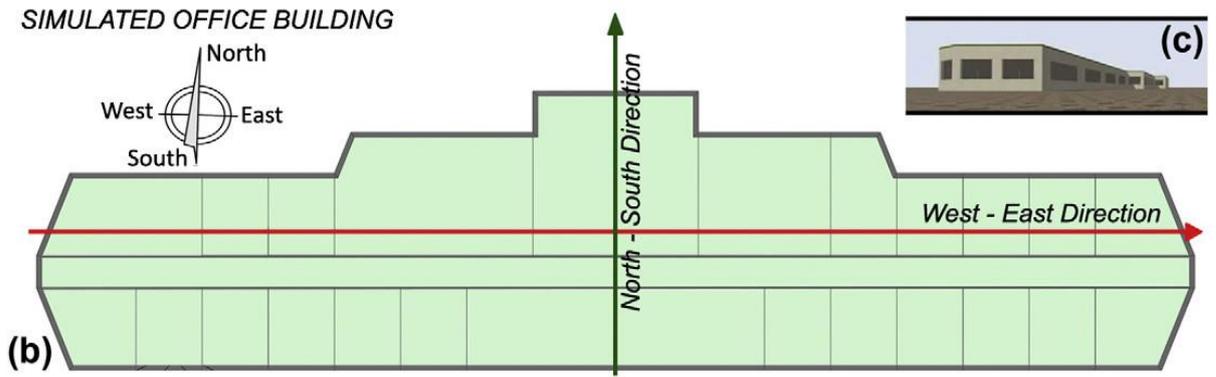


Fig. 4.26. Tipologia di edificio, di struttura e di vegetazione simulate

	1. TENERIFE	2. SEVILLA	3. ROME	4. AMSTERDAM	5. LONDON	6. OSLO
Heating Degree-Days (°Cd)	59	916	1444	2971	2866	4171
Cooling Degree-Days (°Cd)	1166	1063	649	61	32	33
Annual Heating and Cooling degree-days have been evaluated with respect to a 18°C baseline						

Fig. 4.27. Località climatiche considerate

Le simulazioni sono state condotte per vari climi europei.

RISULTATI

Nei climi caldi, le soluzioni migliori sono quelle che ottimizzano la riduzione dei fabbisogni di raffrescamento, essendo le esigenze di riscaldamento piuttosto assenti (Tenerife) o scarse (Sevilla). In estate, i tetti verdi generano una diminuzione di richiesta termica per il raffrescamento tra 1,1-10,8% (Tenerife) e -0,9-11,0% (Sevilla), rispetto al tetto tradizionale. In ogni caso, la soluzione migliore è un rivestimento riflettente. Anche se i *cool roofs* sono adatti per la riduzione del raffreddamento estivo, questi implicano una maggiore richiesta di energia in inverno. In particolare una superficie riflettente caratterizzata da una elevata emissività all'infrarosso induce una significativa perdita di guadagni solari implicando una domanda di riscaldamento superiore in inverno. riassumendo:

- Tenerife: in inverno, non si verifica alcun bisogno di riscaldamento. Pertanto, la soluzione più idonea è il *cool roof* con un risparmio energetico, rispetto al tradizionale intorno al 12,0%.
- Siviglia: la necessità di riscaldamento invernale è scarsa; colori freddi (migliori in estate) e tetti verdi con graminacee (soddisfacente in entrambe le stagioni) determinano prestazioni energetiche equivalenti, con un risparmio complessivo di energia primaria intorno a -11.0% (colore freddo) e -10,7% (tetto verde con graminacee), rispetto ai tetti tradizionali.

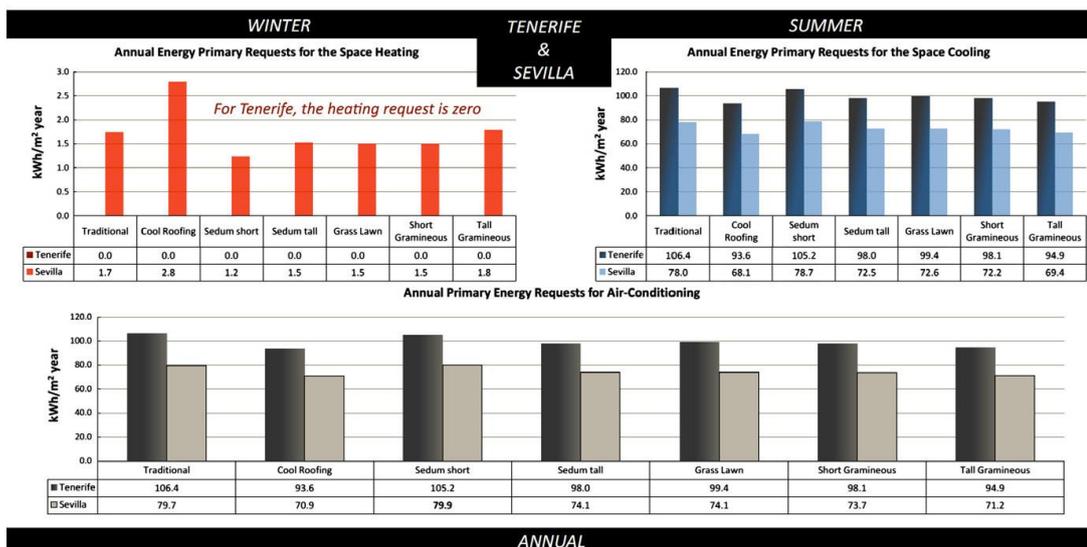


Fig. 4.28. Fabbisogni di energia primaria a Tenerife e Siviglia

Nei climi miti (Roma e Amsterdam), le prestazioni invernali possono assumere un ruolo significativo. In questi climi la perdita dei guadagni solari legata all'adozione di un *cool roof*

implica le peggiori prestazioni di riscaldamento, con la domanda di energia primaria per il riscaldamento, rispetto alla soluzione di base (copertura tradizionale), molto più elevata: rispettivamente +8,9% (Roma) e +7,7% (Amsterdam). Per quanto riguarda i tetti verdi, in estate, non si ottiene nessun vantaggio adottando vegetazione sedum, mentre si ottengono buone performances con l'uso di graminacee alte (-8,2% della domanda di raffreddamento a Roma, -8,5% ad Amsterdam). A livello annuale si può concludere che:

- Roma: la domanda estiva di raffreddamento è elevata. Le soluzioni che riducono al minimo le richieste di raffreddamento sono preferibili. *Cool roof* (-8,4% richiesta annuale di energia) e graminacee alte (-7,8% richiesta annuale di energia) sono da preferire rispetto alla struttura di copertura tradizionale.
- Amsterdam: il fabbisogno energetico invernale è preponderante: dunque, anche se i *cool roofs* offrono ottime prestazioni estive, la migliore soluzione annuale è il tetto vegetato, che mitiga entrambe le richieste energetiche invernali ed estive.

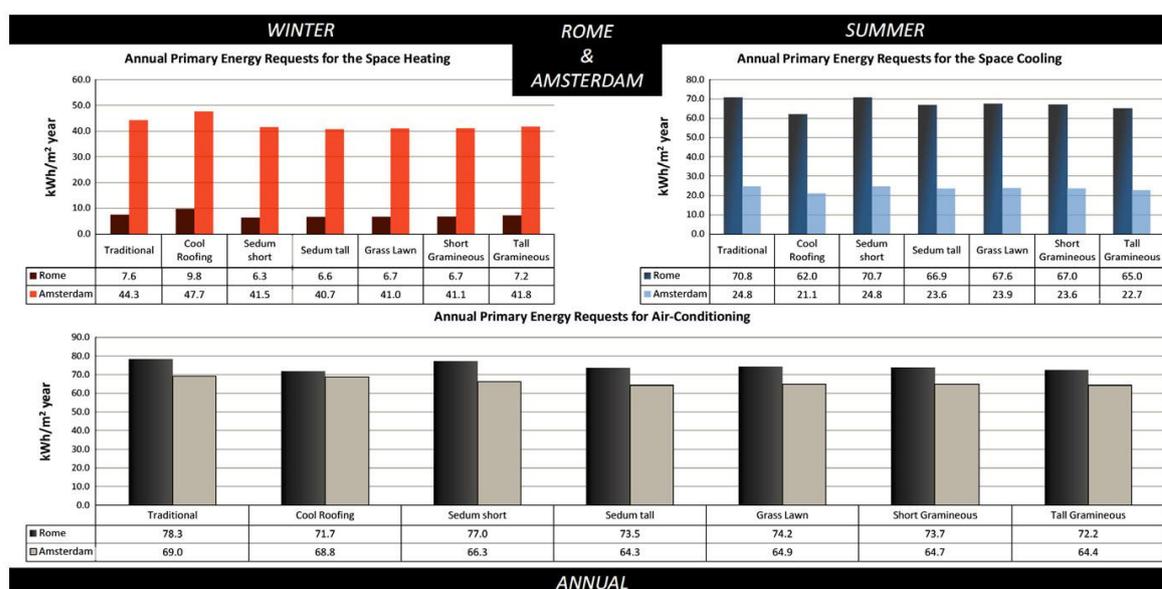


Fig. 4.29. Fabbisogni di energia primaria a Roma ed Amsterdam

In UK le prestazioni del tetto verde sono migliori rispetto al tetto tradizionale. Risultato opposto si verifica a Oslo, dove la copertura tradizionale, aumentando la sua temperatura a causa della bassa riflettanza, determina esigenze di riscaldamento minori. In estate, *cool roofs* e graminacee alte implicano una minore domanda di raffrescamento in entrambe le città.

Su base annua, si può dedurre:

- Londra: il freddo invernale richiede soluzioni di copertura che non penalizzano la trasmissione di calore tra edificio e ambiente. Il tetto verde con graminacee alte è una

corretta soluzione, con richieste energetiche inferiori di circa il 7,2% rispetto al tetto tradizionale.

- Oslo: la necessità di riscaldamento invernale è troppo predominante; soluzioni come tetti freddi, soddisfacenti in estate, sono inadatti a livello annuale. Tetti verdi con sedum alta e graminacee sono preferibili, determinando risparmi energetici annuali intorno al 5,9% rispetto a coperture tradizionali.

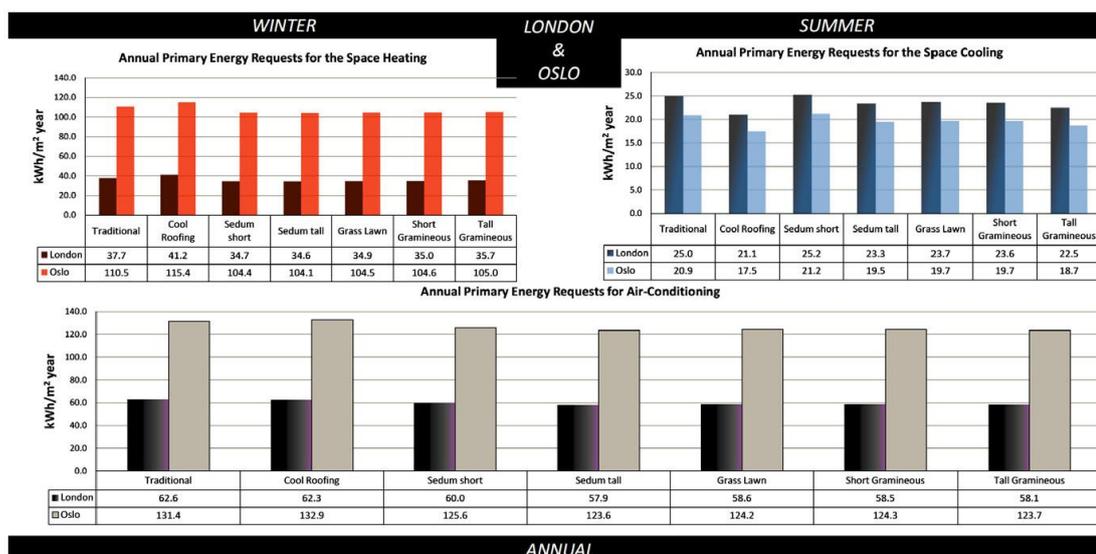


Fig. 4.30. Fabbisogni di energia primaria a Londra e Oslo

Con riferimento alle condizioni di confort interno, i risultati hanno mostrato che:

- A Tenerife, i *cool roofs* producono i migliori risultati sia in inverno che in estate. Durante il periodo di riscaldamento una temperatura superficiale alla base del tetto superiore a 20 °C è raggiunta da tutte le soluzioni, mentre in estate il tetto freddo ha temperature più basse implicando una domanda di raffrescamento inferiore. Il tetto con graminacee raggiunge prestazioni equivalenti, ma richiede una irrigazione artificiale.
- A Sevilla il tetto con graminacee alte genera prestazioni adeguate, in entrambe le stagioni, garantendo rispetto alle coperture tradizionali temperature inferiori durante il periodo di raffrescamento e del tutto equivalenti in inverno. Il *cool roof* ha buone prestazioni in estate, ma implica un peggioramento in inverno rispetto al tetto verde ed al tradizionale.
- A Roma l'utilità termica dell'utilizzo di graminacee alte è evidente, con performances estive migliori rispetto alla copertura tradizionale, sia in inverno (temperature più elevate) e in estate (livelli termici inferiori).
- Ad Amsterdam la radiazione solare è scarsa durante le giornate invernali: quindi, i guadagni solari assumono scarsa importanza. In realtà, considerando l'intera stagione di

riscaldamento il tetto verde riduce la trasmissione di calore convettiva e permette guadagni gratuiti determinando temperature interne superiori rispetto ai *cool roofs*. Contrariamente il tetto freddo implica i migliori risultati estivi.

- Londra e Oslo mostrano prestazioni termiche simili a quelle riscontrate ad Amsterdam. In pieno inverno, il tetto verde non influenza fortemente le prestazioni energetiche a causa della simultanea riduzione dei guadagni solari ma riduzione delle perdite convettive. In estate, le prestazioni energetiche del tetto verde sono soddisfacenti.

Su base annua, i tetti verdi sono adatti, soprattutto quando la vegetazione è progettata per controllare sia il trasferimento di calore invernale che il surriscaldamento estivo. Ovviamente, in inverno, la vegetazione con alta resistenza stomatica implica notevoli guadagni solari (ad esempio piante sedum), mentre il risultato opposto si verifica in estate, in quanto l'elevato assorbimento di acqua alta e l'evaporazione sono utili per il raffrescamento passivo (prato e graminacee piante) [9].

4.2 Simulazione energetica della copertura a verde

Per l'analisi delle prestazioni energetiche della copertura verde è stato scelto il modello termofisico contenuto nel programma di simulazione in regime dinamico Energy Plus nel quale è implementata la modellazione proposta da S. Frankenstein, g. Koenig [10]. In particolare è stata utilizzata l'interfaccia grafica disponibile nel software Design Builder [11].

4.2.1 Generazione del modello del cubo universitario 46C

Al fine di analizzare le prestazioni energetiche della copertura a verde sull'edificio universitario che ospita il sito sperimentale, sono state condotte una serie di simulazioni energetiche. Viene brevemente descritta l'ubicazione dell'edificio e le caratteristiche costruttive indispensabili per la generazione del modello da simulare.

L'università si sviluppa adiacente ad un percorso rettilineo e chilometrico, pedonale e carrabile, coperto e scoperto, attraverso una serie di edifici squadrati, denominati "cubi" che si adattano all'orografia del terreno in modo da definire uno skyline pulito e lineare. Nella figura successiva si riporta una visione della facoltà di Ingegneria.

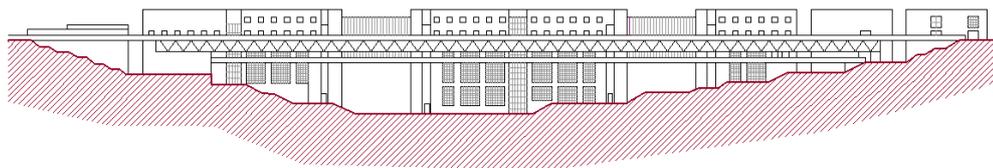


Fig. 4.31. Skyline della facoltà di Ingegneria, Università della Calabria.

Il cubo in esame numerato 46/C, è localizzato a nord dell'intera struttura universitaria, come di seguito illustrato, e accoglie gli uffici amministrativi del Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale (DIMEG).



Fig. 4.32. Inquadramento territoriale della Facoltà di Ingegneria.

Creare un modello termofisico di un edificio al fine di valutarne le prestazioni energetiche implica necessariamente una conoscenza approfondita delle caratteristiche geometriche, tecniche e fisiche di ogni suo componente. Il cubo universitario oggetto di studio presenta, analogamente agli altri edifici costituenti l'università, una forma geometrica parallelepipedica, regolare tanto in pianta quanto in altezza. Si erige su una pianta quadrata di lati 21,30 x 21,30 metri per una altezza di 18 metri. L'edificio si compone di 5 livelli, di cui uno interrato. Ogni piano ha una altezza di interpiano di 2,7 metri, salvo il piano interrato che risulta essere di 4,40 metri e la zona sottostante alla copertura alta 3,60 metri. Ai fini progettuali sono stati considerati solo gli ultimi due livelli sottostanti la copertura in quanto principalmente beneficianti delle prestazioni termiche del tetto verde. Ogni livello inoltre, è caratterizzato da un ambito funzionale destinato alla circolazione per il passaggio dall'esterno verso l'interno (gli uffici) e al collegamento tra i vari piani, e da un ambito funzionale sede degli uffici stessi.

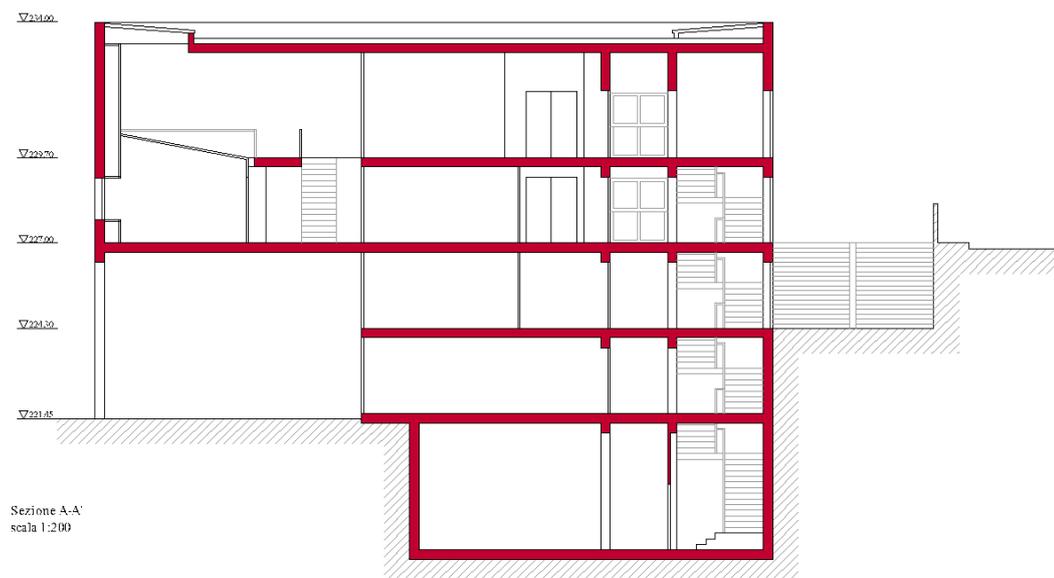


Fig. 4.33. Sezione del Cubo universitario 46C

La struttura si compone di due differenti tipologie di muri perimetrali, con un posizionamento corrispondente alla suddivisione funzionale degli ambienti. La zona adibita ad uso ufficio è caratterizzata da pareti molto spesse e di stratigrafia complessa che, unitamente ai 4 pilastri in acciaio, garantiscono il supporto per la realizzazione degli orizzontamenti; in corrispondenza della zona di passaggio, non riscaldata, i muri perimetrali sono invece di spessore ridotto. La stratigrafia della parete è molto complessa; procedendo dall'esterno verso l'interno, è costituita da un muro in cemento armato pieno rivestito esternamente da pittura in quarzo plastico, intercapedine di aria e un pannello per il rivestimento interno costituito da isolante in fibra di vetro, compensato in cartongesso e albanit. Lo spessore complessivo della parete è di 87,9 cm.

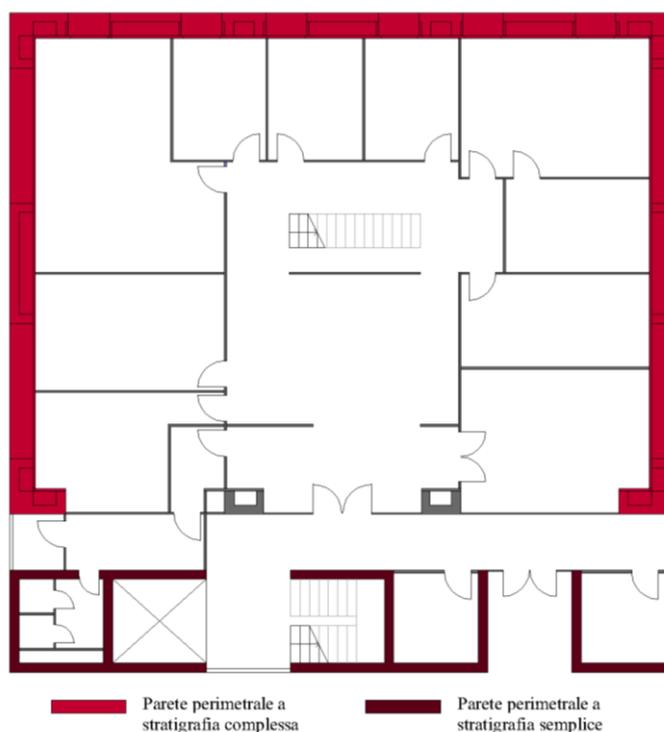


Fig. 4.34. Planimetria del terzo piano con individuazione tipologica degli elementi di chiusura verticale.

I pannelli descritti nella prima tipologia di parete perimetrale hanno conformazioni geometriche e dimensioni differenti a secondo delle aperture presenti. In particolare gli elementi esposti a nord e a sud hanno uguale lunghezza, pari a 14,64 m, ma si differenziano per la presenza o meno di appositi fori predisposti per le aperture. Anche la dimensione delle aperture è differente come illustrato nelle seguenti figure.

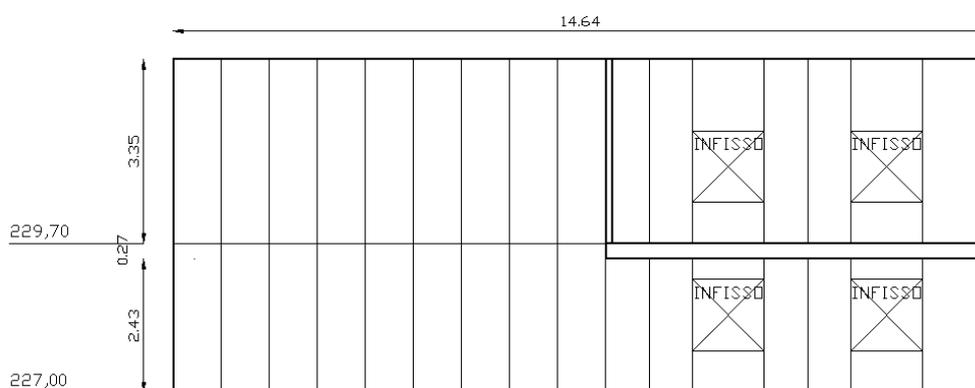


Fig. 4.35. Rivestimento pannello interno, lato nord.

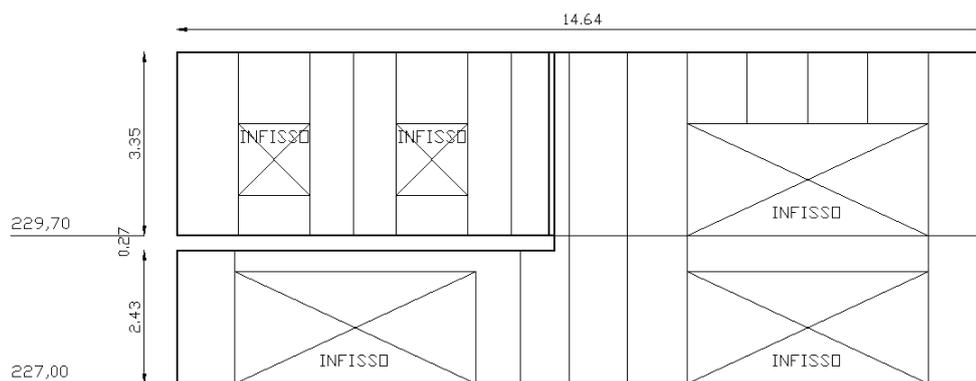


Fig. 4.36. Rivestimento pannello interno, lato sud.

Gli elementi di partizione interna verticale sono di due differenti tipologie: quelle presenti nella zona riscaldata degli uffici, a nord, sud ed ovest e quelli presenti nella zona non riscaldata di semplice circolazione ad est. Entrambe le tipologie sono formate da una serie di pannelli posti in successione costituiti da tre strati, esternamente vi sono due strati di legno compensato di spessore 10 mm mentre internamente vi è uno strato di materiale isolante realizzato in fibra di vetro con spessore di 45 mm; lo spessore totale delle tramezzature è pari a 65 mm. La tipologia che separa gli ambiti di passaggio dalla zona uffici si differenzia dall'altra per la presenza di un sottile strato aggiuntivo di intonaco.

Tutti gli infissi sono realizzati in acciaio – vetrocamera con apertura a vasistas, ma presentano dimensioni differenti.

- Il prospetto Nord è caratterizzato da due tipologie di infissi, presenti esclusivamente negli ultimi due livelli dell'edificio: una finestra in parte opaca e in parte vetrata, di dimensioni 205cm x 180cm, ed una finestra più piccola completamente vetrata avente dimensioni 130cm x 130cm. Di seguito si riporta il prospetto in esame e le misure di relativi infissi.

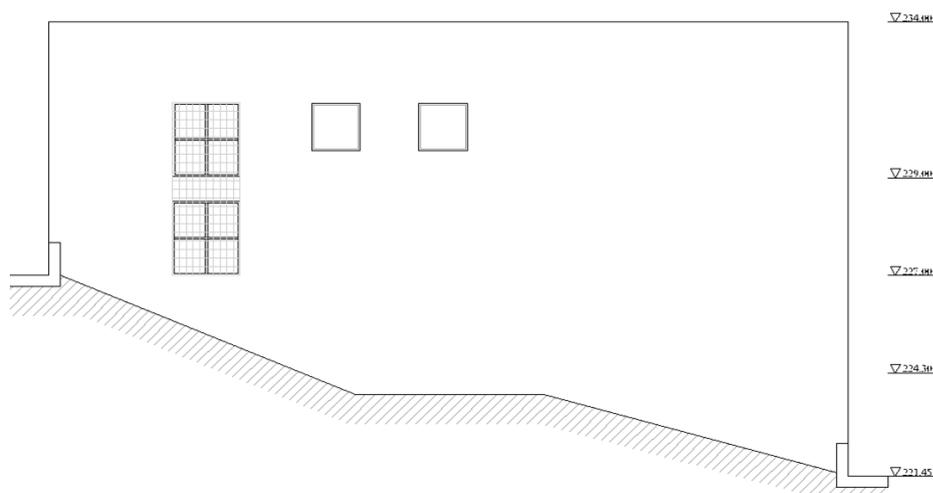


Fig. 4.37. Prospetto Nord del cubo 46C

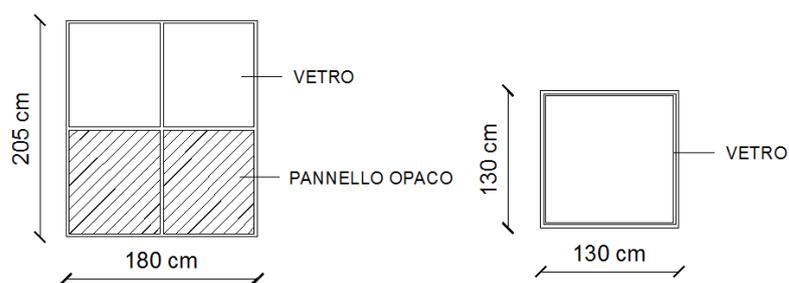


Fig. 4.38. Tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

- Il prospetto Sud è provvisto di una più vasta varietà di finestre:
 - Vetrate di dimensione 205x435 cm, in parte vetrate e in parte opache, presenti fino al terzo piano,
 - Finestre di 205x180 in parte opache e in parte vetrate presenti al secondo e terzo livello;
 - Finestre di dimensioni 130x130 in semplice vetro.

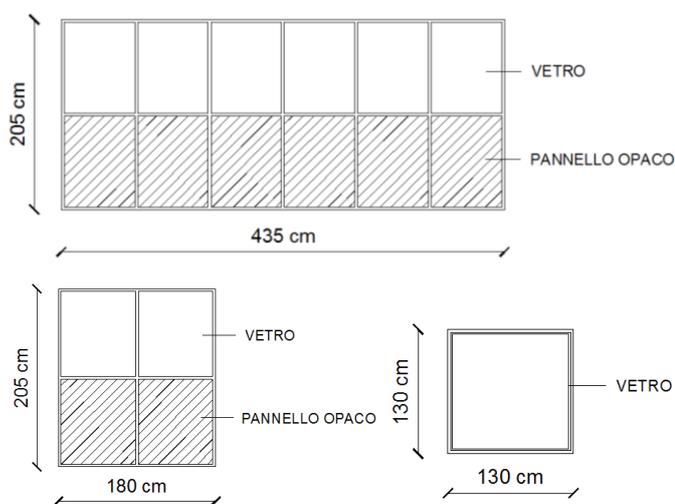


Fig. 4.39. Tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

- Il prospetto Est è caratterizzato da una finestra di dimensioni 270x205, con apertura a vasistas nella zona centrale, e due ingressi vetrati 210x270.

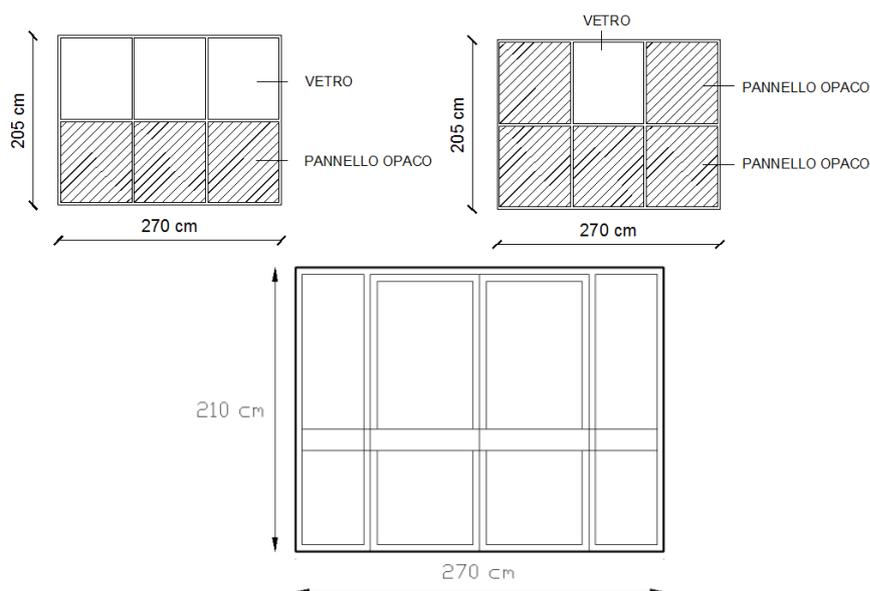


Fig. 4.40. Tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

- Il prospetto Ovest presenta una composizione simmetrica delle aperture. I piani inferiori sono caratterizzati da ampie vetrate di dimensioni 270x205; semplici finestre 130x130 caratterizzano invece l'ultimo livello, analogamente al prospetto Nord e Sud.

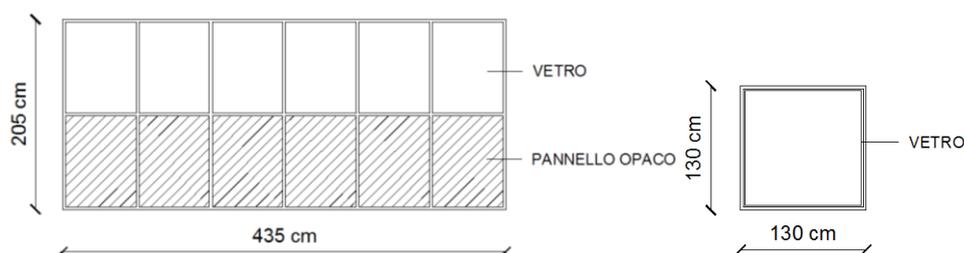


Fig. 4.41. Tipologie di aperture del Cubo Universitario 46 C

Il cubo universitario 46 C è caratterizzato da due differenti tipologie di solaio interpiano; un solaio in laterocemento di spessore complessivo di 22 cm e un solaio in cemento armato precompresso di spessore di 29 cm.

Nella figura seguente si riporta la stratigrafia del solaio interpiano in laterocemento.

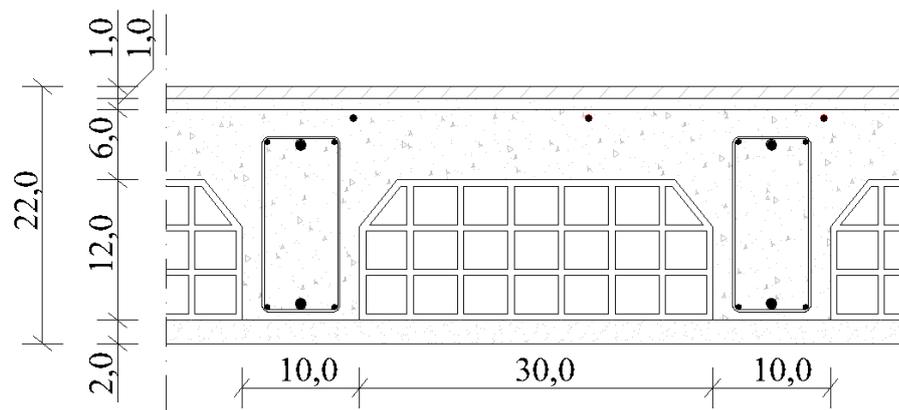


Fig. 4.42. Stratigrafia del solaio interpiano in laterocemento.

