



POLITECNICO DI TORINO

Dottorato di Ricerca in
**“Innovazione tecnologica
per l’ambiente costruito”**

XXVII ciclo

***CARATTERIZZAZIONE
SPERIMENTALE DELLA
PRESTAZIONE TERMICA E
ACUSTICA DI UN LIVING WALL***

Tutor

prof.^{ssa} Valentina Serra

Candidata

arch. Elena Candelari

Giugno 2015

INDICE

1	Introduzione	1
2	Il verde verticale in architettura	7
2.1	Tipologie	7
2.2	Living walls	12
2.2.1	Tecnologia e funzionamento	12
2.2.2	Benefici	19
2.2.3	Problematiche	20
3	La caratterizzazione energetica e acustica dei living walls	22
3.1	Parametri prestazionali	22
3.2	Problemi metodologici	26
3.3	Stato dell'arte	28
3.3.1	Prestazioni energetiche	28
3.3.2	Prestazioni acustiche	33
4	Il caso studio: il living wall GRE_EN_S	34
4.1	Il progetto	34
4.2	La sperimentazione	36
4.3	Gli output del progetto GRE_EN_S	44
5	Caratterizzazione termica	45
5.1	Strumenti e metodologia	45
5.2	Monitoraggio del dimostratore presso il Politecnico di Torino	48
5.2.1	Periodo I	51
5.2.2	Periodo II	61
5.2.3	Confronto dati emersi nelle due campagne di monitoraggio	70
5.3	Monitoraggio del modello in scala reale presso Environment Park (Torino)	73
5.3.1	Periodo I	79
5.3.2	Periodo II	82
5.3.3	Periodo III	84
5.4	Risultati e discussione	86

6	Caratterizzazione acustica	91
6.1	Strumenti e metodologia	91
6.2	Misure in camera riverberante	93
6.3	Misure in tubo di Kundt	97
6.4	Risultati e discussione	105
7	Caratterizzazione meccanica e agronomica	107
7.1	Obbiettivi	107
7.2	Caratterizzazione meccanica	109
7.3	Caratterizzazione agronomica	112
8	Conclusioni	114
8.1	Principali risultati della ricerca e sviluppi futuri	115
	Bibliografia	118



INTRODUZIONE

CAPITOLO 1

La realizzazione di facciate verdi è una pratica nota fin dall'antichità: piante rampicanti quali edera, vite, glicine e molte altre specie, venivano lasciate crescere sulle facciate, dove potevano espandersi fino a ricoprirle completamente. Si trattava di piante radicate nel terreno, che utilizzavano la superficie verticale degli edifici come sostegno per la loro crescita.

Il concetto di verde verticale è stato poi rielaborato in anni più recenti (in particolare nell'ultimo decennio) mettendo a punto dei veri e propri sistemi tecnologici attraverso i quali rivestire gli edifici con una *pelle verde*. Tali apparati, che prendono il nome di *living walls*, sono dei sistemi modulari verticali realizzati con pannelli contenenti un substrato che ospita diverse specie di piante. I pannelli, precoltivati in vivaio, sono montati come rivestimento sulle facciate opache attraverso un apposito telaio.

L'inverdimento delle facciate ha assunto dunque dignità progettuale, configurandosi come elemento integrato con la facciata piuttosto che mera decorazione. È quindi una scelta effettuata a monte nella progettazione di un organismo edilizio, che necessita di uno studio tecnologico e compositivo specifico.

La quasi totalità dei living walls realizzati, trova le sue ragioni in questioni che afferiscono alla sfera formale ed estetica della composizione architettonica, tuttavia limitarsi a considerare il verde verticale solo per l'aspetto compositivo sarebbe alquanto riduttivo.

Numerosi studi, effettuati soprattutto in questi ultimi anni, hanno infatti evidenziato i benefici che un living wall può apportare, sia a scala di edificio che su scala urbana: miglioramento delle prestazioni dell'involucro (isolamento termico), ombreggiamento sulle facciate, controllo microclimatico, diminuzione dell'effetto isola di calore, miglioramento della qualità dell'aria, aumento della biodiversità, trasformazione del paesaggio urbano.

Benché la ricerca sia in linea generale concorde sull'utilità del verde verticale e sui vantaggi che ne derivano a livello qualitativo, pochi sono gli studi che hanno cercato di concretizzarne i benefici esprimendone il carattere quantitativo.

Un primo obiettivo di questa ricerca è stato quindi quello di superare il concetto di verde verticale come elemento teso

unicamente alla definizione formale della facciata, analizzandone gli aspetti fisico-tecnici attraverso un'analisi quantitativa delle proprietà termiche e acustiche. Rispetto a tali proprietà, infatti, la letteratura risulta essere piuttosto carente di dati numerici che possano essere utilizzati nel calcolo delle prestazioni dell'involucro.

Dal punto di vista normativo i living walls in Italia trovano scarsa considerazione. Ad eccezione di un vago accenno nella Legge n.10 del 14/01/2013 "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani", dove si invitano gli enti locali a promuovere l'incremento degli spazi verdi urbani anche tramite tecniche di inverdimento verticale delle pareti, non si trovano riferimenti a tale tecnologia né tanto meno alle questioni di natura fisico tecnica ad essi connesse, contrariamente a quanto invece accade per le coperture verdi.

La conseguenza diretta di tale lacuna legislativa è l'assenza di indicazioni relative alle metodologie di calcolo per stimare le prestazioni termiche e acustiche del verde verticale.

Tale questione si rivela particolarmente complessa in quanto, pur partendo dagli standard delle normative UNI EN ISO, non si può prescindere dal fatto che un living wall è un sistema complesso e multivariato in perenne mutamento: il verde, elemento vivo e dinamico, si sottrae alle regole di un'analisi prestazionale pensata e normalizzata per involucri tradizionali. Parametri quali massa, spessore, resistenza termica, densità, eccetera, variano in funzione delle stagioni, dello sviluppo della pianta, della quantità di substrato utilizzato, e di molteplici altri fattori.

La metodologia di analisi e di calcolo delle prestazioni deve comunque essere corretta dal punto di vista scientifico, replicabile e attendibile nei risultati.

Uno dei principali challenge di questa ricerca è stato, dunque, quello di stimare dei valori numerici atti a descrivere il comportamento termico e acustico di un living wall, a fronte di una difficoltà metodologica e metrologica.

È stato quindi messo a punto un metodo di analisi e valutazione a partire da dati sperimentali, ottenuti attraverso monitoraggi in campo e misure di laboratorio.

Nell'ottica di una progettazione integrata, che considera quale fattore imprescindibile la partecipazione di tutte le discipline interessate alla definizione dell'involucro edilizio (composizione, tecnologia, fisica tecnica, ecc.), questa ricerca ha un duplice obiettivo: a partire dagli output delle misure sperimentali, fornire dati numerici che possano essere usati come riferimento dai progettisti al fine di stimare le reali prestazioni di un edificio che vede il living wall quale tecnologia di involucro; stabilire quali relazioni intercorrono tra i diversi parametri termici, acustici, agronomici e tecnologici al fine di poter ottimizzare il sistema.

La ricerca è stata in parte sviluppata all'interno di un progetto Polight, "GRE_EN_S – GREen ENvelope System", finanziato dal Polo Innovazione della Regione Piemonte; tale progetto è stato svolto in cooperazione con due dipartimenti del Politecnico di Torino, un dipartimento dell'Università di Torino e alcune aziende locali.

L'analisi sperimentale ha riguardato il sistema tecnologico messo a punto all'interno del progetto GRE_EN_S, del quale sono state misurate le prestazioni termiche, acustiche, meccaniche e agronomiche. Tale scelta è dovuta alla necessità di circoscrivere la sperimentazione a una tecnologia specifica al fine di evitare generalizzazioni che, allo stato dell'arte attuale, potrebbero risultare fuorvianti e comporterebbero un grado di incertezza non accettabile ai fini di una corretta valutazione prestazionale. I moduli che costituiscono il sistema GRE_EN_S si compongono come segue:

- feltro esterno,
- substrato,
- feltro interno,
- geogriglia,
- substrato,
- geogriglia,
- feltro interno,
- feltro esterno.

Sugli ultimi due strati vengono effettuati sei tagli orizzontali per permettere l'alloggiamento delle piante. Il modulo, così composto, viene incluso all'interno di una cornice metallica che sarà a sua volta inserita in un sistema di montanti verticali e orizzontali fissati alla parete retrostante. La dimensione dei moduli è di 40 x 60 cm o 50 x 50 cm.



Figura 1 - Stratigrafia di un pannello vegetato.



Figura 2 - Modello insediativo a scala reale.

Al fine di ampliare l'indagine sperimentale, valutare i contributi dei singoli componenti in termini di prestazioni e raccogliere elementi utili all'ottimizzazione del sistema, durante i monitoraggi sono stati variati alcuni elementi: le specie di piante, la composizione del substrato, il materiale dei feltri.

Una volta definito il sistema tecnologico su cui effettuare le misure, il lavoro si è articolato in varie fasi.

Una prima campagna di monitoraggi termici è stata condotta su un dimostratore realizzato presso il Politecnico di Torino e ha permesso di evidenziare le principali potenzialità e criticità del living wall in regime dinamico, a fronte delle variazioni nictemerali e stagionali, oltre che di mettere a punto la metodologia di misura e analisi dei dati. Sono quindi stati raccolti dati relativi a temperature e flussi termici e solari, da cui è stato possibile calcolare resistenze termiche, conduttanze ed energie giornaliere.

Una campagna di monitoraggio analoga è stata in seguito condotta su un modello insediativo a scala reale realizzato presso il centro di ricerca "Environment Park" di Torino. I dati ottenuti sono stati quindi confrontati con un modello insediativo equivalente ma con un rivestimento tradizionale.

La caratterizzazione energetica è consistita nella valutazione dell'influenza del living wall sull'isolamento termico e sul controllo delle temperature superficiali esterne, nonché sullo scambio convettivo con l'ambiente esterno.

Il living wall è stato caratterizzato dal punto di vista acustico innanzitutto mediante la misura del coefficiente di assorbimento. Data la complessità del sistema, è stato necessario mettere a punto una metodologia di indagine rigorosa e che, al contempo, permettesse tempi di misura e costi contenuti. Una campagna di misure preliminari effettuate in tubo di Kundt e confrontate con la misura in camera riverberante, stante il medesimo misurando, ha permesso di validare la correttezza metrologica della metodologia utilizzata. Le misure sono state effettuate presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) di Torino.

La caratterizzazione meccanica dei supporti tecnologici è stata condotta mediante prove di resistenza meccanica a trazione e di permeabilità intrinseca dei feltri.

È stata inoltre svolta una valutazione agronomica al fine di determinare il comportamento di specie diverse e la capacità di accrescimento all'interno del sistema analizzato.

I risultati ottenuti con questo lavoro di ricerca hanno evidenziato l'elevato potenziale del living wall in termini di prestazione termica e acustica.

Dal punto di vista energetico si può affermare che in condizioni invernali il sistema è in grado di ridurre la trasmissione di energia, mentre in condizioni estive se ne evidenzia l'efficacia nel ridurre le temperature superficiali esterne.

Un ruolo importante è svolto dall'intercapedine che si viene a creare tra i pannelli vegetati e la parete retrostante, all'interno della quale s'inserisce il telaio strutturale del living wall. Questa intercapedine durante la stagione invernale funziona come strato isolante, aumentando la resistenza termica totale dell'involucro. È tuttavia necessario evitare di avere un analogo effetto durante la stagione estiva, assicurando la microventilazione dell'intercapedine.

Il pannello vegetato ha inoltre effetto sulle resistenze liminari: la presenza delle foglie riduce la velocità del vento con una conseguente diminuzione dello scambio convettivo tra la parete stessa e l'ambiente esterno.

Dal punto di vista acustico le misure effettuate hanno evidenziato un'ottima prestazione in termini di assorbimento, dovuta principalmente alla presenza del substrato, che si comporta come adattatore d'impedenza tra il mezzo esterno (l'aria) e il sistema stesso.

La miscela utilizzata per il substrato è caratterizzata da un'elevata capacità di ritenzione idrica, necessaria alla sopravvivenza delle piante. Quando l'irrigazione bagna la miscela, la presenza di acqua aumenta in modo considerevole la densità totale e, contemporaneamente, occlude un'elevata percentuale di porosità aperta, determinando, quindi, una perdita di prestazione acustica.

La caratterizzazione delle proprietà meccaniche, effettuata su alcune tipologie di supporti, ha permesso di ottenere dati utili per valutazioni comparative in termini di tenuta al carico, da cui dipende la deformazione della tasca contenente la pianta, di permeabilità e di conduttività idraulica, parametri fondamentali in relazione agli aspetti agronomici.

In conclusione, mettendo in relazione i risultati ottenuti al fine di ottimizzare l'intero sistema living wall, si evince l'importanza di un approccio multidisciplinare fin dalle prime fasi della progettazione dell'involucro.