Nella figura seguente si riporta la stratigrafia del solaio interpiano in cemento armato precompresso caratterizzato nella sua stratigrafia da: intonaco all'intradosso del solaio, strato strutturale dato da due solette in cls con interposti elementi di alleggerimento in polistirolo, massetto e pavimentazione in pvc.

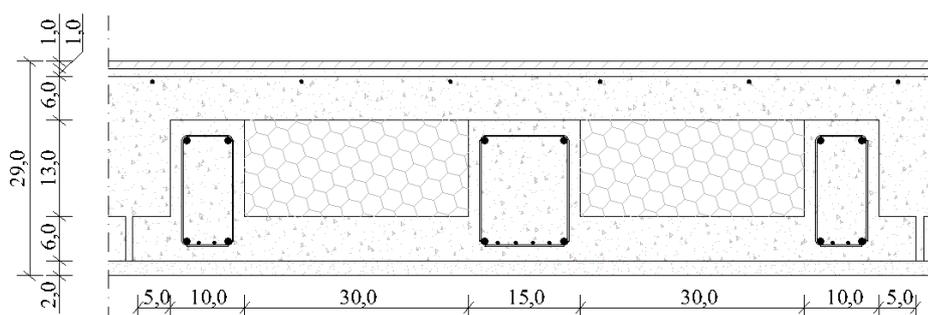


Fig. 4.43. Stratigrafia del solaio interpiano in c.a.p.

Per quanto riguarda gli elementi di chiusura orizzontali, la copertura del cubo 46C si compone di tre differenti tecnologie:

- 1- Copertura costituita da lastre prefabbricate con travetti in cemento armato precompresso;
- 2- Copertura tradizionale in laterocemento;
- 3- Copertura in lamiera zincata.

L'immagine 4.44 illustra la stratigrafia del solaio in cemento armato precompresso di altezza complessiva di 31 cm. La parte strutturale, di 25 cm, si compone di due solette, una superiore e una inferiore, di altezza pari a 6 cm ciascuna, con presenza di elementi di alleggerimento in blocchi di polistirolo alti 13 cm. Inferiormente è rivestito da uno strato di intonaco di 2 cm di spessore; superiormente è caratterizzato, procedendo dall'interno verso l'esterno, dalla

presenza di un massetto delle pendenze di tipo Foamcem di 2 cm, uno strato di impermeabilizzazione di 2 cm, un secondo strato di massetto di 1 cm; inoltre, a seguito di alcuni interventi recenti è stato inserito un ulteriore strato impermeabilizzante di circa 0,5 cm.

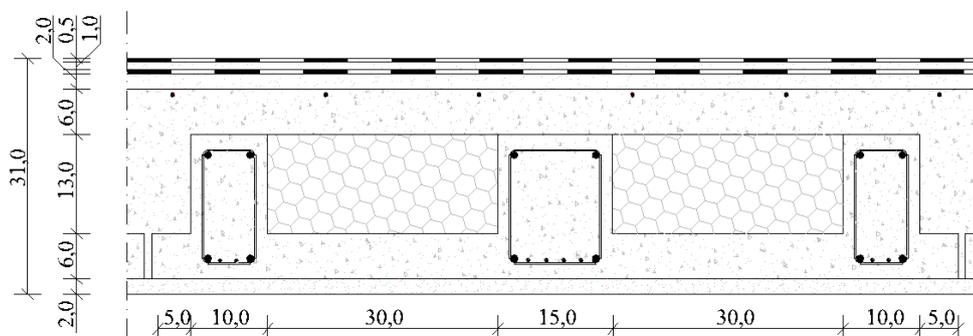


Fig. 4.44. Stratigrafia del solaio di copertura in c.a.p.

Il solaio di copertura in laterocemento ha uno spessore complessivo di 24 cm e si compone di travetti in cemento armato ordinario gettato in opera, con interasse di 40 cm, ed elementi di alleggerimento costituiti da pignatte; superiormente vi è una soletta di completamento di 6 cm sulla quale sono predisposti il massetto delle pendenze Foamcem e l'impermeabilizzazione in modo analogo al caso precedente.

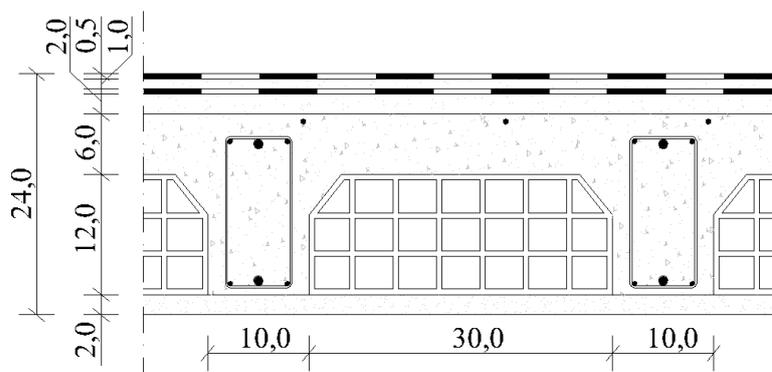


Fig. 4.45. Stratigrafia del solaio di copertura in laterocemento

La copertura a verde di tipo estensivo è stata realizzata sul solaio prefabbricato con travetti in cemento armato precompresso. Come rappresentato nella figura 4.46, quest'ultimo è stato suddiviso in quattro settori come ampiamente descritto nel capitolo due. Si riporta tuttavia una breve sintesi delle stratigrafie implementate nei diversi settori.

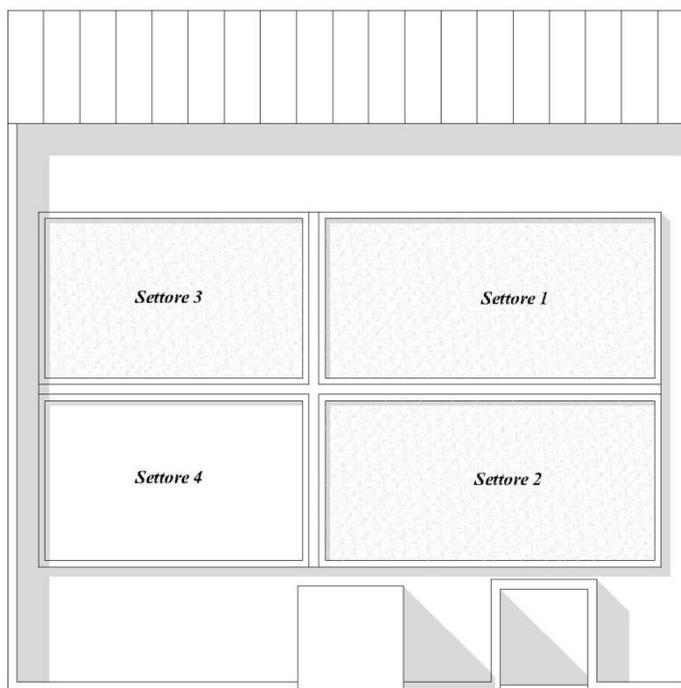


Fig. 4.46. Individuazione dei settori sulla copertura del cubo universitario 46 C

Nella figura 4.47 è rappresentata la stratigrafia del Settore 1.

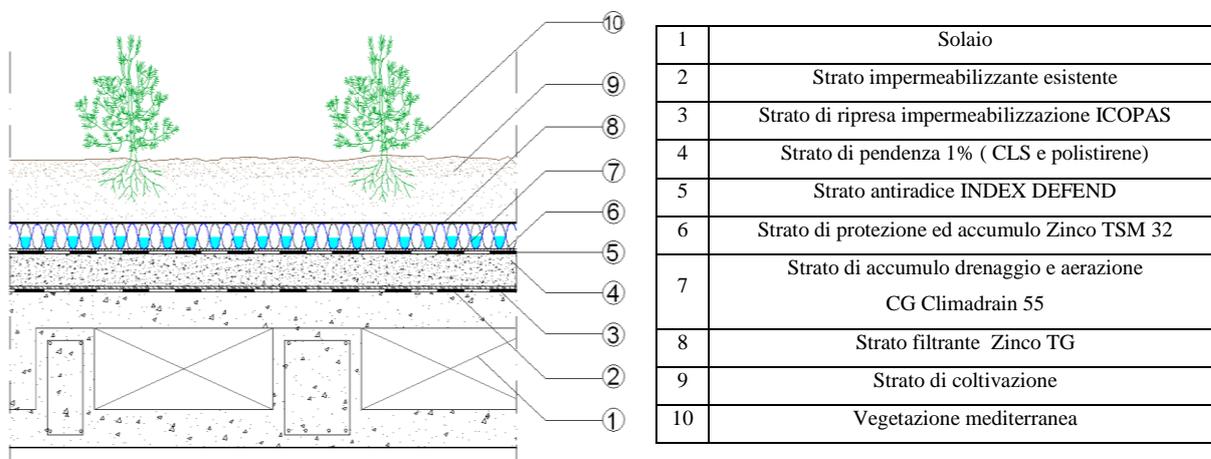


Fig. 4.47. Stratigrafia copertura a verde settore 1

Le proprietà termiche degli strati costituenti le stratigrafie dei vari settori sono già state riportate nel capitolo 2; si riportano quindi solo le proprietà della struttura portante, uguale in tutti e quattro i settori.

Tabella 4.1 Proprietà termiche struttura portante

Strato	Spessore [mm]	Proprietà materiale	Unità di misura	Valore
Solette in cemento armato precompresso	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m ³	2400
Alleggerimento in polistirolo + travetto in c.a.p	130	Conducibilità	W/m K	0,11
		Calore specifico	J/kg K	1240
		Densità	Kg/m ³	500
Solette in cemento armato precompresso	60	Conducibilità	W/m K	1,8
		Calore specifico	J/kg K	1000
		Densità	Kg/m ³	2400

Di seguito è riportata la stratigrafia del Settore 2.

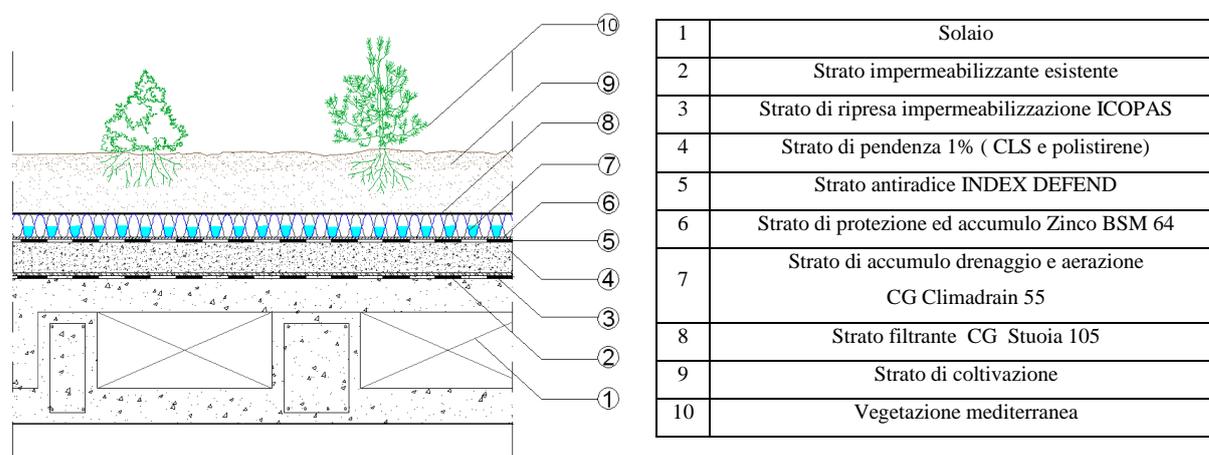


Fig. 4.48. Stratigrafia copertura a verde settore 2

Il Settore 3 è caratterizzato principalmente dalla presenza di uno strato isolante aggiuntivo e dall'assenza dello strato di vegetazione, come di seguito riportato.

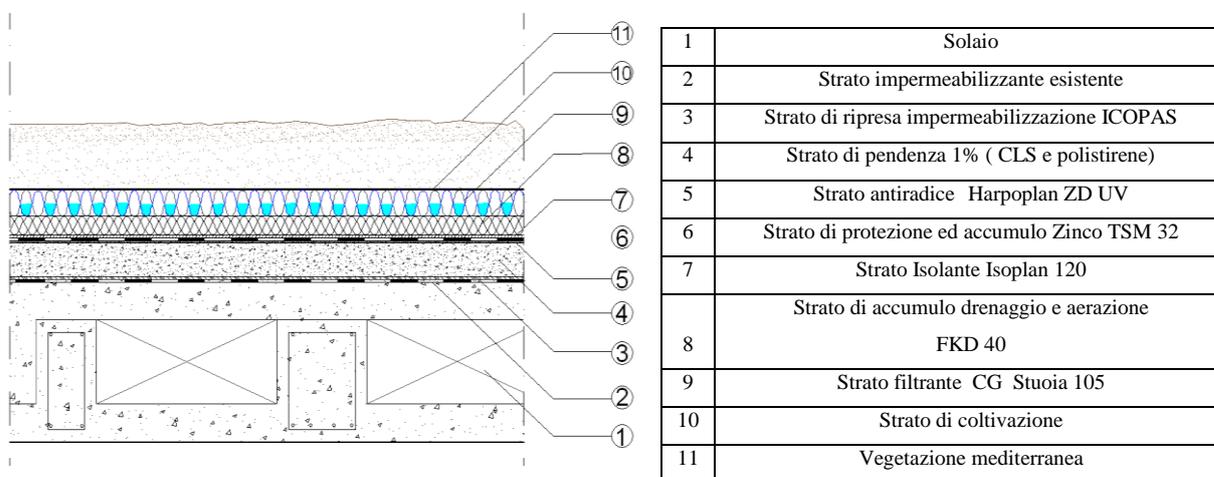


Fig. 4.49. Stratigrafia copertura a verde settore 3

Nelle tabelle precedenti sono state inserite le proprietà dei materiali considerati ai fini modellistici, trascurando strati quali intonaco interno e filtro protettivo di spessore ridotto e quindi poco rilevanti nelle analisi energetiche di seguito conseguite.

Per la modellazione termica della copertura a verde, il software dinamico utilizzato, richiede la specificazione di alcuni valori caratterizzanti la vegetazione ed il substrato colturale. Alcuni di questi valori sono stati ricavati tramite misurazioni in campo sul sito sperimentale del cubo 46C. Per le rimanenti proprietà, di più difficile stima, sono stati considerati i valori di riferimento riportati nella letteratura pertinente. Per maggiori dettagli si rimanda al capitolo 5.

Tabella 4.2. Proprietà della vegetazione

Altezza fogliame	0,30 m
LAI	4,0 m ² /m ²
Emissività	0,95 [10]
Riflessione	0,2 [12]
Resistenza stomatica minima	200 s/m [12]
Umidità massima in saturazione	0,40 m ³ /m ³
Umidità residua	0,01 m ³ /m ³ [13]
Umidità iniziale	0,1 m ³ /m ³

4.2.2 Generazione dei templates

Per cercare di ottenere risultati il quanto più possibile rispecchianti la situazione reale, sono stati opportunamente definiti nel software di simulazione i *templates* delle attività che includono: la definizione delle zone termiche, degli apporti interni, del periodo di riscaldamento e di raffreddamento con le relative temperature si *set-point*, e della ventilazione meccanica, così come illustrato in dettaglio nel seguito.

I *Templates* delle attività definiscono l'utilizzo delle zone in cui è stato suddiviso l'edificio. I dati che devono essere inseriti riguardano l'occupazione, l'uso delle attrezzature, le temperature interne di progettazione, i livelli d'illuminazione e di ventilazione. I *Templates* delle attività realizzati per il cubo 46C sono tre:

- Zone semi esterne non condizionate,
- Zone ufficio,
- Zone di passaggio.

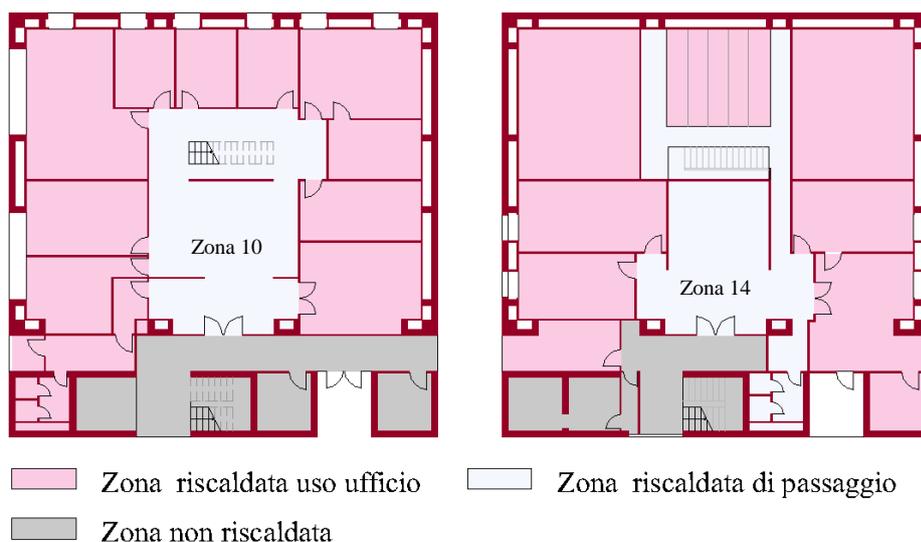


Fig. 4.50. Zonizzazione termica del terzo e quarto piano

Dalle due piante si nota che le zone esposte ad est, evidenziate in pianta dal colore grigio, sono zone esterne non condizionate, difatti essendo zone di collegamento tra i vari piani (vi sono scale, ascensori, disimpegni e servizi igienici) non prevedono alcun impianto di riscaldamento o raffreddamento.

Per il settaggio degli apporti interni i valori utilizzati sono stati estratti dalla norma UNI TS 11300-1 relativa alla determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. Tale norma riporta due differenti metodologie di calcolo degli apporti interni: una globale, generalmente impiegata in fase di progetto per la certificazione energetica dell'edificio, una dettagliata, maggiormente adatta alla definizione dell'audit energetico e della verifica dei consumi reali di un edificio già esistente. Il caso studio attinge ai valori dettagliati dei profili temporali degli apporti termici degli occupanti e delle apparecchiature. Per edifici adibiti ad uffici è stato utilizzato il prospetto 10 della norma UNI TS 11300-1 di seguito riportata [14]:

Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature (edifici adibiti ad uffici)

Giorni	Ore	Ambienti ufficio (60% della superficie utile di pavimento) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m ²	Altre stanze, atri, corridoi (40% della superficie utile di pavimento) $(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})/A_f$ W/m ²
Lunedì - Venerdì	07.00 - 17.00	20,0	8,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	9,50	3,92
Sabato - Domenica	07.00 - 17.00	2,0	1,0
	17.00 - 23.00	2,0	1,0
	23.00 - 07.00	2,0	1,0
	Media	2,0	1,0
Media		7,4	3,1

$(\Phi_{\text{int,Oc}} + \Phi_{\text{int,A}})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_f è la superficie utile di pavimento.

Fig. 4.51. Profili temporali degli apporti termici dagli occupanti e dalle apparecchiature per edifici adibiti ad uffici.

Quindi :

- Per il Template “Zona Ufficio” si ha un apporto interno raggruppato di massimo 20 W/m²;
- Per il Template “Zona di passaggio” si ha un apporto raggruppato di massimo 8 W/m².

Relativamente al raffrescamento e al riscaldamento si definiscono le temperature di set-point e set-back rispettivamente a 26 °C e 35 °C nel primo caso, 20 °C e 5 °C nel secondo.

È stata inoltre definita una *Schedule* di funzionamento sia per l’impianto di raffrescamento che di riscaldamento. La *Schedule*, infatti, rappresenta i profili di funzionamento dei sistemi di climatizzazione per fase orarie quotidiane, giorni della settimana, mesi e anno; tali indicazioni dipendono dalla città di appartenenza dell’edificio in esame, e in particolare della fascia climatica in cui tale città ricade. Il valore di aria minima di rinnovo inserito è stato ricavato dalla normativa UNI 10339 [15] e viene determinato come prodotto tra l’aria minima di rinnovo, per uso ufficio, pari a 11 l/s per persona e l’indice di affollamento pari a 0,06 persona/mq. Il valore definitivo inserito nel codice risulta, pertanto 0,66 l/s m².

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{00} (10^{-3} m ³ /s per persona)	Q_{0e} (10^{-3} m ³ /s m ²)	
EDIFICI ADIBITI A RESIDENZA E ASSIMILABILI			
RESIDENZE A CARATTERE CONTINUATIVO			
- Abitazioni civili:			
• soggiorni, camere da letto	11	-	A
• cucina, bagni, servizi		estrazioni	
- Collegi, luoghi di ricovero, case di pena, caserme, conventi:			
• sale riunioni	9*	-	-
• dormitori/camere	11	-	-
• cucina	-	16,5	-
• bagni/servizi		estrazioni	A
RESIDENZE OCCUPATE SALTUARIAMENTE			
Vale quanto prescritto per le residenze a carattere continuativo			
ALBERGHI, PENSIONI ecc.			
• ingresso, soggiorni	11	-	-
• sale conferenze (piccole)	5,5*	-	-
• auditori (grandi)	5,5*	-	-
• sale da pranzo	10	-	-
• camere da letto	11	-	-
• bagni, servizi		estrazioni	-
EDIFICI PER UFFICI E ASSIMILABILI			
• uffici singoli	11	-	-
• uffici open space	11	-	-
• locali riunione	10*	-	-
• centri elaborazione dati	7	-	-
• servizi		estrazioni	A

Fig. 4.52. Portata dell'aria esterna in edifici adibiti ad uso civile, UNI 10339.

4.2.3 Simulazione energetica della copertura a verde

Eseguita la modellazione geometrica dell'edificio, la definizione delle proprietà dei materiali, degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, della destinazione d'uso e dei dati climatici del sito in cui il cubo universitario è collocato, si è proceduto con la simulazione dinamica attraverso l'ausilio del codice Energy Plus, attraverso cui è stato possibile risalire all'entità dei consumi energetici degli impianti, considerati a regime discontinuo, ossia con funzionamento esclusivo nelle ore e nei giorni lavorativi. La durata di funzionamento degli impianti di climatizzazione, è determinata in funzione della zona climatica di appartenenza. Essendo il cubo universitario situato a Rende, e rientrando di conseguenza nella zona climatica D, viene ritenuta stagione di riscaldamento, come dettato dalla norma UNI TS 11300 [14], il periodo intercorrente tra il 1° Novembre e il 15 Aprile; quella di raffrescamento comprende, in maniera semplificata, i rimanenti mesi dell'anno.

Le analisi verificanti le prestazioni termiche della copertura a verde sono state effettuate ponendo a confronto i consumi energetici dell'edificio (di cui si sono presi in considerazione solamente i due livelli sottostanti alla copertura) con diverse ipotesi di realizzazione della tipologia di copertura:

- 1 Copertura interamente costituita da solaio tradizionale in c.a.p. (Caso di riferimento);
- 2 Copertura interamente costituita dalla stratigrafia "Settore 1";
- 3 Copertura interamente costituita dalla stratigrafia "Settore 2";

- 4 Copertura interamente costituita dalla stratigrafia “Settore 3”;
- 5 Copertura con presenza contemporanea di 4 differenti settori, data dalla combinazione delle tipologie precedentemente elencate, così come si presenta in realtà il sito sperimentale.

Le coperture appena definite sono state ipotizzate esclusivamente sulla porzione di tetto corrispondente agli ambienti riscaldati, ad esclusione di quella parte occupata dalla lamiera zincata. In relazione a tutta la superficie della copertura, pari a 414,2 m², la lamiera zincata ne rappresenta un 17,7%, la porzione di tetto corrispondente alla zona non riscaldata è pari al 13,0% , mentre la porzione di copertura su cui sono state disposte le differenti stratigrafie da analizzare corrisponde al 69,3%.

Copertura tradizionale.

Tale tipo di copertura presenta un valore di trasmittanza globale pari a 0,59 W/m²K. Vengono di seguito riportati i risultati delle simulazioni, espressi in termini di fabbisogni mensili per il riscaldamento e per il raffrescamento. I valori sono normalizzati rispetto all’area utile degli ambienti riscaldati ; pertanto sono espressi in Wh/m². Le simulazioni si pongono come riferimento nella valutazione dell’effetto benefico dovuto all’installazione di una copertura vegetata su di un edificio esistente. La differenza tra i risultati delle simulazioni ottenuti nelle ipotesi di installazione delle diverse tipologie di copertura a verde e nell’ipotesi di solaio tradizionale permette di quantificare i risparmi energetici conseguibili, in termini di fabbisogno di energia termica dell’edificio, o meglio degli ultimi due piani (che risentono maggiormente degli effetti del tetto verde).

Tab. 4.3 Fabbisogni termici mensili dell’edificio con copertura tradizionale

	Riscaldamento [Wh/m²]	Raffrescamento [Wh/m²]
Gennaio	5191	0
Febbraio	3480	0
Marzo	1178	0
Aprile	282	0
Maggio	0	-3243
Giugno	0	-6731
Luglio	0	-9078
Agosto	0	-8528
Settembre	0	-5024

Ottobre	0	-897
Novembre	690	0
Dicembre	3736	0
Totale	14558	-33501

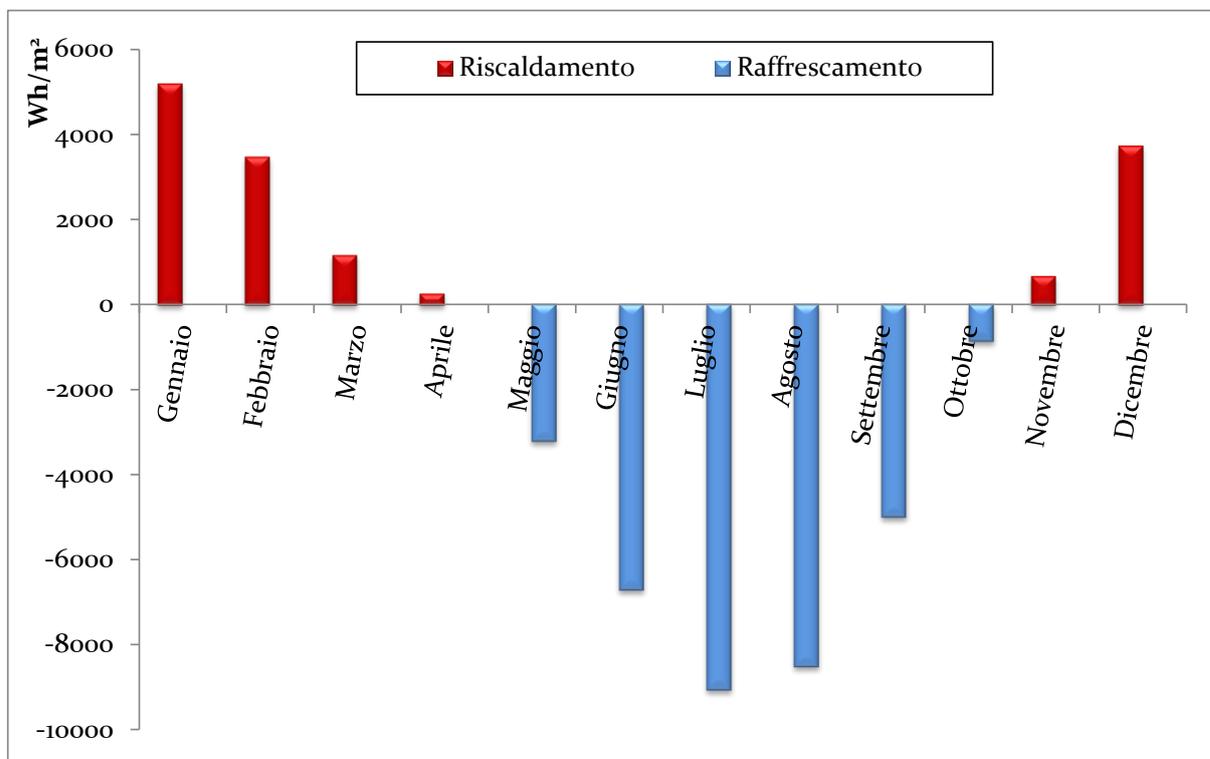


Fig. 4.53. Fabbisogni mensili dell'edificio nel caso di riferimento

Copertura "Settore 1"

Tale tipo di copertura presenta un valore di trasmittanza globale pari a $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. Di seguito si riportano i fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e per il raffrescamento nell'ipotesi che la copertura del cubo 46C sia completamente ricoperta da un tetto verde con stratigrafia pari a quella del Settore 1.

Tab. 3.3 Fabbisogni termici mensili dell'edificio con copertura Settore 1

	Riscaldamento [Wh/m²]	Raffrescamento [Wh/m²]
Gennaio	4416	0
Febbraio	2970	0
Marzo	978	0
Aprile	199	0
Maggio	0	-3166
Giugno	0	-6109

Luglio	0	-8147
Agosto	0	-7719
Settembre	0	-4671
Ottobre	0	-1007
Novembre	459	0
Dicembre	3071	0
Totale	12092	-30819

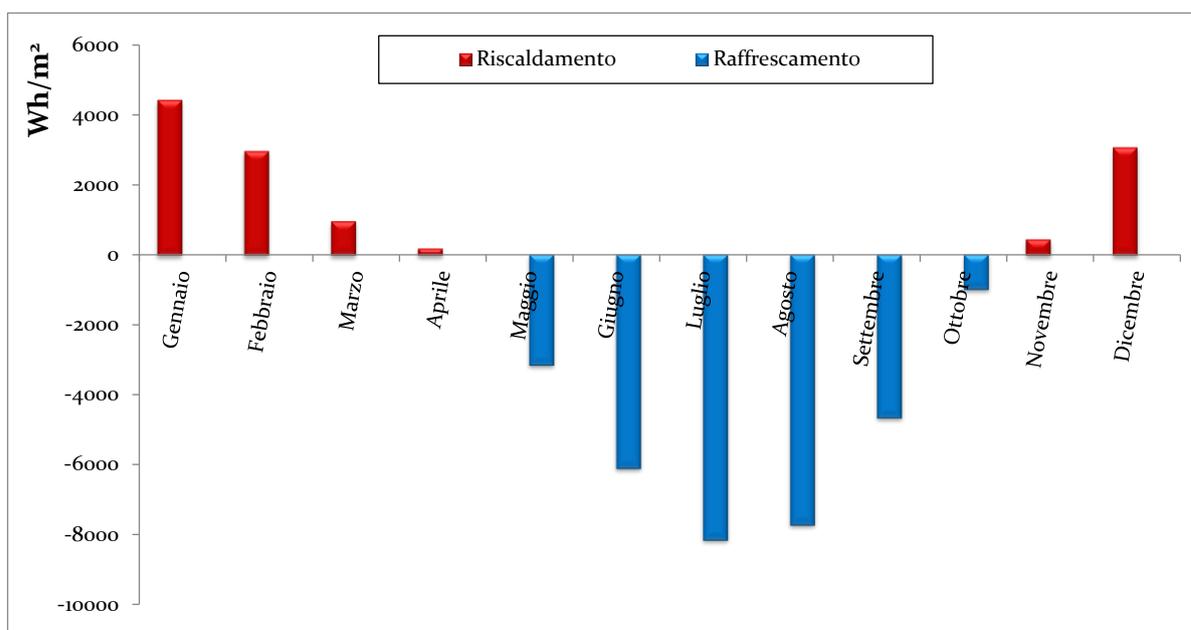


Fig. 4.54. Fabbisogni mensili dell'edificio con copertura Settore 1

Copertura “Settore 2”

Tale tipo di copertura avente un valore di trasmittanza globale pari a $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ equivalente a quella del settore 1. Dalle simulazioni si ottengono risultati identici al caso precedente.

Copertura “Settore 3”

Tale tipo di copertura avente un valore di trasmittanza globale pari a $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$. Di seguito si riportano i fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e per il raffrescamento nell'ipotesi che la copertura del cubo 46C sia completamente ricoperta da un tetto verde con stratigrafia pari a quella del Settore 3.

Tab. 4.4 Fabbisogni termici mensili dell'edificio con copertura Settore 3

	Riscaldamento [Wh/m ²]	Raffrescamento [Wh/m ²]
Gennaio	4190	0
Febbraio	2697	0
Marzo	806	0
Aprile	121	0
Maggio	0	-3668
Giugno	0	-6400
Luglio	0	-8166
Agosto	0	-7878
Settembre	0	-5100
Ottobre	0	-1255
Novembre	338	0
Dicembre	2785	0
Totale	10938	-32467

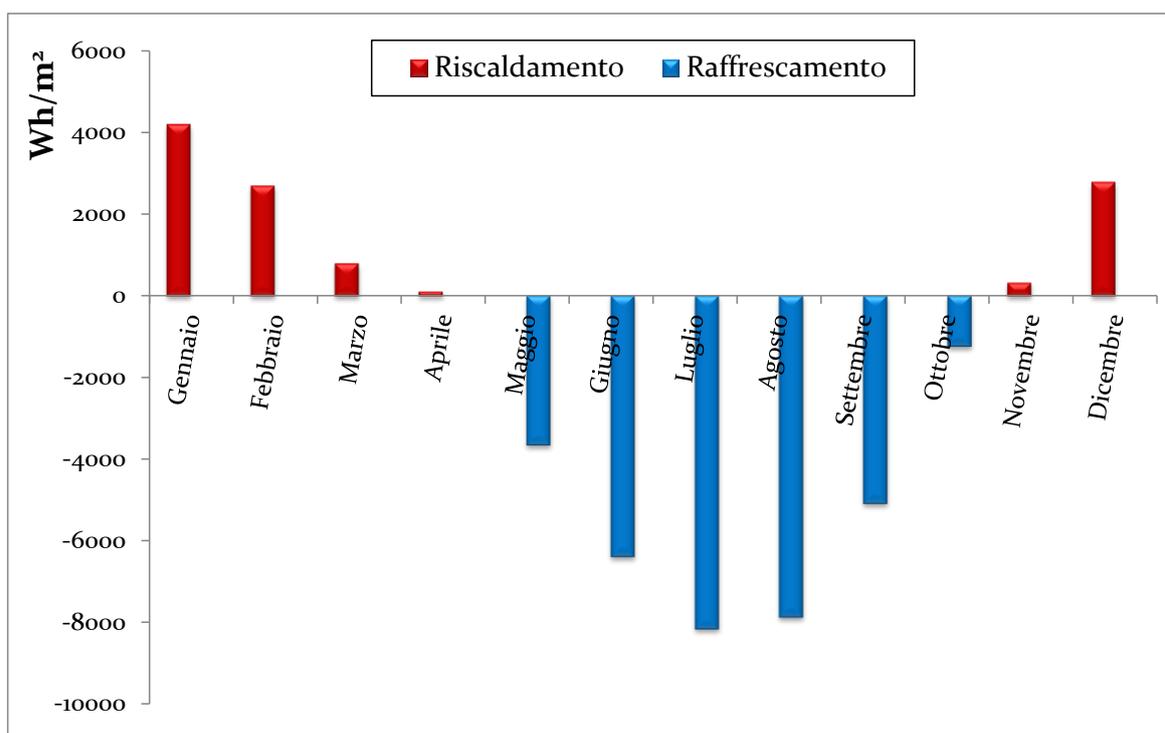


Fig. 4.55. Fabbisogni mensili dell'edificio con copertura Settore 3

Copertura con presenza contemporanea dei 4 settori

Tale simulazione è stata condotta ipotizzando che la porzione di tetto sovrastante gli ambienti riscaldati, sia costituita dalla presenza contemporanea dei quattro settori, come già precedentemente descritti, e rappresenta la situazione reale. Di seguito si riportano i

fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e per il raffrescamento ottenuti tramite la simulazione dinamica.

Tab. 4.5 Fabbisogni termici mensili dell'edificio con copertura 4 Settori

	Riscaldamento [Wh/m ²]	Raffrescamento [Wh/m ²]
Gennaio	4452	0
Febbraio	2955	0
Marzo	944	0
Aprile	178	0
Maggio	0	-3465
Giugno	0	-6551
Luglio	0	-8714
Agosto	0	-8236
Settembre	0	-5023
Ottobre	0	-1075
Novembre	452	0
Dicembre	3086	0
Totale	12066	-33065

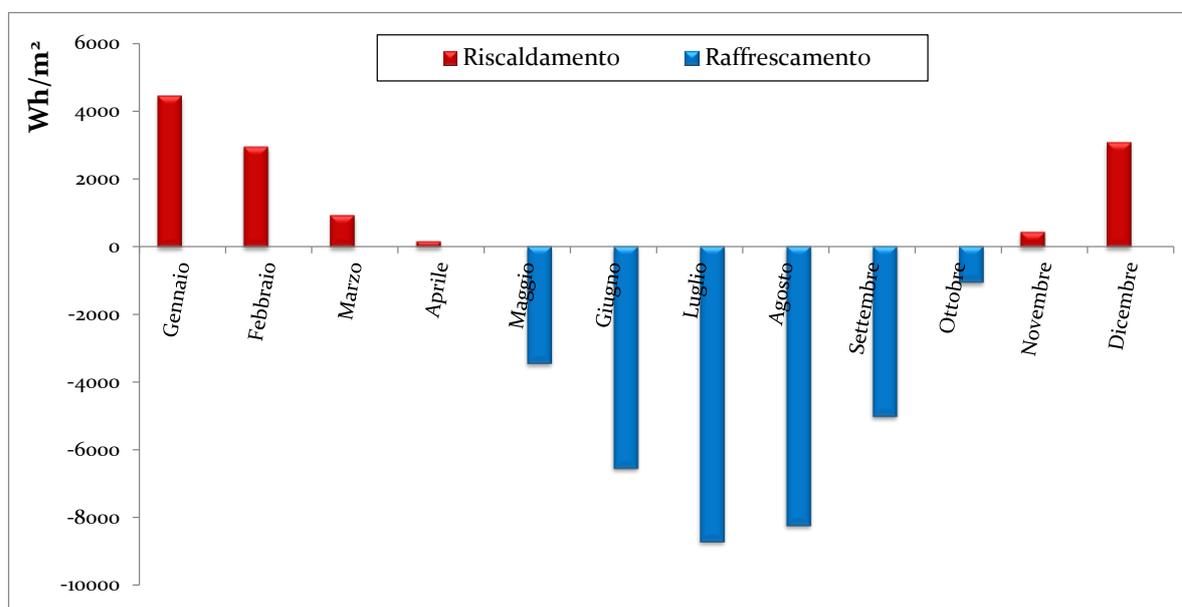


Fig. 4.56. Fabbisogni mensili dell'edificio con i 4 Settori

I grafici seguenti mostrano i fabbisogni di energia termica annuali per il riscaldamento e per il raffrescamento per i diversi casi simulati. Si nota chiaramente l'effetto benefico della presenza di una copertura a verde sulla riduzione dei consumi energetici dell'edificio. La vegetazione scherma la radiazione solare prevenendo il surriscaldamento del tetto verde in estate. Il fogliame assorbe la maggior parte della radiazione solare e la utilizza per le sue

funzioni biologiche come evapotraspirazione, fotosintesi, etc. Durante le stagioni fredde l'evapotraspirazione è limitata e l'ombreggiatura non è un fattore cruciale nel bilancio di energia a causa dei bassi valori di irraggiamento solare. Inoltre, in inverno, la presenza di strati aggiuntivi sulla copertura determina un incremento della resistenza termica dell'intera copertura garantendo migliori livelli di isolamento. Sebbene il livello effettivo di isolamento supplementare fornito sia ancora materia di dibattito, dal momento che è strettamente correlato al contenuto variabile d'acqua del substrato, la maggior parte degli esperti ritiene che l'aggiunta di terreno sulla copertura si possa ritenere come un semplice strato aggiuntivo di isolante che nel peggiore dei casi non incrementa le perdite termiche [16].

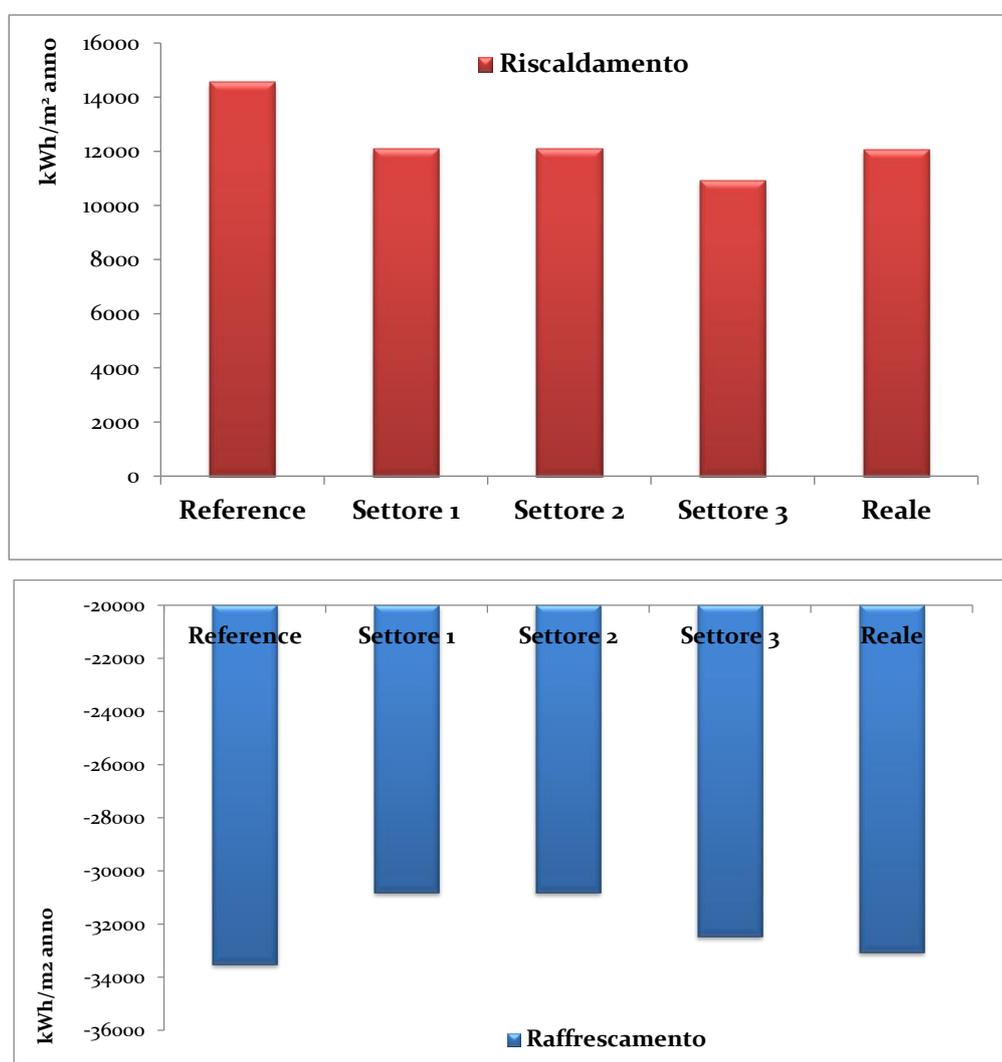


Fig. 4.57. Fabbisogni di energia termica per i diversi casi simulati

I risultati delle simulazioni dimostrano che, relativamente al periodo invernale, la presenza di un tetto verde garantisce in ogni caso un risparmio nel consumo di energia per la climatizzazione. In particolare, tra le differenti tipologie di copertura a verde, la più

performante è risultata quella occupata interamente dal settore 3, con una riduzione del 25%. Esso è caratterizzato, diversamente dagli altri due settori, dalla presenza di uno strato aggiuntivo di isolamento che aumenta la resistenza termica della copertura e permette di conseguire notevoli risparmi energetici.

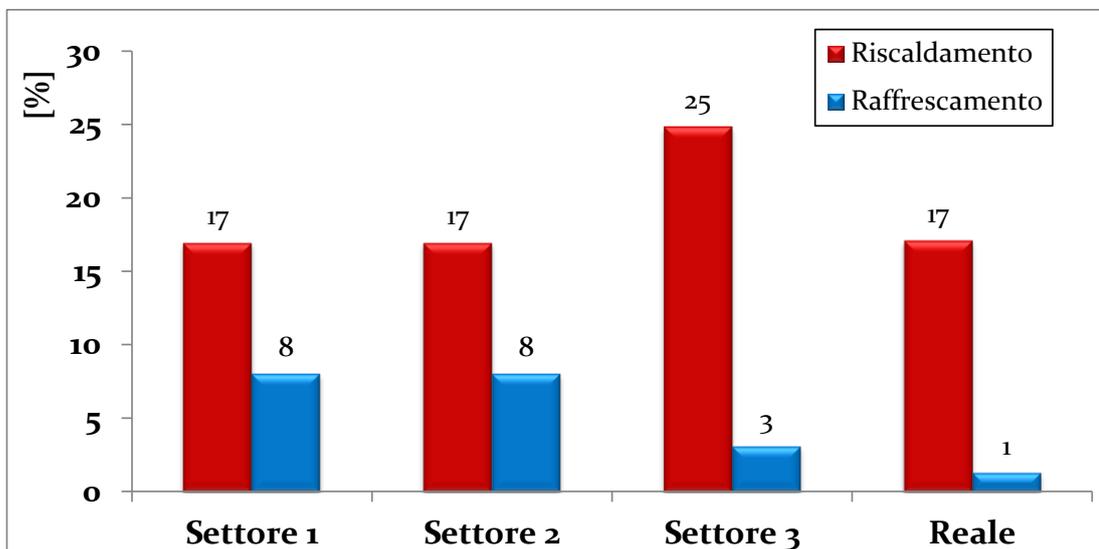


Fig. 4.58. Riduzioni percentuali dei fabbisogni di energia termica

Contrariamente alle performance invernali, nel periodo estivo la presenza dello strato aggiuntivo di isolante congiuntamente all'assenza dello strato vegetativo determina un valore minore di riduzione dei fabbisogni energetici, pari al 3%. La presenza contemporanea dei quattro settori determina in qualche modo prestazioni medie rispetto ai risultati precedenti. Nonostante la riduzione dei consumi invernali equivalga a quella ricavata supponendo la presenza del settore 1 o 2, la riduzione dei consumi estivi si riduce all'1%. Ciò è giustificato considerando che con questa configurazione solo una parte della copertura (settore 1 e 2) presenta vegetazione che produce effetti di raffrescamento passivo, mentre il settore 3, come su descritto, nel periodo estivo produce scarse performance [17]. In definitiva sono riassunti nella tabella seguente le riduzioni percentuali dei fabbisogni totali annui nelle quattro ipotesi di configurazione simulate.

Tab. 3.7. Riduzione percentuale dei fabbisogni termici annuali

	Riduzione Totale [%]
Settore 1	11
Settore 2	11
Settore 3	10
Reale	6

Riferimenti bibliografici

- [1] *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance.* A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou; *Energy and Buildings* 33 (2001) 719-729
- [2] *The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore.* Wong NH, Cheong DKW, Yan H, Soh J, Ong CL, Sia A. *Energy and Buildings* 64 (2003); 35:353
- [3] *Performance evaluation of an extensive green roof.* Liu K, Minor J. National Research Council Canada, Greening Rooftops for Sustainable Communities, Washington, D.C., May 5-6, 2005, 1:11
- [4] *Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon.* Graig Spolek. *Urban Ecosyst* (2008) 11:349–359
- [5] *Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece.* Aikaterini Sfakianaki, Elli Pagalou, Konstantinos Pavlou, Mat Santamouris and M. N. Assimakopoulos. *Int. J. Energy Res.* 2009; 33:1059–1069
- [6] *Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate.* Fioretti R, Palla A, Lanza LG, Principi P. *Building and Environment* 2010; 45:1890–904
- [7] *On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece.* A. Spala, H.S. Bagiorgas, M.N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou. 2008. *Renewable Energy* 33 (2008) 173–177.
- [8] *Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate.* Getter KL, Rowe DB, Andresen JA, Wichman IS. *Energy and Buildings* 2011;43:3548–57

- [9] *Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?*. Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo de' Rossi, Gianluca Turni, Giuseppe Peter Vanoli. *Applied Energy* 104 (2013) 845–859
- [10] “*FASST Vegetation Models*” – S. Frankenstein, g. Koenig, Engineer research and Development Center (2004)
- [11] “*DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation for DesignBuilder v3.1*”
- [12] “*Biosphere-Atmosphere Transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model*” – Dickinson, R. E., A. Henderson – Sellers, P. J. Kennedy, and M. F. Wilson (1986)
- [13] “*Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types*” – Klaas Metselaart, *Resource, Conservation and recycling* 64
- [14] “*Norma UNI TS 11300 – 1*”, Maggio 2009
- [15] “*Norma UNI TS 10339*”, Maggio 2012
- [16] Theodore Theodosiou. *Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour*. *Advances in Building Energy Research*, (2009) 3:1, 271-288
- [17] M. De Simone, F. Reda, P. Bevilacqua, G. Pizzuti, C. Carpino. *Realizzazione di un tetto verde sperimentale per la riqualificazione energetica di un edificio universitario. apparato sperimentale e simulazione energetica*. VII CONGRESSO NAZIONALE AIGE Associazione Italiana Gestione Energia, 10-11 GIUGNO 2013, Università della Calabria, Rende.

Capitolo 5. Modellazione termofisica della copertura a verde

In questo capitolo viene affrontato il tema della modellazione termofisica delle coperture a verde. È dapprima presentata un'analisi di letteratura sui modelli più significativi proposti da vari autori nel corso degli anni che si pongono alla base dello sviluppo di un nuovo modello termofisico. È successivamente presentato il modello sviluppato presso il dipartimento DIMEG dell'università della Calabria e le prime fasi di test e validazione del codice di calcolo numerico associato. Infine sono mostrati i risultati conseguiti durante un periodo di ricerca svolto presso il dipartimento di Idraulica ed Ingegneria Ambientale dell'Università di Belgrado che ha riguardato l'accoppiamento del modello termico della copertura a verde con un modello idraulico.

5.1 Analisi di letteratura dei modelli più significativi

In una prima fase è stata condotta un'analisi ed un confronto dei modelli matematici elaborati nel corso degli anni e descrittivi delle modalità di trasporto di energia termica tra gli strati componenti la copertura a verde e l'ambiente esterno. Sono state individuate a tal fine le modalità di trasmissione di calore e quindi le equazioni di bilancio energetico. Ogni termine presente al loro interno è considerato con approcci diversificati. È impreciso definire un modello più o meno adatto rispetto ad un altro, così come è impossibile definire in assoluto il modello più appropriato da adottare, in quanto, come si vedrà di seguito, ogni modello parte da alcune ipotesi semplificative e considera alcuni fattori in maniera dettagliata trascurandone altri.

Tuttavia alcuni modelli recentemente pubblicati in ambito scientifico internazionale sono supportati da un processo di verifica e di validazione che dimostrano la rispondenza tra i risultati del modello matematico teorico e quelli ottenuti da indagine sperimentale e quindi una corretta trattazione dei fenomeni fisici caratterizzanti la copertura verde. Di seguito si riporta una immagine riassuntiva delle principali modalità di scambio termico presenti nel sistema in esame:

$Q_{g,sensibile}$: flusso di calore sensibile del terreno [W/m^2];

$Q_{f,sensibile}$: flusso di calore sensibile del fogliame [W/m^2];

L_g : flusso di calore latente del terreno [W/m^2];

L_f : flusso di calore latente del fogliame [W/m^2];

L_w : radiazione a onde lunghe [W/m^2];

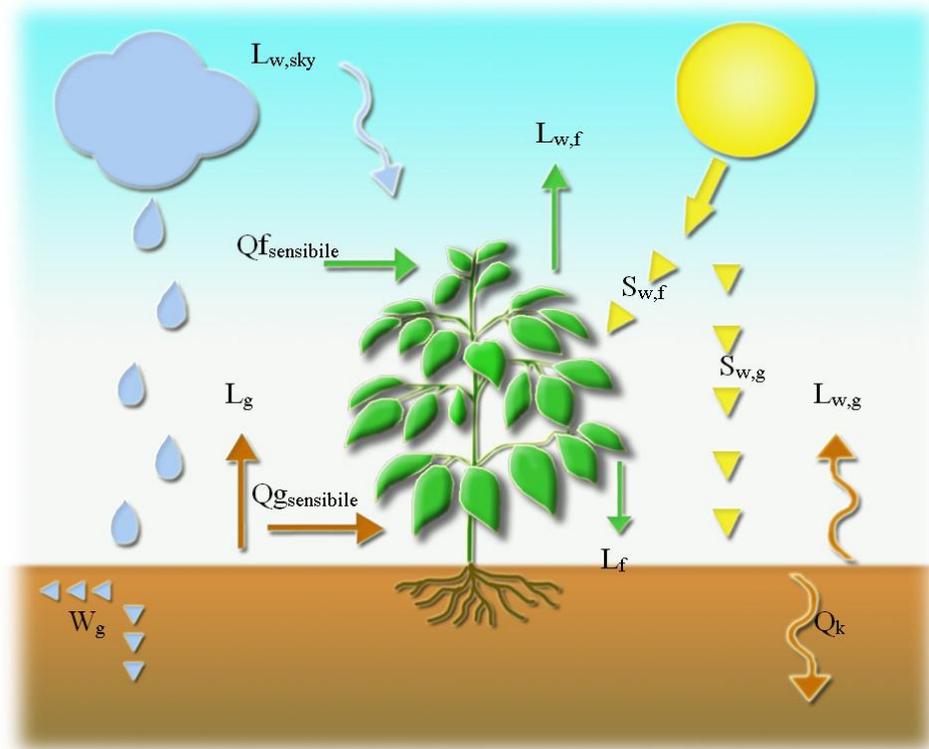


Fig. 5.1. Principali modalità di scambio termico nel sistema terreno – vegetazione – ambiente esterno

S_w : radiazione a onde corte [W/m^2];

Q_k : calore conduttivo trasmesso all'interno del terreno [W/m^2];

W_g : contenuto d'acqua volumetrico.

È possibile definire una equazione globale di bilancio energetico che descriva in via del tutto generale i processi esistenti, i quali saranno esplicitati nei modelli di seguito proposti in maniera dettagliata e con differenti livelli di dettaglio:

$$R_n = L + Q_{\text{sensibile}} + Q_{\text{conduttivo}} + B$$

R_n : contributo radiativo che si compone di una aliquota a onde corte proveniente dal sole e una a onde lunghe. La maggior parte dell'energia radiante che raggiunge la superficie terrestre è a onde corte, una parte della quale è riflessa dalle superficie su cui incide. La frazione percentuale di energia riflessa, definita albedo, dipende sia da fattori ambientali variabili nel

tempo, come l'altezza del sole sull'orizzonte, sia dalle caratteristiche della superficie raggiunta dai raggi solari. La vegetazione riflette solitamente una frazione di radiazione superiore rispetto a terreno. Parte dell'energia radiativa assorbita dalla terra viene irradiata nuovamente verso l'atmosfera nel campo delle onde lunghe, infrarosso, in maniera proporzionale alla temperatura superficiale. Lo stesso accade per i gas che costituiscono l'atmosfera, che riflettono a loro volta tale energia nello stesso campo di lunghezza. Pertanto la radiazione netta, considerata ai fini del bilancio, risulta essere una combinazione di radiazione a onde lunghe e onde corte. In definitiva, i contributi radiativi individuabili in presenza di tetto verde sono:

- Radiazione a onde corte incidente sul fogliame;
- Radiazione a onde corte incidente sul terreno;
- Radiazione a onde lunghe tra vegetazione e ambiente esterno;
- Radiazione a onde lunghe tra vegetazione e terreno;
- Radiazione a onde lunghe tra terreno e ambiente esterno.

$Q_{sensibile}$: flusso di calore sensibile, ovvero il calore scambiato tra il suolo e lo strato di aria a contatto, oppure tra la vegetazione e l'aria circostante, per effetto di un gradiente termico che genera dei moti d'aria e quindi la propagazione del calore nello strato limite per convezione naturale.

L : flusso di calore latente, trasmesso per variazione di stato liquido-vapore; Esso è legato ai fenomeni evapotraspirativi, ossia alla evaporazione del terreno e alla traspirazione delle piante; non è da trascurare, anche se di entità minore rispetto al precedente, il contributo di calore latente che si propaga all'interno del terreno. Nei processi latenti è fondamentale la presenza dell'acqua; la sua assenza tende ad annullare il contributo latente portando alla trasformazione del contributo radiativo incidente in parte in calore di tipo sensibile e in parte in flusso conduttivo all'interno del terreno.

$Q_{conduttivo}$: flusso di calore nel suolo, ovvero il calore trasferito dalla superficie verso gli strati sottostanti innescato sempre da un gradiente di temperatura e dipendente dalla conducibilità termica dello strato che si sta analizzando. Tale termine può assumere valori positivi o negativi a seconda che ci sia in corso un riscaldamento o un raffreddamento della superficie. La conducibilità termica è strettamente legata alle condizioni di umidità del suolo, in quanto l'aria, cattivo conduttore di calore, presente nei pori, può essere sostituita da acqua, che invece costituisce un buon conduttore.

B: energia immessa nella biosfera ad opera del processo di fotosintesi delle piante, le quali, utilizzando l'energia derivante dalla luce solare, acqua e anidride carbonica, liberano ossigeno e producono biomassa. Questo contributo viene in genere trascurato.

Dall'analisi di letteratura si evince l'incisiva complessità della trattazione del problema, a causa della moltitudine di parametri che influenzano i processi di scambio termico e della loro interazione. Per tale motivazione i primi modelli risultano approssimativi e poco rappresentativi del reale comportamento di una copertura verde: Eumorfopoulou (1998) [1] e Nichau (2001) [2] investigano le caratteristiche principali di tale tecnologie, ma trascurano processi essenziali quali il fenomeno dell'evapotraspirazione e la presenza del contenuto d'acqua come fattore influenzante la conducibilità del terreno. Tali modelli inoltre non definiscono un vero e proprio bilancio energetico quantificando i processi di scambio di calore. Successivamente sono stati sviluppati modelli più complessi che analizzano i processi termici partendo da alcune assunzioni di base semplificative; quelle comuni a tutti i modelli studiati sono:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- Il fenomeno biochimico, quale la fotosintesi, è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.

Tali modelli, procedendo con differenti discretizzazioni, analizzano nel dettaglio alcuni contributi, ma ne trascurano altri, come per esempio il bilancio di massa, risultando talvolta incompleti. Il modello di Elena Palomo Del Barrio nel 1998 [3], propone per la prima volta una formulazione completa molto accurata della definizione del bilancio energetico globale; si fonda, infatti sul trasferimento di calore e di massa, anche se il contenuto d'acqua è considerato costante e si trascura la resistenza stomatica delle piante. Tale modello è stato poi ripreso da Kumura nel 2005 [4], il quale ha incorporato il modello su un sistema di simulazione basato sulle trasformazioni di Fourier in Matlab e poi è stato testato per mezzo di una sperimentazione su larga scala con un tetto verde realizzato in India. Anche il modello matematico formulato da Lazzarin [5] tiene in considerazione il contenuto d'acqua presente nel terreno come fattore incidente sul bilancio energetico complessivo; i flussi convettivi e

radiativi, tuttavia, risultano analizzati in modo alquanto approssimativa attraverso l'equazione di Penam-Monteith ed il coefficiente di adduzione che trascura la resistenza stomatica delle piante. Pertanto tale modello è stato validato con dati sperimentali solo in condizioni di terreno secco. Alexandri nel 2007 [6] sviluppa un modello matematico fondato sul bilancio di calore e di massa e introduce la resistenza stomatica delle foglie. Effettua una sperimentazione su piccola scala al fine di validare tale modello che, tuttavia, risulta approssimativo in quanto trascura il flusso di precipitazione o l'irrigazione, scostandosi dalla condizione reale caratterizzante una copertura verde. Un modello complesso e dettagliato è stato proposto da Sailor nel 2008 [7], il quale sviluppa un modello fondato sulle equazioni di bilancio energetico e di massa del FASST [8]; analizza nel dettaglio ogni tipologia di scambio termico interessante il sistema terreno - vegetazione - ambiente esterno, anche se si propone una rappresentazione semplificata del bilancio di acqua e una conducibilità termica del terreno costante. Tale modello è stato poi implementato con il programma di simulazione Energy Plus e validato con dati sperimentali. Il modello è stato poi ripreso nel 2012 da Jaffal [9] che ha simulato e ulteriormente convalidato tale modello soffermandosi sull'impatto della copertura verde sul risparmio energetico, e da Eddine Ouldboukhidine [10] nello stesso anno; egli ha modificato il modello di Sailor con l'introduzione della variabilità della conducibilità termica del terreno attraverso una funzione lineare dipendente dal contenuto d'acqua. Lo stesso autore, poi, nel 2012 ha ripreso il modello precedente arricchendolo della resistenza stomatica delle piante e della presenza del vento.

Nel 2010 Feng e Meng [11] hanno proposto un modello matematico, fondato sempre sul bilancio di calore e di massa, visto la notevole ingerenza del contenuto di acqua sul bilancio energetico globale; si tratta di un approccio pratico e semplificato, fondato per la maggior parte su formulazioni di natura empirica che considera un contributo nuovo rispetto agli studi precedenti, quale il processo di fotosintesi delle piante, ma trascura fenomeni fondamentali come il flusso di precipitazione e la presenza di acqua nel terreno.

Jim e Tsang [12], invece, propongono nel 2011 un modello matematico teorico al fine di individuare la capacità isolante degli strati abiotici, quali drenaggio e impermeabilizzazione, oltre al terreno, costituenti il tetto verde e la loro influenza sulla riduzione del trasferimento di calore tra esterno-interno. Il modello, le cui formulazioni sono prevalentemente di natura empirica, è stato inoltre validato con tre differenti procedure sperimentali. Tale modello rappresenta un'analisi innovativa in relazione alla trattazione degli scambi di calore e di massa riguardanti il terreno in quanto viene proposta la dipendenza della conducibilità termica in funzione del contenuto d'acqua presente nello strato. Uno studio simile è stato condotto

sempre dagli stessi autori, nel 2011 per una copertura verde tropicale anche se l'aspetto conduttivo non viene trattato con analogo interesse e approfondimento. Per ultimo, ma di notevole importanza, è il modello sviluppato da Tabares-Velasco [13], il quale si fonda su un bilancio di massa e di calore per tre differenti condizioni: copertura parziale, totale o assenza di vegetazione. Richiama alcune formulazioni fisiche già adottate nei precedenti studi ed effettua per alcune di esse delle modifiche, in particolar modo relativamente alla trattazione della evapotraspirazione; introduce inoltre una nuova equazione lineare della conducibilità termica del terreno in funzione del contenuto di acqua. I dati sperimentali hanno validato il modello proposto.

Modello n°1

Titolo:

A green roof model for building energy simulation programs.

Autori:

D.J.Sailor [7]

Anno:

2008.

Obiettivi:

Lo studio mira alla definizione di un modello fisico, rappresentante il bilancio energetico di una copertura a verde, da poter implementare nei programmi di simulazione energetica dinamica. Il modello in esame è stato, infatti, incorporato nel software Energy Plus, sviluppato dall' US Department of Energy.

La formulazione del modello in esame si fonda su quello dell'Army Corps of Engineers' FASST [8], con l'apporto di alcune modifiche.

Assunzioni:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- Il fenomeno di fotosintesi delle piante è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;

- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.
- Inerzia termica del substrato trascurata;
- Conducibilità termica del terreno costante;
- Equazione di massa semplificata, con flusso di calore dovuto al trasporto verticale di acqua nel terreno trascurata;
- Substrato colturale parzialmente coperto da vegetazione;
- Flusso di precipitazione trascurato.

Descrizione del modello:

Analogamente a un tetto tradizionale, l'equazione di bilancio energetico di una copertura a verde è dominato dai contributi radiativi provenienti dal sole, bilanciati dai flussi sensibili (convettivi), latenti (evaporativi) derivanti dal terreno e dalla superficie delle piante, dal flusso conduttivo presente all'interno del substrato colturale e dal contributo termico radiativo nell'infrarosso entrante ed uscente sia dal terreno che dalla superficie delle foglie.

Il modello in esame, di seguito rappresentato, definisce due equazioni di bilancio all'interfaccia vegetazione – ambiente esterno e all'interfaccia vegetazione – terreno. Tali equazioni vengono poi linearizzate secondo Deardorff [14] e risolte simultaneamente, ottenendo così i valori di temperatura del terreno e del fogliame.

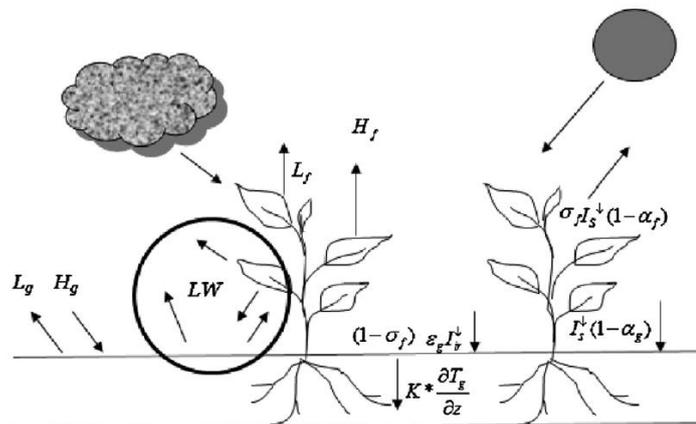


Fig. 5.2. Rappresentazione degli scambi termici tra vegetazione – terreno - ambiente esterno

H_g :flusso di calore sensibile del terreno [W/m^2];

H_f :flusso di calore sensibile del fogliame [W/m^2];

L_g : flusso di calore latente del terreno [W/m^2];

L_f : flusso di calore latente del fogliame [W/m^2];

LW : radiazione a onde lunghe [W/m^2];

I_s : radiazione solare [W/m^2];

Equazione di bilancio energetico sul fogliame.

$$F_f = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

- F_f : flusso di calore netto del fogliame [W/m^2].
- I_s : flusso radiativo totale entrante a onde corte [W/m^2].
- I_{ir} : flusso radiativo totale entrante a onde lunghe [W/m^2].
- T_f : temperatura del fogliame [K].
- T_g : temperatura superficiale del terreno [K].
- α_f : albedo a onde corte della vegetazione, funzione del tipo di vegetazione e della stagione. Tale parametro rappresenta la riflessività della superficie alla incidenza della radiazione solare.
- $\varepsilon_f = 0.90 + F(T_g)[0.96 - 0.90]$ è l'emissività della vegetazione considerata di valore equivalente al coefficiente di assorbimento del fogliame nell'infrarosso a^{air} ;
- $F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$.
- $\varepsilon_g = 0.92 \div 0.97$ indica l'emissività della superficie del terreno.
- $\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$
- σ : costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$].
- σ_f : frazione di copertura vegetativa. Se tale valore non è noto, può essere calcolato usando il metodo sviluppato da Ramirez e Senarath [15]:

$$\sigma_f = \begin{cases} \sigma_f = 1 - \exp(-0.75LAI) & \text{per piante grasse} \\ \sigma_{f,max} & T_g > 298.0 \quad \text{per altri tipi di piante} \\ \sigma_{f,min} & T_g < 273.15 \\ \sigma_{f,max} - [1 - F(T_g)][\sigma_{f,max} - \sigma_{f,min}] & 273.15 \leq T_g \leq 298.0 \end{cases}$$

Dove

$$LAI = LAI_{min} + F(T_g)[LAI_{max} - LAI_{min}]$$

$$F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$$

I valori di LAI_{max} , LAI_{min} , $\sigma_{f,min}$, $\sigma_{f,max}$ sono definiti in tabella:

Tab - 5.1 Proprietà della vegetazione di bassa altezza [FASST]

Biome	high/ medium/ low	$\sigma_{f,max}^*$ (%)	$\sigma_{f,min}^*$ (%)	LAI_{max}^* (m ² /m ²)	LAI_{min}^* (m ² /m ²)	SIA^* (m ² /m ²)
crop	m	85	25	6.0	0.5	0.5
short grass	l	80	70	2.0	0.5	4.0
tall grass	m	80	50	6.0	0.5	2.0
desert	l	5	0	2.0	0	0.5
tundra	m	60	40	6.0	0.5	0.5
irrigated crops	m	80	20	6.0	0.5	0.5
semidesert	m	10	0	6.0	0.5	2.0
bog/marsh	l	80	40	6.0	0.5	2.0
evergreen shrub	h	80	60	6.0	5.0	2.0
deciduous shrub	h	80	50	6.0	1.0	2.0

Il termine LAI [m²/m²] è definito come l'area totale occupata dalla proiezione orizzontale delle foglie.