Il ruolo della componente vegetale sembra apportare i maggiori benefici a livello energetico, mentre a livello acustico la discriminante è data piuttosto dalla presenza del substrato.

La necessità di irrigazione, se da un lato concorre al raffrescamento della parete durante la stagione estiva, ha effetti negativi sulla performance energetica invernale (riduce la resistenza termica dei moduli) e sulla performance acustica. La

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE

scelta delle specie vegetali utilizzate nel living wall è quindi da considerarsi rilevante soprattutto in relazione al loro fabbisogno idrico.

La performance di un involucro con il living wall può essere rapportata, oltre che alla scala dell'edificio, anche su scala urbana, dove tale tecnologia può contribuire a mitigare l'effetto isola di calore nonché ad attenuare significativamente gli effetti di riverberazione del rumore da traffico sulle facciate degli edifici (effetto canyon).

IL VERDE VERTICALE IN ARCHITETTURA

CAPITOLO 2

2.1 TIPOLOGIE

La locuzione “verde verticale” indica una vasta gamma di tipologie di inverdimento degli edifici, la cui caratteristica comune è la presenza di specie vegetali sulle chiusure opache verticali.

Nella maggior parte dei casi, le piante formano una sorta di cuscino vegetale sulla parete, presentandosi dunque come un vero e proprio rivestimento che può essere più o meno integrato con la chiusura opaca di cui rappresentano la finitura esterna.

Le tecnologie d’inverdimento delle facciate esistenti sul mercato sono molteplici e variegata, ma non esiste una vera e propria classificazione delle varie tipologie normata a livello internazionale e riconosciuta dalla comunità scientifica. Occorre tuttavia fare una panoramica dei diversi sistemi raggruppandoli in alcune macro - famiglie.

Una fondamentale distinzione, ai fini del presente lavoro di ricerca, è quella tra *facciate verdi* e *living wall systems* (Köeler 2008).

Con facciate verdi s’intendono quei rivestimenti che fanno uso di specie vegetali rampicanti, radicate a terra o in vaso, che utilizzano le pareti dell’edificio come supporto al proprio sviluppo. Si tratta dunque di un sistema non autonomo in cui la muratura, che costituisce la superficie di aggrappo della pianta, non deve presentare problematiche di degrado dovute alla presenza della pianta stessa.

Le facciate verdi rappresentano la tecnologia di verde verticale più antica, presente nell’area del Mediterraneo da più di 2000 anni. Quando la pianta è nel pieno del suo sviluppo, le foglie formano un cuscinetto che riveste la muratura retrostante. La

facciata risulta ombreggiata e la velocità dell'aria che lambisce la parete è ridotta.



**Figura 3 - Esempio di facciata verde: il Balmoral Castle in Inghilterra.
(Fonte: www.balmoralcastle.com)**

Un'evoluzione di questo sistema è rappresentata dall'utilizzo di griglie quale supporto su cui la pianta può svilupparsi, eventualmente distanziate dalla parete retrostante; in quest'ultimo caso la muratura viene preservata dall'azione meccanica del rampicante e da un eccesso di umidità che può ristagnare sulla parete. Se le piante sono radicate al suolo, non è di solito necessario prevedere un impianto di fertirrigazione, anche se in alcuni casi può rivelarsi opportuno.



**Figura 4 - BRT Architekten, Uffici Swiia RE, Monaco di Baviera.
(Fonte: www.brt.de)**



**Figura 5 - Centro direzionale ex Ducati, Mario Cucinella, Rimini.
(Fonte: www.archdaily.com)**

I sistemi di verde verticale ascrivibili alla tipologia dei living wall systems sono costituiti da elementi modulari, solitamente pannelli, che vengono montati sulla facciata opaca mediante un telaio di supporto. Tali pannelli ospitano il substrato che permette di mettere a dimora le piante. Sia il substrato sia le piante sono dunque portate in quota per tutta l'altezza della facciata. Le specie utilizzate sono non rampicanti, generalmente sempreverdi, e necessitano di un adeguato sistema di fertirrigazione.

Nell'ambito delle tecnologie living walls il supporto tecnologico ha un ruolo fondamentale, poiché deve garantire la modularità ed essere adatto a permettere la crescita della pianta; l'assemblaggio dei vari componenti avviene per interconnessione (incastro, stratificazione, accostamento).



**Figura 6 - Museo Quai de Branly, Jean Nouvel, Parigi.
(Fonte: <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com>)**



**Figura 7 - VenhoevenCS, Sportplaza mercator, Amsterdam.
(Fonte: venhoevencs.nl)**

L'utilizzo del verde verticale è una pratica nota fin dall'antichità: differenti specie di rampicanti erano utilizzate in aderenza alle pareti verticali o per creare pergolati all'aperto, con la funzione di ombreggiare durante la stagione estiva. Non era escluso l'utilizzo di apposite strutture di sostegno (griglie, telai, piante a fusto verticale) autonome o addossate alla parete.

L'applicazione del verde in verticale nell'arco dei secoli presenta caratteristiche tecnologiche per lo più comuni, senza subire evoluzioni sostanziali. L'innovazione costituita dai living wall, si presenta in anni piuttosto recenti. A partire dal XX secolo si comincia a pensare all'integrazione tra vegetazione e involucro sperimentando soluzioni inedite.

La principale novità portata da tali sistemi, che si sviluppano dagli anni Novanta, è legata all'idea che le piante possano essere

portate in quota, occupando spazi che naturalmente non riuscirebbero ad occupare (Bellomo 2009). Uno dei principali promotori dei living walls è il botanico francese Patrick Blanc, ideatore del sistema brevettato Mur vegetal™, ovvero un “dispositivo per la coltivazione senza suolo delle piante, su una superficie verticale”.

Se nel resto d'Europa il verde verticale è ormai una tecnologia consolidata, in Italia la diffusione è stata più lenta e discreta, ed è solo negli ultimi anni che i living wall si sono affacciati sul panorama architettonico italiano.

Per favorire lo sviluppo e la conoscenza dei living wall, il presente lavoro di ricerca si è focalizzato sulla caratterizzazione di questa tipologia di verde verticale.

2.2 LIVING WALLS

2.2.1 Tecnologia e funzionamento

I living wall, pur presentando una struttura tra loro simile, comprendono una vasta gamma di soluzioni tecniche e progettuali dalle caratteristiche differenti; sul mercato è infatti possibile trovare numerosi prodotti, molti dei quali legati a brevetti industriali.

I living wall constano essenzialmente di quattro componenti:

- il telaio di aggancio,
- il supporto tecnologico atto a contenere la pianta,
- il substrato,
- la pianta stessa.

Il *telaio di aggancio* ha la duplice funzione di struttura portante e di connessione tra il living wall e la parete retrostante; consta di un sistema di montanti e traversi avvitati, imbullonati o tassellati alla parete.

Sul telaio va a innestarsi il supporto tecnologico, ovvero il pannello che conterrà il substrato e la pianta. È importante che tale connessione avvenga per sovrapposizione: i pannelli non devono occupare lo spazio tra un montante e l'altro, ma formare un ultimo layer esterno. Tale accorgimento permette di creare un'intercapedine tra la parete e il living wall system (spazio in cui si colloca il telaio di aggancio).

L'intercapedine ha una molteplice funzione: innanzitutto garantire un certo grado di traspirabilità alle piante, che altrimenti rischierebbero di trovarsi in condizione di asfissia radicale; inoltre essa permette di evitare il contatto diretto tra la parete e il pannello irrigato dall'acqua, evitando così ristagni di umidità sulla muratura.

Una particolare attenzione va posta nella scelta dei materiali che costituiscono il pannello; quest'ultimo costituisce il *supporto tecnologico* per la componente vegetale. È necessario un certo livello di rigidità atto a garantire una connessione stabile dal punto di vista strutturale con il telaio di aggancio. Il materiale che ospita la pianta e il substrato deve garantire una corretta traspirazione ed essere in grado di trattenere l'acqua d'irrigazione, che altrimenti tenderebbe a scendere per gravità lasciando le piante più in quota in condizioni di siccità. Esso, inoltre, deve resistere alla spinta meccanica esercitata in prima battuta dalla crescita dell'apparato radicale, nonché da eventuali cicli gelo-disgelo nella stagione invernale, e in seconda battuta dall'aumento della forza peso del substrato quando esso viene irrigato.

Una combinazione che si è rivelata vincente, a tal proposito, consiste nell'abbinare una cornice rigida, per esempio in materiale metallico, ad un materiale più morbido di tipo tessile, che viene fissato mediante rivetti o graffe.

I *substrati* sono composti di materiali organici e/o inorganici: sfagno, terriccio alleggerito, fibre vegetali, argilla espansa, perlite, lapillo di lava, pietra pomice, feltro, eccetera. La miscela deve essere adatta al tipo di pianta, avere un peso contenuto e una capacità di ritenzione idrica adeguata; per questo motivo è spesso addizionata con polimeri idroretentori.

L'*elemento vegetale* rappresenta il componente più importante, ma anche il più delicato, dell'intero sistema. La messa in opera di un living wall non può prescindere da competenze agronomiche specifiche, che orienteranno nella giusta direzione la scelta della specie vegetale, la sua messa a dimora e la sua manutenzione. Il sistema e le tecnologie adottate dovranno, infatti, creare un "ambiente" all'interno del quale la pianta trovi delle buone condizioni adatte alla vita e al suo sviluppo biologico. Il mancato raggiungimento di questo obiettivo può portare a un rapido degrado del living wall, una maggiore necessità di interventi di manutenzione straordinaria (con conseguente incremento dei costi) o addirittura a una moria dell'intero apparato vegetale.

La selezione delle essenze richiede innanzitutto un'attenta analisi del contesto in cui il living wall dovrà insediarsi. Latitudine, condizioni climatiche, orientamento ed esposizione ai venti e alla radiazione solare, rappresentano dei criteri-guida fondamentali che influenzano la scelta delle piante.

Solitamente le piante vengono precoltivate in vivaio e fatte crescere orizzontalmente; una volta sviluppatesi, i pannelli vengono montati sul living wall. Nonostante questo passaggio da orizzontale a verticale le ponga in condizione di stress, le piante riescono comunque a orientare le proprie radici verso il basso secondo la direzione della gravità terrestre grazie alla loro naturale capacità geotropica.

La scelta delle piante, in relazione al loro portamento,¹ ma anche dei substrati e dei feltri di contenimento, deve essere fatta in modo da evitare componenti che possano portare problemi di sradicamento, stroncamento, asfissia radicale, aridità radicale, o disseccamento delle parti aeree.

Accanto a tutte queste valutazioni, vanno aggiunte alcune considerazioni riguardanti il carattere compositivo e formale che si vuole dare alla facciata. Il progetto si soffermerà quindi sulla creazione di una "tavolozza" botanica basata sulle differenze cromatiche tra le varie specie, il loro mutare stagionale, il periodo di fioritura, la tipologia, la densità² e lo spessore del manto fogliare.

La manutenzione in quota viene effettuata mediante carrello su braccio mobile o un ponteggio; è necessario prevederla almeno una volta all'anno.

Per l'irrigazione si programma un sistema automatico, integrato nel living wall, che deve essere previsto già in fase di progettazione, assieme alla possibilità di manutenzione degli ugelli.

¹ Il portamento di una pianta si riferisce alle direzioni lungo le quali crescono le parti aeree e alle forme che assumono.

² La densità fogliare è un parametro descritto dal Leaf Area Index (LAI) ed esprime la superficie totale delle foglie per metro quadrato.

Si riportano di seguito alcune tra le principali tecnologie living wall disponibili in Italia.

Nome commerciale	Archi Wall™
Azienda	Archiverde
Descrizione	<p>Il sistema si compone di un supporto in PVC espanso, un film tessuto in polipropilene e un doppio strato di feltro graffiato al supporto. Le tasche di alloggiamento delle piante sono ricavate incidendo orizzontalmente il feltro esterno. Un tubo per l'irrigazione è posto nella parte alta del muro; la capillarità del feltro assicura distribuzione idrica omogenea. Nella parte inferiore del living wall vi è una canalina per la raccolta delle acque di scolo. I consumi idrici indicati dal produttore sono da 0,5 a 5 litri al giorno per m², in funzione dell'esposizione, della stagione e delle essenze. Tra la parete e il pannello in PVC vi è un'intercapedine ventilata. La sottostruttura è in alluminio o acciaio tubolare. Il peso complessivo del living wall è inferiore ai 50 kg/m².</p>
Foto	

CAPITOLO 2
IL VERDE VERTICALE IN ARCHITETTURA

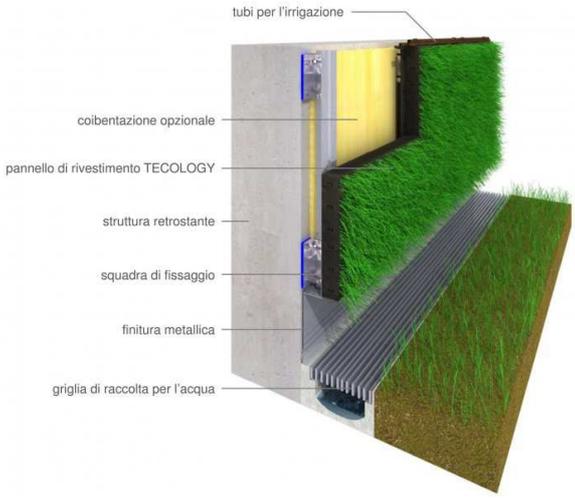
Nome commerciale	Flexiverde™
Azienda	Poliflor
Descrizione	Il modulo è composto da due strati di geotessile ³ imputrescibile cuciti in modo sfalsato sui due lati di una geogriglia; in tal modo si vengono a creare degli scomparti longitudinali di forma cilindrica che vengono riempiti con un substrato a base di inerti. Un cuscino di fibre di cocco prevegetato viene fatto radicare sul modulo. All'interno dello scomparto superiore c'è una barra, in acciaio inox, che permette il fissaggio alla struttura portante. Dimensioni: 53 x 63 x 8 cm (sistema montato).
Foto	

³ Il geotessile è un prodotto a base polimerica dell'industria tessile utilizzato in opere di ingegneria civile per le sue proprietà fisiche, meccaniche e idrauliche. Viene utilizzato come strato separatore, drenante o protettivo, a contatto con il terreno.

CAPITOLO 2
IL VERDE VERTICALE IN ARCHITETTURA

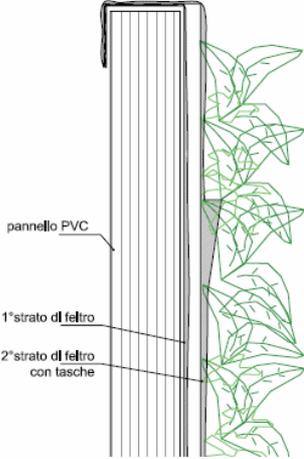
Nome commerciale	Reviwall™
Azienda	Reviplant
Descrizione	Il sistema si compone di un telaio in alluminio riciclato, una geostuoia in polipropilene, e teli radicabili. Il substrato è una miscela a base di fibra di cocco, polimeri idroretentori e micorrize (funghi che favoriscono lo sviluppo della pianta in condizioni di stress). Dimensioni: 40 x 50 x 3 cm; peso 26 kg/m ² .
Foto	

CAPITOLO 2
IL VERDE VERTICALE IN ARCHITETTURA

Nome commerciale	6. Sesto punto™
Azienda	Tecology
Descrizione	<p>I pannelli in polipropilene fungono da contenitori per un medium organico erboso senza necessità di substrato; due scossaline in lamiera forata costituiscono la finitura inferiore e superiore, permettendo la ventilazione; un impianto di microirrigazione assicura il corretto apporto idrico; è prevista la raccolta dell'acqua di scolo. La struttura portante è realizzata in profili di alluminio e ancorata alla parete. L'aggancio dei pannelli è stato progettato in modo da evitare ponti termici.</p> <p>Dimensioni 60 x 40 x 6 cm; peso di un pannello a regime di piena umidità: 10 kg.</p>
Foto	 <p>The diagram illustrates the internal structure of the vertical green wall system. It shows a concrete wall on the left with a grey metal frame attached. A yellow insulation layer is labeled 'coibentazione opzionale'. A green panel is labeled 'pannello di rivestimento TECOLOGY'. Below the panel is a grey metal structure labeled 'struttura retrostante'. A blue bracket labeled 'squadra di fissaggio' secures the panel to the wall. A metal finish labeled 'finitura metallica' is visible at the bottom. A blue grid labeled 'griglia di raccolta per l'acqua' is positioned to collect water. Irrigation tubes labeled 'tubi per l'irrigazione' are shown at the top.</p>

CAPITOLO 2
IL VERDE VERTICALE IN ARCHITETTURA

Nome commerciale	Sundar™
Azienda	Verdecrea
Descrizione	Le piante crescono in tasche predisposte su un substrato di materiale inerte senza terra, fissato su pannelli di forex o pvc; un telo in polipropilene rigato agevola il consolidamento radicale. La struttura portante è di tipo componibile in acciaio e rimane distanziata dalla parete. Il peso è di 40 – 50 kg/m ² .
Foto	

Nome commerciale	Unica™
Azienda	Designeering
Descrizione	Una struttura portante metallica modulare ospita i pannelli in pvc, coperti da un doppio strato di feltro; sullo strato più esterno vengono realizzate le tasche per l'alloggiamento piante. Peso: 25-30 kg/m ² .
Foto	

2.2.2 Benefici dei living walls

La letteratura è piuttosto concorde nell'ascrivere ai living walls e, più in generale, al verde verticale, numerosi benefici con ricadute dalla scala dell'edificio a quella urbana.

La valenza primaria dei living walls sembra essere quella estetica: la selezione delle opportune specie vegetali e l'abilità del progettista portano a composizioni del tutto inedite: le pareti diventano dei quadri viventi che danno un nuovo volto ai fronti costruiti e trasformano il paesaggio urbano.

L'inverdimento delle cortine edilizie, e ancor di più dei fronti ciechi degli edifici, costituisce un'occasione di riqualificazione e valorizzazione. La tecnologia living wall, dotata di struttura autoportante, non va a gravare sull'apparato murario dell'edificio preesistente e può essere giustapposta senza comportare complicazioni costruttive.

Alle questioni di carattere formale, si affiancano una serie di valenze legate alla sfera psicologica e al comfort percepito: il verde è legato a sensazioni piacevoli, contribuisce a rilassare e diminuire lo stress ed è associato all'idea di salubrità, benessere fisico e qualità della vita.

Il verde è in grado di modificare il microclima (temperatura, umidità e ventosità). Quando, infatti, la radiazione solare colpisce la pianta, il 2% dell'energia viene utilizzata per il processo di fotosintesi clorofilliana, il 48% è assorbito e immagazzinato nel sistema linfatico, il 30% è trasformato in calore, e il 20% viene riflesso (Ariaudo, Fracastoro 2007). L'energia trasformata in calore viene in parte dissipata grazie al processo di evapotraspirazione.⁴

La minore riflessione della radiazione solare contribuisce ad avere effetti positivi sul fenomeno dell'isola di calore urbana.⁵

Le piante svolgono un importante ruolo in termini di qualità dell'aria, in quanto sono in grado di assorbire o decomporre alcuni agenti inquinanti: in un anno una superficie di 300 m² fissa una quantità di CO₂ pari a quella prodotta da un'auto di media cilindrata che percorre 20000 km (Corrado 2010).

Il manto fogliare, inoltre, intrappola parte del particolato, che si deposita sulle piante anziché rimanere in sospensione nell'aria. L'azione di depurazione e filtraggio avviene anche sulle acque piovane: inquinanti come metalli pesanti o idrocarburi sono trattenuti dalle foglie.

⁴ L'evapotraspirazione è quel processo per cui l'acqua presente nel terreno passa nell'aria allo stato di vapore ed è dovuto all'effetto congiunto della traspirazione della pianta e dell'evaporazione dal terreno. Pertanto, esso dipende dalla quantità d'acqua contenuta nel terreno e non può avvenire se non in presenza di una specie vegetale.

⁵ Una delle principali cause dell'effetto "isola di calore urbana", ovvero quell'effetto per cui la temperatura dell'aria all'interno della città è sempre maggiore di quella delle zone rurali circostanti, è rappresentata dal maggior assorbimento della radiazione solare da parte delle superfici asfaltate e cementificate.

Fondamentale risulta essere anche il ruolo legato alla biodiversità, particolarmente prezioso in contesti urbani densamente edificati.

Numerosi articoli e monografie non mancano di argomentare vantaggi legati alle prestazioni termiche (Tabassom et al. 2014). Si riportano i principali benefici ascritti alla presenza del verde verticale: il verde costituisce uno schermo naturale alla radiazione solare ombreggiando la superficie dell'edificio; costituisce un ulteriore strato con una sua resistenza termica che si va ad aggiungere a quella della parete retrostante e riduce la velocità del vento che lambisce la parete.

Alcuni autori annoverano anche delle performance di tipo acustico quale l'attenuazione dei rumori.

Tali proprietà, che spesso sono riportate nelle monografie solo come dato qualitativo non supportato da evidenze numeriche, verranno analizzate e approfondite dal punto di vista quantitativo nel capitolo successivo.

2.2.3 Problematiche

La progettazione e l'installazione di un living wall vanno affrontate alla luce di alcune problematiche che è opportuno considerare. Innanzitutto la presenza di un elemento vivo, le piante, ha come diretta conseguenza la necessità di una manutenzione periodica: occorre quindi prevedere almeno una o due volte l'anno, secondo le caratteristiche delle essenze utilizzate, un intervento di potatura. Durante tale intervento si potrà provvedere anche alla sostituzione di eventuali piante morte o pannelli deteriorati. È possibile, soprattutto in zone particolarmente ventose e adiacenti a spazi verdi, che si verifichi la germinazione delle infestanti all'interno dei pannelli del living wall. In tal caso sarà necessario procedere con un intervento di manutenzione straordinaria volto all'eliminazione delle specie indesiderate.

Il periodo più critico per la crescita delle piante è quello che segue l'installazione: le piante passano, infatti, da una condizione orizzontale (vengono precoltivate in vivaio) ad una condizione verticale; sarà necessario quindi un periodo di adattamento alla crescita in verticale, durante il quale l'irrigazione e il fertilizzante verranno somministrati secondo quantitativi appositamente calibrati.

La fertirrigazione rappresenta un punto particolarmente delicato, poiché deve coniugare le esigenze idriche e il corretto dosaggio di fertilizzante per piante diverse o esposte diversamente in un unico sistema d'irrigazione.

In fase di progettazione è opportuno prevedere anche la possibilità d'ispezione e controllo della struttura portante e supporti tecnologici.

È difficile sbilanciarsi nel fare valutazioni riguardo alla durabilità di queste tecnologie. I sistemi living walls presenti sono stati installati in anni ancora troppo recenti per poter avere una

casistica significativa su cui calcolare la vita media di un living wall. Indubbiamente, essa è legata per lo più alla durabilità dei supporti tecnologici; le piante infatti possono essere sostituite regolarmente durante gli interventi di manutenzione e i substrati vengono arricchiti mediante la fertirrigazione.

Un'ultima riflessione va fatta relativamente ai costi: prevedere una chiusura opaca che include il living wall significa adottare una tecnologia che ad oggi presenta dei costi piuttosto elevati; a questi si vanno ad aggiungere i costi di manutenzione periodica e quelli relativi al consumo di acqua.

Quest'ultima voce di costo può essere mitigata in caso di recupero delle acque piovane, anche se in condizioni urbane si rischia che le impurità presenti (per quanto per la maggior parte siano trattenute dai filtri) intasino gli ugelli dell'impianto d'irrigazione.

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA E ACUSTICA DEI LIVING WALLS

CAPITOLO 3

3.1 PARAMETRI PRESTAZIONALI

L'involucro edilizio svolge un ruolo fondamentale rispetto alle prestazioni energetiche di un edificio. La valutazione di tali prestazioni passa necessariamente attraverso la definizione di quei parametri atti a descriverne le caratteristiche quantitative dal punto di vista della fisica tecnica.

La normativa vigente individua due tipologie di parametri per la definizione della performance energetica dell'involucro, a seconda che si consideri un regime stazionario o un regime dinamico.

Il *regime stazionario* si basa sull'ipotesi che il comportamento dell'involucro non sia influenzato dall'andamento giornaliero e/o stagionale delle condizioni al contorno ovvero che i parametri prestazionali possano essere calcolati ed espressi tramite un dato numerico indipendentemente dall'elemento temporale. Il parametro fondamentale che esprime il comportamento termico dell'involucro in condizioni stazionarie è la trasmittanza termica della parete. Essa si ottiene dalla resistenza termica dei singoli strati che compongono l'involucro, data dal rapporto tra lo spessore dello strato di materiale omogeneo e la conducibilità termica del materiale stesso.

$$R = \frac{s}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$$

Eq. 1

Dove:

- R è la resistenza termica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
- s è lo spessore di materiale omogeneo [m]
- λ è la conducibilità termica dello strato di materiale omogeneo [W/mK].