- $\sigma_f I_s (1 - \alpha_f)$: flusso solare a onde corte assorbito dalla vegetazione al netto del contributo riflesso dalla stessa.
- $\sigma_f \varepsilon_f I_{ir}$: aliquota di radiazione entrante nell'infrarosso assorbita dalla vegetazione, in funzione della emissività del fogliame.
- $\sigma_f \varepsilon_f \sigma T_f^4$: flusso radiativo nell'infrarosso uscente dalla vegetazione e dipendente dalla costante di Boltzmann, dalla temperatura del fogliame e dalla sua emissività. La somma di tali tre contributi rappresenta lo scambio radiativo, a onde lunghe e corte, vigente tra vegetazione e ambiente esterno.
- $\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$: scambio radiativo tra vegetazione e terreno, includente la aliquota emessa e assorbita dalla vegetazione; essa è ottenuta attraverso il metodo additivo del trasferimento radiativo di due strati caratterizzati da riflessioni multiple.
- $H_f = (1.1 LAI \rho_{af} C_{p,a} C_f W_{af}) (T_{af} - T_f)$ è il trasferimento di calore sensibile tra il fogliame e l'aria esistente tra le foglie [W/m²];
 LAI : indice di area fogliame [m²/m²];
 $(T_{af} - T_f)$: differenza di temperatura tra l'aria presente tra le foglie e la vegetazione, con $T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g)$ formulato secondo Deardorff in funzione della temperatura del terreno T_g , della temperatura del fogliame T_f e della temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misurazione T_a [14];

$\rho_{af}=0.5(\rho_a + \rho_f)$ rappresenta la densità dell'aria nel fogliame [kg/m^3] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria ρ_a e della vegetazione ρ_f , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_{p,a}=1005.6$ [J/kgK] è il calore specifico dell'aria a pressione costante;

$C_f=0.01 \left(1 + \frac{0.3}{W_{af}}\right)$ è il coefficiente di bulk, definito da Deardorff [14] in funzione della

velocità del vento tra le foglie $W_{af}=0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f + (1-\sigma_f)W'}$;

W' : velocità del vento corretto [m/s] corrispondente a

$$W' \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato $W'=W$ essendo $W > 2$ m/s .

$C_{hn}^f = \left[k / \ln \left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f} \right) \right]^2$ rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della

sommità del fogliame indicativo del trasferimento di impulso tra atmosfera e fogliame.

$k=0.4$ è la costante di Von Karman, z_0^f è indice della scabrezza [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero; z_a e z_d rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di Z_f corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [18]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

- $L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat})$ è il flusso di calore latente scambiato tra il fogliame e l'atmosfera circostante, definita dalle formulazioni di Deardorff [W/m^2] [14].

LAI : indice di area fogliame [m^2/m^2];

$l_f = 1.91846 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2$ calore latente di vaporizzazione [J/kg] definito secondo

Henderson-Sellers in funzione della temperatura del fogliame T_f [16];

$(q_{af} - q_{f,sat})$: descrive la differenza tra il titolo della miscela di aria in corrispondenza della superficie della vegetazione e titolo della miscela di aria satura del fogliame; in particolare si avrà secondo Balik e Deardorff:

$$q_{af} = \frac{[(1-\sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat} \cdot r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{[1-\sigma_f[0.6(1-r'') + 0.1(1-M_g)]}$$

Con q_a la porzione di aria mista ed $M_g=0\div 1$ è il fattore rappresentante la porzione di contenuto d'acqua volumetrico nel terreno in relazione alla sua porosità.

$\rho_{af} = 0.5(\rho_a + \rho_f)$ rappresenta la densità dell'aria nel fogliame [kg/m^3] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria ρ_a e della vegetazione ρ_f , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_f = 0.01 \left(1 + \frac{0.3}{W_{af}}\right)$ è il coefficiente di bulk per flusso di calore turbolento nel fogliame, definito da Deardorff [14] in funzione della velocità del vento tra le foglie

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f + (1-\sigma_f)W'};$$

W' : velocità del vento corretto [m/s] corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato $W'=W$ essendo $W > 2$ m/s.

$C_{hn}^f = \left[k / \ln \left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f} \right) \right]^2$ rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame per condizioni atmosferiche neutrali;

$k=0.4$ è la costante di Von Karman, z_0^f è indice della scabrezza del fogliame [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero; z_a e z_d rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di Z_f corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [22]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s}$ rappresenta il fattore di umidità della superficie del fogliame, dato dalla combinazione della resistenza aerodinamica e di quella stomatica alla diffusione del vapore;

$r_a = \frac{1}{C_f W_{af}}$ è la resistenza aerodinamica funzione del coefficiente di bulk per trasmissione di calore turbolento nel fogliame C_f e della velocità del vento all'interfaccia fogliame-aria W_{af} [m/s];

$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$ rappresenta la resistenza stomatica della vegetazione alla diffusione del vapore [s/m]. Il fenomeno traspirativo delle piante, infatti, viene controllato dal movimento di apertura e chiusura degli stomi che varia a seconda dell'intensità di illuminazione, del contenuto d'acqua del terreno e della differenza di pressione tra l'interno della foglia e l'aria limitrofa.

$r_{s,min}$: resistenza stomatica minima;

L'inverso dei fattori f_1 , f_2 , f_3 è determinato attraverso la formulazione di Koenig [17] come segue:

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[1, \frac{0.04 I_s + 0.005}{0.81 \cdot (0.004 I_s + 1)} \right]$$

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 & \text{quando } \theta_r > \theta' \\ \frac{\theta' - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} & \text{quando } \theta_r \leq \theta \leq \theta' \end{cases}$$

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat} - e_a)]$$

Con:

I_s : flusso radiativo totale entrante a onde corte [W/m^2].

g_d : caratteristica specifica delle piante diversa da zero solo per gli alberi;

$e_{f,sat}$: pressione di vapore saturo alla temperatura del fogliame [Pa];

e_a : pressione di vapore dell'aria [Pa];

θ_r : valore del contenuto di acqua residuo, in corrispondenza del quale le piante iniziano ad appassire [m^3/m^3]; generalmente esso corrisponde a $\theta_r = 0.01 m^3/m^3$;

θ' : contenuto di acqua nella zona delle radici [m^3/m^3];

θ_{max} : massimo contenuto di acqua che un particolare tipo di terreno può trattenere e oltre il quale l'acqua non può essere più assorbita [m^3/m^3]; esso generalmente varia tra $0.3 \div 0.6 m^3/m^3$;

Equazione di bilancio energetico sul terreno.

$$F_g = (1 - \sigma_f)[I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

- $\alpha_g = 0.23 \div 0.40$ è l'albedo a onde corte della superficie del terreno, funzione del tipo di terreno.
- $\varepsilon_f = 0.90 + F(T_g)[0.96 - 0.90]$ è l'emissività della vegetazione considerata di valore equivalente al coefficiente di assorbimento del fogliame nell'infrarosso a^{air} ;
 $F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$.
- $\varepsilon_g: 0.92 \div 0.96$ rappresenta l'emissività della superficie del terreno, funzione del tipo di terreno.
- $\varepsilon_1 = \varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_f \varepsilon_g$
- σ : costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$].
- σ_f : frazione di copertura vegetativa precedentemente definito.
 $LAI = LAI_{min} + F(T_g)[LAI_{max} - LAI_{min}]$
 $F(T_g) = 1.0 - 0.0016[298.0 - T_g]^2$
 I valori di LAI_{max} , LAI_{min} , $\sigma_{f,min}$, $\sigma_{f,max}$ sono definiti in tabella (4.3)
- F_g : flusso di calore netto alla superficie del terreno [W/m^2].
- I_s : flusso radiativo totale entrante a onde corte [W/m^2].
- I_{ir} : flusso radiativo totale entrante a onde lunghe [W/m^2].
- T_f : temperatura del fogliame [K].
- T_g : temperatura superficiale del terreno [K].
- $(1 - \sigma_f)I_s(1 - \alpha_g)$: flusso solare a onde corte, non intercettata dalla vegetazione, assorbito dal substrato vegetativo al netto del contributo riflesso dallo stesso.
- $(1 - \sigma_f)\varepsilon_g I_{ir}$: aliquota di radiazione nell'infrarosso, non intercettata dal fogliame, incidente sul terreno, funzione della emissività dello stesso.
- $(1 - \sigma_f)\varepsilon_g \sigma T_g^4$: flusso radiativo nell'infrarosso uscente dal terreno e dipendente dalla costante di Boltzmann, dalla temperatura del terreno e dalla sua emissività. La somma di tali tre contributi rappresenta lo scambio radiativo, a onde lunghe e corte, vigente tra il substrato colturale e l'ambiente esterno.

▪ $\frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4)$ descrive lo scambio radiativo tra vegetazione e terreno; essa è ottenuta attraverso il metodo additivo del trasferimento radiativo di due strati caratterizzati da riflessioni multiple.

▪ $k \frac{\partial T_g}{\partial z}$ rappresenta il trasferimento di massa per conduzione all'interno del substrato, con k la conduttività termica del terreno in corrispondenza della superficie [W/mK] ipotizzata con valore costante e T_g la temperatura del terreno [K];

▪ $H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_{h,g} W_{af} (T_{af} - T_g)$ è il trasferimento di calore sensibile tra la superficie del terreno e l'aria [W/m²];

$(T_{af} - T_g)$: differenza di temperatura tra l'aria presente tra le foglie e la superficie del terreno, con $T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g)$ formulato secondo Deardorff in funzione della temperatura del terreno T_g , della temperatura del fogliame T_f e della temperatura dell'aria all'altezza dello strumento di misurazione T_a [14];

$\rho_{ag} = 0.5(\rho_a + \rho_g)$ rappresenta la densità dell'aria in corrispondenza della temperatura della superficie del terreno [kg/m³], ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria ρ_a e del terreno stesso ρ_g , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$C_{p,a} = 1005.6$ [J/kgK] è il calore specifico dell'aria a pressione costante;

$C_{hg} = \Gamma_h (1 + \sigma_f) C_{hng} + \sigma_f C_{hnf}$ è il coefficiente di bulk per flusso di calore sensibile in corrispondenza del terreno, definito in funzione dei coefficienti di bulk in condizioni atmosferiche neutre C_{hng} , C_{hnf} e di un fattore correttivo Γ_h definito per condizioni atmosferiche neutre.

$C_{hnf} = \left[k / \ln \left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f} \right) \right]^2$ rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità

del fogliame per condizioni atmosferiche neutre;

$k=0.4$ è la costante di Von Karman, z_0^f è indice della scabrezza del fogliame [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero; z_a e z_d rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di Z_f corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [18]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$C_{hng} = r_{ch}^{-1} \cdot \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z_a}{z_{o,g}}\right)} \right]^2$ rappresenta il coefficiente di bulk vicino al terreno in condizioni atmosferiche neutrali, funzione della costante di Von Karman $k=0.4$, della distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione z_a , della scabrezza del terreno $z_{o,g} = 0.001$ m per tutti i tipi di terreno, del numero di Schmidt $r_{ch}=0.63$ per tutti i tipi di terreno.

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} < 0.0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} = 0.0 \end{cases}$$

$$R_{ib} = \frac{2g z_a (T_{af} - T_g)}{(T_{af} - T_g) W_{af}^2}$$

Con:

R_{ib} : numero di bulk Richardson, dipendente dalla temperatura del terreno T_g [K], temperatura dell'aria presente tra le foglie T_{af} [K], ;

$g=9.81$ m/s² costante gravitazionale;

$W_{af}=0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hnf}} + (1-\sigma_f)W'$ è la velocità del vento tra le foglie, ove:

W' : velocità del vento corretta [m/s] corrispondente a

$$W' = \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato $W'=W$ essendo $W > 2$ m/s.

▪ $L_g = \rho_{ag} C_{e,g} l_g W_{af} (q_{af} - q_g)$ è il flusso di calore latente scambiato tra la superficie del terreno e l'atmosfera circostante, definita dalle formulazioni di Deardorff [W/m²] [14].

$l_g = 1.91846 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2$ rappresenta il calore latente di vaporizzazione [J/kg] definito secondo Henderson-Sellers in funzione della temperatura del fogliame T_f ;

$\rho_{ag} = 0.5(\rho_a + \rho_g)$ rappresenta la densità dell'aria in corrispondenza della superficie del terreno [kg/m³] ottenuta come media aritmetica tra la densità dell'aria ρ_a e della terreno stesso ρ_g , entrambe calcolate secondo la legge dei gas ideali;

$(q_{af} - q_g)$: descrive la differenza tra il titolo della miscela di aria in corrispondenza della superficie della vegetazione e il titolo della miscela di aria all'interfaccia del terreno; in particolare si avrà secondo Balik e Deardorff:

$$q_{af} = \frac{[(1-\sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat} \cdot r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{[1-\sigma_f[0.6(1-r'') + 0.1(1-M_g)]}$$

Con q_a la porzione di aria mista;

$$q_g = M_g q_{g,sat} + (1-M_g)q_{af}$$

$M_g=0 \div 1$ è il fattore rappresentante la porzione di contenuto d'acqua volumetrico nel terreno in relazione alla sua porosità;

$q_{g,sat}$: porzione di miscela satura in corrispondenza del terreno;

$C_{eg} = \Gamma_e(1 + \sigma_f)C_{eng} + \sigma_f C_{hnf}$ è il coefficiente di bulk per flusso di calore latente in corrispondenza del terreno, definito in funzione dei coefficienti di bulk in condizioni atmosferiche neutrali C_{eng} , C_{hnf} e di un fattore correttivo di stabilità per il calore latente Γ_e definito per condizioni atmosferiche neutrali.

$$C_{eng} = r_{ce}^{-1} \cdot \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z_{rh}}{z_{o,g}}\right)} \right]^2$$

rappresenta il coefficiente di bulk vicino al terreno in condizioni atmosferiche neutrali, funzione della costante di Von Karman $k=0.4$, della distanza verticale sopra il terreno in cui è posto lo strumento di misurazione dell'umidità relativa z_{rh} , della scabrezza del terreno $z_{o,g} = 0.001$ m per tutti i tipi di terreno, del numero turbolento di Prandtl $r_{ce}=0.71$ per tutti i tipi di terreno.

$$C_{hnf} = \left[k / \ln\left(\frac{z_a - z_d}{z_0^f}\right) \right]^2$$

rappresenta il coefficiente di bulk in corrispondenza della sommità del fogliame per condizioni atmosferiche neutrali;

$k=0.4$ è la costante di Von Karman, z_0^f è indice di scabrezza del fogliame [m] e si definisce come l'altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento tende a zero; z_a e z_d rappresentano rispettivamente la distanza verticale in cui è posta lo strumento di misurazione e l'altezza in cui la velocità del vento è effettivamente nulla. Noto il valore di Z_f corrispondente all'altezza della vegetazione, si avrà secondo le formulazioni di Balik [18]:

$$z_a = 0.701 Z_f^{0.979} \text{ [m]}$$

$$z_d = 0.131 Z_f^{0.997} \text{ [m]}$$

$$\Gamma_e = \begin{cases} \frac{1.0}{(1.0 - 16.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} < 0.0 \\ \frac{1.0}{(1.0 - 5.0 R_{ib})^{0.5}} & R_{ib} = 0.0 \end{cases}$$

$$R_{ib} = \frac{2gZ_a(T_{af}-T_g)}{(T_{af}-T_g)W_{af}^2}$$

Con:

R_{ib} : numero di bulk Richardson, dipendente dalla temperatura del terreno T_g [K], temperatura dell'aria presente tra le foglie T_{af} [K];

$g=9.81 \text{ ms}^{-2}$ costante gravitazionale;

$W_{af}=0.83\sigma_f W' \sqrt{C_{hn}^f + (1-\sigma_f)W'}$ è la velocità del vento tra le foglie, ove:

W' : velocità del vento corretta [m/s] corrispondente a

$$W' \begin{cases} 2 \text{ m/s} & \text{se la velocità del vento è } W < 2 \text{ m/s} \\ W & \text{se la velocità del vento è } W > 2 \text{ m/s} \end{cases}$$

Nel caso in esame è risultato $W'=W$ essendo $W > 2 \text{ m/s}$.

Per effettuare la risoluzione numerica del problema, si effettua la linearizzazione di Deardorff dei termini del quarto ordine T_f^4 e T_g^4 e dei termini di miscela satura $q_{g,sat}$ e $q_{f,sat}$:

$$\begin{aligned} [T_f^{(n+1)}]^4 &= [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n] \\ [T_g^{(n+1)}]^4 &= [T_g^n]^4 + 4[T_g^n]^3 [T_g^{n+1} - T_g^n] \end{aligned}$$

Ove $T_f^{(n+1)}$ e $T_g^{(n+1)}$ sono le temperature in Kelvin rispettivamente del fogliame del terreno al corrente istante di tempo.

Il titolo della miscela di aria satura in corrispondenza della temperatura del terreno e del fogliame è:

$$q_{g,sat}(T_g^{(n+1)}) = q_{sat}(T_g^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_g^n} (T_g^{(n+1)} - T_g^n)$$

$$q_{f,sat}(T_f^{(n+1)}) = q_{sat}(T_f^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_f^n} (T_f^{(n+1)} - T_f^n)$$

Ove $q_{sat}(T_g^n) = \frac{0.622e^*(T_g^n)}{P-e^*(T_g^n)}$ rappresenta il titolo della miscela di aria satura al precedente istante, formulata da Balik [21];

$e^* = 611.2 \exp\left[17.67 \left(\frac{T_g^n - 273.15}{T_g^n - 29.65}\right)\right]$ è la pressione di vapore saturo [Pa] valutata alla temperatura del terreno al precedente istante di tempo T_g^n , P è invece la pressione atmosferica [Pa].

Derivando il contributo di miscela satura si avrà:

$$\frac{dq^*}{dT_g^n} = \left[\frac{0.622P}{(P-0.378e^*)^2} \right] \left(\frac{de^*}{dT_g^n} \right)$$

Dalla legge di Clausius-Clapeyron è possibile calcolare il contributo della pressione di vapore saturo:

$$\frac{de^*}{dT_g^n} = \frac{l_g e^*(T_g^n)}{(R_v (T_g^n)^2)}$$

con R_v la costante dei gas riferito al vapore acqueo ed l_g il calore latente di

vaporizzazione [J/kg] riferito alla temperatura della superficie del terreno.

Con procedimento analogo si avrà:

$$q_{sat}(T_f^n) = \frac{0.622e^*(T_f^n)}{P-e^*(T_f^n)}$$

Le equazioni finali, per la risoluzione numerica del problema saranno:

$$C_{1,f} + C_{2,f}T_g + C_{3,f}T_f = 0$$

$$C_{1,g} + C_{2,g}T_g + C_{3,g}T_f = 0$$

I coefficienti presenti in tale sistema di equazioni derivano dalla combinazione diretta delle equazioni precedentemente riportate.

Risolvendo il sistema è possibile ottenere simultaneamente le incognite T_g e T_f .

La differenza di implementazione rispetto al FASST è che il termine conduttivo presente nell'espressione di $C_{1,g}$ e $C_{2,g}$ sono risolti in Energy Plus con il metodo CTF (Conduction Transfer Function).

Modello n°2

Titolo:

A heat transfer model for assessment of plant based roofing system in summer conditions.

Autori:

Paulo Cesar Tabares-Velasco, Jelena Srebric [13].

Anno:

2012

Obiettivi:

Lo studio mira alla definizione di un modello di tetto verde che può essere incorporato in differenti software di simulazione o procedure di calcolo, al fine di ridurre i consumi energetici. Vengono introdotte, a tal scopo, nuove relazioni di calcolo riguardanti la

conduttività termica del substrato vegetale, la resistenza del substrato all'evaporazione e la resistenza stomatica delle piante alla traspirazione.

Assunzioni:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- Il fenomeno di fotosintesi delle piante è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.
- Regime quasi – statico: è un caso particolare del regime transitorio in cui il sistema viene sottoposto a variazioni cicliche della temperatura dell'ambiente che lo circonda;
- Inerzia termica del substrato trascurata;
- Conducibilità termica del terreno descritta da una legge lineare, funzione del contenuto d'acqua;
- Assenza di un bilancio di massa all'interno del substrato.

Descrizione modello:

Lo studio distingue tra un modello con vegetazione, uno senza vegetazione e un terzo modello con copertura parziale di vegetazione; la discretizzazione degli strati che costituiscono la copertura a verde avviene per nodi.

Discretizzazione modello senza vegetazione.

È il modello più semplice in quanto si considerano unicamente gli scambi termici con l'aria esterna, il sole ed il substrato. L'immagine seguente descrive il circuito elettrico equivalente per i flussi di calore in esame; esso risulta costituito da resistenze termiche collegate in parallelo tra il nodo rappresentante la temperatura superficiale del terreno e quello simboleggiante la temperatura di riferimento dell'aria; ogni resistenza è rappresentativa di un contributo presente nell'equazione di bilancio di seguito descritta.

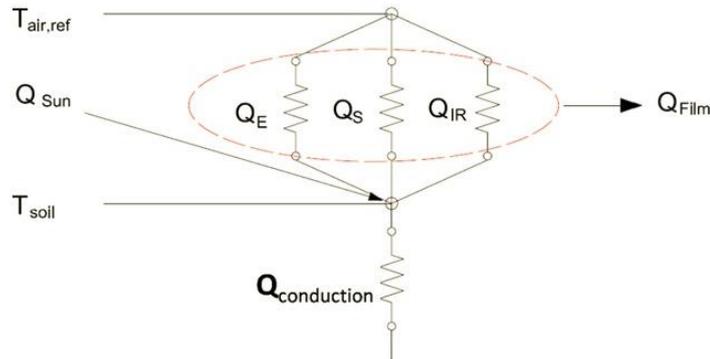


Fig. 5.3. Circuito elettrico equivalente descrivente i flussi di calore per un modello di tetto verde senza vegetazione

Q_E : calore latente trasmesso tra terreno ed aria [W/m^2].

Q_S : calore sensibile trasmesso tra suolo ed aria [W/m^2].

Q_{IR} : rappresenta la radiazione nell'infrarosso terreno – cielo [W/m^2].

$Q_{\text{film}} = Q_E + Q_S + Q_{IR}$

Q_{Sun} : contributo radiativo proveniente dal sole [W/m^2].

$Q_{\text{conduction}}$ = trasferimento di calore per conduzione attraverso lo strato colturale [W/m^2].

$T_{\text{air,ref}}$: temperatura dell'aria [K];

T_{soil} : temperatura superficiale del terreno [K].

L'equazione di bilancio che governa il sistema è così rappresentabile:

$$R_{sh,abs} = (Q_E + Q_S + Q_{IR}) + Q_{conduction}$$

- $R_{sh,abs} = (1 - \rho_{substrate}) \cdot R_{sh}$ è la radiazione solare assorbita dal substrato, ottenuta dalla radiazione solare incidente su di esso e depurata dalla aliquota di radiazione riflessa dallo stesso. $\rho_{substrate}$ rappresenta la riflessività del substrato, dipendente dal tipo di terreno e dal contenuto di acqua; in genere varia da 0.10 per terreni umidi a 0.35 per terreni secchi.
- $Q_S = h \cdot (T_{soil} - T_a)$ rappresenta il calore sensibile trasmesso tra suolo ed aria, determinabile con la formulazione del flusso convettivo, in cui il coefficiente convettivo viene stabilito attraverso il numero di Nusselt. Esso esprime il rapporto tra lo scambio termico convettivo e quello conduttivo che si realizza attraverso uno strato di fluido immobile. Il suo valore varia dipende dal numero di Grashof e di Reynolds e dal tipo moto, a seconda che ci si trovi in convezione forzata, naturale, mista.

$$Nu = \begin{cases} -3 + 1.25 \cdot 0.025 Re^{0.8} & \text{se } Gr < 0.068 Re^{2.2} \quad \text{Convezione forzata} \\ -2.7 \left(\frac{Gr}{Re^{2.2}} \right)^{1/3} \cdot \left(3 \frac{15}{4} + \frac{15}{16} \cdot 0.0253 Re^{0.8} \right) & \\ \text{Se } 0.068 Re^{2.2} < Gr < 55.3 Re^{5/3} & \text{Convezione mista} \\ -0.15 Ra^{1/3} & \text{se } 55.3 Re^{5/3} < Gr \quad \text{Convezione naturale} \end{cases}$$

- $Q_E = \frac{\rho C_p}{\gamma(r_{sub} + r_a)} \cdot (e_{soil} - e_{air})$ descrive il contributo evaporativo, ossia il calore latente trasmesso tra terreno ed aria. La formulazione deriva dalla approssimazione della legge di Dalton.

ρC_p descrive il prodotto tra la densità e il calore specifico $[J/m^3 K]$;

γ : costante psicometrica [Pa/K]

$(e_{soil} - e_{air})$: differenza tra la pressione di vapore saturo corrispondente alla temperatura del terreno e la pressione di vapore dell'aria [Pa].

r_a : resistenza aerodinamica alla traspirazione [s/m].

r_{sub} : resistenza della superficie del substrato al trasferimento di acqua; tale termine deve tenere conto delle condizioni in cui l'acqua viene assorbita, evapora, o scorre via. La sua determinazione è stata effettuata diversamente rispetto ai modelli precedenti, attraverso opportune sperimentazioni;

$r_{sub} = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{VWC}{VWC_{sat}} \right)^{c_3}$ con $c_1 = 0$, $c_2 = 34.5$, $c_3 = 3.3$ determinati sperimentalmente. VWC rappresenta il contenuto di acqua volumetrico, mentre VWC_{sat} descrive il contenuto volumetrico di acqua in condizioni di saturazione; tali due parametri sono valutati per uno spessore di substrato di 9 cm. È stato preso in considerazione il termine VWC_{sat} per non trascurare la porosità del substrato.

- $Q_{IR} = \varepsilon_{sub} \cdot \sigma \cdot (T_{top,sub}^4 - T_{sky}^4)$ rappresenta la radiazione nell'infrarosso terreno – cielo funzione dall'emissività del terreno, dalla temperatura superficiale del substrato a contatto con l'aria esterna e dalla temperatura del cielo.

σ : costante di Stefan-Boltzmann $[5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4]$.

ε_{sub} : emissività del terreno, indipendente dal contenuto di acqua, varia tra 0.90-0.98.

$T_{top,sub}$: temperatura superficiale del substrato a contatto con l'aria [K].

T_{sky} : temperatura del cielo [K], le metodologie più semplici per la determinazione di tale parametro assumono $T_{sky} = T_{air}$; altri modelli, invece, considerano $T_{sky} = T_{air} - 20^\circ \text{C}$; studi più complessi ricorrono a formulazioni non lineari in funzione del punto di rugiada. In tale caso si è ricorso a una misurazione empirica attraverso esperimenti in laboratorio [19].

- $Q_{conduction} = k_{sub} \cdot \frac{T_{top,sub} - T_{bottom,sub}}{L}$
 descrive il trasferimento di calore per conduzione attraverso lo strato colturale del tetto verde. L'innovazione di tale modello si riscontra nella formulazione della conduttività termica rappresentata da una funzione lineare i cui coefficienti sono ottenuti attraverso l'apparato sperimentale Cold Plate: $k_{sub} = a_1 + a_2 \cdot vwc$. I valori dei coefficienti a_1 ed a_2 risultano tabellati in funzione del tipo di terreno; per esempio per argilla espansa $a_1=0.16$ ed $a_2=0.51$. $T_{top,sub}$ e $T_{bottom,sub}$ rappresentano rispettivamente la temperatura del substrato colturale sulla superficie esterna a contatto con l'aria e all'interno dello stesso misurati in Kelvin.

Discretizzazione modello con vegetazione.

Nella figura sono schematizzati gli scambi termici che interessano il tetto verde in presenza di vegetazione.

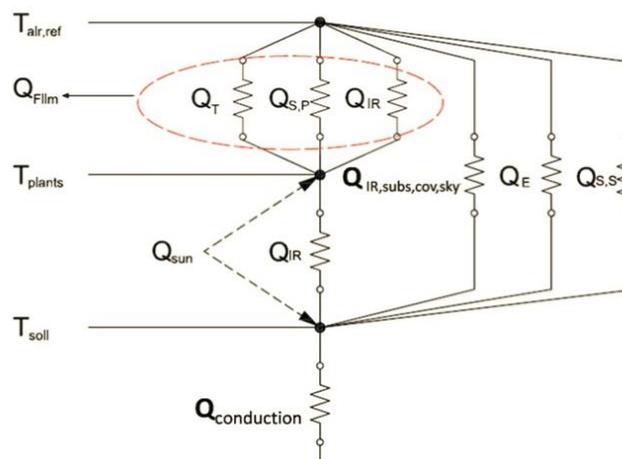


Fig. 5.4. Circuito elettrico equivalente descrivente i flussi di calore per un modello di tetto verde con vegetazione.

$Q_{conduction}$: trasferimento di calore per conduzione attraverso lo strato colturale [W/m^2];

Q_E : calore latente trasmesso tra terreno ed aria [W/m^2];

Q_{film} : $Q_T + Q_{S,P} + Q_{IR}$

Q_{IR} : radiazione nell'infrarosso tra vegetazione - aria esterna e tra terreno - vegetazione [W/m^2];

$Q_{IR,sub,conv,sky}$: rappresenta la radiazione nell'infrarosso tra terreno - cielo in presenza di vegetazione [W/m^2];

$Q_{S,P}$: calore sensibile trasmesso tra vegetazione ed aria [W/m^2].

$Q_{S,S}$: calore sensibile trasmesso tra suolo ed aria [W/m^2].

Q_{sun} : contributo radiativo del sole agente sul nodo vegetazione e sul nodo terreno [W/m^2];

Q_T : calore latente di traspirazione scambiato tra le piante e l'ambiente circostante [W/m²];

$T_{air,ref}$: temperatura dell'aria [K];

T_{plants} : temperatura del fogliame [K];

T_{soil} : temperatura superficiale del terreno [K].

La presenza di questa modifica incisivamente l'equazione di bilancio termico e di massa poichè risulta necessario inserire la porzione di radiazione incidente su di essa, la traspirazione e l'effetto di ombreggiamento. Trascurando il carico termico dovuto ai processi metabolici di fotosintesi, il bilancio rappresentativo di tale modello è dato da:

$$R_{sh,abs,plants} = (Q_{T,p} + Q_{S,p} + Q_{IR,p}) + Q_{IR,S,P}$$

$$R_{sh,abs,substrate} = -Q_{IR,S,P} + Q_{S,S} + Q_{conduction} + Q_{IR,sub,cov,sky} + Q_E$$

La prima equazione rappresenta l'insieme degli scambi di calore netti tra vegetazione – ambiente esterno – terreno; la seconda descrive, invece, il bilancio energetico tra terreno – vegetazione– ambiente esterno. I contributi presenti sono di seguito descritti:

- $R_{sh,abs,plants} = (1 - \rho_{plants} - \tau_{plants,solar}) \cdot (1 + \tau_{plants} \rho_{substrate}) \cdot R_{sh}$ è la frazione della radiazione entrante R_{sh} a onde corte assorbita dalle piante, definita analogamente alla trattazione di Palomo Del Barrio del 1998 [3]. Essa è calcolata come la somma tra la parte di radiazione entrante (depurata dalla aliquota di radiazione riflessa dalla foglia, e trasmessa dalla stessa) e quella che attraversando le foglie giunge sul terreno e si riflette dallo stesso.

R_{sh} : radiazione solare entrante;

ρ_{plants} : riflessività delle piante;

$\tau_{plants,solar} = e^{-k_s LAI}$ è trasmittanza a onde corte della vegetazione, calcolata in funzione dell'indice di area fogliame LAI [m²/m²] e il coefficiente di estinzione k_s [3];

$\rho_{substrate}$: riflessività del terreno.

- $R_{sh,abs,substrate} = \tau_{plants,solar} \cdot (1 - \rho_{substrate}) \cdot R_{sh}$ rappresenta la radiazione solare che, trasmettendosi attraverso le foglie, viene assorbita dal terreno; essa è depurata dal contributo riflesso dal terreno stesso.

R_{sh} : radiazione solare entrante;

$\tau_{plants,solar} = e^{-k_s LAI}$ è la trasmittanza a onde corte della vegetazione, calcolata in funzione dell'indice di area fogliame LAI [m²/m²] e il coefficiente di estinzione k_s [3];

$\rho_{substrate}$: riflessività del terreno.

- $Q_{T,p} = LAI \cdot \frac{\rho c_p}{\gamma(r_s + r_a)} (e_{plants} - e_{air})$ descrive il calore latente di traspirazione scambiato tra le piante e l'ambiente circostante, funzione dell'indice di area fogliame e della resistenza degli stomi, ripresa dai modelli SVAT.

ρc_p descrive il prodotto tra la densità e il calore specifico [$J/m^3 K$];

γ : costante psicometrica [Pa/K];

$(e_{s,plants} - e_{air})$: differenza tra la pressione di vapore saturo corrispondente alla temperatura delle foglie e la pressione di vapore dell'aria [Pa].

r_a : resistenza aerodinamica alla traspirazione [s/m].

Nella definizione di tale termine, l'innovazione consiste nella formulazione della resistenza degli stomi, caratterizzata dalle funzioni "f" di natura empirica, definite in base alla radiazione solare, alla pressione di vapore, contenuto di acqua e temperature:

$$r_s = \frac{r_{stomatal,min}}{LAI} \cdot f_{solar} \cdot f_{vdp} \cdot f_{vwc} \cdot f_{temp}$$

Le funzioni impiegate per il calcolo della resistenza stomatica sono sviluppate da differenti studi, in differenti condizioni ambientali e per differenti tipologie di piante:

$f_{solar} = 1 + e^{-0.034(R_{sh}-3.5)}$ è stata determinata attraverso delle misurazioni effettuate sulle piante di tabacco;

$f_{vdp} = \frac{1}{1 - 0.5 \ln(e_{s,plants} - e_a)}$ segue l'approccio logaritmico usato per le piante del deserto;

$f_{temp} = \frac{1}{1 - 0.0016(35 - (T_{plants} - 273.15))^2}$ segue la stessa formulazione dei modelli SVAT;

$$f_{vwc} = \begin{cases} 1 & \text{per } VWC > 0.7 \cdot VWC \cdot C_{fc} \\ \frac{0.7 \cdot VWC \cdot C_{fc} - VWC \cdot C_{wp}}{VWC - VWC \cdot C_{wp}} & \text{per } VWC \cdot C_{wp} < VWC < 0.7 \cdot VWC \cdot C_{fc} \\ 1000 & \text{per } VWC \cdot C_{wp} > VWC \end{cases}$$

- $Q_{S,p} = 1.5 \cdot LAI \cdot h_{conv} \cdot (T_{plants} - T_{air})$ è calore sensibile tra fogliame e aria, definito analogamente alla trattazione di Del Barrio [3] a meno del coefficiente iniziale aggiunto in tale modello al fine di tenere in considerazione la asperità del terreno. Il coefficiente si basa su apposite precedenti ricerche riguardanti il trasferimento di calore convettivo delle foglie; in particolare esso è stato calcolato ipotizzando un mezzo poroso e una velocità del vento in tale mezzo pari a $1/3$ della velocità del vento insistente sopra le piante.