Conoscendo la resistenza termica totale della parete (sommatoria delle resistenze dei singoli strati), è possibile calcolare la trasmittanza termica U , che esprime la quantità di calore nell'unità di tempo che attraversa l'elemento di involucro per metro quadro di superficie, per grado kelvin di differenza di temperatura tra i due ambienti separati dall'elemento stesso ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s}{\lambda} + \sum R + \frac{1}{h_e}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

Eq. 2

Dove:

- U è la trasmittanza termica [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- h_i è il coefficiente liminare interno [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
- s è lo spessore di strato omogeneo [m]
- λ è la conducibilità termica del materiale [W/mK]
- R è la resistenza termica dello strato non omogeneo [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
- h_e è il coefficiente liminare esterno [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

La trasmittanza della chiusura è però influenzata negativamente dalla presenza di ponti termici, ovvero zone in cui si verifica discontinuità di forma o di materiali. In corrispondenza di queste zone, definite come una configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico dalla condizione monodimensionale, si verificano dei fenomeni perturbativi locali che comportano una maggiore dispersione di calore. Tale fenomeno si può quantificare calcolando il valore della potenza termica dispersa dai ponti termici per trasmissione attraverso l'involucro edilizio, data dalla lunghezza del ponte termico moltiplicato per la trasmittanza termica lineica dello stesso. Quest'ultimo parametro esprime il flusso termico disperso che compete alle zone singolari per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria fra interno ed esterno.

In *regime dinamico* (o variabile o transitorio), invece, si assume il fattore tempo quale elemento influenzante le caratteristiche termofisiche dell'involucro, tenendo quindi in considerazione tutti quegli aspetti legati all'accumulo di calore.

I parametri prestazionali relativi al regime dinamico sono:

- massa superficiale,
- trasmittanza termica periodica,
- sfasamento e attenuazione.

La massa superficiale (kg/m^2) è legata alla densità dei materiali costituenti la stratigrafia dell'involucro.

La trasmittanza termica periodica ($\text{W/m}^2\text{K}$), che dipende da massa volumica, calore specifico e conducibilità termica degli strati componenti, fa riferimento a un regime periodico stabilizzato ed esprime la capacità di una struttura opaca di sfasare e attenuare il flusso termico da cui è attraversata. La sua definizione, così come quella del fattore di attenuazione (-) e di sfasamento (h) si trova nella norma UNI13786.

Secondo la normativa UNI EN ISO 13790 è possibile adottare dei metodi di calcolo semplificati della trasmittanza termica periodica qualora si riferisca a tecnologie innovative quali: serra non riscaldata, elementi di involucro opaco con isolamento trasparente, muri solari ventilati, elementi di involucro ventilati. Nonostante la norma si dimostri attenta ad alcune "eccezioni", essa non contempla il verde verticale come caso particolare.

Numerosi studi scientifici hanno analizzato le proprietà energetiche dei living walls e, più in generale, del verde verticale. La caratterizzazione è avvenuta adottando una serie di indicatori che sono stati ritenuti adatti a esprimere le performance del verde da un punto di vista quantitativo.

Alcuni studi ritengono significativo il calcolo del coefficiente liminare esterno (Mazzali et al. 2013), in quanto la presenza del manto vegetale influisce sullo scambio convettivo tra la parete e l'ambiente esterno (Perini et al. 2011). Lo scambio convettivo diventa quindi un parametro efficace per esprimere il comportamento del sistema parete quando il rivestimento esterno è costituito da un living wall.

Lo studio di Ariaudo e Fracastoro (2007) evidenzia come sia possibile determinare una "costante verde" che, tenendo conto del fattore di trasmissione solare della pianta, quindi un fattore dovuto alle sole caratteristiche del manto vegetale, permetta di stimare la riduzione del carico termico estivo. Va tuttavia precisato che questo studio è relativo non a un living wall ma a una facciata verde (assenza di substrato).

Ottel  et al. nel 2011 calcolano invece, la resistenza termica degli strati che compongono il living wall; inoltre lo studio si avvale di un'analisi di Life Cycle Assessment (LCA) quale metodologia per mettere a sistema il risparmio energetico dovuto al living wall con i "costi ambientali" di produzione e mantenimento.

Altri studi si concentrano sulla riduzione delle temperature superficiali o sulla temperatura outdoor in corrispondenza di una superficie vegetata (Wong et al. 2010), collegando a questa diminuzione un conseguente risparmio energetico estivo (Alexandri e Jones 2008).

In generale, è possibile affermare che la maggior parte degli studi si ferma all'analisi di dati sperimentali; quasi nessuno arriva a definire dei parametri standard che possano servire alla caratterizzazione dei living walls.

Per quel che concerne i *parametri acustici*, la legislazione nazionale con il DPCM 5/12/97 definisce i requisiti acustici passivi che le partizioni devono rispettare:

- potere fonoisolante apparente (relativo agli elementi di separazione tra due ambienti confinati),
- isolamento acustico standardizzato di facciata,
- isolamento al calpestio,
- isolamento dal rumore prodotto dagli impianti tecnologici ad impianto discontinuo.

È evidente che l'unico parametro che interessa una partizione verticale esterna è l'isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,nT,w}$, calcolato in base al potere fonoisolante dei diversi elementi che costituiscono la facciata, considerando la trasmissione diretta e laterale.

Anche se non indicato dalla normativa come requisito prestazionale autonomo,⁶ il coefficiente di assorbimento acustico è un parametro che descrive un'importante proprietà dei materiali. All'interno di un contesto urbano, dove il rumore prodotto da sorgenti sonore outdoor è particolarmente elevato, le superfici con un elevato coefficiente di assorbimento acustico, possono svolgere un ruolo importante rispetto al comfort acustico ambientale.

Gli studi presenti in letteratura, che verranno presentati nel paragrafo "3.3 STATO DELL'ARTE", si concentrano per lo più su quest'ultimo parametro (Horoshenkov 2013) e sulla determinazione sperimentale dell'insertion loss (Wong et al. 2010) dovuto alla presenza della parete vegetata.

Quest'ultimo parametro esprime la differenza tra il livello di pressione sonora misurata in presenza e in assenza della superficie che si vuole caratterizzare. L'unità di misura dell'insertion loss sono i decibel acustici.

L'insertion loss è dunque un parametro relativo e non assoluto, in quanto riferito a un ambiente di misura. Pertanto esso non si può annoverare tra i parametri utili alla caratterizzazione di un generico living wall.

⁶ L'assorbimento acustico viene considerato nel calcolo dei requisiti acustici passivi solo al fine di normalizzare le prestazioni delle partizioni escludendo gli effetti di assorbimento dovuti ai diversi rivestimenti presenti.

3.2 PROBLEMI METODOLOGICI

Per poter fare considerazioni sull'adeguatezza di un indicatore al fine di descrivere e caratterizzare i living wall dal punto di vista fisico tecnico, è imprescindibile avere una piena consapevolezza del sistema stesso e del suo funzionamento.

Innanzitutto il living wall, come accennato nel capitolo precedente, può essere considerato un sistema di rivestimento delle chiusure esterne opache verticali. Alla luce di ciò, dunque, la trasmittanza termica va considerata solo in seconda battuta, in quanto si riferisce all'intera stratigrafia dell'involucro, considerando, come si è visto, gli scambi termici con l'ambiente interno e con l'ambiente esterno (coefficienti liminari). Nel caso del living wall sarà più opportuno considerare prima quegli indicatori che possono riferirsi al singolo strato e non all'intera parete: conducibilità termica, densità, spessore, eccetera. Questi indicatori, tuttavia, presuppongono un materiale omogeneo o, quanto meno standardizzato. Se, infatti, è possibile ricavare dei valori per prodotti di lavorazione industriale (si pensi, ad esempio, ai laterizi che, pur non essendo omogenei, si conformano a precisi standard normativi), tale operazione sembra essere quasi impossibile nel caso di un elemento così mutevole e dinamico quale il living wall. In alcuni lavori di ricerca vi è stato il tentativo di calcolare la conducibilità termica delle foglie, ottenendo un dato medio, il cui valore rischia però di essere una semplificazione riduttiva o addirittura fuorviante. Le foglie, infatti, formano un "cuscino" di spessore e densità variabile e disomogenea, non solo da caso a caso, ma anche da una stagione all'altra. Anche la standardizzazione del substrato, componente fondamentale del sistema living wall, risulterebbe inappropriata: benché sia possibile caratterizzare la miscela di fibre e inerti, il grado di compattazione (e quindi la densità) all'interno del modulo è un dato estremamente variabile, dal momento che questo processo è solitamente effettuato manualmente in vivaio. Inoltre, i cicli d'irrigazione ne modificano le caratteristiche. Si potrebbe considerare il substrato umido, ma anche in questo caso, non essendo la quantità d'acqua fornita costante, è difficile arrivare a definire un dato numerico realmente attendibile.

Un'ulteriore considerazione va fatta relativamente alla pianta: essa assorbe l'energia solare trasformandone una parte in calore latente. Tentare di ricondurre l'attività biologica ad alcuni valori che descrivono un comportamento statico, risulterebbe una semplificazione assai azzardata.

Il living wall è dunque un involucro attivo per cui sarebbe forse più appropriata una caratterizzazione in regime dinamico, ma anche in questo caso s'incontra una problematicità di fondo: i parametri dinamici presuppongono l'esistenza di un periodo che si ripropone in modo costante nel tempo. La "dinamicità" delle piante è estremamente variabile in funzione sia delle condizioni al contorno che della specificità della pianta stessa (in quanto

essere vivente), e questo rende difficoltosi i tentativi di parametrizzazione.

Data la complessità del living wall, il calcolo teorico delle prestazioni di un involucro vegetato rischia di essere poco accurato. Esistono in letteratura alcune caratterizzazioni energetiche sviluppate mediante modelli per la simulazione. Nella maggior dei casi, tuttavia, si riscontra una generale difficoltà nella caratterizzazione numerica delle proprietà della vegetazione e la raccolta di alcuni dati (assorbimento della radiazione solare, traspirazione, apertura stomatica,⁷ eccetera) andrebbe implementata. Tale difficoltà ha portato a effettuare numerose assunzioni che si traducono di fatto in una semplificazione eccessiva del problema. In molti casi, inoltre, la validazione dei modelli utilizzati per le simulazioni, è stata condotta in un intervallo di tempo troppo breve per essere considerata attendibile (Pérez et al. 2014).

⁷ Con stoma s'intende quel <<complesso (chiamato anche apparato stomatico) presente nell'epidermide delle parti aeree delle piante (fusto, foglie e organi omologhi) costituito da due cellule che, essendo reniformi, lasciano tra di loro una fessura (dotto stomatico o apertura stomatica) attraverso la quale il sistema degli spazi intercellulari comunica liberamente con l'aria esterna>>. (Fonte: Enciclopedia Treccani)

3.3 STATO DELL'ARTE

3.3.1 Prestazioni energetiche

Si presentano in questo paragrafo i principali studi relativi alle prestazioni energetiche dei living walls, ad oggi compiuti.

In generale, si può affermare che gli articoli presenti in letteratura sono concordi nell'attribuire ai living walls la capacità di ridurre i consumi energetici degli edifici, in particolar modo durante la stagione estiva.

Pérez et al. (2014) sottolineano come le prestazioni energetiche di un living wall siano strettamente legate al fattore climatico: esso influenza la crescita delle piante e il loro comportamento (traspirazione, orientamento, densità e grandezza delle foglie).

Tuttavia, ribadiscono gli autori, nei vari studi presenti in letteratura non sempre tale dato viene fornito. Risulta quindi particolarmente difficile confrontare i vari lavori al fine di trarre delle conclusioni generali riguardo al comportamento energetico di un living wall (Figura 8).

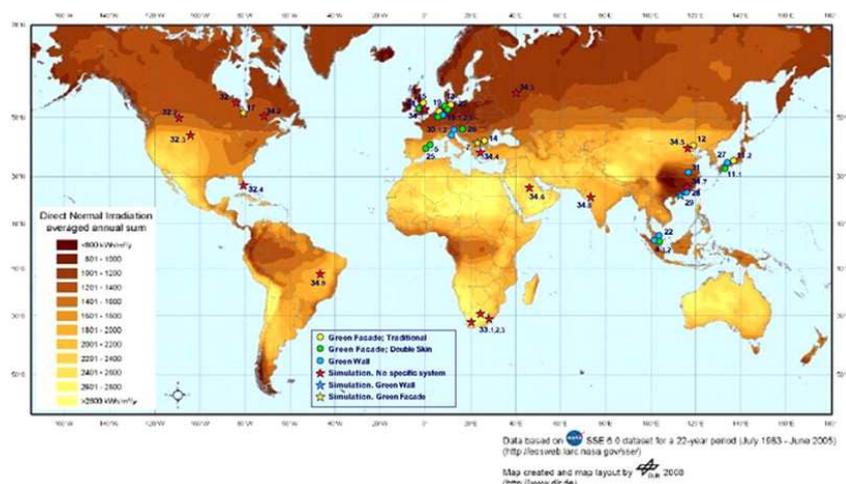


Figura 8 - Somma media annuale della radiazione normale diretta e articoli presenti in letteratura divisi per argomento.
(Fonte: Perez et al. 2014)

Da un'analisi della letteratura, emergono tre principali effetti dovuti alla presenza del living wall e indagati a livello sperimentale:

- riduzione delle temperature superficiali esterne e raffrescamento,
- isolamento termico,
- riduzione della velocità del vento (effetto barriera).

RIDUZIONE DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI ESTERNE E RAFFRESCAMENTO

La riduzione delle temperature superficiali esterne è un effetto dovuto all'ombreggiamento della parete dato dalla presenza delle foglie, che intercettano la radiazione solare incidente. Tale effetto è considerato dalla totalità degli studi presenti in letteratura, almeno dal punto di vista qualitativo.