$T_{plants} - T_{air}$: è la differenza di temperatura tra fogliame e aria;

LAI : indice di area fogliame [m^2/m^2]

Il coefficiente convettivo h_{conv} viene determinato attraverso il numero di Nusselt utilizzando la metodologia convenzionale.

▪ $Q_{IR,p} = (1 - \tau_{plants,ir}) \cdot \epsilon_{plants} \cdot \sigma \cdot (T_{plants}^4 - T_{sky}^4)$ è la radiazione termica nell'infrarosso tra vegetazione e cielo depurata dall'aliquota radiativa che attraversa la pianta.

$\tau_{plants,ir} = e^{-k_1 LAI}$ è il coefficiente di trasmissione della radiazione termica nell'infrarosso, calcolato analogamente a quello per onde corte, attraverso un differente coefficiente di estinzione, in tal caso denominato k_1 ;

ϵ_{plants} rappresenta l'emissività delle piante generalmente pari a 0.92, 0.96 o 0.98;

σ : costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$].

▪ $Q_{IR,S,P} = (1 - \tau_{IR}) \cdot \frac{(T_{plants}^4 - T_{top,sub}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{sub}} + \frac{1}{\epsilon_{plants}} - 1}$ rappresenta la radiazione nell'infrarosso scambiata

tra la vegetazione e il substrato. Il calcolo di questo parametro può risultare alquanto difficoltoso se non si eseguono delle semplificazioni iniziali; le ipotesi generalmente assunte sono:

1. Piante e substrato costituiscono due superfici parallele con differente area;
2. Piante e substrato costituiscono due superfici parallele e infinite;
3. Piante definite da ampia superficie e sovrastanti l'area ridotta del substrato;

Alcuni modelli, come quello di Elena Palomo del Barrio [3], assumono la terza ipotesi; altri, come D.J.Sailor [7], fondano la propria trattazione sulla seconda. Generalmente la prima condizione, sebbene la più realistica, viene trascurata in quanto necessita della conoscenza di parametri aggiuntivi di non facile determinazione, come il Fattore di Vista (F_{view}), funzione dell'Indice di Area Fogliame e dell'altezza delle piante. L'apparato sperimentale in esame, ha conseguito una differenza di risultati del solo 10% tra i tre approcci; per tali motivazioni, a favore di una maggiore semplicità procedurale, è stata adottata la seconda condizione adoperando così la formulazione sopra riportata.

τ_{IR} : trasmittanza media

T_{plants} : temperatura della vegetazione in Kelvin;

$T_{top,sub}$: temperatura della superficie del substrato a contatto con l'aria;

ϵ_{sub} : emissività del terreno pari a 0.95.

ϵ_{plants} : rappresenta l'emissività delle piante generalmente pari a 0.92, 0.96 o 0.98.

▪ $Q_{s,s} = h_{sub} \cdot (T_{sub,top} - T_{air})$ è il flusso di calore convettivo scambiato tra lo strato superficiale del substrato e l'aria circostante; esso dipende da:

$(T_{sub,top} - T_{air})$: differenza di temperatura tra lo strato superficiale del terreno a contatto con l'aria e l'aria stessa;

$h_{sub} = \frac{h_{por} \cdot h_{conv}}{h_{por} + h_{conv}}$ rappresenta il coefficiente di scambio convettivo del substrato basato sul

coefficiente convettivo per mezzi porosi

$h_{por} = \frac{k_{por}}{L} \cdot 1.12Pe^{0.5}$, ove $Pe = 0.3V_{air} \frac{L}{\alpha_{por}}$ è il numero di Peclet dipendente dalla velocità

media dell'aria V_{air} , dalla altezza L del substrato e dalla diffusività termica dei mezzi porosi α_{por} ;

$k_{por} = \Phi k_{air} + (1 - \Phi) k_{plants}$ è la conduttività termica di un mezzo poroso funzione della porosità dello strato vegetativo Φ della conduttività termica dell'aria k_{air} e della conduttività termica delle piante k_{plants} .

▪ $Q_{conductive} = k_{sub} \cdot \frac{T_{top,sub} - T_{bottom,sub}}{L}$ descrive il trasferimento di calore per conduzione attraverso lo strato colturale del tetto verde, già definito nello studio del modello senza vegetazione.

$k_{sub} = a_1 + a_2 \cdot vwc$. I valori dei coefficienti a_1 ed a_2 risultano tabellati in funzione del tipo di terreno; per esempio per argilla espansa $a_1=0.16$ ed $a_2=0.51$.

$T_{top,sub}$ e $T_{bottom,sub}$ rappresentano rispettivamente la temperatura del substrato colturale sulla superficie esterna a contatto con l'aria e all'interno dello stesso misurati in Kelvin.

▪ $Q_{IR,sub,cov,sky} = \tau_{plants,IR} \cdot \varepsilon_{sub} \cdot \sigma \cdot (T_{plants}^4 - T_{sky}^4)$ scambio radiativo nell'infrarosso del terreno con cielo e vegetazione definito come quella radiazione che attraversa le foglie secondo la trasmittanza $\tau_{plants,IR} = e^{-k_1 LAI}$ e viene intercettata dal terreno secondo la sua emissività ε_{sub} .

$\tau_{plants,ir} = e^{-k_1 LAI}$ è la trasmittanza della radiazione termica nell'infrarosso, calcolata analogamente alla trasmittanza per onde corte, attraverso un differente coefficiente di estinzione, in tal caso denominato k_1

ε_{sub} : emissività del terreno pari a 0.95;

σ : costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$];

T_{plants} : temperatura della vegetazione [K];

T_{sky} : temperatura del cielo [K].

- $Q_E = \frac{\rho C_p}{\gamma(r_{sub} + r_a)} \cdot (e_{soil} - e_{air})$ descrive il contributo evaporativo, ossia il calore latente trasmesso tra terreno ed aria, già precedentemente descritto. La formulazione deriva dalla approssimazione della legge di Dalton.

ρC_p descrive il prodotto tra la densità e il calore specifico [$J/m^3 K$].

γ : costante psicometrica [Pa/K].

$(e_{soil} - e_{air})$: differenza tra la pressione di vapore saturo corrispondente alla temperatura del terreno e la pressione di vapore dell'aria [Pa].

r_a : resistenza aerodinamica alla traspirazione [s/m].

$r_{sub} = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{VWC}{VWC_{sat}}\right)^{c_3}$ (con $c_1=0$, $c_2=34.5$, $c_3=3.3$) rappresenta la resistenza della superficie del substrato al trasferimento di acqua; determinati sperimentalmente. VWC rappresenta il contenuto di acqua volumetrico, mentre VWC_{sat} descrive il contenuto volumetrico di acqua in condizioni di saturazione; tali due parametri sono valutati per uno spessore di substrato di 9 cm.

Modello con copertura parziale di vegetazione.

Il terzo modello studiato è quello di tetto verde parzialmente coperto da vegetazione. Molti studi infatti analizzano la condizione in cui ci sia una fitta e alta vegetazione sul tetto, allontanandosi dalla realtà; secondo Tabares-Velasco è necessario valutare, pertanto, simultaneamente il modello con vegetazione e senza vegetazione, in modo da poter determinare il flusso totale di calore attraverso il tetto. Seguendo l'approccio del FASST [8], e quindi di D.J.Sailor [7], introduce con σ_f la frazione di vegetazione coprente il substrato.

Il calore fluttuante all'interno del substrato di un tetto verde parzialmente coperto da vegetazione e il flusso evapotraspirativo complessivo sono quindi dati dalla somma del contributo appartenente al modello con vegetazione e quello derivante dal modello senza vegetazione, come di seguito esposto:

$$Q_{substrate} = \sigma_f \cdot Q_{substrate,covered} + (1 - \sigma_f) \cdot Q_{substrate,bare}$$

$$Q_{ET,total} = \sigma_f \cdot (Q_{E,substrate,cov} + Q_{T,plants}) + (1 - \sigma_f) \cdot Q_{E,substrate,bare}$$

Modello n°3

Titolo:

Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer.

Autori:

Salah-Eddine- Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Issa Jaffal, Abdelkrim Trablesi [10].

Anno:

2011

Obiettivi:

Lo studio mira a perfezionare il modello matematico sviluppato da J. Sailor [7] considerando l'influenza del contenuto d'acqua volumetrico e del fenomeno dell'evapotraspirazione sulle prestazioni termiche del tetto verde. Alla trattazione teorica del modello segue un processo di sperimentazione e validazione, attraverso il quale si evince l'importanza della presenza del bilancio di massa nel substrato per ridurre la percentuale di errore tra modello teorico e sperimentale. Le simulazioni, inoltre, si propongono come utile mezzo per evidenziare il contributo positivo della vegetazione sulle prestazioni energetiche dell'edificio.

Assunzioni:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale.
- Il fenomeno di fotosintesi delle piante è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione.
- Substrato colturale parzialmente coperto da vegetazione;
- Conducibilità termica del terreno espressa da una legge lineare in funzione del contenuto d'acqua;

Descrizione del modello:

Il modello in esame sviluppa due equazioni di bilancio energetico all'interfaccia vegetazione – ambiente esterno e all'interfaccia vegetazione – terreno.

La trattazione dei singoli contributi radiativi, convettivi e latenti è analoga a quella precedentemente sviluppata da Sailor nel 2008 [7].

Equazione di bilancio energetico sul fogliame.

$$F_f = \sigma_f [I_s(1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir} - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

Equazione di bilancio energetico sul terreno.

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s(1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir} - \varepsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

L'innovazione di tale modello consiste nella definizione dell'equazione di bilancio di massa, espressa in forma semplificata da Sailor e che ora viene adeguatamente studiato in funzione del flusso di precipitazione, del contributo drenante negli strati sottostanti, e della porzione di acqua fornita al fenomeno dell'evapotraspirazione.

La presenza di acqua nel terreno, infatti, modifica sensibilmente le proprietà termiche dello strato stesso, come la conducibilità $K(\theta)$ che, per tale motivazione, viene espressa attraverso una relazione lineare in funzione del contenuto d'acqua:

$$K(\theta) = K_0 + \theta K_e$$

Con:

K_0 : la conducibilità termica del materiale [W/mK];

K_e : conducibilità termica dell'acqua [W/mK];

θ : contenuto di acqua.

L'equazione descrivente il trasferimento del contenuto di acqua nel terreno è fondato sul metodo di Richard, come segue [31]:

$$C_m \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{m\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - D_{l\psi} \right]$$

Con:

C_m : capacità capillare del terreno;

$D_{m\psi}$: conducibilità termica dell'acqua del substrato, in funzione della quale si esprime lo scambio di massa all'interno del terreno;

D_{mT} : diffusività termica dell'acqua in condizioni isobare, in funzione della quale si esprime il passaggio vapore per differenza di temperatura all'interno del terreno;

$D_{l\psi}$: diffusività termica dell'acqua in funzione del potenziale di acqua;

ψ : il potenziale di acqua nel terreno [m];

Se si assume un substrato ad alta porosità il contributo del trasferimento di massa risulta essere preminente rispetto al contributo termico, pertanto l'espressione precedentemente riportata può essere semplificata come segue:

$$C_m \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{m\psi} \frac{\partial y}{\partial x} - D_{l\psi} \right]$$

Le condizioni al contorno sono di seguito definite:

$$D_{l\psi} - D_{m\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{x=0} = P_r$$

$$D_{l\psi} - D_{m\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \Big|_{x=ep} = D$$

Dove:

P_r : flusso di precipitazione [W/m^2] considerato a $x=0$, ossia in corrispondenza della superficie superiore del terreno;

D : flusso di drenaggio dell'acqua [W/m^2] valutato in $x=ep$, ossia in corrispondenza della superficie inferiore del terreno alla profondità nota ep .

Considerando che in ogni istante di tempo la quantità di acqua nel substrato è influenzata dall'intensità del flusso di precipitazione, dalla quantità di acqua drenata e dall'entità di evapotraspirazione, il contenuto di acqua complessivo nel substrato i -esimo si può esprimere come:

$$\theta_i(T_f, T_g) - \theta_{i-1}(T_f, T_g) + P_r - D - EPT = 0$$

Il valore dell'evapotraspirazione ETP può essere determinato attraverso differenti approcci; in questo caso si è ricorso alla formulazione di Penman-Monteith:

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e^0 - e_0)}{\Delta + \gamma (T_a + 0.34 U_2)}$$

$\Delta = \frac{e_s^0 - e_a^0}{T_s - T_a}$ rappresenta la pendenza della curva nel diagramma pressione del vapore saturo –

temperatura descritta dalla equazione di Clausius-Clapayron;

γ : costante psicometrica;

$(e^0 - e_0)$: descrive la differenza di pressione di vapore, con e^0 la pressione del vapore di saturazione dell'aria ed e_0 la pressione di vapore parziale di aria [Pa];

U : velocità del vento misurata a 2 m di altezza dalla superficie del terreno [m/s];

R_n : radiazione solare netta [W/m^2]

T_a : temperatura dell'aria [$^{\circ}C$];

G : flussi di calore sensibili caratterizzanti il terreno [W/m^2];

Per effettuare la risoluzione numerica del problema, si effettua la linearizzazione di Deardorff dei termini del quarto ordine T_f^4 e T_g^4 e dei termini di miscela satura $q_{g,sat}$ e $q_{f,sat}$, con procedura analoga a quella impiegata da Sailor:

$$[T_f^{(n+1)}]^4 = [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n]$$

$$[T_g^{(n+1)}]^4 = [T_g^n]^4 + 4[T_g^n]^3 [T_g^{n+1} - T_g^n]$$

Ove $T_f^{(n+1)}$ e $T_g^{(n+1)}$ sono le temperature in Kelvin rispettivamente del fogliame del terreno al successivo istante di tempo.

Il titolo della miscela di aria satura in corrispondenza della temperatura del terreno e del fogliame è :

$$q_{g,sat}(T_g^{(n+1)}) = q_{sat}(T_g^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_g^n} (T_g^{(n+1)} - T_g^n)$$

$$q_{f,sat}(T_f^{(n+1)}) = q_{sat}(T_f^n) + \left(\frac{\partial q_{sat}}{\partial T}\right)_{T_f^n} (T_f^{(n+1)} - T_f^n)$$

Le equazioni finali, per la risoluzione numerica del problema saranno simili a quelle rappresentate da Sailor con l'aggiunta di una terza equazione:

$$C_{1,f} + C_{2,f}T_g + C_{3,f}T_f = 0$$

$$C_{1,g} + C_{2,g}T_g + C_{3,g}T_f = 0$$

$$\theta_i(T_f, T_g) - \theta_{i-1}(T_f, T_g) + P_r - D - EPT = 0$$

I coefficienti presenti in tale sistema di equazioni derivano dalla combinazione diretta delle equazioni precedentemente riportate. Il sistema è stato risolto attraverso Matlab, ottenendo simultaneamente le incognite T_g, T_f e θ_i .

Modello n°4Titolo:

Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roof.

Autori:

Rabah Djedjig, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Emmanuel Bozonnet [20].

Anno:

2012

Obiettivi:

Lo studio mira sviluppare un modello termico e idrico di un tetto verde parzialmente coperto da vegetazione che non trascuri l'inerzia termica degli strati componenti la copertura e che consenta una determinazione esplicita del fenomeno dell'evapotraspirazione. Tale modello descrive, inoltre, gli effetti della velocità del vento nel fogliame attraverso una nuova formulazione della resistenza stomatica al passaggio di calore e di massa. Il modello è stato validato con un apparato sperimentale a La Rochelle.

Assunzioni:

- Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili; tale assunzione implica la scelta di un modello monodimensionale;
- Il fenomeno di fotosintesi delle piante è trascurabile nell'equazione di bilancio energetico;
- Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione;
- Substrato colturale parzialmente coperto da vegetazione;
- Inerzia termica del terreno non trascurabile;
- Conducibilità termica del terreno espressa da una legge lineare in funzione del contenuto d'acqua;
- Evapotraspirazione stimata con un nuovo metodo, differente dalla equazione di Penman-Monteith a cui attingono gli altri modelli.

Descrizione del modello:

Il modello proposto considera due parti della copertura verde: il fogliame e il substrato. La vegetazione è caratterizzata dal coefficiente di copertura parziale σ_f e dall'indice di area fogliame LAI, i quali conferiscono alla vegetazione la caratteristica di essere semitrasparente nei confronti della radiazione. Di seguito si illustra la struttura del tetto verde modellato e le sue proprietà radiative:

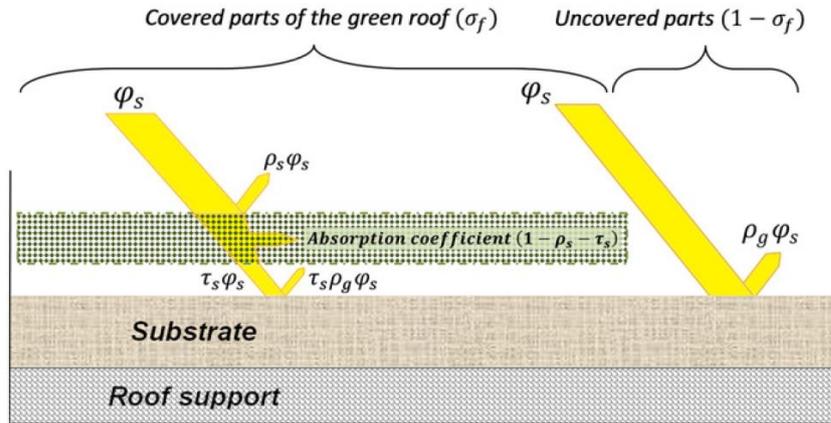


Fig. 5.5. Modellazione della struttura del tetto verde e delle sue proprietà radiative. φ_s : radiazione solare incidente, τ_s : trasmittanza solare; ρ_g : coefficiente di riflessione del terreno.

Modello della vegetazione

L'equazione di bilancio della vegetazione è di seguito proposta con valore di temperatura delle foglie costante.

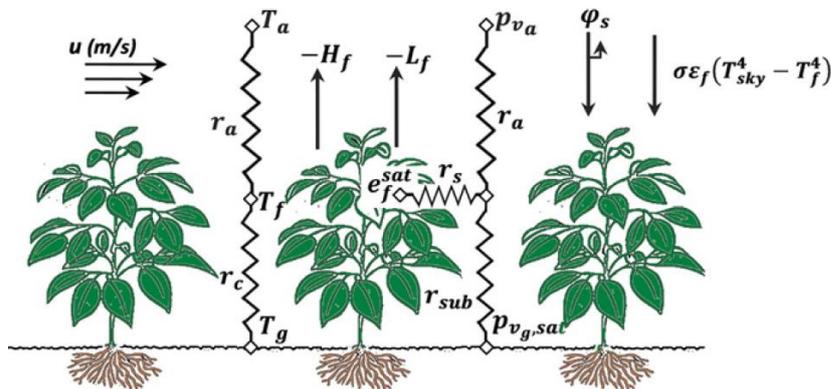


Fig. 5.6. Principali flussi termici caratterizzanti la vegetazione.

H_f : flusso sensibile [W/m^2];

L_f : flusso latente [W/m^2];

T_g : temperatura superficiale del terreno [K];

T_a : temperatura dell'ambiente esterno [K];

T_f : temperatura del fogliame [K];

T_{sky} : temperatura del cielo [K];

φ_s : radiazione solare incidente [W/m^2];

r_a : resistenza aerodinamica al trasferimento di calore sensibile [s/m];

r_c : resistenza al flusso di calore sensibile tra la superficie del terreno e l'aria presente tra le foglie [s/m];

r_{sub} : resistenza superficiale del substrato al trasferimento di calore [s/m];

r_s : resistenza stomatica delle foglie al trasferimento di calore [s/m];

p_{va} : pressione di vapore dell'aria [Pa];

σ : costante di Boltzmann [W/m^2K^4];

ε_f : emissività del fogliame.

$$(\rho c_p)_f d_f \frac{dT_f}{dt} = R_{n,f} + H_f + L_f$$

- $(\rho c_p)_f$: descrive la capacità termica specifica della vegetazione [J/m^3K];

d_f : spessore della foglia [m];

$\frac{dT_f}{dt}$: variazione della temperatura del fogliame rispetto al tempo;

- $R_{n,f} = [R_{n,f}]_s + [R_{n,f}]_{sky} + [R_{n,f}]_g$ rappresenta il flusso radiativo riferito al fogliame [W/m^2], dato dalla somma della radiazione a onde corte assorbita, del flusso radiativo a onde lunghe scambiato con l'ambiente esterno e del flusso radiativo scambiato con il terreno.

- $[R_{n,f}]_s = \sigma_f [(1-\tau_s-\rho_s)(1+\tau_s\rho_s)\varphi_s]$ è la radiazione a onde corte dal fogliame; esso riprende la formulazione di P. Del Barrio [3], riformulata tramite l'inserimento del coefficiente di copertura parziale σ_f ;

- $[R_{n,f}]_g = \sigma_f [\varepsilon_{fg}\sigma(T_g^4 - T_f^4)]$ è il flusso termico a onde lunghe scambiato tra il terreno e il fogliame, equivalente alla formulazione di D.J. Sailor [7].

- $[R_{n,f}]_{sky} = \sigma_f [\varepsilon_f\sigma(T_{sky}^4 - T_f^4)]$ è il flusso termico a onde lunghe scambiato tra il fogliame e l'ambiente esterno; tale formulazione è analoga a quella descritta da D.J.Sailor [7], eccetto che per la formulazione del parametro T_{sky}^4 ;

$T_{sky} = \left(\frac{\varphi_{sky}}{\sigma}\right)^{1/4}$ è la temperatura del cielo, intesa come quel valore di temperatura in corrispondenza del quale un corpo nero emette una radiazione a onde lunghe pari a quella

incidente misurata; φ_{sky} rappresenta la radiazione infrarossa incidente [W/m^2] e σ la costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$].

- $H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_a - T_f)$ descrive il flusso di calore sensibile scambiato tra il fogliame e l'ambiente esterno [W/m^2]; esso si pone come una riformulazione della modellazione di P.Del Barrio [3].

F = indice di area fogliame;

$(\rho c_p)_a$: capacità termica specifica dell'aria [$\text{J}/\text{m}^3\text{K}$];

T_a : temperatura dell'aria [K];

T_f : temperatura del fogliame [K];

$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{om}} - \psi_{sm}\right) \right]}{k^2 u}$ resistenza aerodinamica [s/m] riferita allo strato di aria appena sopra la vegetazione, funzione della velocità del vento e della scabrezza delle piante;

ψ_{sm} : fattore correttivo per il "momento";

k : costante di Von Karman [0.4];

u : velocità del vento [m/s];

z : altezza dello strumento di misurazione [m];

$d_0 = 0.701 h_c^{0.975}$ altezza in corrispondenza della quale la velocità del vento si annulla [m] ripreso dal lavoro di Balik [18];

$z_{om} = 0.131 h_c^{0.997}$ misura della scabrezza per il momento [m], ripresa dal lavoro di Balik [18];

- $L_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (T_a - T_f)$ descrive il flusso di calore latente scambiato tra la vegetazione e l'ambiente esterno [W/m^2]; esso si pone come un miglioramento della formulazione di P.Del Barrio [3].

$r_a = \frac{\left[\ln\left(\frac{z-d_0}{z_{om}} - \psi_{sm}\right) \right]}{k^2 u}$ resistenza aerodinamica [s/m] riferita allo strato di aria appena sopra la vegetazione, già definita.

$r_s = \frac{r_{s,min}}{F} f_1(\varphi_s) \cdot f_2(T_s) \cdot f_3(\omega_g) \cdot f_4(p_{vf,sat} - p_{va})$ descrive la resistenza stomatica delle foglie, calcolata come prodotto della minima resistenza stomatica con funzioni che tengono in considerazione il contenuto d'acqua nel terreno e le condizioni climatiche; tale formulazione riprende quella adottata da D.J.Sailor [7], ma applica una procedura di calcolo simile a quella di Tabares Velasco [13] per le funzioni f :

$$f_1(\varphi_s) = 1 + e^{-0.034(R_{sh} - 3.5)}$$

$$f_2(T_s) = \frac{e^{0.3(T_f - 273.15)} + 258}{e^{0.3(T_f - 273.15)} + 27}$$

$f_3(\omega_g) = \frac{\omega_g^{max} - \omega_g^{min}}{\omega_g - \omega_g^{min}} \approx \frac{1}{S_r}$ con $S_r = \frac{\omega_g}{\omega_g^{sat}}$ è il livello di saturazione data dal rapporto tra il contenuto di acqua volumetrico nel terreno e il contenuto d'acqua volumetrico in condizioni di saturazione.

Modello del terreno

Il modello del terreno, di seguito rappresentato, è descritto da una equazione di bilancio termico e di massa.

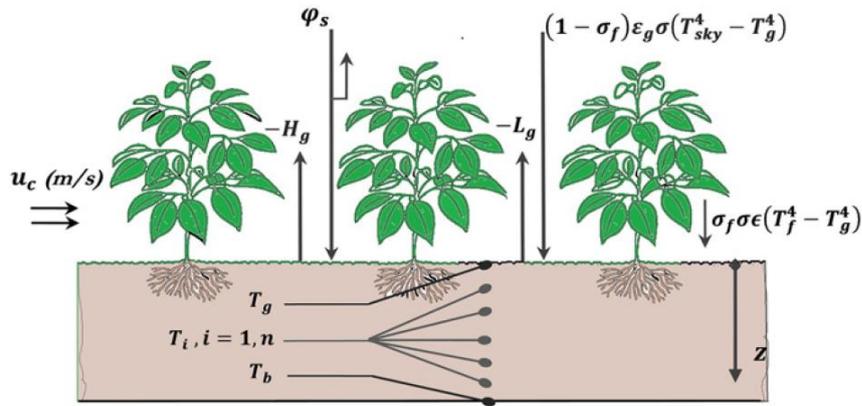


Fig. 5.7. Principali flussi termici caratterizzanti la superficie del terreno

H_g : flusso sensibile [W/m²];

L_g : flusso latente [W/m²];

T_g : temperatura superficiale del terreno [K];

T_b : temperatura del terreno in profondità [K];

T_f : temperatura del fogliame [K];

T_{sky} : temperatura del cielo [K];

σ : costante di Boltzmann [W/m²K⁴];

σ_f : frazione di copertura vegetativa;

ϵ_g : emissività del terreno;

u_c : velocità del vento presente tra le foglie [m/s].

$$(\rho c_p)_{g, \omega_g} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Le proprietà termofisiche del substrato sono calcolate in funzione del contenuto volumetrico dell'acqua ω_g :

- secondo la formulazione di Ouldoukhitine [10] la conduttività del terreno è pari a:

$$k_{\omega_g} = k_0 + \omega_g k_w$$
- secondo la formulazione di P.Del Barrio [3] la capacità termica specifica del terreno è pari a: $(\rho c_p)_{g,\omega_g} = c_{p_w}(0.2 + \omega_g)\rho_{soil}$

Le condizioni al contorno sono:

$T(z=h_g, t) = T_b$ con T_b la temperatura del terreno alla profondità h_g ;

$k_{\omega_g} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=}$ = $R_{n,g} + H_g + L_g$ in cui i termini nel membro a destra rappresentano rispettivamente il contributo radiativo, sensibile e latente valutato in corrispondenza della superficie del terreno in W/m^2 . Tali termini sono di seguito specificati.

$$R_{n,f} = [R_{n,g}]_s + [R_{n,g}]_l$$

- $[R_{n,g}]_s = \sigma_f[(1-\rho_g)\tau_s\varphi_s] + (1-\sigma_f)[(1-\rho_g)\varphi_s]$ rappresenta il flusso radiativo a onde corte incidente sul terreno [W/m^2]; esso migliora la formulazione di D.J.Sailor [7] con:

ρ_g : riflettanza del terreno;

τ_s : trasmittanza solare;

σ_f : percentuale di copertura di vegetazione;

φ_s : radiazione solare incidente [W/m^2];

$\sigma_f[(1-\rho_g)\tau_s\varphi_s]$: descrive la aliquota di radiazione che, attraversando la vegetazione, viene assorbita dal terreno;

$(1-\sigma_f)[(1-\rho_g)\varphi_s]$: descrive la aliquota di radiazione solare non intercettata dal fogliame e assorbita dal terreno, al netto della aliquota riflessa dal terreno stesso;

- $[R_{n,g}]_l = \sigma_f \varepsilon_{fg} \sigma (T_f^4 - T_g^4) + (1-\sigma_f) \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_g^4)$ rappresenta il flusso radiativo nell'infrarosso valutato in corrispondenza della superficie del terreno [W/m^2], formulazione analoga a quella di D.J.Sailor [7];

- $H_g = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_c + r_a} (T_a - T_g)$ descrive il flusso di calore sensibile scambiato tra il terreno e l'ambiente esterno [W/m^2];

F: indice di area fogliame;

(ρc_p) : capacità termica specifica dell'aria [J/m³K];

T_a : temperatura dell'aria [K];

T_g : temperatura superficiale del terreno [K];

r_a : resistenza aerodinamica al trasferimento di calore sensibile [s/m];

$r_c = \frac{1}{a+bu_c}$ descrive la resistenza al flusso di calore sensibile tra la superficie del terreno e

l'aria presente tra le foglie [s/m], con:

$$a = \sqrt{0.28Fdh_c} \approx 0.004 \text{ m/s};$$

$$b \approx 0.012 \text{ m/s};$$

$u_c = u_{hc} e^{-a(1-\frac{0.05}{h_c})}$ è la velocità del vento tra le foglie [m/s]

$u_{hc} = u \left[\ln\left(\frac{h_c - d_o}{z_{om}}\right) / \left(\ln\left(\frac{h_u - d_o}{z_{om}}\right) - \psi_{sm} \right) \right]$ velocità del vento valutata in corrispondenza dell'altezza del vegetazione.

▪ $L_g = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_{sub})} (p_{vg,sat} - p_{v,a})$ descrive il flusso di calore del terreno [W/m²];

formulazione analoga a quella proposta da Tabares-Velasco [13].

Equazione di bilancio idrico del terreno

Il contenuto di acqua nel terreno ha un impatto non trascurabile sull'intensità del flusso di calore e di massa in un tetto verde; esso influenza, infatti, le proprietà fisiche del substrato determinante per il valore dei carichi termici e l'intensità del processo di evaporazione e traspirazione. Pertanto risulta fondamentale determinare come varia tale fattore nel tempo.

Il bilancio di massa è così rappresentato:

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega_g}{\partial t} = P - D - E$$

Con:

P = flusso di precipitazione [kg/m²s];

D = flusso drenato [kg/m²s];

$E = -(L_f + L_g)/l_v$ l'evapotraspirazione [kg/m²s], con l_v il calore latente di vaporizzazione [J/kg].

La risoluzione numerica viene effettuata, come nel caso di D.J.Sailor [7] e Tabares-Velasco [13] ottenendo i valori di temperatura del fogliame, temperatura del terreno e contenuto d'acqua nello stesso.

5.2 Analisi dei modelli analizzati

Ogni modello matematico ha analizzato nel dettaglio i vari fenomeni termici attingendo a formulazioni già elaborate nel corso degli anni precedenti o proponendone delle nuove di natura empirica. I modelli ritenuti fondamentali perché accurati nella descrizione dei singoli fenomeni fisici sono:

P. Del Barrio-1998;
Lazzarin-2005;
D.J:Sailor-2008;
Jim, Tsang-2011;
E. Ouldboukhitine-2011;
Tabares-Velasco-2012;
Jaffal, E. Ouldboukhitine-2012.

Si procede, pertanto, in tale paragrafo, a un confronto conclusivo e dei modelli trattati.

Radiazione solare incidente sul fogliame.

Del Barrio: partendo dall'ipotesi che il tetto sia completamente coperto da vegetazione, sottrae dalla radiazione solare complessiva sia l'aliquota che viene riflessa dalle foglie che quella assorbita dalle stesse; a tale contributo aggiunge poi la porzione di radiazione che attraversa la vegetazione, giunge sul substrato e riflettendosi su di esso incide sulle piante. Tale contributo viene però trascurato nelle equazioni risolutive del modello.

Lazzarin e Jim-Tsang: non quantificano tale parametro in quanto trascurano la presenza della vegetazione come nodo termico;

Sailor: alla radiazione solare totale sottrae solo il contributo riflesso dalle foglie, ma tiene in considerazione la possibilità che vi sia una copertura parziale di vegetazione tramite il coefficiente di copertura σ_f ;

Ouldboukhitine: riprende la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna;

Tabares-Velasco: riprende la formulazione di Del Barrio senza modifica alcuna;

Djedjig: riformula l'approccio di Del Barrio aggiungendo il contributo σ_f .

Radiazione solare incidente sul terreno.

Del Barrio: procede con un approccio analogo al precedente caso definendo tale valore come quella porzione di radiazione incidente, al netto di quella riflessa dal terreno, che attraversa la vegetazione giungendo così sul substrato;

Lazzarin: ricorre all'utilizzo del coefficiente di estinzione che è funzione delle proprietà ottiche del fogliame;

D.J.Sailor: considera l'aliquota di radiazione incidente non captata dalle foglie al netto di quella riflessa dal terreno stesso;

Jim, Tsang: definiscono tale contributo in modo semplificato in funzione del solo coefficiente di assorbimento;

Ouldboukhitine: riprende la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna;

Tabares-Velasco: riprendono senza modifica alcuna la formulazione di Del Barrio nella trattazione del tetto verde con vegetazione; in assenza di vegetazione, invece, propongono una definizione simile a quella di Jim-Tsang in funzione della riflessività dello strato, anziché del coefficiente di assorbimento;

Djedjig: propone una formulazione che attinge in parte all'approccio di Del Barrio e in parte a quello di D.J.Sailor.

Radiazione nell'infrarosso vegetazione-ambiente esterno.

Del Barrio: esprime questo contributo in funzione della trasmittanza della vegetazione τ_1 ;

Lazzarin: propone una trattazione semplificata attraverso il coefficiente di adduzione liminare, inglobando in una unica espressione i fenomeni radiativi nell'infrarosso e i sensibili di tipo convettivo;

D.J.Sailor: descrive tale contributo in funzione del coefficiente di copertura parziale σ_f e dell'emissività del fogliame;

Ouldboukhitine: riprende la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna;

Djedjig: propone una riformulazione di quella di D.J.Sailor.