L'effetto di raffrescamento è altresì dovuto al processo evapotraspirativo che avviene grazie alla presenza delle piante e del substrato. Circa il 50% degli studi analizzati considera questo effetto. Va tuttavia precisato che esso è difficilmente quantificabile poiché legato a parametri fortemente variabili. L'evapotraspirazione è, infatti, strettamente legata non solo alla quantità di substrato presente, ma anche al regime di irrigazione e all'orientamento della facciata.

Wong et al. (2010) hanno studiato otto differenti tipi di living walls e facciate verdi, applicate a murature cementizie.

La sperimentazione ha previsto la misura delle temperature superficiali del muro dietro al living wall (o alla facciata verde) e dell'aria esterna di fronte alla parete verde.

I living walls hanno mostrato una migliore capacità di ridurre la temperatura rispetto alle facciate verdi; si può quindi dedurre che il pacchetto tecnologico del living wall abbia delle proprietà specifiche legate non solamente all'elemento vegetale, bensì a una combinazione di cause. Infatti, l'effetto combinato dell'extra isolamento dovuto agli strati aggiuntivi e alla presenza di umidità trattenuta nel terreno, influenzano positivamente la prestazione energetica estiva.

Mazzali et al. (2013) fanno uno studio di tipo sperimentale su un living wall monitorato in un tipico contesto climatico mediterraneo temperato durante la stagione estiva. Lo studio è stato condotto in tre località differenti (Lonigo in provincia di Vicenza, Venezia e Pisa) utilizzando specie diverse di piante. I parametri misurati sono: temperature superficiali, temperatura dell'aria esterna, umidità relativa dell'aria esterna, velocità del vento, flussi di calore e radiazione solare incidente.

La ricerca evidenzia il legame tra la performance del living wall e la presenza di radiazione solare: durante le giornate soleggiate, infatti, la differenza di temperatura superficiale tra un muro intonacato e un muro rivestito con il living wall è compresa tra 12 °C e 20 °C, mentre durante le giornate nuvolose il delta si riduce a un paio di gradi. Anche i flussi termici uscenti sono maggiori nel caso della parete tradizionale (90 - 100 W/m²) rispetto a quelli uscenti dalla parete con il living wall (18 - 30 W/m²). Tale differenza, quantificata percentualmente dagli autori (70% - 80%) è significativa in quanto permette una sensibile riduzione del carico di raffrescamento e dei consumi energetici ad essa legati.

Questa differenza di flussi è dovuta ad alcuni fattori: innanzitutto l'ombreggiamento delle foglie riduce drasticamente la quantità di energia solare incidente sulla parete, inoltre la dinamica dell'evapotraspirazione fa sì che l'energia termica sia trasformata

in calore latente; infine, le piante hanno un differente coefficiente di assorbimento.

La ricerca di Chen et al. (2013) esamina il comportamento termico in climi caldo umidi con un lavoro sperimentale.

Sono state testate sei differenti specie di piante, misurando sulla "test cell": le temperature dell'aria interna ed esterna, le temperature superficiali interne ed esterne, la temperatura dell'aria nell'intercapedine, l'umidità relativa dell'aria esterna, la velocità dell'aria esterna e la radiazione solare incidente.

I risultati evidenziano innanzitutto il potenziale di raffrescamento dovuto a una minore temperatura superficiale sia esterna (delta 20,8 °C) che interna (delta 7,7 °C); di conseguenza, anche la temperatura dell'aria interna risulta minore (delta 1,1 °C).

Il lavoro è focalizzato sulle proprietà termiche del microclima tra la superficie del muro e il living wall; quest'ultimo è lo "strumento" che sottrae calore all'aria dell'intercapedine, la cui temperatura, infatti, risulta sempre inferiore rispetto all'aria esterna, ma maggiore della temperatura superficiale esterna del muro (a contatto con l'intercapedine). Bisogna tuttavia sottolineare che le differenze di temperatura sono sempre molto contenute, e rischiano di essere approssimabili al range di incertezza di misura.

Inoltre, il living wall non aumenta l'umidità relativa dell'aria dell'intercapedine né quella dell'ambiente indoor. Il tasso di umidità e l'efficacia nel raffrescamento restano comunque legati alla componente tecnologica di realizzazione dell'intercapedine: secondo quanto riportato dagli autori, se essa è sigillata la sua prestazione relativa al raffrescamento è migliore ma la mancanza di ventilazione rende l'aria più umida.

ISOLAMENTO TERMICO

L'isolamento termico dipende dai diversi strati che compongono il living wall; la presenza di un'intercapedine d'aria non ventilata o debolmente ventilata e di spessore adeguato sono l'elemento ritenuto più significativo negli articoli analizzati, mentre la composizione del substrato e il suo spessore non vengono tenuti in considerazione.

Perini et al. (2011), sottolineano che i living wall, rispetto alle facciate verdi, sono un sistema con maggiore impatto sulla resistenza termica, grazie all'intercapedine d'aria (se di spessore adeguato) e all'extra isolamento fornito dagli strati dei moduli del living wall (polietilene e substrato).

Questo lavoro è particolarmente interessante, in quanto prende in considerazione una molteplicità di aspetti, che analizza in modo combinato; tuttavia viene trascurato il problema legato alla presenza dei ponti termici che si vengono a formare tra un pannello vegetato e l'altro. Se, infatti, si vuole considerare il pannello vegetato come strato isolante aggiuntivo, includendolo quindi nel calcolo della resistenza termica totale della parete, vi sono due fattori imprescindibili che occorre considerare: il telaio metallico dei pannelli (che costituisce un ponte termico) e la

costante presenza di acqua, dovuta all'irrigazione, che influisce sulla resistenza termica del pannello, peggiorandone le prestazioni in maniera significativa.

RIDUZIONE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO

La riduzione della velocità del vento che lambisce la parete è legata alla presenza delle foglie. Alcuni studi analizzano questo effetto mettendolo in relazione con una riduzione degli scambi termici convettivi.

Perini et al. (2011) analizzano il potenziale del living wall nel ridurre la velocità dell'aria che lambisce la facciata, registrando una diminuzione da 0,56 m/s (sensore posizionato a 10 cm di distanza) a 0,10 m/s (sensore posizionato nell'intercapedine tra la parete e il living wall).

Questo studio è uno dei primi e pochi lavori che prende in considerazione, oltre all'aspetto estivo, anche quello invernale. In particolare, l'attenzione si concentra sulla capacità delle foglie di ridurre la velocità dell'aria che lambisce la parete e le relative conseguenze sulla resistenza termica della parete stessa. Dalle analisi sperimentali effettuate emerge che a un metro di distanza dalla facciata, non sono apprezzabili differenze di temperatura o velocità dell'aria, ma all'interno del fogliame e dell'intercapedine la velocità dell'aria è significativamente meno elevata. Dall'analisi delle diverse configurazioni testate, emerge che è possibile determinare uno spessore di intercapedine ottimale, individuato tra i 40 mm e i 60 mm, affinché la velocità dell'aria si mantenga minore di 0,2 m/s. La conseguenza di questo decremento di velocità è la possibilità di equiparare la resistenza liminare esterna a quella interna, dal momento che gli scambi convettivi sono ridotti. Un altro elemento interessante che emerge dall'articolo, è il confronto tra i diversi sistemi di inverdimento delle facciate: l'inverdimento diretto (rampicanti) e il living wall si dimostrano particolarmente efficaci, mentre l'inverdimento indiretto ottenuto facendo crescere dei rampicanti su una struttura di sostegno distanziata dalla parete non risulta avere una buona performance a causa dell'elevato spessore di intercapedine.

SIMULAZIONI

In letteratura è possibile trovare poche simulazioni relative alla tecnologia del living wall. Come riportato nel paragrafo precedente, le simulazioni, dato l'attuale stato dell'arte, devono basarsi su numerose assunzioni, comportando una notevole semplificazione del sistema da caratterizzare.

A fronte di tale problematica, lo studio presentato in questa tesi ha portato avanti una caratterizzazione di tipo sperimentale. Tuttavia, si riportano per completezza gli elementi più interessanti riguardanti le simulazioni emersi da un'analisi della letteratura.

Alexandri e Jones (2008) hanno simulato gli effetti termici dei tetti verdi e dei muri vegetali in canyon urbani. I risultati della simulazione mostrano che la combinazione di queste due tecnologie può portare un abbassamento della temperatura outdoor fino a 11 °C durante le giornate soleggiate.

La riduzione della temperatura è dovuta innanzitutto alla vegetazione stessa, ma anche l'esposizione e i fattori geometrici influenzano tale prestazione: più è ampio il canyon e meno significativo è il contributo del verde in termini di diminuzione della temperatura. Lo studio, dopo aver considerato diversi contesti climatici, evidenzia che il verde verticale all'interno dei canyon è più performante rispetto alle coperture verdi, ma questi ultimi hanno un effetto maggiore alla quota delle coperture e di conseguenza a scala urbana. I tetti e i muri verdi possono determinare un risparmio energetico per il raffrescamento degli edifici compreso tra il 32% e il 100%; inoltre mitigano l'effetto isola di calore urbana. Benché i risultati siano interessanti, occorre precisare che lo studio di Alexandri e Jones non specifica né la tipologia di verde verticale né le specie vegetali considerate. Wong et al. (2009) sviluppano un'analisi termica mediante simulazione per determinare gli effetti della vegetazione sul comfort termico e sui consumi energetici. È stata altresì valutata la performance termica dell'involucro calcolandone la trasmittanza termica. Alcuni dati utilizzati (Leaf Area Index, spessore del manto fogliare, eccetera) sono stati ricavati da studi sperimentali precedenti relativi ai tetti verdi, ritenendoli validi anche per i living wall.

La simulazione è stata fatta ipotizzando un living wall con differenti tipi di piante, come rivestimento per un ipotetico edificio. Il parametro chiave per valutare l'effetto di ombreggiamento risulta essere lo spessore del manto fogliare. Tale parametro è quantificabile attraverso il Leaf Area Index della specie utilizzata.

La riduzione del fabbisogno energetico per il raffrescamento, dovuta alla presenza del manto fogliare, è tra il 10% e il 30%.

Nonostante gli studi concernenti le prestazioni energetiche dei living wall si siano intensificati soprattutto negli ultimi anni, rimangono ancora numerosi aspetti da indagare in profondità: un confronto tra le diverse specie di piante, un confronto tra facciate aventi diverso orientamento, la composizione del substrato e il suo contributo in termini di prestazione energetica.

È inoltre necessario finalizzare i dati ottenuti e fornire indicazioni chiare ai progettisti in modo da rendere attendibile e accurato il calcolo delle prestazioni energetiche di una generica parete rivestita con la tecnologia living wall.

3.3.2 Prestazioni acustiche

Lo stato dell'arte, relativo alle prestazioni acustiche del living wall, si presenta a oggi particolarmente lacunoso poiché in letteratura sono presenti solo pochissimi articoli riguardo a tale tematica.

Van Renterghem et al. (2013) hanno studiato mediante metodologie di calcolo il potenziale di pareti vegetate, tetti verdi, schermi vegetati, e la combinazione di questi elementi. Lo studio si concentra sulla propagazione del rumore del traffico dalla strada ai cortili. Il parametro utilizzato nelle varie simulazioni è l'insertion loss. Dato il carattere comparativo della ricerca, si evidenzia come le ricadute sull'insertion loss date dalla vegetazione verticale, dipendano fortemente dal materiale con cui vengono confrontate: la vegetazione comporta una maggiore riduzione del livello di rumore soprattutto se confrontate con materiali rigidi. Inoltre, l'inverdimento delle superfici ai piani più alti influisce maggiormente rispetto all'inverdimento delle superfici al livello della strada.

Lo studio di Wong et al. (2010) prende in esame otto tipi di facciate verdi e ne valuta il loro impatto acustico misurando l'insertion loss dovuto alla loro presenza. Dai dati raccolti emerge che una particolare attenuazione è presente alle basse e medie frequenze. Secondo gli autori, ciò è dovuto alla capacità del substrato di assorbire il suono, mentre il diverso risultato alle alte frequenze è dovuto allo scattering⁸ delle foglie.

Il coefficiente di assorbimento acustico ha un andamento crescente fino a 1000 Hz; a partire da questa frequenza si stabilizza attorno ad un valore compreso tra 0,25 e 0,5, a seconda del tipo campione testato.

Horoshenkov et al. (2013) misurano il coefficiente di assorbimento acustico di cinque specie vegetali in presenza e in assenza di substrato. La prova è eseguita mettendo a punto una metodologia di misura utilizzando il tubo ad impedenza. Il modello di fluido equivalente per la propagazione del suono in un mezzo rigido poroso proposto da Miki (1990) è utilizzato per validare i risultati. La performance acustica delle piante e del terreno è messa in relazione con la resistività al flusso e la tortuosità; inoltre la densità di area fogliare e l'angolo con cui è orientata la foglia rispetto alla direzione dell'onda incidente costituiscono due fattori caratteristici per stimare l'assorbimento acustico.