Radiazione nell'infrarosso vegetazione-terreno.

Del Barrio: descrive lo scambio radiativo infrarosso vegetazione-terreno, unitamente a quello terreno-cielo. L'analisi viene effettuata esclusivamente in corrispondenza del terreno, definendolo come somma del contributo entrante dal cielo e di quello derivante dalle piante al netto del contributo infrarosso uscente dal terreno stesso; la formulazione è quindi espressa in funzione della trasmittanza infrarossa della vegetazione, oltre che delle temperature;

D.J.Sailor: descrive lo scambio termico tra il terreno e la sola quantità di vegetazione presente sul tetto verde, in funzione delle rispettive emissività e temperature; tale contributo è presente in entrambe le equazioni di bilancio;

Ouldboukhitine e Djedjig: riprendono la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna;

Tabares-Velasco: propongono una nuova formulazione in funzione del valore di trasmittanza media.

Radiazione nell'infrarosso terreno-ambiente esterno.

D.J.Sailor: analizza la radiazione infrarossa terreno – ambiente esterno che non viene captata dalla vegetazione, in funzione della emissività del terreno.

Ouldboukhitine: riprende la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna.

Tabares –Velasco: per il modello di tetto verde con vegetazione considera la radiazione che attraversa le foglie, secondo la trasmittanza $\tau_{(plants,IR)}$ funzione del coefficiente di estinzione, e che viene intercettata dal terreno secondo la sua emissività ϵ_{sub} . In assenza di vegetazione, il flusso termico infrarosso è determinato in maniera analoga a meno del contributo tra vegetazione-terreno e di quello tra vegetazione-ambiente esterno;

Djedjig: rielabora l'analisi di D.J. Sailor considerando che la copertura può essere caratterizzata sia da zone completamente coperte, sia da zone completamente scoperte, sia da zone parzialmente coperte da vegetazione;

Jim, Tsang: riportano la radiazione infrarossa dell'atmosfera in funzione della temperatura di rugiada e della temperatura dell'aria. Quindi non vi è dipendenza diretta dalla emissività del terreno.

Calore sensibile vegetazione-aria esterna.

Del Barrio: esprime tale contributo in funzione della capacità termica della vegetazione, dell'indice di area fogliame e della resistenza esterna del fogliame al passaggio di calore sensibile, oltre che dalla temperatura esterna e del fogliame;

Lazzarin: come già detto ricorre al coefficiente di adduzione per considerare in una unica formulazione semplificata i contributi sensibili e radiativi;

D.J.Sailor: esprime tale contributo in funzione dell'indice di area fogliame, delle proprietà del vento, della densità dell'aria in corrispondenza del fogliame e del calore specifico dell'aria, del valore della scabrezza, oltre che dalla temperatura esterna e del fogliame;

Tabares-Velasco: modifica la formulazione di Del Barrio;

Djedjig: riformula la proposta di P.Del Barrio modificando il coefficiente iniziale. Tale valore non si considera nella equazione risolutiva.

Calore sensibile terreno-aria esterna.

Del Barrio: riporta la formulazione classica di tale fenomeno in funzione del coefficiente convettivo di bulk per il trasporto di calore e della differenza di temperatura tra i due sistemi;

D.J.Sailor: riporta una analisi dettagliata di tale parametro tenendo in considerazione la densità dell'aria sul fogliame, il calore latente di vaporizzazione, il coefficiente di bulk per il flusso di calore turbolento, l'influenza della resistenza aerodinamica e di quella stomatica delle foglie alla diffusione del vapore; in particolare quest'ultima è espressa in funzione del contenuto di acqua presente nel terreno;

Jim,Tsang: riprende la formulazione di Del Barrio senza modifica alcuna;

Ouldboukhitine: riprende la formulazione di D.J.Sailor senza modifica alcuna;

Tabares-Velasco: propone una nuova formulazione attraverso l'introduzione del coefficiente di scambio convettivo del substrato basato sul coefficiente convettivo per mezzi porosi;

Djedjig: descrive tale parametro in funzione delle capacità termiche dell'aria, della resistenza aerodinamica al trasferimento di calore sensibile e della resistenza al flusso di calore sensibile tra la superficie del terreno e l'aria presente tra le foglie funzione della velocità del vento.

Calore conduttivo all'interno del terreno.

Del Barrio: analizza il fenomeno definendo la conducibilità termica del terreno in funzione del contenuto d'acqua volumetrico (fissato a priori); inoltre considera la presenza di un contributo latente all'interno del terreno stesso dovuto alla diffusione del vapore nei pori;

Lazzarin: definisce il fenomeno tra due nodi adiacenti in funzione dello strato che si sta analizzando, delle rispettive temperature e del valore di conduttività dipendente dal contenuto di acqua nel terreno stesso;

D.J.Sailor: analizza tale fenomeno solo in relazione al substrato colturale considerando una conducibilità termica del terreno costante e risultando così alquanto approssimativo;

Ouldboukhitine: considera all'interno del terreno sia il fenomeno conduttivo che quello latente per la presenza del vapore e definisce la conduttività in modo analogo all'approccio di Tabares-Velasco;

Tabares-Velasco: propone una nuova formulazione attraverso l'introduzione della conduttività termica espressa come funzione lineare del contenuto d'acqua e dipendente da coefficienti definiti empiricamente;

Djedjig: definisce il valore di conducibilità con approccio analogo a quello di Tabares-Velasco e non trascura la presenza del vapore all'interno del terreno.

Calore latente fogliame-ambiente esterno.

Del Barrio: esprime tale contributo in funzione della capacità termica del fogliame, della resistenza esterna della vegetazione al passaggio di vapore della resistenza interna al trasferimento di calore, definito anche come resistenza stomatica di bulk e della pressione di vapore;

Lazzarin: descrive il fenomeno attraverso l'esplicitazione della evapotraspirazione calcolata in funzione del di una formulazione semi-empirica riguardante il massimo valore di evapotraspirazione di una vegetazione ben irrigata;

D.J.Sailor: riporta una descrizione molto dettagliata del fenomeno tenendo in considerazione la densità dell'aria sul fogliame, il calore latente di vaporizzazione, il coefficiente di bulk per il flusso di calore turbolento e l'influenza della resistenza aerodinamica e di quella stomatica delle foglie alla diffusione del vapore; in particolare quest'ultima è espressa in funzione del contenuto di acqua presente nel terreno;

Tabares-Velasco: introduce, con approccio analogo a D.J.Sailor, la resistenza stomatica delle piante è definita per mezzo di funzioni ricavate empiricamente in relazione al contenuto d'acqua nel terreno e al tipo di vegetazione;

Djedjig: si pone come un miglioramento della formulazione di P.Del Barrio attingendo sia alle formulazioni di D.J.Sailor che di Tabares-Velasco.

Calore latente terreno-ambiente esterno.

Del Barrio: esprime tale contributo attraverso il coefficiente convettivo di bulk per il trasporto di vapore, la costante termodinamica psicometrica, il calore latente di vaporizzazione e il deficit di pressione;

D.J.Sailor: richiama le formulazioni di Deardorff, esprimendo tale contributo in funzione del calore latente di vaporizzazione, della densità dell'aria in corrispondenza della superficie del terreno, della porzione di miscela aria-acqua, della velocità del vento tra le foglie;

Jim, Tsang: descrivono il fenomeno riprendendo la formulazione di Penman;

Ouldboukhitine: definisce il calore latente tra fogliame-ambiente esterno e tra terreno-ambiente esterno, similmente all'approccio di Del Barrio, ossia esplicitando in una unica formulazione l'intero contributo evapotraspirativo attraverso la formulazione di Penman-Monteith;

Tabares-Velasco: modifica la formulazione di Del Barrio attraverso l'introduzione della resistenza della superficie del substrato al trasferimento di acqua, determinata sperimentalmente;

Djedjig: riprende la formulazione di Tabares-velasco senza modifica alcuna;

5.3 Modello termofisico della copertura a verde

L'analisi della letteratura ha evidenziato che, per la sua accuratezza, il modello di riferimento per quanto riguarda la formulazione degli scambi radiativi è da ritenersi quello di Jaffal, E. Ouldboukhitine-2012 [10], mentre il modello di Sailor [7] è stato considerato di riferimento per la formulazione degli scambi sensibili e latenti. Successivamente la modellazione è stata ampliata considerando anche il modello FASST [8] che fornisce una metodologia di riferimento per la valutazione del contributo energetico associato alle precipitazioni e al lavoro proposto da Feng et Al. 2010 [11] per quanto riguarda la modellazione del contributo energetico associato alla fotosintesi e alla respirazione delle piante. La formulazione del modello si basa sull'assunzione di alcune ipotesi. Si ritiene che la copertura verde sia parzialmente coperta da vegetazione, non è trascurata l'inerzia termica del terreno e viene effettuata la determinazione esplicita del fenomeno dell'evapotraspirazione. Sono, inoltre, descritti gli effetti della velocità del vento nel fogliame ed è considerata una formulazione della resistenza stomatica al passaggio di calore e di massa. Il fenomeno di fotosintesi delle piante non è trascurato e viene considerato il flusso termico associato alle precipitazioni meteoriche.

Ulteriori assunzioni sono:

- ✓ Le piante e il substrato colturale sono omogenei orizzontalmente;
- ✓ Il calore e il trasferimento di massa sono analizzati secondo la sola direzione verticale, mentre i flussi orizzontali sono trascurabili (modello monodimensionale);
- ✓ La temperatura delle foglie è assunta uniforme;
- ✓ Il trasferimento di calore per conduzione nelle piante è trascurabile;
- ✓ Il substrato colturale è considerato equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, pertanto le sue proprietà non dipendono dalla direzione;
- ✓ La conducibilità termica del terreno è espressa in funzione del contenuto d'acqua;
- ✓ L'evapotraspirazione è stimata con un nuovo metodo, differente dalla equazione di Penman-Monteith a cui attingono gli altri modelli.

Il modello, analogamente a quanto riportato in letteratura, si basa sulla scrittura di due equazioni di bilancio energetico scritte rispettivamente per lo strato di vegetazione e per lo strato di terreno. La vegetazione viene caratterizzata dal coefficiente di copertura parziale σ_f e dall'indice di area fogliame LAI, i quali conferiscono alla copertura vegetativa

rispettivamente la caratteristica di essere a copertura parziale e semitrasparente nei confronti della radiazione solare ed infrarossa. Tali assunzioni consentono di modellare con accuratezza gli scambi termici radiativi a corta e lunga lunghezza d'onda tra la vegetazione e il suolo e tra la vegetazione e l'ambiente circostante. La schematizzazione degli scambi termici in cui sono specificati sia gli scambi di calore sensibile che latente è riportata in figura.

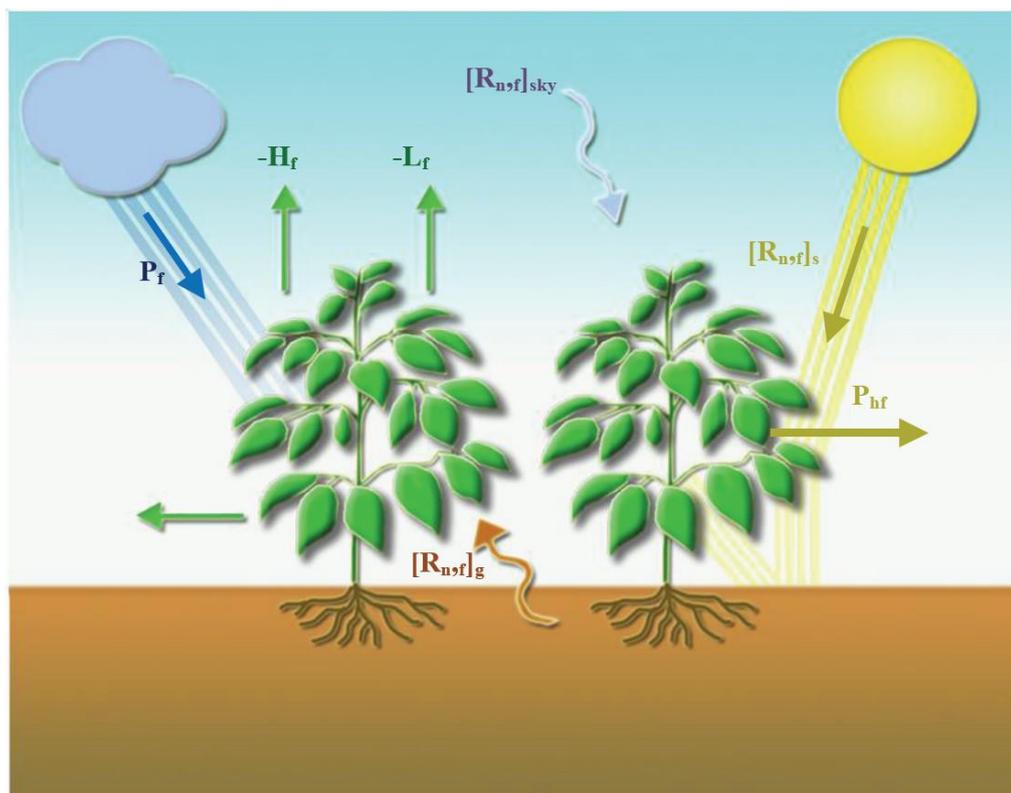


Fig. 5.8. Scambi termici e di massa della vegetazione

L'equazione di bilancio è formulata tenendo conto degli scambi termici radiativi, dei flussi di calore sensibile e latente, del contributo energetico associato alle precipitazioni e al processo di fotosintesi e respirazione della vegetazione:

$$F(T_f) = R_{n,f} + H_f + L_f + P_f + P_{hf} = 0$$

Dove:

$R_{n,f}$ è il flusso radiativo netto;

H_f è il flusso di calore sensibile tra fogliame e ambiente esterno;

L_f è il flusso di calore latente tra fogliame e ambiente esterno;

P_f è il flusso di calore derivante dalle precipitazioni;

P_{hf} è il flusso di calore derivante dalla fotosintesi e dalla respirazione.

La modellazione del comportamento termofisico del terreno si basa sulla formulazione di una equazione di bilancio termico e di massa. Nella figura 5.9 sono schematizzati gli scambi termici caratterizzanti il substrato.

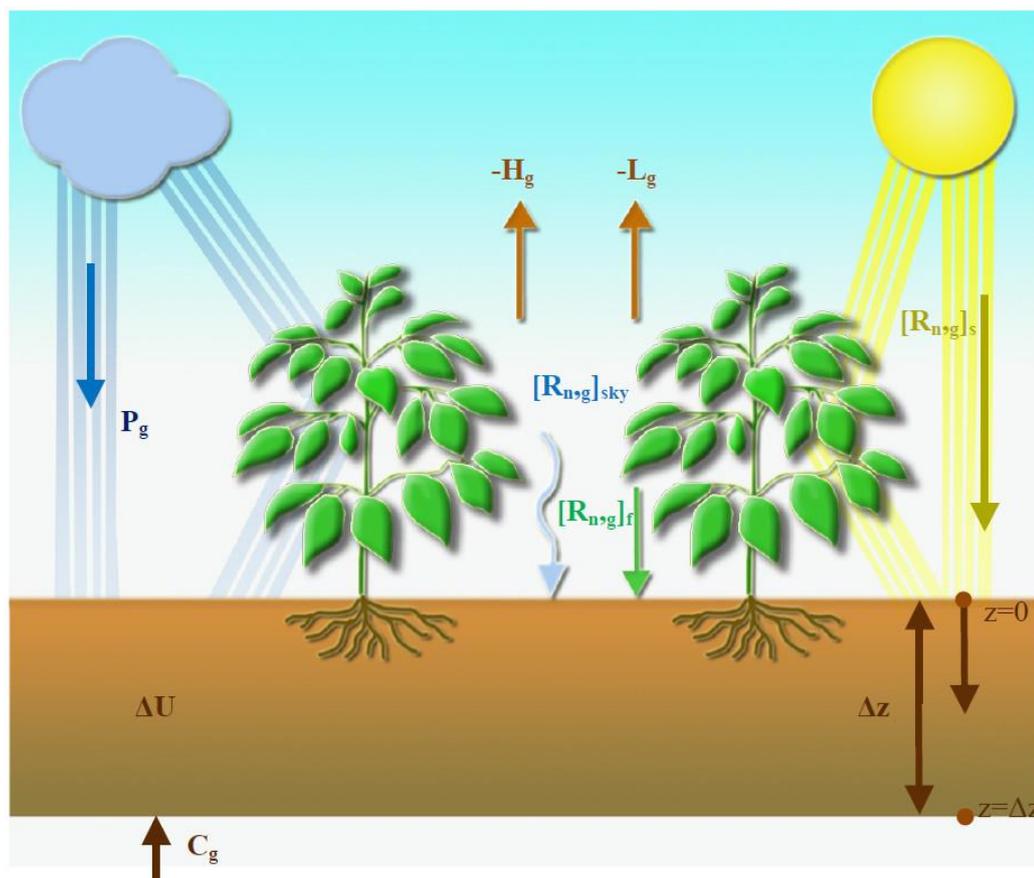


Fig. 5.9. Scambi termici e di massa del terreno.

A differenza della maggior parte dei modelli disponibili in letteratura, l'equazione di bilancio energetico del terreno viene formulata tenendo in considerazione il contributo energetico associato alle piogge, l'inerzia termica del terreno e la variabilità delle sue proprietà termofisiche con il contenuto d'acqua.

$$F_g(T_g) = R_{n,g} + H_g + L_g + C_g + P_g + \Delta U = 0$$

Dove:

$R_{n,g}$ è il flusso radiativo netto;

H_g è il flusso di calore sensibile tra il terreno e l'ambiente esterno;

L_g è il flusso di calore latente tra il terreno e l'ambiente esterno;

P_g è il flusso di calore derivante dalle precipitazioni;

C_g è il flusso di conduttivo nel terreno;

ΔU è la variazione di energia interna del terreno.

L'esplicitazione dei termini che definiscono gli scambi termici e di massa consente di scrivere le equazioni di bilancio in forma completa ed evidenziare le incognite del problema ovvero la temperatura del fogliame T_f e del terreno T_g . Per effettuare la risoluzione numerica del problema, si utilizza la linearizzazione delle incognite (T_f e T_g), che si presentano con un ordine superiore al primo. Si perviene così alle equazioni finali per la risoluzione numerica del problema, che rappresentano un sistema di equazioni algebriche accoppiate che risolte ad ogni istante temporale permettono di ottenere simultaneamente le incognite T_f e T_g .

5.4 Analisi dei risultati forniti dal modello termofisico

Per la validazione del codice di calcolo è stato selezionato un giorno, rappresentativo delle condizioni climatiche estive, per cui sono disponibili i dati sperimentali acquisiti dal sistema DAQ. I valori sperimentali delle grandezze sono stati opportunamente elaborati in modo da disporre di grandezze medie orarie. La giornata selezionata è il 6 agosto 2013, caratterizzata da condizioni di cielo sereno ed elevato irraggiamento solare.

Il codice di calcolo richiede in ingresso una serie di grandezze e di parametri. Di fondamentale importanza sono le grandezze caratterizzanti il clima. In particolare, sono stati considerati:

- ✓ Temperatura dell'aria esterna
- ✓ Temperatura del cielo
- ✓ Irraggiamento solare
- ✓ Velocità del vento
- ✓ Precipitazioni
- ✓ Umidità dell'aria
- ✓ Pressione atmosferica

Di seguito sono mostrati gli andamenti orari delle grandezze climatiche esterne fornite come input al codice di calcolo per la giornata considerata.

La temperatura dell'aria esterna, per il giorno selezionato, va da un minimo di 23,3 °C ad un massimo di 37,8 °C. L'umidità relativa dell'aria esterna oscilla tra il 20 ed il 75%. I valori massimi sono registrati nelle ore notturne. La temperatura del cielo segue l'andamento della

temperatura dell'aria esterna a cui è correlata e oscilla tra un valore minimo di 283,4 K (10,29 °C) ed un massimo di 293 K (19,9 °C).

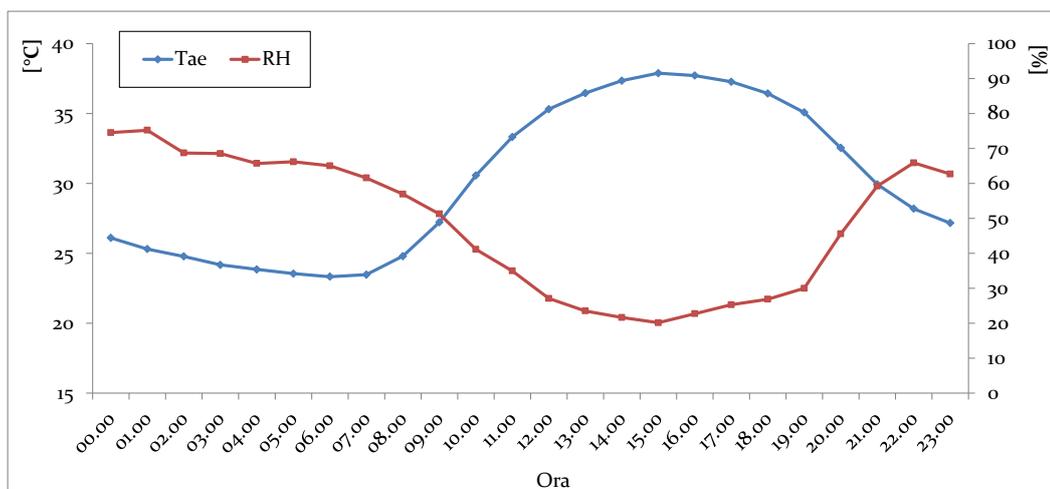


Fig. 5.10. Andamento della temperatura dell'aria esterna e dell'umidità relativa

La radiazione solare globale mostra il tipico andamento a campana, con un valore massimo di 898,8 W/m².

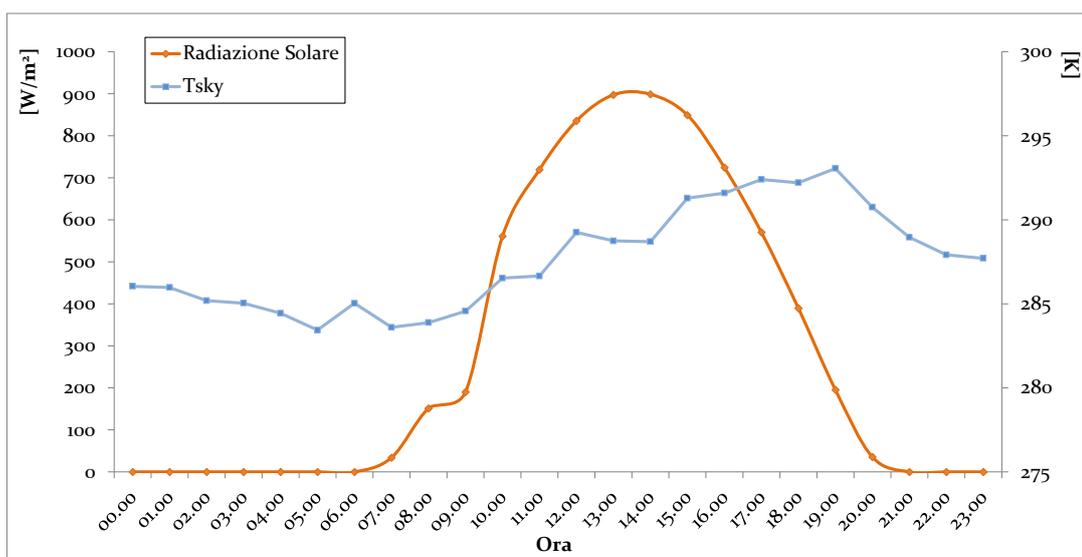


Fig. 5.11. Andamento della radiazione solare e temperatura del cielo

La velocità del vento mostra anch'essa un andamento variabile tra un minimo di 0,33 m/s ed un massimo di 2,7 m/s, registrato nelle ore pomeridiane. La pressione atmosferica ha variazioni molto contenute tra 992 ed 995 hPa.

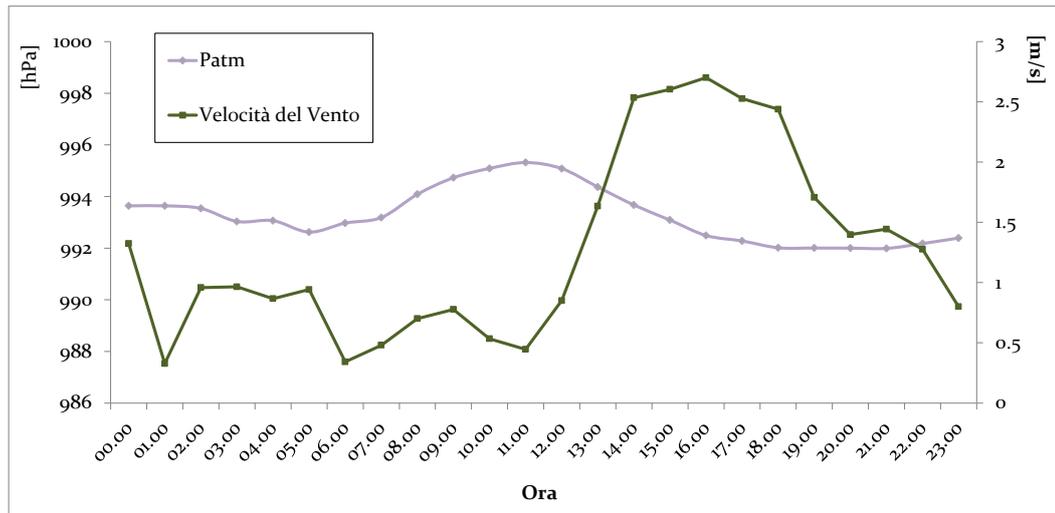


Fig. 5.12. Andamento della velocità del vento e della pressione atmosferica

Nel giorno di agosto selezionato gli impianti di climatizzazione non risultano in funzione per cui le variabili monitorate internamente sono rappresentative della condizione di evoluzione libera. Di seguito vengono graficati gli andamenti, per il giorno selezionato, della temperatura ed umidità relativa degli ambienti interni (Locale 1 sottostante la porzione di copertura denominata settore 1) e della temperatura superficiale del solaio.

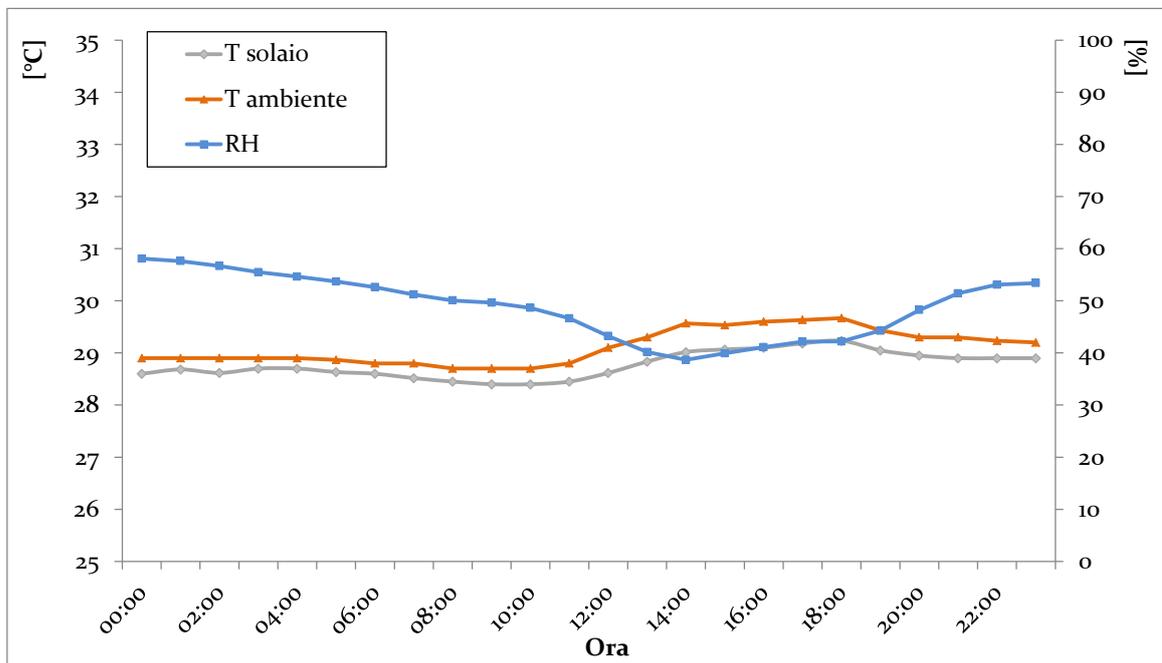


Fig. 5.13. Andamento delle variabili interne nel Locale 1 per la giornata estiva selezionata

Il codice di calcolo numerico sviluppato richiede l’inserimento di numerosi parametri relativi allo strato vegetativo. Alcuni di questi sono di difficile quantificazione e misurazione, per cui si è ricorso a valori di riferimento presenti in letteratura; per altri invece, è stato possibile procedere alla misurazione diretta in situ. I parametri seguenti di seguito riportati sono stati

definiti in base alla letteratura presente ed alla indagine condotta su studi disponibili in letteratura, scegliendo valori opportuni in base alla tipologia di vegetazione installata sul sito sperimentale del cubo 46C:

- ✓ Coefficiente di estinzione per onde corte $k_s = 1,10$ (foglie orizzontali)
- ✓ Albedo della vegetazione $\rho_s = 0,25$
- ✓ Coefficiente di traspirazione $TC = 20$
- ✓ Rapporto tra il rateo di evaporazione ed il rateo di traspirazione $R_{et}/R_{tp} = 1$

Per determinare il coefficiente di copertura parziale, si è proceduto dapprima con un rilievo fotografico e successivamente le foto sono state assemblate e vettorializzate in Cad, al fine di ottenere la percentuale di settore coperta da vegetazione e la rimanente percentuale priva di vegetazione.



Fig. 5.14. Individuazione dell'area coperta da vegetazione, settore 1 - agosto 2013

Risulta che la vegetazione copre il settore 1 per il 55% e il restante 45% è terreno nudo. Il coefficiente di copertura da utilizzare come input del codice è quindi $\sigma_f = 0.55$. La vegetazione presente sul sito sperimentale è di tre tipologie: *Carpobrotus edulis*, *Dianthus grantianopolitanus*, *Cerestium tomentosum*. I tre tipi non sono presenti in equa misura: le piante grasse (*Carpobrotus edulis*) sono circa l'82% del totale, mentre i cespugli sono il 15% per le *Cerestium tomentosum* e per le *Dianthus grantianopolitanus* solo il 3%. Data la differente distribuzione, per definire un unico valore di altezza della vegetazione e un unico valore del parametro leaf area index (LAI), si è adoperata la media ponderata.

Dalle misure in situ dell'altezza della vegetazione si è ricavato:

- ✓ Altezza minima piante grasse: $Z_{fmin} = 5$ cm
- ✓ Altezza massima piante grasse: $Z_{fmax} = 21$ cm
- ✓ Altezza minima cespugli (entrambi i tipi): $Z_{fmin} = 3$ cm
- ✓ Altezza massima cespugli (entrambi i tipi): $Z_{fmax} = 11$ cm



Fig. 5.15. Rilievo sullo strato vegetale, misura dell'altezza della vegetazione sulla copertura

Facendo la media e ponderando in base alla distribuzione di tipologia di pianta, il valore di altezza da inserire nel codice di calcolo è risultato: $Z_f = 12$ cm.

Per la definizione del parametro LAI ci si è rifatti in parte alla letteratura e in parte a misure dirette. Infatti, per i cespugli sempre verdi, da una tabella presente in letteratura [8] e di seguito riportata, si ricava:

- ✓ Leaf Area Index cespugli LAI_{min} = 5
- ✓ Leaf Area Index cespugli LAI_{max} = 6

Per le piante grasse, invece, ci si rifà ad un'altra definizione presente in letteratura [10], per la quale il parametro LAI si misura contando il numero di intersezioni di un ago verticale forante le foglie della vegetazione. In base a questa descrizione e ai rilievi fotografici realizzati in più punti della copertura, si è in grado di definire questi valori:

- ✓ Leaf Area Index piante grasse LAI_{min} = 1
- ✓ Leaf Area Index piante grasse LAI_{max} = 4

Facendo la media e ponderando in base alle diverse tipologie di pianta, il valore di LAI da inserire nel codice di calcolo è: LAI = 3.

Le principali proprietà termiche del terreno sono state fornite dall'azienda:

- ✓ Contenuto massimo d'acqua 40%
- ✓ Densità del terreno a secco: 1060 kg/m³
- ✓ Densità del terreno a saturazione: 1360 kg/m³
- ✓ Calore specifico a secco: 1227 J/kg K
- ✓ Calore specifico a saturazione: 1388 J/kg K
- ✓ Conducibilità termica media K = 0,27 W/(mK)

Dalla letteratura si è ricavato inoltre il valore di albedo del terreno ρ_g pari a 0,31.

Le proprietà termofisiche del substrato ovvero densità ρ , calore specifico c_p , sono ritenute variabili e calcolate in funzione del contenuto volumetrico d'acqua ω_g .

In base a studi effettuati in precedenza è risultato opportuno adottare la correlazione proposta da Sailor [21, 22] per il calcolo della conducibilità termica del terreno in funzione del contenuto d'acqua, secondo l'espressione:

$$\frac{K}{K_{dry}} = \frac{1.45 \exp(4.411S_r)}{[1 + 0.45 \exp(4.411S_r)]}$$

A questo punto è necessario conoscere il valore di K_{dry} o alternativamente il valore medio di K per poter utilizzare la relazione precedente la quale risulta funzione del grado di saturazione S_r . Analogamente per quanto riguarda la capacità termica volumetrica, supponendo una variabilità di tipo lineare, dalla conoscenza dei valori di C a secco ed a saturazione è possibile esprimere C come:

$$C = C_{dry} + \frac{C_{sat} - C_{dry}}{\theta_{sat}} * \theta$$

Per la validazione del modello termofisico si è proceduto ad effettuare una campagna di simulazioni allo scopo di verificare l'accuratezza del modello sviluppato nel riprodurre i fenomeni termofisici che caratterizzano la copertura a verde mediante la comparazione tra le variabili termometriche misurate sperimentalmente e gli outputs forniti dal codice stesso.