⁸ Lo scattering è una diffusione talvolta dispersiva dell'onda sonora dovuta alla presenza di discontinuità nel mezzo. Nel caso del living wall, l'onda sonora invece di incidere direttamente sulla facciata, viene diffusa e in parte riflessa fra le foglie, che fungono da mezzo disperdente.

IL CASO STUDIO: IL LIVING WALL GRE_EN_S

CAPITOLO 4

4.1 IL PROGETTO

Il lavoro di ricerca presentato all'interno di questa tesi è stato in parte sviluppato all'interno del progetto GRE_EN_S - GREen ENvelope System, un progetto finanziato dal Polo Innovazione Green Building and Hydrogen Technologies della Regione Piemonte grazie ai Fondi Europei per lo Sviluppo Regionale.

Il progetto GRE_EN_S ha visto coinvolti il Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino (capofila), il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, il Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari dell'Università degli Studi di Torino, e alcuni partner aziendali (Ceit, 13Ricerca, Safitec).

L'obiettivo del progetto GRE_EN_S è stato quello di sviluppare un prototipo di living wall modulare ad alto contenuto tecnologico e a basso impatto ambientale. Il progetto si è dunque focalizzato sulla definizione di una filiera produttiva legata alla realtà locale, cosiddetta "a chilometro zero", sulla progettazione di un sistema tecnologico *disassemblabile* e *riutilizzabile*, sull'utilizzo di materie prime *riciclate* e sulla *sostenibilità economica*.

L'approccio è stato di tipo interdisciplinare: le diverse competenze dei partner sono state messe in relazione tra loro al fine di valutare e definire un prototipo di living wall, considerandone tutti gli aspetti caratterizzanti: tecnologico, progettuale, fisico tecnico, agronomico, economico e commerciale.

Il prototipo sviluppato nell'ambito del progetto GRE_EN_S è stato scelto come caso studio. Sono state quindi organizzate numerose campagne di monitoraggi termici e di analisi acustiche, meccaniche e agronomiche, in modo da fornire una completa caratterizzazione del sistema. Tale scelta è stata motivata dalla

necessità di restringere il campo d'indagine a un living wall specifico che, pur presentando le peculiarità comuni a questo tipo di tecnologia (substrato leggero, supporto tecnologico realizzato con materiali tessili, modularità), permettesse di focalizzare la sperimentazione su un caso studio, in modo da non limitarsi a considerazioni generiche e superficiali di tipo unicamente qualitativo e non corredate da dati numerici sperimentali.

Il progetto GRE_EN_S ha previsto l'avanzamento della ricerca secondo varie fasi.

Innanzitutto lo studio e la definizione di materiali e prodotti che costituiscono il sistema parete, sia nei componenti tecnologici, che in quelli agronomici: sistema strutturale, supporto tecnologico, substrato e specie vegetali. La valutazione dei vari componenti è stata fatta alla luce e della fattibilità tecnica ed economica della filiera produttiva degli elementi del sistema stesso, e alla luce dei requisiti prestazionali necessari.

Si è quindi passati alle varie fasi della progettazione, fino ad arrivare al progetto definitivo del sistema parete GRE_EN_S, e alla realizzazione di prototipi che sono stati testati dal punto di vista tecnologico, agronomico e fisico tecnico.

Sono stati scelti gli indicatori utili alla verifica prestazionale dei prototipi definendo un protocollo di raccolta dati, analisi e monitoraggio delle prestazioni termiche e ambientali del sistema parete GRE_EN_S.

A questa fase, è seguita la realizzazione di due moduli insediativi "campione", uno realizzato con il sistema parete GRE_EN_S, l'altro con tipiche tecnologie di rivestimento leggere, al fine di monitorare le prestazioni termiche e ambientali e valutare l'efficacia di GRE_EN_S.

Infine, alla luce di quanto emerso dai monitoraggi, sono stati desunti gli "aspetti chiave" relativi alla progettazione e alla realizzazione del sistema parete GRE_EN_S, valutando complessivamente le prestazioni monitorate sul prototipo e sui moduli insediativi, nonché la fattibilità tecnica ed economica della filiera di recupero di tutti i materiali e i prodotti utilizzati nella realizzazione del living wall GRE_EN_S.

4.2 LA SPERIMENTAZIONE

La fase sperimentale ha visto coinvolti in modo sinergico tutti i partner del progetto, sia accademici sia aziendali. Partendo da un'analisi di fattibilità ed ecocompatibilità, sono state testate le prestazioni di materiali e componenti fino alla definizione di un prototipo finale, esposto e monitorato nel modulo insediativo.

Il primo passo della prototipazione ha riguardato la definizione di una struttura portante per alloggiare i moduli del progetto GRE_EN_S. Il sistema strutturale scelto per ospitare i pannelli vegetati è il telaio BYBOX™ brevettato dall'azienda CEIT, partner aziendale del progetto. Si tratta di una struttura composta da montanti e traversi in acciaio zincato che forma una griglia 100 x 50 cm; il telaio permette di realizzare strutture verticali continue, sulle quali possono essere montate pannellature a secco prefinito o da intonacare.

Lo studio e la messa a punto di un prototipo di pannello vegetato ha preso come punto di riferimento iniziale il sistema REVIWALL™, brevettato dal vivaio Reviplant. Tale pannello si compone di una struttura in alluminio zincato di dimensioni 40 x 50 cm realizzata con due profili a "C" connessi da asticelle rivettate, atte ad accogliere uno strato di feltro in polipropilene, due strati di stuoie radicabili non tessute in fibra sintetica (polipropilene e poliestere) e due geogriglie contenenti a loro volta il substrato in fibra di cocco, micorrize e polimeri idroretentori. Nel feltro esterno vengono praticati sei tagli orizzontali, creando così delle tasche dove le piante vengono messe a dimora e possono cominciare la radicazione verso gli strati più interni del substrato.

Inizialmente la modularità del telaio BYBOX™ è stata adattata alle dimensioni del pannello vegetato, a cui sono state aggiunte sul lato posteriore due lamelle sagomate all'estremità superiore e inferiore, in modo da permettere l'aggancio alla struttura BYBOX™ (Figura 9).

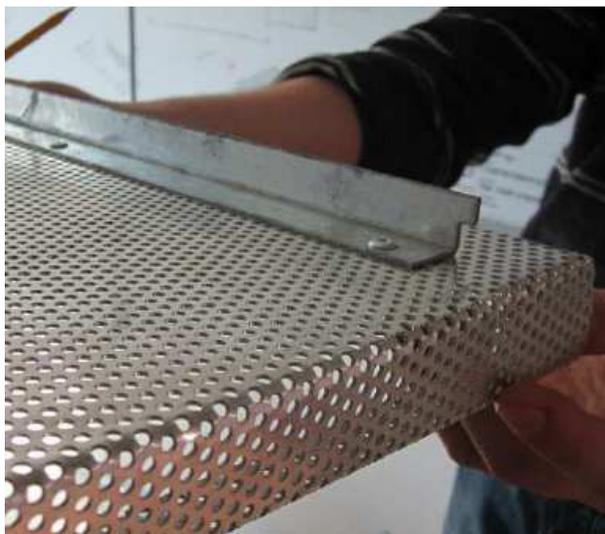


Figura 9 - Telaio in lamiera microforata per il pannello vegetato
Particolare delle lamelle sagomate che permettono l'incastro all'interno
del telaio BYBOX™.

L'assemblaggio avviene mediante incastro, senza richiedere ulteriori strumenti per la posa in opera e lo smontaggio. I moduli possono essere assemblati indifferentemente sia in orizzontale che in verticale, ottenendo una superficie complanare.

Questo primo prototipo (PT01) ha presentato alcune criticità. Dal punto di vista tecnologico, si è evidenziato che la struttura dei pannelli in profili a C è troppo debole, in particolare nei punti di connessione, e si deforma in seguito a ripetute fasi di montaggio e rimozione; inoltre la spinta generata dall'apparato radicale delle piante può portare alla rottura dei profili in corrispondenza della piegatura. Anche le lamelle di aggancio, in seguito alle deformazioni, perdono la loro esatta posizione rendendo sempre più difficoltoso sia l'aggancio sia la rimozione. Oltre ad un evidente problema d'integrità strutturale e durabilità dei pannelli, questo determina anche un problema estetico alterando la continuità delle fughe.

Il secondo prototipo del pannello vegetato (PT02) presenta un elemento strutturale unitario in lamiera microforata piegata sui lati e risvoltata. In tal modo si evita di creare dei nodi deboli di connessione e si riducono le fasi di lavorazione, passando da 15 rivettature ad una sola fase di piegatura meccanica per ogni modulo; la resistenza meccanica della struttura del pannello ne è notevolmente incrementata, a fronte di un aumento di peso piuttosto contenuto. Le dimensioni del modulo vengono adattate al telaio BYBOX™ e diventano 50 x 50 cm.

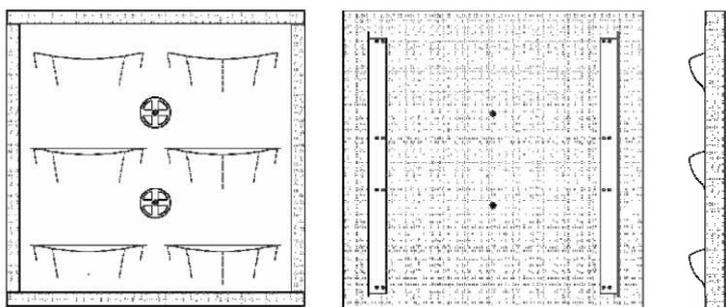


Figura 10 - Schema del prototipo PT02.

Il pacchetto costituito da feltri e substrato viene fissato alla lamiera microforata mediante alcuni tasselli.

La foratura dell'alluminio (diametro 5 mm) garantisce una corretta permeabilità all'aria del supporto tecnologico, indispensabile alla sopravvivenza delle piante.

Anche in questo prototipo si evidenziano alcune criticità. La presenza della cornice in alluminio, quando la vegetazione non si è ancora sviluppata completamente e pertanto non ricompre l'intera superficie della parete, comporta un impatto visivo non trascurabile e dà luogo a una indesiderata riflessione della radiazione solare. I tessuti utilizzati come contenitore delle piante si rivelano non del tutto appropriati essendo non resistenti ai raggi ultravioletti, pertanto la loro durabilità risulta piuttosto limitata; si riscontra inoltre una scarsa rigidità e una tendenza a spanciare sotto l'azione meccanica della pianta.

Nel terzo prototipo (PT03), infatti, il tessuto esterno viene sostituito con un feltro in poliestere resistente agli UV e calandrato; quest'ultima caratteristica è data da un trattamento termico sulla faccia interna del tessuto che ne fonde le fibre superficiali, conferendo una rigidità maggiore.

Il feltro è stato accoppiato a uno strato interno in viscosa; quest'ultima non può essere considerata quale componente esterno perché non abbastanza resistente e durevole, tuttavia il suo ruolo è fondamentale grazie all'elevata capacità di trattenere l'acqua.

Dal punto di vista strutturale, la lamiera microforata viene piegata di 90 gradi senza risvoltarla ulteriormente. Il pacchetto contenente il substrato viene fissato alla lamiera mediante dado e bullone a testa cieca anti svitamento, anziché usare una vite autoperforante, evitando così la presenza delle punte delle viti sul retro del pannello, che risultano pericolose durante la movimentazione.

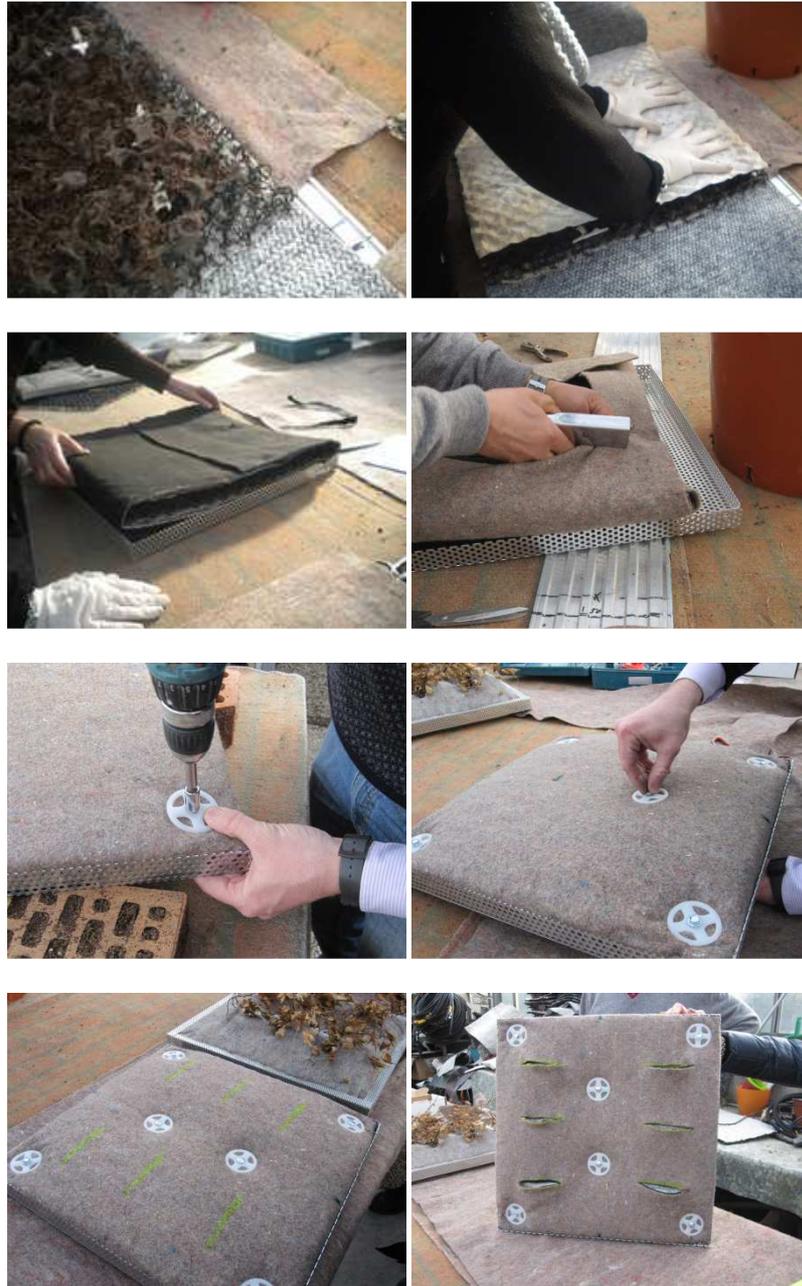


Figura 11 - Foto della realizzazione del prototipo PT03.

In seguito è stata realizzata un'ulteriore variante al PT03, utilizzando dei feltri differenti per l'alloggiamento delle piante: un doppio strato di feltro in poliestere agugliato lungo tre fasce orizzontali: l'agugliatura è ottenuta mediante il movimento verticale di appositi aghi e serve a tenere insieme le fibre dei due feltri.⁹

I substrati utilizzati per la sperimentazione sono di vario tipo: un substrato composto da fibra di cocco, addizionata con polimeri idroretentori e micorrizae, ha rappresentato la base a partire dalla quale sono state introdotte alcune variazioni.

⁹ La coesione del materasso di fibre ottenuto mediante il processo di agugliatura è dovuta alla penetrazione di una parte delle fibre trascinate verticalmente dal moto degli aghi.

Nell'ottica di utilizzare all'interno del pannello GRE_EN_S alcune materie prime seconde, si è pensato di testare i residui della fabbricazione di feltrini sotto sedia quale componente del substrato. Il ruolo dei feltrini è quello di trattenere l'acqua evitando un eccessivo percolamento in occasione dell'irrigazione e permettere alla pianta di assorbirla nel tempo. In assenza di materiali con sufficiente capacità di ritenzione idrica, infatti, si rischia che l'acqua erogata in quota scenda per gravità e le piante più in alto si trovino in condizioni di siccità.

Nella scelta del materiale si è tenuto conto sia della sua disponibilità in quantitativi sufficienti allo sviluppo di una filiera dedicata, sia della reperibilità sul territorio locale.

Sono state quindi composte le seguenti miscele: substrato "standard" così come sopra descritto, substrato a base di fibra di cocco (50%) e feltrini sminuzzati (50%), e substrato a base di feltrini sminuzzati in totale sostituzione della fibra di cocco.

Il volume di substrato necessario per la realizzazione di un singolo modulo è di circa 2,5 litri.

Al fine di valutare l'idoneità e l'efficacia dei diversi substrati rispetto alla crescita delle piante, sono state fatte delle analisi a campione calcolando l'indice di crescita¹⁰ e l'indice di area fogliare¹¹ delle piante cresciute nei diversi substrati.

Per quanto riguarda la componente vegetale, sono state selezionate le specie da testare, avendo cura di scegliere essenze adatte alla crescita in verticale con caratteristiche botaniche e di accrescimento diverse:

- *lonicera nitida*,
- *bergenia cordifolia*,
- *heuchera villosa* "Palace purple",
- *luzula sylvatica*.

La *lonicera nitida* è una specie piuttosto diffusa nella realizzazione di verde verticale, grazie alla sua resistenza e al valore estetico. È una pianta sempreverde con foglie opposte di colore verde scuro, di piccole dimensioni (lunghe circa 1 - 1,5 cm e larghe circa 0,5 cm), piccoli fiori bianchi profumati e bacche viola non commestibili. Predilige esposizioni soleggiate o parzialmente soleggiate.

La *bergenia cordifolia* è una pianta sempreverde con foglie ovate carnose di grandi dimensioni, le cui tonalità variano dal verde brillante al rossiccio; nel periodo di fioritura sviluppa fiori rosa a coppa in racemi. Anche la *bergenia* predilige esposizioni soleggiate o parzialmente soleggiate.

L'*heuchera villosa* (palace purple) è una specie perenne, con fogliame di colore bronzo-purpureo; si adatta a esposizioni soleggiate o parzialmente soleggiate.

¹⁰ L'indice di crescita (IC) viene calcolato facendo la media tra le misure di altezza, diametro maggiore e diametro ortogonale della chioma.

¹¹ L'Indice di Area Fogliare, in inglese Leaf Area Index (LAI), è il rapporto tra la totalità della superficie fogliare e la superficie di terreno su cui la pianta insiste. Per una trattazione più esaustiva relativa all'utilizzo di questo parametro si rimanda al Capitolo 7.

La *luzula sylvatica* è una graminacea cespitosa a fogliame semipersistente e portamento cadente, con foglie di piccole dimensioni (1 - 1,5 cm) di colore verde chiaro. Predilige esposizioni soleggiate.



Figura 12 - *Lonicera nitida* (a), *bergenia cordifolia* (b), *heuchera villosa* palace purple (c), *luzula sylvatica* (d).

Un ulteriore criterio che ha guidato la selezione delle specie è quello relativo alle esigenze idriche: sono state scelte piante con una necessità di irrigazione simile, al fine di avere una ottimale gestione della fertirrigazione in opera.

Le piante sono state messe a dimora nei diversi tipi di substrato e sono state monitorate e valutate attraverso i seguenti parametri:

- biomassa sviluppata (misurando in peso l'apparato aereo);
- valutazione qualitativa dell'apparato radicale (dimensioni della pianta, spessore medio del cuscino fogliare, dimensioni e numero delle foglie);
- calcolo della percentuale di copertura verde sulla parete;
- aspetto generale delle piante (eventuali malattie, morie o segni di stress).

Contestualmente alle fasi di prototipizzazione, si è provveduto a progettare e realizzare una cella di prova che consentisse di avviare sia una prima campagna di monitoraggi termici, sia di testare la funzionalità complessiva del sistema parete, nonché di fare emergere eventuali criticità.

Il dimostratore, realizzato presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, è costituito da un involucro isolato poco massivo. Le sue dimensioni esterne sono 2,0 x 1,8 x 1,8 m. Sulla facciata orientata a sud è stata montata la struttura portante per il living wall, sulla quale sono stati inseriti nove prototipi di

moduli vegetati, avendo però cura di lasciare una fascia verticale rifinita ad intonaco come benchmark di riferimento.



Figura 13 - Fasi di montaggio del dimostratore presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino.

È stato successivamente progettato e realizzato il modulo insediativo campione, installato presso il centro di ricerca Environment Park di Torino. Il modulo ha dimensioni esterne di 250 x 400 x 286 cm ed è costituito da una struttura monoblocco prefabbricata trasportabile. La struttura è composta da un basamento in scatolati di acciaio saldati con tamponamento in lamiera coibentate su cui sono connessi i piantoni di supporto alla copertura; le pareti perimetrali, assemblate anch'esse fuori opera, sono realizzate mediante il sistema BYBOX™ con maglia 50 x 50 cm e coibentate dall'interno. Il sistema viene completato in opera con i pannelli PT03 su tre facciate per un totale di 52 m² di superficie. Il quarto lato ospita un serramento in vetro camera che permette l'ingresso all'interno.

Al fine di avere un benchmark significativo, utile al confronto delle prestazioni termiche, è stato realizzato anche un altro modulo insediativo con le pareti esterne rivestite in tavolato di abete anziché con il living wall.

Per entrambi i moduli insediativi, la copertura è costituita da un traliccio reticolare in alluminio con rivestimento superiore in policarbonato impermeabilizzato e strato d'isolamento inferiore in lamiera coibentate.

CAPITOLO 4
IL CASO STUDIO: IL LIVING WALL GRE_EN_S

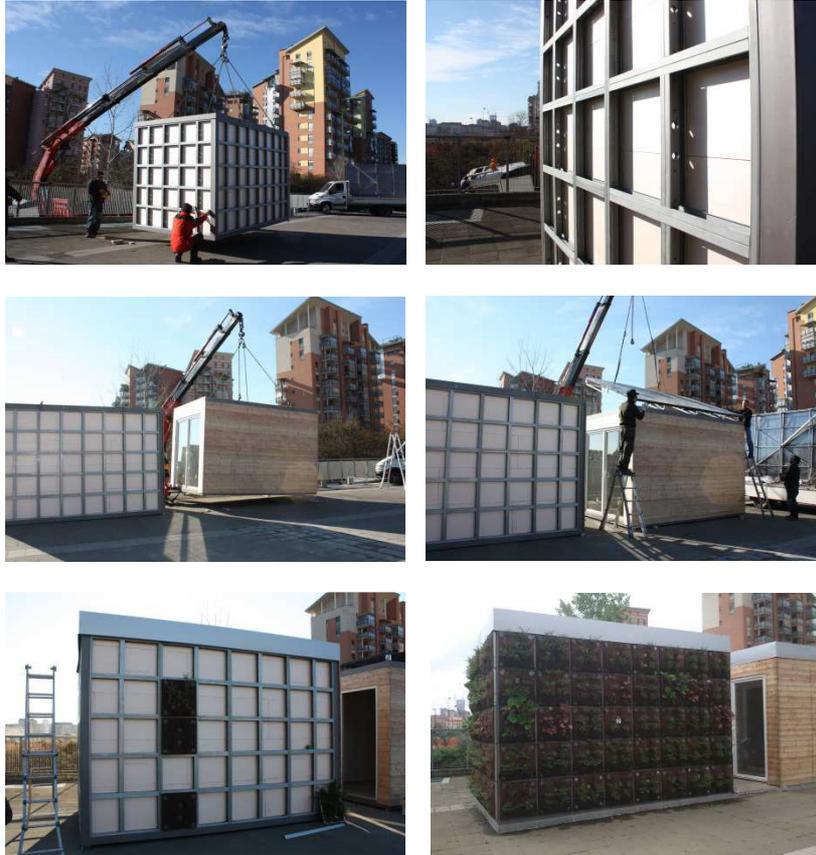


Figura 14 - Foto montaggio dei modelli insediativi presso Environment Park.

4.3 GLI OUTPUT DEL PROGETTO GRE_EN_S

Le sperimentazioni svolte su materiali, substrati e specie, relativamente alle prestazioni tecnologiche, meccaniche e agronomiche, hanno permesso di arrivare a definire un prototipo finale ottimizzato.

Il substrato a base di fibra di cocco si è rivelato essere il più adatto alla crescita delle piante, tuttavia la sostituzione del 50% della fibra di cocco con scarti di lavorazione dei feltrini sotto sedia non ostacola un corretto sviluppo della pianta e costituisce una buona miscela qualora si voglia privilegiare gli aspetti legati al recupero di scarti di lavorazione.

Questa soluzione comporta però un'attenzione particolare alla continuità d'irrigazione: infatti, se il feltrino si disidrata completamente, in seguito a picchi di calore o interruzioni del sistema d'irrigazione, riprende con molta difficoltà a svolgere la sua funzione di ritenzione idrica, mettendo in crisi la sopravvivenza della pianta.

Il substrato a base di feltrini in totale sostituzione della fibra di cocco, invece, non permette una normale curva di crescita del vegetale.

Tutte le essenze vegetali hanno reagito bene alla condizione verticale, salvo la *luzula sylvatica*, per la quale si è registrata una moria del 90% delle piante, evidenziando dunque la non idoneità di questa specie alla realizzazione di un living wall.

La *bergenia*, pur essendo una specie che complessivamente è adatta al verde verticale, necessita di qualche attenzione supplementare a causa delle sue dimensioni: crescendo esercita una forza meccanica sui feltri di contenimento causandone in alcuni casi la deformazione o addirittura fuoriuscendo parzialmente dalle tasche in cui è ospitata e ricadendo in avanti. Inoltre, può porre qualche criticità legata al disseccamento periodico delle foglie più vecchie e quindi a un eventuale impatto sulla qualità estetica del living wall, con conseguente maggiore necessità di manutenzione.