In particolare è possibile fornire al codice, come dati di input rappresentativi delle condizioni climatiche interne, la temperatura superficiale del soffitto degli ambienti interni T_r . Gli outputs del codice saranno i valori di:

1. Temperatura del fogliame T_f
2. Temperatura superficiale del terreno T_g
3. Temperatura del nodo centrale del terreno T_c
4. Temperatura alla base del terreno T_b

Nel grafico successivo sono mostrati gli andamenti orari, della temperatura superficiale ed alla base del terreno, della temperatura superficiale misurata sul solaio interno e della temperatura media misurata nel terreno. Allo scopo di selezionare le grandezze più significative per la comparazione è stato necessario effettuare delle osservazioni sulle misure ricavate in campo. È da rilevare che i valori misurati tramite i due sensori inseriti nel terreno risultano molto prossimi, per cui si ritiene possibile, con buona approssimazione, rappresentare le due misure mediante il loro valor medio ($T_{c_misurata}$) il quale può essere utilizzato nel confronto con le temperature in output al codice. L'analisi dei valori di temperatura graficati mostra che l'andamento della temperatura superficiale del terreno fornita dal codice T_g risulta in ottimo accordo con i dati sperimentali ($T_{c_misurata}$) durante le ore notturne in cui sono prevalenti gli scambi radiativi nell'infrarosso con il cielo. Non appena compare il contributo energetico associato alla radiazione solare (F_{is}), la temperatura superficiale del terreno si innalza discostandosi dai valori sperimentali misurati al di sotto della superficie del suolo. Di fatto il bilancio energetico del nodo temperatura superficiale, del resto molto complesso, presenta componenti differenti rispetto al nodo situato nel terreno, e tra queste la forzante principale è proprio la radiazione a onde corte, ossia la radiazione solare. Si osserva inoltre che durante le ore diurne lo sfasamento tra il valore massimo registrato della temperatura T_g e il massimo valore che assume la forzante solare è uguale allo sfasamento tra i picchi di $T_{c_misurata}$ e di F_{is} . Questo comportamento è essenzialmente dovuto agli effetti capacitativi del terreno che, in termini di ritardo temporale, producono gli effetti nella schematizzazione numerica e nelle misure sperimentali.

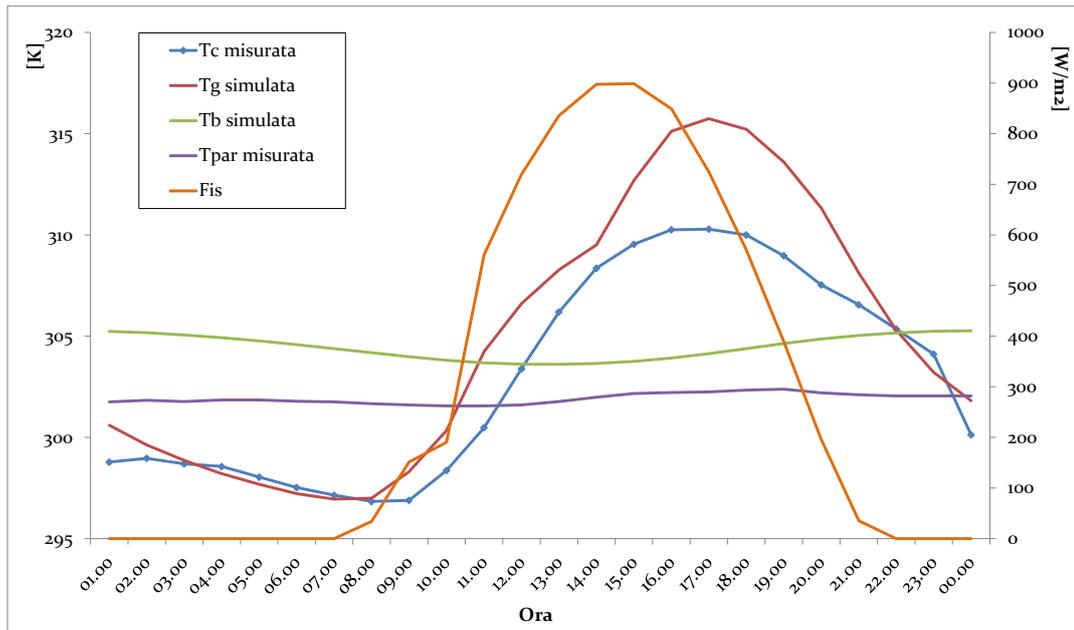


Fig. 5.16. Andamento orario della temperatura superficiale del terreno T_g , della temperatura nel terreno T_c e della temperatura alla base del terreno T_b , simulati e valori sperimentali della temperatura superficiale interna T_{par} , della temperatura nel terreno $T_{c\ media}$ e della radiazione solare F_{is} .

Nel grafico riportato in figura 5.17 sono illustrati gli andamenti della temperatura del fogliame T_f , della temperatura superficiale del terreno T_g , della temperatura dell'aria esterna T_{ae} e della radiazione solare globale sul piano orizzontale F_{is} . E' possibile osservare la forte dipendenza della temperatura del fogliame dall'andamento della radiazione solare. Al crescere di F_{is} i valori di T_f si incrementano repentinamente e, per l'ipotesi di ritenere la vegetazione con capacità termica nulla non si notano sfasamenti temporali tra i valori massimi registrati per le due grandezze. Inoltre la temperatura T_f presenta un andamento molto prossimo a quello della temperatura dell'aria esterna T_{ae} , mostrando valori massimi superiori durante le ore diurne a causa dell'assorbimento della radiazione solare da parte del fogliame, mentre si osservano valori leggermente più bassi di notte a causa dello scambio infrarosso con la volta celeste. Quest'ultimo fenomeno non viene riscontrato, invece, sulla superficie del terreno in quanto gli effetti capacitativi dello stesso sfasano nel tempo gli effetti della radiazione solare assorbita che a loro volta prevalgono sulla dispersione di calore notturna del terreno nei riguardi della volta celeste. La temperatura della vegetazione varia tra un minimo di 23,1 °C alle ore 6 e un massimo di 42,6°C alle 17, mentre l'andamento della temperatura del terreno varia tra un minimo di 23,8°C e un massimo di 42,6 °C.

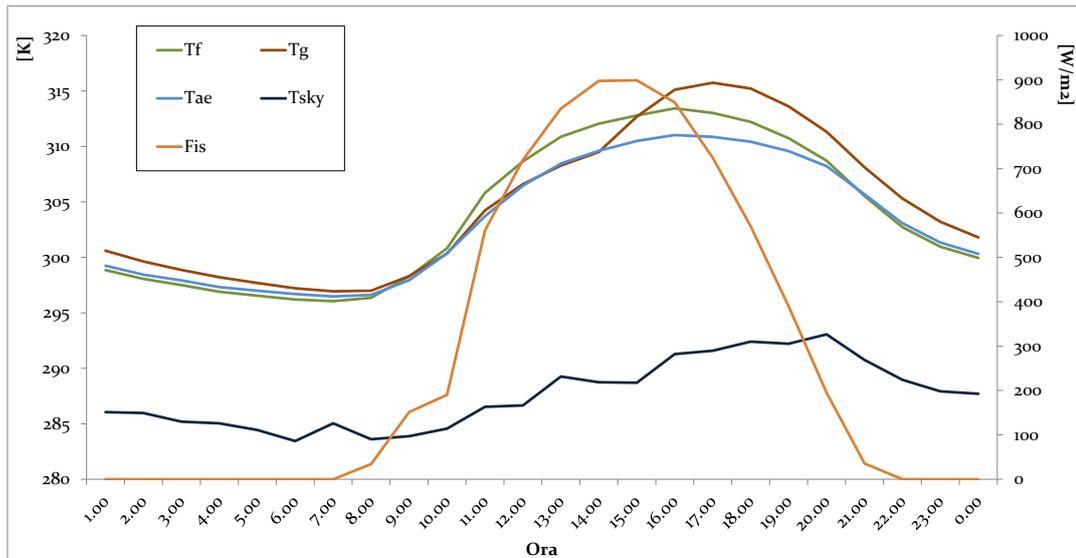


Fig. 5.17. Andamenti della temperatura del fogliame T_f e superficiale del terreno T_g simulati, confrontati con l'andamento delle forzanti esterne ovvero temperatura dell'aria T_{ae} e radiazione solare

$$F_{is}$$

Nella figura seguente sono graficati gli andamenti dei vari contributi energetici dell'equazione di bilancio della vegetazione, calcolati dal codice a seguito della risoluzione numerica del problema e quindi del calcolo delle temperature incognite T_g , T_f , T_c e T_b .

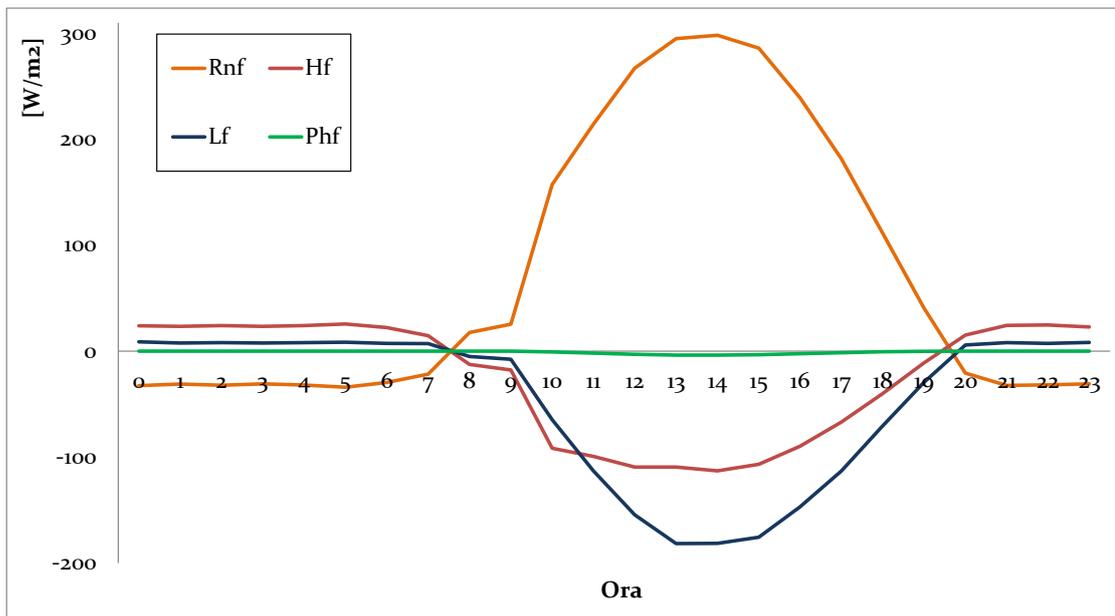


Fig. 5.18. Contributi energetici del fogliame in output: contributo radiativo netto R_{nf} , contributo sensibile H_f , contributo latente L_f , contributo associato alle precipitazioni P_f , contributo associato alla fotosintesi P_{hf}

Il flusso di calore derivante dalle precipitazioni P_f è nullo nelle 24 ore simulate in quanto non sono presenti precipitazioni nei dati di input. Si nota anche come il flusso di calore derivante

dalla fotosintesi e dalla respirazione P_{hf} mostri valori relativamente bassi raggiungendo un valore massimo pari a circa -3.76 W/m^2 . Il flusso di calore sensibile tra fogliame e ambiente esterno H_f si mantiene positivo nelle ore notturne, mentre diviene negativo in presenza di radiazione solare. Il contributo sensibile è proporzionale alla differenza di temperatura tra l'aria presente tra le foglie e la vegetazione, per cui a seguito dell'assorbimento della radiazione a onde corte l'innalzamento della temperatura del fogliame provoca una conseguente cessione di energia all'aria per effetto convettivo computato nel termine H_f . Di rilevante importanza è il flusso di calore latente L_f , che assume un valore di picco di circa 181.76 W/m^2 con segno negativo; per cui del calore totale in gioco nel bilancio energetico un'aliquota importante viene dispersa per effetto dei fenomeni evapotraspirativi. Il flusso radiativo netto R_{nf} è negativo nelle ore notturne a causa dello scambio radiativo con la volta celeste, mentre a seguito della presenza della radiazione solare, il flusso netto si inverte. Ciò è chiaramente visibile nella figura successiva in cui sono riportati i tre contributi del flusso radiativo netto: radiazione a onde corte assorbita $R_{n,f,s}$, flusso radiativo a onde lunghe scambiato con l'esterno $R_{n,f,sky}$ e flusso radiativo scambiato con il terreno $R_{n,f,g}$.

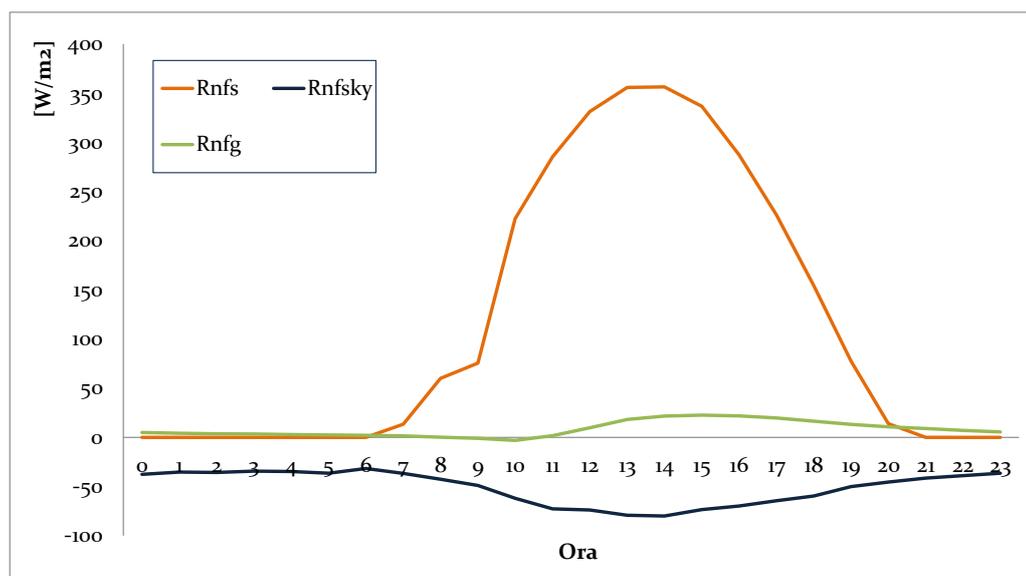


Fig. 5.19. Contributi radiativi del fogliame in output: radiazione a onde corte assorbita $R_{n,f,s}$, flusso radiativo a onde lunghe scambiato con l'esterno $R_{n,f,sky}$ e flusso radiativo scambiato con il terreno $R_{n,f,g}$.

Il flusso radiativo scambiato con il cielo $R_{n,f,sky}$ è negativo nelle 24 ore simulate, ciò è dovuto al fatto che, come mostra la figura 5.17, la temperatura del fogliame è sempre superiore alla temperatura della volta celeste. Il contributo dovuto agli scambi tra vegetazione e terreno non assume grossa rilevanza e, in base alla definizione del modello termofisico, è circa uguale, ma di segno opposto, al flusso radiativo tra terreno e vegetazione, come verrà evidenziato nel

seguito. Le differenze sono dovute al fattore di copertura. Il termine $R_{n,f,s}$ infine segue l'andamento della radiazione solare sul piano orizzontale F_{is} , ed assume un valore massimo di circa 356.55 W/m^2 ; si può quindi apprezzare come dei 898 W/m^2 di radiazione solare incidente sulla copertura a verde circa il 40% venga assorbito dalla vegetazione.

Nella figura seguente sono graficati gli andamenti dei vari contributi energetici associati al terreno.

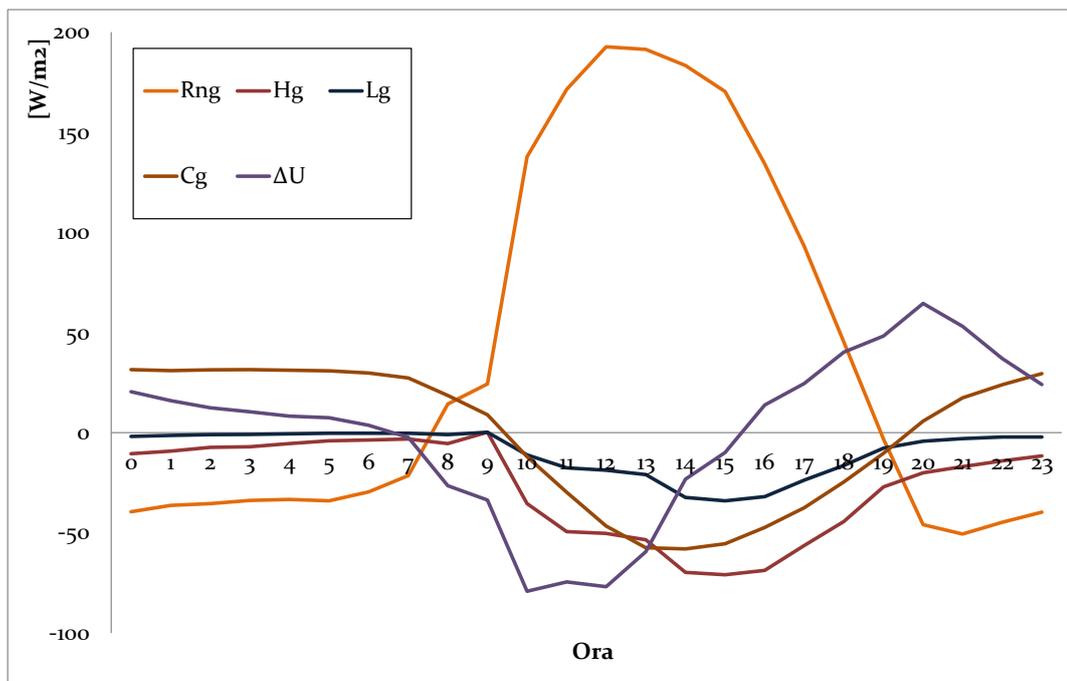


Fig. 5.20. Contributi energetici del terreno in output: contributo radiativo netto R_{ng} , contributo sensibile H_g , contributo latente L_g , contributo associato alle precipitazioni P_g , conduzione nel terreno C_g , variazione di energia interna ΔU

Per lo strato di terreno valgono considerazioni simili a quelle espone per lo strato vegetativo, con alcune differenze. Analogamente al caso precedente, il flusso di calore derivante dalle precipitazioni P_f è nullo. Il contributo latente L_g , pur mantenendo un andamento simile, assume valori inferiori rispetto al bilancio della vegetazione. Il flusso di calore sensibile H_g assume per la maggior parte delle ore valori negativi; ciò è facilmente intuibile considerando che la temperatura del terreno mostra valori superiori a quelli della vegetazione e dell'aria esterna durante le 24 ore di simulazione. Di notevole importanza sono i contributi associati alla conduzione nel terreno C_g ed alla sua variazione di energia interna ΔU . Con riferimento al nodo superficiale esterno si osserva, dal grafico precedente, come il termine conduttivo sia positivo, ovvero entrante, nelle ore notturne. Ciò dimostra come il flusso di calore trasmesso per conduzione sia rivolto verso l'alto ossia dalla base del solaio alla superficie del terreno. A

seguito dell'innalzamento della temperatura superficiale il flusso conduttivo si inverte diventando negativo, per ritornare positivo dalle ore 20 in poi.

Di seguito sono riportati gli andamenti dei contributi del flusso radiativo netto relativo al terreno: radiazione a onde corte incidente $R_{n,g,s}$, flusso radiativo a onde lunghe scambiato con il cielo $R_{n,g,sky}$ e flusso radiativo scambiato con il fogliame $R_{n,g,f}$.

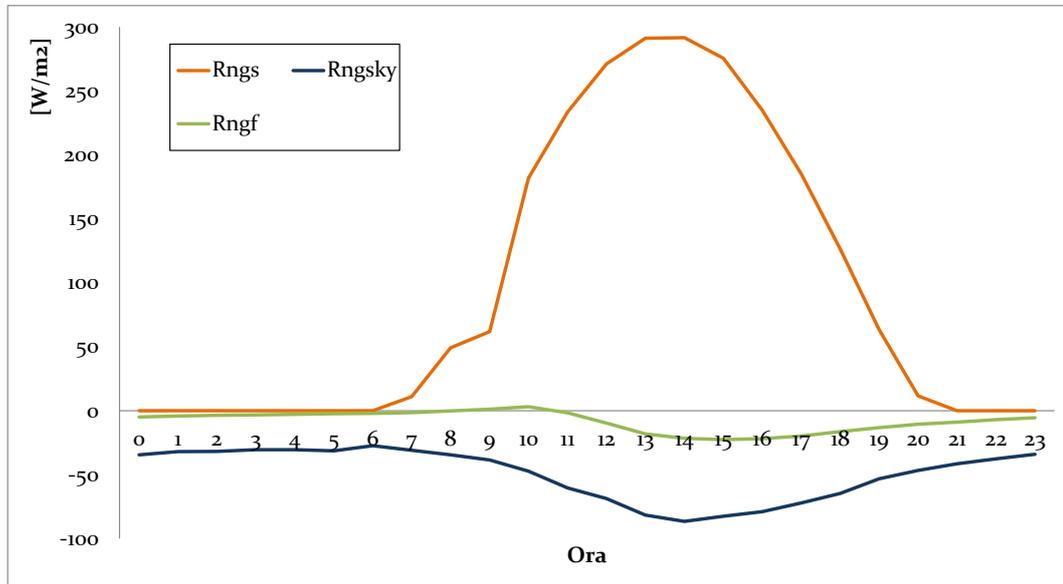


Fig. 5.21. Contributi radiativi del terreno in output: radiazione a onde corte assorbita $R_{n,f,g}$, flusso radiativo a onde lunghe scambiato con l'esterno $R_{n,g,sky}$ e flusso radiativo scambiato con il terreno

$$R_{n,g,f}$$

Anche in questo caso il termine di scambio con il cielo si mantiene negativo nelle 24 ore a causa della maggiore temperatura superficiale del terreno rispetto al cielo. Come già espresso in precedenza si nota anche come il termine $R_{n,g,f}$ sia opposto e prossimo al termine $R_{n,f,g}$ in quanto nella formulazione del modello i due contributi presentano, a meno dei segni, uguale espressione ma differente conteggio del termine contenente il fattore di copertura. Infine il termine rappresentativo della radiazione a onde corte incidente sul terreno segue, come nel caso precedente, l'andamento della radiazione solare sul piano orizzontale F_{is} , assumendo un valore massimo di circa $291,7 \text{ W/m}^2$.

Altro termine energetico molto importante, che costituisce anche un elemento di affinamento del modello rispetto a quelli disponibili in letteratura, è il contributo associato alla variazione di energia interna del terreno. La variazione di energia interna è strettamente correlata all'andamento della temperatura superficiale del terreno; si nota come nei punti di massimo e minimo della curva rappresentante la temperatura T_g il termine ΔU si annulli. Infatti di notte il terreno si scarica, e dopo il raggiungimento del valor minimo di T_g (momento in cui

cambia la concavità), si ha un'inversione del flusso termico. Successivamente il terreno inizia a caricarsi e ΔU registra il valore massimo in corrispondenza del punto in cui si presenta il picco di T_g .

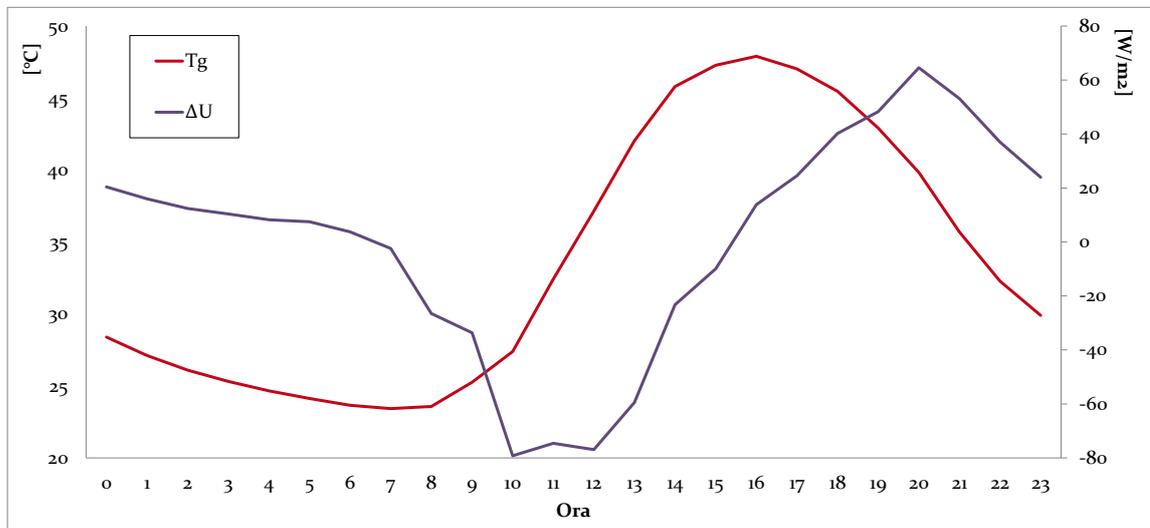


Fig. 5.22. Andamenti di ΔU e T_g nel giorno simulato

5.5 Accoppiamento del modello termico con un modello idraulico

Per creare un modello utilizzabile per la simulazione di coperture a verde è stato introdotto un approccio semplificato per accoppiare il modello termofisico descritto in precedenza con un modello idraulico che sia in grado di calcolare il contenuto d'acqua del terreno ad ogni istante temporale.

Il moto dell'acqua nel sottosuolo può avvenire in condizioni di saturazione o non saturazione. L'infiltrazione ha luogo nella parte più superficiale del terreno e pertanto si manifesta quasi sempre con un moto verticale in condizioni di non saturazione.

La relazione di base per la trattazione del moto idrico nel sottosuolo è la Legge di Darcy, la quale esprime un legame di proporzionalità diretta tra la velocità di filtrazione in un mezzo saturo e la perdita di energia subita dalla corrente liquida nel tubo di flusso durante il moto.

$$q = -k\nabla\Pi$$

Dove:

q è il flusso di acqua liquida per unità di area [m/s],

k è la conducibilità idraulica [m/s],

Π è il potenziale totale per unità di peso [m],

∇ è l'operatore laplaciano $\nabla = \partial / \partial x + \partial / \partial y + \partial / \partial z$.

In generale, il potenziale idrico del suolo è considerato come somma di quattro potenziali: gravitazionale (ψ_g), matriciale (ψ_m), osmotico (ψ_o) ed il potenziale di pressione (ψ_p). Il potenziale gravitazionale o energia potenziale gravitazionale è associata alla quota rispetto a un piano di riferimento. Il potenziale matriciale è la parte di potenziale dell'acqua associata all'attrazione dell'acqua da parte della matrice solida. Questo potenziale è spesso chiamato potenziale capillare. Il potenziale osmotico è la parte del potenziale dell'acqua che può essere attribuito alla attrazione di soluti. In acqua pura questo potenziale è considerato pari a zero. Il potenziale di pressione è pari a p/γ . Nei terreni saturi questo potenziale è chiamato quota piezometrica perché corrisponde al livello piezometrico. Questa quota in condizioni insature, nella maggior parte dei casi, può essere trascurata.

Le equazioni che descrivono il movimento dell'acqua in terreni insaturi sono uguali a quelle per terreni saturi con la fondamentale differenza che la legge di Darcy di filtrazione è generalizzata in modo tale che la conducibilità idraulica sia una funzione dell'umidità del suolo (contenuto idrico del suolo):

$$k = k(\theta) = k(\psi_m)$$

Se si considerano condizioni insature con acqua non salina, il potenziale idrico del suolo è costituito da due dei quattro componenti precedentemente citati, ossia potenziale idrico gravitazionale e matriciale, entrambi per unità di peso:

$$\Pi = \Psi = z + \psi_m$$

Per cui nelle tre direzioni la legge di Darcy può essere scritta come:

$$q_x = -k(\psi_m) \frac{\partial(\psi_m + z)}{\partial x} = -k(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial x}$$

$$q_y = -k(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial y}$$

$$q_z = -k(\psi_m) \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right)$$

Se si scrive un bilancio di massa per un volume elementare di terreno e si combina con la precedente equazione di Darcy, si ottiene infine l'equazione del movimento dell'acqua in terreni insaturi, nota anche come Equazione di Richard:

$$C^*(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho k(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho k(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho k(\psi_m) \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right)$$

Dove:

$$C(\psi_m) = \rho \frac{\partial \theta}{\partial \psi_m}, \text{ con } \theta \text{ contenuto volumetrico d'acqua [m}^3\text{/m}^3\text{]}$$

Nella sola direzione z l'equazione diventa:

$$C^*(\psi_m) \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho k(\psi_m) \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right)$$

L'equazione precedente è un'equazione differenziale alle derivate parziali di secondo ordine, che deve essere risolta numericamente. Per la risoluzione sono necessarie delle relazioni aggiuntive che descrivono le proprietà idrauliche del suolo. Queste relazioni devono esprimere la variazione di conducibilità idraulica del terreno in funzione del potenziale matriciale $k(\psi_m)$, e la variazione del contenuto d'acqua volumetrico in funzione del potenziale matriciale $\theta(\psi_m)$, che sono note come la curva di ritenzione idrica del suolo o curva caratteristica di umidità del terreno che è caratteristica di ogni tipo di terreno.

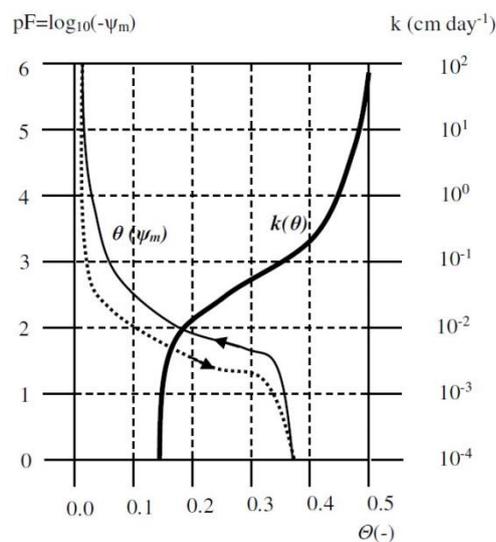


Fig. 5.23. Curva caratteristica di ritenzione idrica di un terreno

Per ricavare queste curve possono essere utilizzati apparati sperimentali o soluzioni analitiche. Per quanto riguarda le soluzioni analitiche, ci sono molti modelli disponibili in letteratura e tra di loro i più ampiamente utilizzati e riconosciuti sono il modello di Brooks-Corey e Van-Genuchten [23].

Il modello idraulico è stato sviluppato come una forma integrale dell'equazione di Richards assumendo $\rho = \text{cost}$. L'integrazione dell'equazione tra due livelli di un elemento di terreno Z_{bot} e Z_{top} conduce a :

$$\frac{d}{dt} \int_{Z_{\text{bot}}}^{Z_{\text{top}}} \theta(z, t) dz = \int_{Z_{\text{bot}}}^{Z_{\text{top}}} \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi_m) \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) \right) dz$$

Applicando il teorema di Gauss (divergenza) per la trasformazione di un integrale di volume in uno di superficie, il termine sul lato destro dell'equazione precedente diventa il flusso attraverso i confini del volume di terreno considerato. Il termine sul lato sinistro rappresenta il cambiamento dell'umidità del suolo nel tempo.

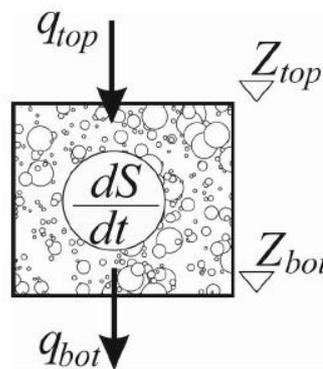


Fig. 5.24. Rappresentazione schematica di un elemento di terreno

Così l'equazione precedente diventa:

$$\frac{dS}{dt} = q_{\text{top}} - q_{\text{bot}}$$

Dove S è il contenuto di umidità del suolo [m] e $q_{\text{top}}/q_{\text{bot}}$ sono i flussi sul contorno [m/s]. Se l'ipotesi di **drenaggio libero** (il movimento dell'acqua è guidato dal solo potenziale gravitazionale $\frac{\partial \psi_m}{\partial z} = 0$) viene applicata come condizione al contorno inferiore, si ha, dalla legge di Darcy, che il flusso in tale contorno è pari alla conducibilità idraulica:

$$q_{bot} = k(\psi_m) \left(\frac{\partial \psi_m}{\partial z} + 1 \right) = k(\psi_m) = k(\theta)$$

La relazione della conducibilità in funzione del contenuto d'acqua utilizzata nel modello idraulico è simile alle relazioni di Brooks-Corey e Van-Genuchten che si trovano in letteratura, ma con un numero inferiore di parametri. È funzione della saturazione relativa e dell'esponente n , come di seguito:

$$k(\theta) = k_{sat} \left(\frac{SW - FC}{STO - FC} \right)^n = k_{sat} S_r^n$$

Dove k_{sat} è la conducibilità idraulica a saturazione [m/s], SW è il contenuto d'acqua [m], FC è la capacità di campo [m], STO è la capacità di accumulo del terreno (corrispondente alla porosità) [m] e S_r è la saturazione relativa del terreno.

Riorganizzando l'equazione in modo che il flusso superiore viene dapprima aggiunto al contenuto di umidità del terreno nel membro a sinistra ed esprimendo il contenuto di umidità del terreno disponibile per la percolazione come $S = SW - FC$, si ottiene:

$$\frac{d}{dt}(SW - FC) = -q_{bot} = -k_{sat} \left(\frac{SW - FC}{STO - FC} \right)^n$$

Dividendo entrambi i membri dell'equazione per $STO^* = STO - FC$ si ottiene l'equazione differenziale non lineare ordinaria in funzione della variabile S_r .

$$\frac{dS_r}{dt} = -\frac{k_{sat}}{STO^*} S_r^n$$

Se l'equazione di sopra è integrata tra $t=0$ ($S_r = S_{r(0)}$) e $t=t$ ($S_r = S_r(t)$) si ottiene la soluzione per $S_r(t)$:

$$\int_{S_r(0)}^{S_r(t)} \frac{dS_r}{S_r^n} = \int_{t_0=0}^{t_1=t} -\frac{K_{sat}}{STO^*} dt$$

$$S_r(t) = \left((n-1) \frac{K_{sat}}{STO^*} t + S_{r(0)}^{1-n} \right)^{\frac{1}{1-n}}$$

A questo punto, per ottenere la quantità di acqua che percola attraverso il bordo inferiore, il valore del flusso sul bordo inferiore va integrato nel periodo di tempo desiderato (time step Δt). Combinando le equazioni precedenti si ottiene:

$$W_{perc}(\Delta t) = \int_0^{\Delta t} k_{sat} S_r^n(t) dt$$

Risolviendo l'integrale si ottiene:

$$W_{perc}^{unsat}(\Delta t) = STO^* \left\{ S_{r(0)} - \left(S_{r(0)}^{(1-n)} + \frac{(n-1)k_{sat}}{STO^*} \Delta t_{unsat} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right\}$$

Se la saturazione relativa iniziale $S_{r(0)}$ è maggiore di 1, significa che la percolazione dal terreno saturo occorrerà prima di quella del terreno insaturo.

$$W_{perc}^{sat}(\Delta t) = k_{sat} \Delta t_{sat}$$

Dove il tempo di percolazione saturo si calcola come:

$$\Delta t_{sat} = \begin{cases} \min \left(\frac{SW - STO}{K_{sat}}; \Delta t \right), & SW \geq STO \\ 0 & SW < STO \end{cases}$$

Ed il tempo di percolazione insaturo è pari a $\Delta t_{unsat} = \Delta t - \Delta t_{sat}$. La percolazione totale del terreno si può calcolare come somma delle due percolazioni, saturo ed insaturo:

$$W_{perc}(\Delta t) = W_{perc}^{sat} + W_{perc}^{unsat}$$

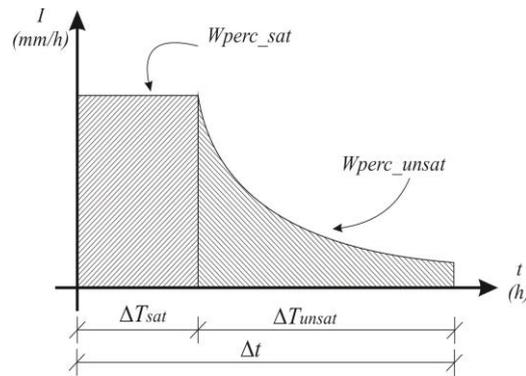


Fig. 5.25. Percolazione saturata ed insatura

Quindi, si sommano dapprima le precipitazioni (P) alla percolazione così che il contenuto d'acqua diventa:

$$SW'_i = SW_i + P * \Delta t$$

Nel generico intervallo di tempo Δt il contenuto d'acqua sarà ridotto dell'aliquota percolata:

$$SW''_i = SW'_i - W_{perc}(SW'_i, \Delta t)$$

Dopo la percolazione, i flussi di calore latente sono convertiti in un consumo d'acqua [m/s] e sottratti dal contenuto d'acqua SW .

$$CONS = \frac{L_g + L_f + P_{hf}}{L}$$

$$SW''_i = SW''_i - CONS * \Delta t$$

Ad ogni modo è inserito un limite sul valore del contenuto d'acqua che non può scendere al di sotto di una soglia, denominata Wilting Point WP , tale che l'acqua contenuta nel terreno non sia accessibile dalle radici delle piante. Per cui, infine, il contenuto d'acqua si calcola come:

$$SW_{i+1} = \left\{ \begin{array}{ll} SW''_i & ; SW''_i > WP \\ WP & ; SW''_i \leq WP \end{array} \right\}$$

E il contenuto d'acqua al time step successivo si può calcolare come :

$$\theta_{i+1} = \frac{SW_{i+1}}{Z_{top} - Z_{bot}}$$

Per risolvere il sistema di equazioni accoppiato, il valore di contenuto d'acqua iniziale è fornito al codice numerico. Successivamente sono calcolate le proprietà termiche del substrato (capacità termica $C(\theta)$ e conducibilità termica $\lambda(\theta)$) in funzione di questo valore di contenuto d'acqua. Si risolvono così le equazioni di bilancio energetico che forniscono in output la temperatura del fogliame e la temperatura superficiale del terreno. La conoscenza di queste temperature permette di calcolare tutti i contributi energetici del bilancio che possono essere usati per definire le condizioni al contorno per la risoluzione del modello idraulico. L'ultima equazione può essere così utilizzata per calcolare il valore del contenuto d'acqua al time step successivo. I calcoli sono ripetuti per il numero desiderato di time steps.

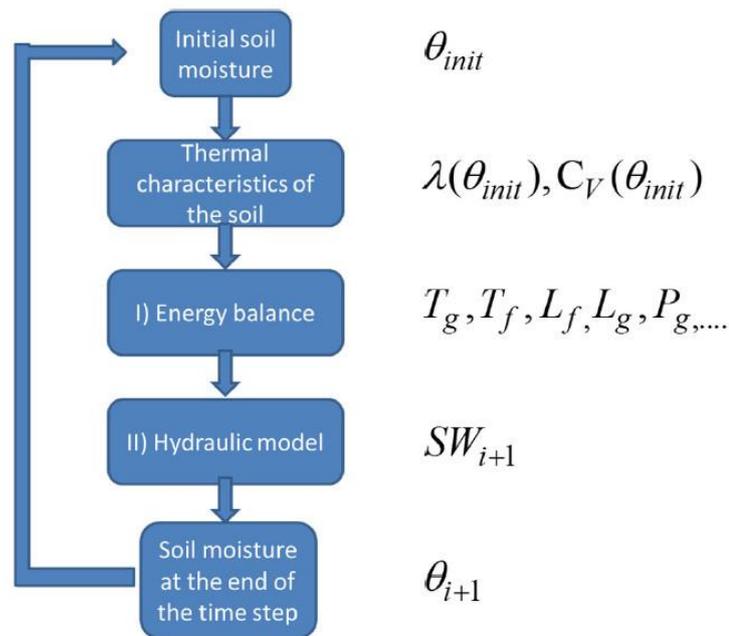


Fig. 5.26. Algoritmo per la risoluzione delle equazioni accoppiate

La calibrazione del modello idraulico è stata effettuata in funzione del contenuto volumetrico d'acqua. Ci sono cinque parametri di calibrazione:

- ✓ Porosità [-],
- ✓ Conducibilità idraulica a saturazione k_{sat} [m/s],
- ✓ Esponente di percolazione n [-],

- ✓ Capacità di campo FC [-],
- ✓ Wilting point WP [-].

Il numero di questi parametri può essere ridotto opportunamente se sono noti i valori di alcuni di essi tramite esperimenti in laboratorio. In questo caso sono stati considerati tutti e cinque.

Il modello è stato calibrato su un periodo di una settimana in aprile 2014 (04/04/2014 – 11/04/2014). La temperatura dell'aria esterna è variata tra 9,1 °C e 23,5 °C. L'umidità relativa tra 30,2 % e 95,3 %.

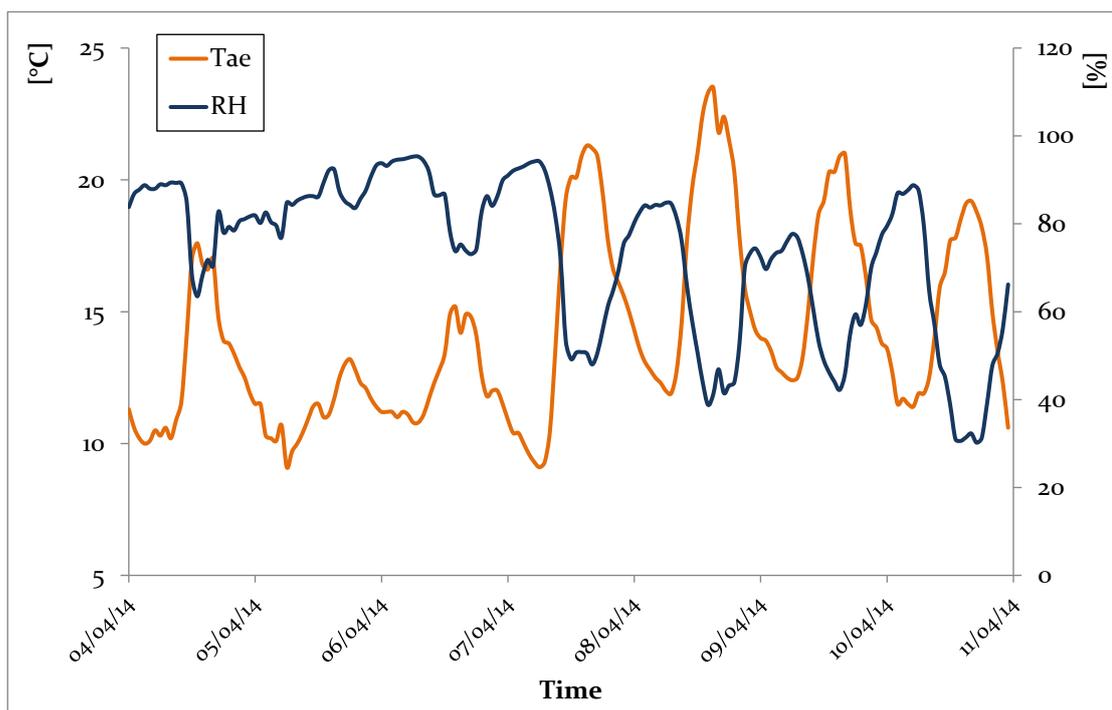


Fig. 5.27. Condizioni climatiche esterne nella settimana di calibrazione

Interessante notare che nel periodo scelto per la calibrazione si sono verificati degli eventi piovosi, uno più limitato, giorno 4 con una precipitazione totale di 2,6 mm, ed uno più cospicuo nei giorni 5 e 6 con una precipitazione totale di 21,4 mm, come si evince dalla figura seguente.

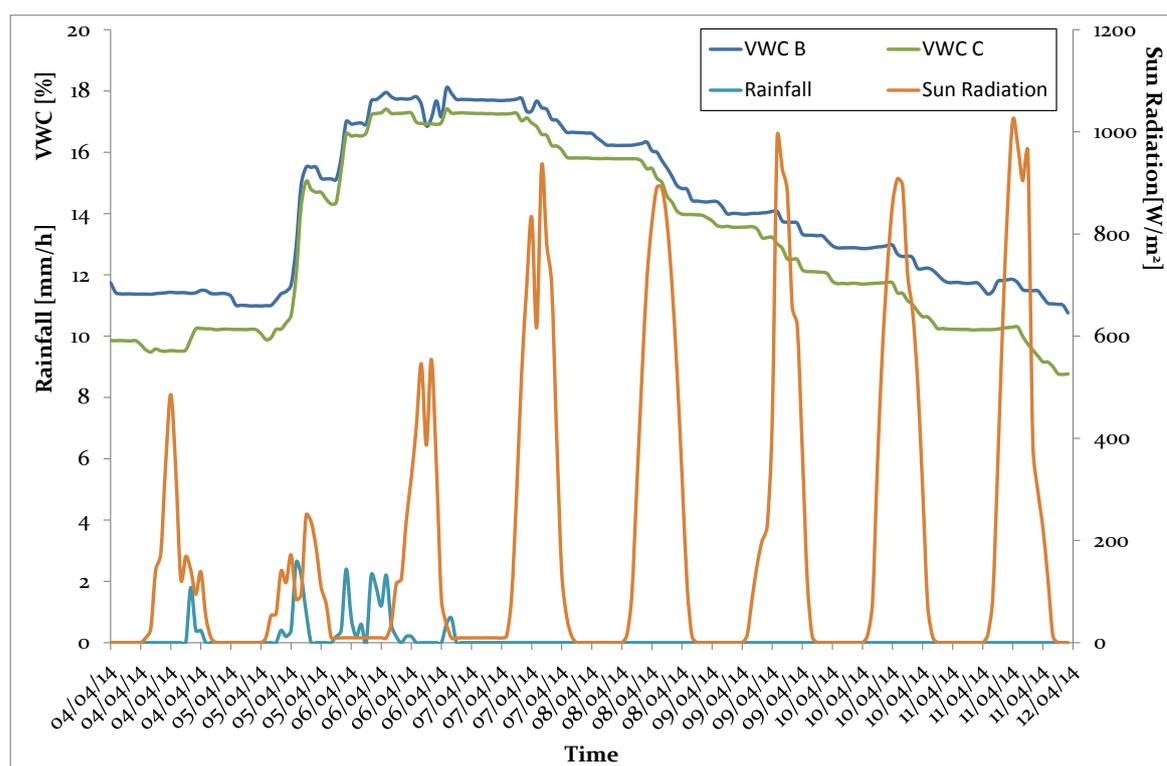


Fig. 5.28. Precipitazioni, radiazione solare e contenuto d'acqua nel settore 1 nella settimana di calibrazione

A seguito degli eventi piovosi si verifica un innalzamento del valore del contenuto d'acqua del substrato (sono mostrati in figura 5.28 i valori relativi a due punti di acquisizione del settore 1) che subisce un salto consistente in corrispondenza del picco massimo di precipitazione di 2,6 mm/h che avviene giorno 5 alle ore 15:00. VWC aumenta di circa 5 punti percentuali. Si osserva inoltre che nei giorni seguenti, a causa degli elevati valori di radiazione solare e dei minori valori di umidità relativa, si attivano in maniera cospicua i fenomeni di evapotraspirazione che provocano un declino del valore di contenuto d'acqua del terreno. In particolare, a partire da giorno 7, si osserva come la curva di VWC sia per il punto B che per il punto C si presenta circa costante durante le ore notturne, dove i fenomeni evapotraspirativi sono molto limitati, mentre declina con un pendenza accentuata durante le ore diurne per raggiungere a fine settimana valori circa prossimi a quelli iniziali. Ciò permette di concludere che la quantità di acqua trattenuta nel terreno, ossia non drenata, a seguito degli eventi piovosi evapora completamente in un arco di tempo pari a cinque giorni.

La calibrazione del modello è stata effettuata partendo da valori dei parametri basati sull'esperienza.

Per verificare il livello di attendibilità del modello è stato utilizzato il coefficiente di Nash Sutcliffe NS che varia da $-\infty$ ad 1. Il valore 1 indica una perfetta corrispondenza tra i valori osservati e modellati. Il coefficiente di Nash Sutcliffe è definito come:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (\theta_{obs}^i - \theta_{mod}^i)^2}{\sum_i (\theta_{obs}^i - \bar{\theta}_{obs})^2}$$

In particolare, a seguito dei diversi tentativi di calibrazione, i parametri che sono risultati maggiormente influenzanti il comportamento della curva di contenuto volumetrico d'acqua sono risultati *porosità* e capacità di campo *FC*. Siccome il substrato utilizzato nel sito sperimentale presenta una granulometria grossa è stato ritenuto opportuno utilizzare valori più bassi di porosità un valore di capacità di campo molto vicino alla porosità. A questa tipologia di materiale corrisponde in genere anche un elevato valore di conducibilità idraulica. Di seguito sono mostrati i risultati iniziali ed i migliori risultati ottenuti al termine del processo di calibrazione.

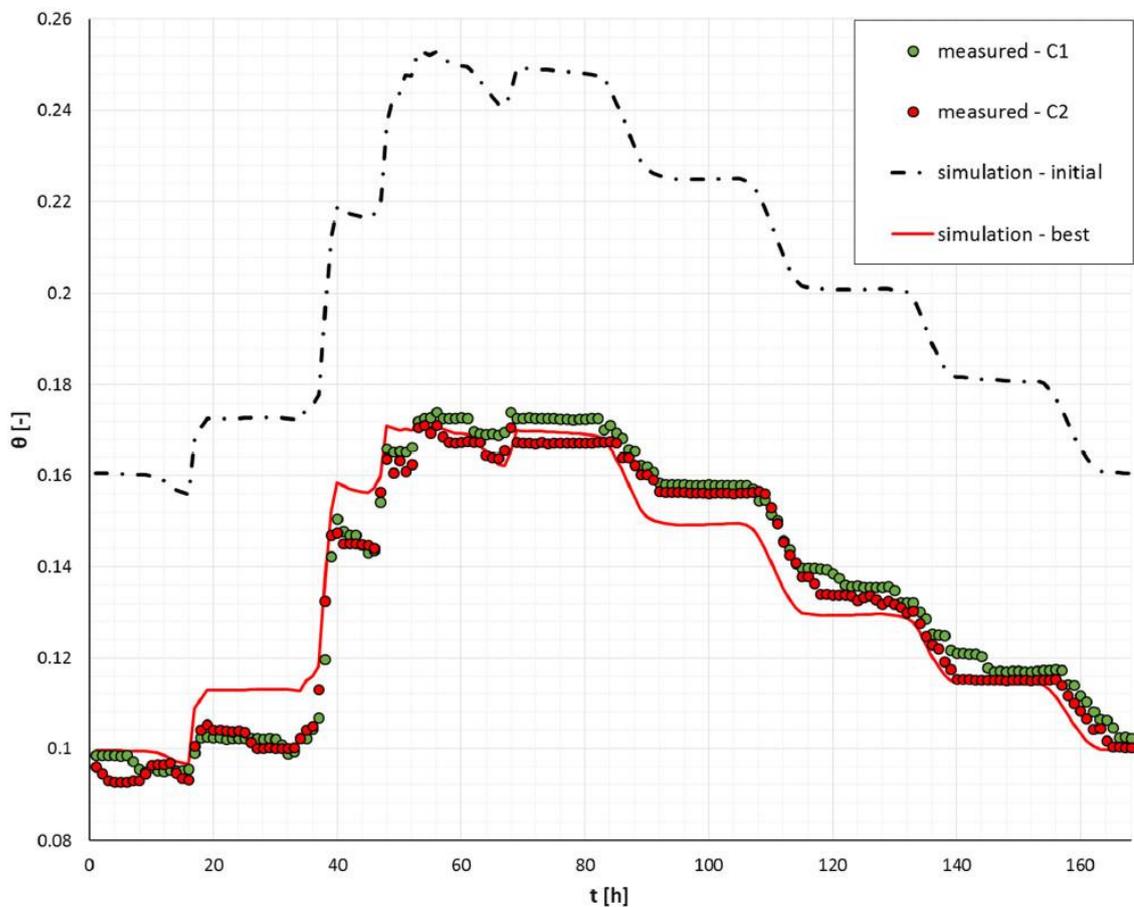


Fig. 5.29. Risultati del processo di calibrazione

calibration parameter	por [-]	0.35	0.22
	θ_{fc} [-]	0.25	0.17
	θ_{wp} [-]	0.05	0.05
	Ksat [m/s]	0.0001	0.0001
	n [-]	2	2
NS	NSc1 [-]	-5.097	0.92737
	NSc2 [-]	-5.884	0.94364

Fig. 5.30. Parametri adottati nella calibrazione

I valori del parametro NS ottenuti risultano elevati, a dimostrare l'ottima corrispondenza tra i valori misurati e calcolati con il codice numerico [25].

Si riportano infine i confronti tra gli output del codice termico, a valle dell'accoppiamento con il codice idraulico, e le corrispondenti misure sperimentali per il settore 1 nella settimana considerata.

Il grafico seguente mostra gli andamenti della temperatura superficiale del terreno. Si riconosce come il codice numerico sia in grado di approssimare bene i valori sperimentali misurati.

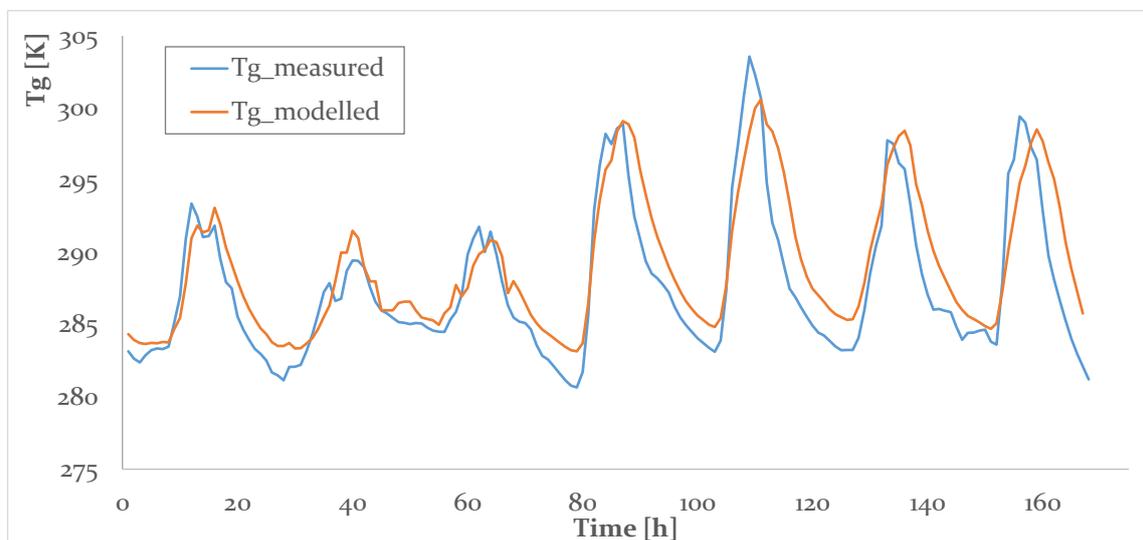


Fig. 5.31. Andamenti di T_g sperimentale e modellata

Di seguito si riporta il grafico relativo alle temperature del fogliame. In questo caso, nonostante il codice numerico sia in grado di fornire un andamento molto prossimo a quello dei valori misurati sperimentalmente, è presente uno shift tra le due curve, probabilmente dovuto ad errori nelle misure.

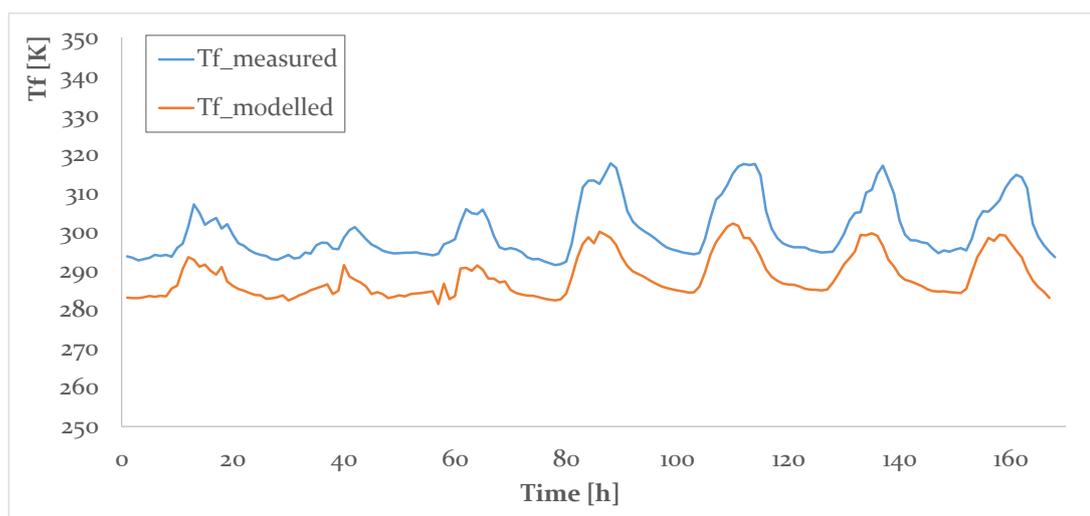


Fig. 5.32. Andamenti di T_f sperimentale e modellata

Riferimenti Bibliografici

- [1] “*The contribution of a planted roof to the thermal protection of building in Greece*” – E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, *Energy and buildings* 27 (1998)
- [2] “*Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*” - Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, and G. Mihalakakou, *Energy and Buildings* 33 (2001).
- [3] “*Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*”- Elena Palomo Del Barrio, *Energy and Buildings* 27 (1998) .
- [4] “*Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*” – R. Kumar, S.C. Kaushik, *Building and Environment* 40 (2005)
- [5] “*Experimental measurements and numerical modeling of a green roof*” – Renato Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato, *Energy and Buildings* 37 (2005).
- [6] “*Developing a one dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of the green roofs on the built environment: Comparison with experimental results*” E. Alexandri, P. Jones, *building and Environment* 42 (2007)
- [7] “*A green roof model for building energy simulation programs*” – D.J. Sailor, *Energy and Buildings* 40 (2008)
- [8]. “*FASST Vegetation Models*” – S. Frankenstein, g. Koenig, *Engineer research and Development Center* (2004)
- [9] “*A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*” – I. Jaffal, S.E. Ouldbounkhitine, R. Belarbi, *Renewable energy* 43 (2012)

- [10] “*Assessment of a green roof thermal behavior: a coupled heat and mass transfer model*” - S.E. Ouldbounkhitine, R. Belarbi, I. Jaffal, A. Trablesi, *Building and Environment* 49 (2011)
- [11] “*Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs*” – Chi Feng, Q. Meng, Y. Zhang, *Energy and Building* 42 (2010)
- [12] “*Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of the green roof*” – C.Y. Jim, S. W. Tsang, *Energy and Buildings* 43 (2011).
- [13] “*A heat and mass transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer condition*” – P. C. Tabares-Velasco, J. Srebric, *Building and Environment* 48 (2012)
- [14] “*Efficient Prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of layer of vegetation*” – J. W. Deardorff, *Journal of geophysical research* (1978)
- [15] “*A statistical Dynamical parameterization of interception and land surface atmosphere interaction*” – A. Ramirez, S. Seranath, *Journal of climate* 13 (2000)
- [16] “*A new formula for latent heat of vaporization of water as a function of temperature*” – B. Henderson-Sellers, *Quarterly Journal of Royal metallic Society* 110 (1984)
- [17] “*Smart Weapons Operability Enhancement (SWOE) Joint Test and Evaluation (JT and E) program: Final report*” – G. G. Koenig, *SWOE Report* 10 (1994)
- [18] “*Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature model for thermal infrared signature prediction*” – L.K. Balik, R.K. Link, *Transactions on geosciences and remote sensing* GE 19 (1981)
- [19] “*Experimental quantification of heat and mass transfer process through vegetated roof samples in a new laboratory setup*” - Tabares-Velasco, J. Srebric, *International Journal of heat and mass transfe* (2011)

- [20] “*Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs*” – R- Djeding, S.E. Ouldboukhitine, R. Belarbi, E. Bozonnet, *International Communication in heat and mass transfer* 39 (2012)
- [21] D.J. Sailor, D. Hutchinson, L. Bokovoy, *Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S.*, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1246–1251.
- [22] D.J. Sailor, M. Hagos, *An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media*, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2298–2303.
- [23] Unsaturated hydraulic conductivity, In *Soil and Environmental Analysis-Physical methods*, Dirksen, Christiaan 2000 183-239. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.
- [24] D. Mazzeo, P. Bevilacqua, M. De Simone, N. Arcuri. *Effetti dello strato vegetativo sul miglioramento delle prestazioni energetiche ed ambientali di una copertura a verde in clima Mediterraneo*. XXXIV Convegno nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bari, 8-10 settembre 2014.
- [25] Željko Vasilić, Miloš Stanić, Piero Bevilacqua, Dušan Prodanović. *Coupling of soil moisture and soil heat transport in green roofs*. WATER SUPPLY AND SEWAGE SYSTEMS, Jahorina, Pale, May 28th - 30th 2014.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi di dottorato è raccolta l'esperienza maturata nell'ambito delle coperture a verde con un'analisi olistica, comprensiva sia di risultati sperimentali che delle fasi di modellazione dei fenomeni fisici coinvolti in un tetto verde.

È innanzitutto presentato il sito sperimentale realizzato sulla copertura del cubo 46C presso il dipartimento DIMEG dell'Università della Calabria. Il sito, grazie alla sua peculiare divisione in diversi settori, permette di valutare le prestazioni di diverse composizioni stratigrafiche e di confrontarle con il comportamento di una copertura tradizionale. Il sistema di monitoraggio, molto complesso, permette l'acquisizione accurata di diverse variabili: le grandezze climatiche esterne tramite centralina meteo, le grandezze termiche nei diversi strati dei diversi settori grazie ad opportuni sensori e le grandezze climatiche interne, nei locali sottostanti i diversi compartimenti. A tal uopo nel sito sperimentale è stato realizzato un sistema di acquisizione dati *ad hoc*, basato sulla modularità e scalabilità, in modo da ottenere maggiore flessibilità nella gestione dei componenti hardware e prevedendo possibili espansioni future del sistema.

Sono successivamente presentati i risultati delle indagini sperimentali condotte. Particolare attenzione è stata posta nell'analisi delle prestazioni delle diverse tipologie di stratigrafia in condizioni estive ed invernali e nella quantificazione dell'effetto della copertura a verde sugli ambienti interni. Dall'analisi dei dati sperimentali nel periodo estivo è emerso che il contenuto d'acqua nel substrato influenza fortemente i profili di temperatura nel terreno e, a seconda della stratigrafia installata, può influenzare anche i profili degli strati sottostanti. La presenza di un ulteriore strato di isolamento termico oltre all'assenza di vegetazione genera valori ed oscillazioni di temperatura nettamente superiori nel substrato, e livelli di temperatura mediamente più alti alla base della stratigrafia. In generale il massetto alleggerito delle pendenze genera uno sfasamento del picco di temperatura di circa 5 ore, mentre l'effetto congiunto di tutta la stratigrafia a verde stabilizza i valori alla base che risultano pressoché costanti. La temperatura superficiale della copertura di riferimento è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche esterne e mostra oscillazioni giornaliere della temperatura decisamente

elevate. Dal confronto tra le temperature medie alla base dei settori e della temperatura superficiale della copertura tradizionale si evince chiaramente l'effetto benefico della presenza dei diversi settori, in particolare settore 1 e 2 mostrano le performances migliori. Nella settimana di riferimento invernale, si riconosce come il contenuto d'acqua del substrato influenzi in maniera limitata i profili di temperatura del substrato a causa della minore entità delle forzanti esterne che limita gli effetti dei processi evapotraspirativi. Ciononostante le diverse stratigrafie riescono a mantenere alla base della soluzione a verde temperature medie superiori rispetto al tetto tradizionale. In particolare il settore 1 riesce a garantire una temperatura media di 2,5 °C maggiore se confrontata con quella del settore 4 mentre la presenza dello strato di isolante nel settore 3 produce un innalzamento del valore medio della temperatura di 5 °C.

Di notevole rilevanza è l'effetto della presenza della copertura a verde sugli ambienti interni dell'ultimo piano dell'edificio che ospita il sito sperimentale. Se si considerano due settimane estive caratterizzate da condizioni climatiche esterne simili, soprattutto in termini di radiazione solare e temperatura dell'aria esterna, in presenza ed assenza della copertura a verde, i risultati hanno mostrato come l'effetto del tetto verde si traduce in una differenza media di 3,6 °C della temperatura dell'aria interna. Inoltre in una tipica settimana estiva (agosto 2014) il confronto tra i valori di temperatura nei locali sottostanti i diversi settori mostra come la presenza di una copertura a verde permette di mantenere negli ambienti interni valori di temperatura mediamente 2,2 °C più bassi. Un'ulteriore conferma deriva dall'analisi dei valori della temperatura interna per l'intero mese di agosto 2013. Il grafico della distribuzione di frequenza cumulata inversa della temperatura dell'aria interna dei quattro locali, mostra chiaramente come il locale al di sotto del settore 4 (tetto tradizionale di riferimento) presenta per l'intero periodo considerato temperature superiori agli altri locali, essendo la temperatura superiore a 28 °C per il 95% del tempo. Risultati positivi sono riscontrati anche nel periodo invernale: se si osserva la curva di frequenza cumulata inversa si può notare come a partire da 22°C il locale 4 è quello che mostra valori percentuali minori rispetto agli altri ambienti. Per quantificare i risparmi energetici conseguibili a seguito dell'installazione della copertura a verde sull'edificio 46C in termini di fabbisogno di energia termica, per il riscaldamento e per il raffrescamento, sono state condotte una serie di simulazioni

energetiche tramite il software di calcolo dinamico DesignBuilder che implementa un modello termofisico delle coperture a verde originariamente sviluppato da Frankenstein, S. and G. Koenig. Le analisi condotte con diverse ipotesi di realizzazione della tipologia di copertura hanno dimostrato che, relativamente al periodo invernale, la presenza di un tetto verde garantisce in ogni caso un risparmio nel consumo di energia per la climatizzazione. In particolare nell'ipotesi di superficie interamente ricoperta dal settore 3 si è ottenuta una riduzione pari al 25%. Contrariamente alle performance invernali, nel periodo estivo la presenza dello strato aggiuntivo di isolante congiuntamente all'assenza dello strato vegetativo determina un valore minore di riduzione dei fabbisogni energetici, pari al 3%. I risultati migliori nel periodo estivo si ottengono considerando la presenza sull'intera copertura del settore 1 o 2 che mostrano performances equivalenti. I risultati relativi al periodo estivo risultano comunque solo indicativi, bisogna tenere presente che le simulazioni sono state condotte con riferimento agli ultimi due piani dell'edificio e che il modello implementato nel software presenta limitazioni nella descrizione di alcuni processi fisici o nella modellazione degli strati stessi del tetto verde, essendo di fatto i risultati delle simulazioni in disaccordo con le evidenze sperimentali.

In base alle precedenti considerazioni l'ultima fase della ricerca ha riguardato lo sviluppo di un modello termofisico delle coperture a verde che, basato sulla letteratura, contiene alcuni elementi di novità, o meglio di raffinamento, rispetto ai modelli di riferimento considerati. Il modello si basa sulla scrittura di due equazioni di bilancio energetico, scritte rispettivamente per lo strato di vegetazione e per lo strato di terreno. L'analisi degli output forniti dal codice di calcolo ha dimostrato l'importanza dei diversi contributi energetici considerati nel bilancio di una copertura a verde, e come l'evapotraspirazione possa ritenersi un contributo rilevante in termini potenza.

Nel modello proposto il calcolo di alcuni contributi energetici richiede la conoscenza del valore del contenuto d'acqua del substrato per ogni time step. La conoscenza di questa grandezza non è immediata a meno che non si disponga di un sito sperimentale con opportuni sensori. Per superare questa limitazione, si è proceduti con l'accoppiamento del modello termico con un modello idraulico, di modo che a partire dalle stesse condizioni al contorno il modello idraulico sia in grado di calcolare il valore

del contenuto d'acqua da fornire poi al modello termico per la risoluzione del bilancio energetico. Ciò è il risultato di un periodo di ricerca presso l'Istituto di Ingegneria Idraulica ed Ambientale della Facoltà di Ingegneria Civile dell'Università di Belgrado. Il modello idraulico è stato opportunamente calibrato ottenendo un'elevata corrispondenza dei valori simulati con quelli misurati sperimentalmente.