Anche l'*heuchera* presenta il disseccamento delle foglie alla base della pianta dovuto al continuo ricambio fogliare; inoltre è sensibile all'attacco dell'*oziorrinco*, un insetto parassita delle piante, che può provocarne la moria; per tale motivo è opportuno un protocollo di difesa e monitoraggio assiduo.

Relativamente ai tessuti utilizzati, si può affermare che il prototipo PT03 rappresenta la soluzione migliore: il tessuto calandrato, che inizialmente non sembrava adatto poiché era stato valutato non essere abbastanza traspirante, ha invece solo reso più lenta la fase iniziale dello sviluppo della pianta, ma presenta caratteristiche di resistenza meccanica alla deformazione nettamente più performanti.

CARATTERIZZAZIONE TERMICA

CAPITOLO 5

5.1 STRUMENTI E METODOLOGIA

Il lavoro di ricerca sperimentale è stato condotto valutando la performance termica di un involucro tipo rivestito con la tecnologia sviluppata nell'ambito del progetto GRE_EN_S.

I dati sono stati rilevati in modo da poter scindere il contributo del living wall da quello della restante stratigrafia di involucro, andando ad analizzare i fenomeni di scambio termico influenzati dalla presenza del rivestimento. Al fine di avere un quadro esaustivo e corretto, è stato sempre considerato un involucro di benchmark con cui raffrontare i dati rilevati simultaneamente e con le stesse condizioni al contorno.

Sono stati eseguiti due tipi di monitoraggio. Una prima campagna sperimentale è stata effettuata su un dimostratore installato presso il Politecnico di Torino e ha permesso di monitorare i diversi prototipi e le differenti specie vegetali, mettendo a punto il sistema di misura.

I dati emersi nella prima campagna sono stati approfonditi con il secondo monitoraggio, effettuato sul modello insediativo in scala reale, realizzato presso il centro di ricerca Environment Park.

Le grandezze ritenute necessarie per un'analisi di tipo prestazionale e quindi monitorate sono:

- temperature superficiali delle pareti interne ed esterne,
- temperature ambientali interne ed esterne,
- flussi termici attraverso i diversi prototipi e l'involucro benchmark,
- radiazione solare incidente sul piano verticale della facciata.

L'apparato di misura è costituito da sensori collegati a un data-logger che rilevano il dato con un intervallo temporale di 15

minuti. I sensori per la misurazione delle temperature sono termocoppie di tipo TT (rame-costantana), calibrate in laboratorio, conformemente alle indicazioni del Servizio Taratura in Italia (SIT). I sensori sono stati inseriti in un bagno termostatico che è stato portato a tre diverse temperature (0 °C, 30 °C e 60 °C). La temperatura del bagno termostatico è stata verificata da un termometro a resistenza al platino, anch'esso certificato. Stabilizzate le termocoppie nel bagno termostatico, si è definita una curva di calibrazione per ogni sensore, riportando in ascissa l'intervallo temporale di lettura e in ordinata i valori di temperatura rilevati.

L'accuratezza di misura di ogni termocoppia è stata stabilita secondo gli standard e i protocolli definiti dal Servizio di Taratura in Italia (SIT), considerando l'incertezza della termoresistenza di riferimento e del bagno termostatico utilizzato durante la taratura. Da questa procedura deriva che *la più alta incertezza, con il limite di confidenza del 95%, è di ±0,3 °C*. Nell'analisi dei dati rilevati tale valore è stato considerato in via cautelativa per tutte le termocoppie. I flussi termici sono stati misurati mediante i sensori Hukseflux™ HFP01, che presentano una resistenza termica del sensore inferiore a $6.25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$. *L'accuratezza dichiarata del produttore è ±5 % con un intervallo di confidenza del 95 %, mentre la sensibilità nominale è di circa 50 μV/W/m².*

La caratterizzazione energetica dei prototipi ha valutato l'influenza del verde sull'incremento d'isolamento termico, calcolando la resistenza termica del living wall e la conduttanza termica C dell'intera parete. Le elaborazioni sono state effettuate a partire dai dati sperimentali; pertanto, il valore ottenuto si riferisce alle condizioni in opera e non a una misura di laboratorio. L'analisi della prestazione energetica dei primi prototipi del living wall è stata condotta tramite l'elaborazione dei dati relativi alle temperature e ai flussi termici e solari misurati, con valutazione della trasmittanza dei diversi prototipi tramite il metodo di analisi delle medie progressive (EN 12494), utilizzando la seguente formula:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{q}_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

Eq. 3

Dove:

- \dot{q} è il flusso termico [W/m^2],
- T_{si} è la temperatura superficiale interna [K],
- T_{se} è la temperatura superficiale esterna [K].

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

La sommatoria dei valori è ottenuta misurando i parametri a intervalli regolari di tempo, escludendo i dati diurni al fine di eliminare l'influenza della radiazione solare.

È stato inoltre analizzato il controllo delle temperature superficiali esterne dovute alla presenza del verde parietale, al fine di poter ricavare informazioni relativamente al comfort termoigrometrico a livello di ambiente esterno.

5.2 MONITORAGGIO DEL DIMOSTRATORE PRESSO IL POLITECNICO DI TORINO

Il monitoraggio della prestazione energetica sul dimostratore installato presso il Politecnico di Torino ha previsto la realizzazione di un supporto sperimentale che fornisca un ambiente tipo da monitorare. La cella è costituita da un involucro isolato standard poco massivo con un volume di 2,0 x 1,8 x 1,8 m (misure esterne).

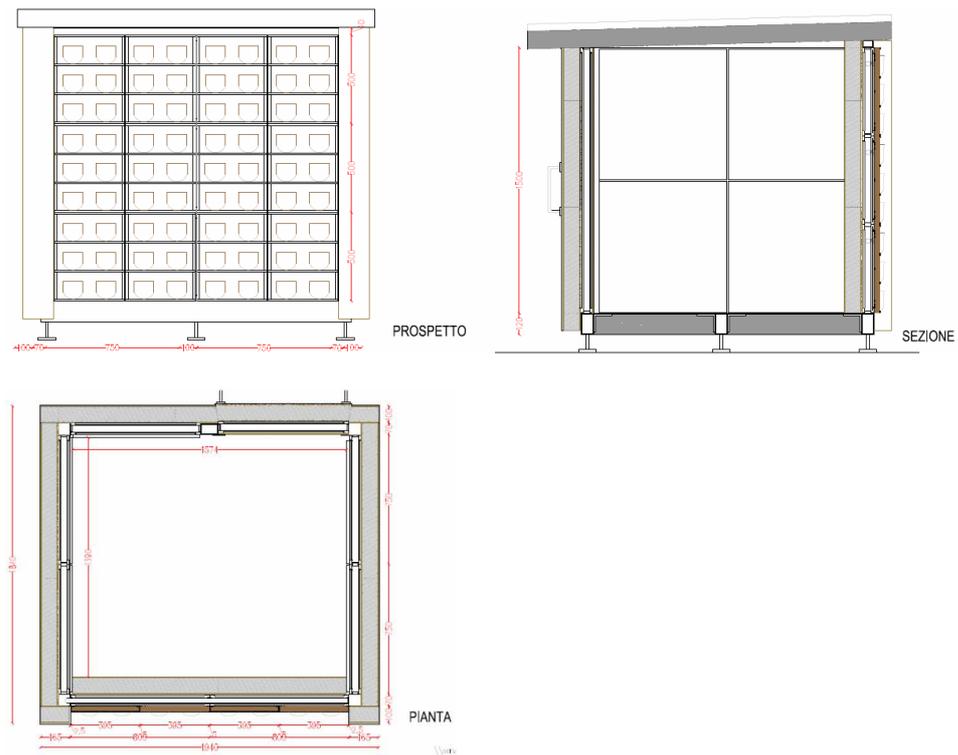


Figura 15 - Prospetto, sezione e pianta del dimostratore.

L'involucro verticale di riferimento ha una trasmittanza termica pari a circa $0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. La cella di prova presenta una facciata orientata a sud di $2,0 \times 1,8 \text{ m}$, nella quale sono inseriti i prototipi dei moduli verdi (tre colonne di diversi prototipi larghe 50 cm e alte 150 cm , costituite da 3 moduli ciascuna) e il benchmark (delle medesime dimensioni).

I prototipi sono stati montati su un supporto di alluminio e si differenziano per il diverso substrato contenuto nei pannelli modulari. L'ambiente interno è stato controllato collegando la cella di prova tramite due condotti, uno di mandata e l'altro di ripresa, a un sistema sperimentale costituito da un impianto VAV (Variable Air Volume), alimentato da un gruppo frigo e da una batteria di post-riscaldamento.

L'irrigazione avviene mediante un sistema "a goccia" a controllo automatico, alimentato da un serbatoio da $0,3 \text{ m}^3$ posizionato all'interno della cella.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA



Figura 16 - Il sistema d'irrigazione.

Durante le campagne di misura del dimostratore sono stati posizionati i sensori indicati in Tabella 1.

MISURANDO	SENSORE	OUTPUT SENSORE	UNITÀ DI MISUR A	N° DI SENSORI
Temperatura dell'aria esterna	Termocoppia	T_AIR_EXT	°C	1
Temperatura dell'aria interna	Termocoppia	T_AIR_INT	°C	1
Temperatura superficiale interna del modulo verde	Termocoppia	T_B_INT	°C	1
Temperatura superficiale interna del benchmark	Termocoppia	T_WALL_INT	°C	1
Temperature superficiali esterne dei moduli verdi	Termocoppia	T_A_EXT T_B_EXT T_C_EXT	°C	3
Temperatura superficiale esterna del benchmark	Termocoppia	T_WALL_EXT	°C	1
Temperature dell'intercapedine tra i moduli verdi e la parete retrostante	Termocoppia	T_A_MID T_B_MID T_C_MID	°C	3
Flusso termico che attraversa la parete rivestita con i moduli verdi (posto all'interno della cella)	Termoflussimetro	HF_A_INT HF_B_INT HF_C_INT	W/m ²	3
Flusso termico che attraversa la parete benchmark	Termoflussimetro	HF_WALL	W/m ²	1
Flusso termico che attraversa i moduli verdi (posto nell'intercapedine)	Termoflussimetro	HF_B_MID	W/m ²	1
Irradianza solare sul piano verticale della facciata	Piranometro	SOL_OUT_V	W/m ²	1

Tabella 1- Elenco dei sensori utilizzati per il monitoraggio del dimostratore presso il Politecnico di Torino.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

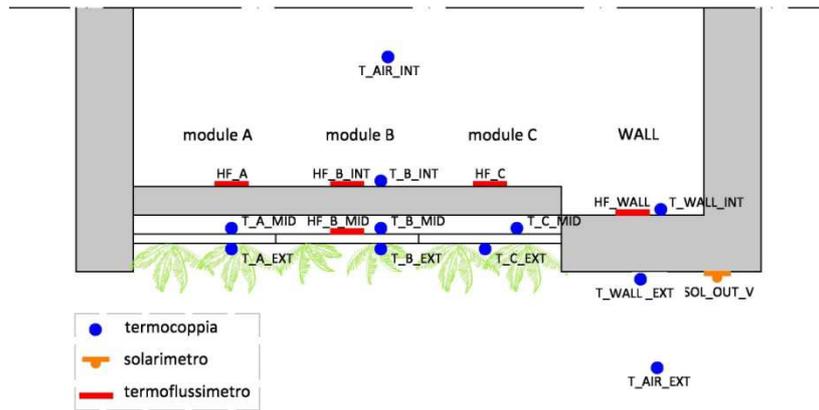


Figura 17 - Posizionamento dei sensori in pianta.

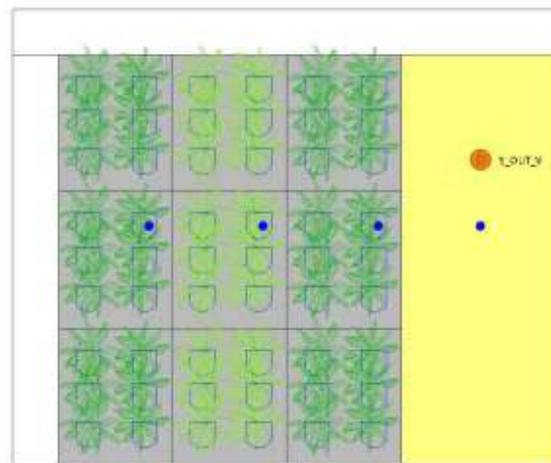


Figura 18 - Posizionamento dei sensori in prospettiva.

5.2.1 Periodo I

Il primo periodo di monitoraggio è stato effettuato con i moduli di bergenia cordifolia, in condizioni invernali e primaverili. L'attività è durata circa un mese, dal 15/03/2012 al 19/04/2012. I moduli monitorati presentano substrati differenti al fine di valutare se esistono differenze apprezzabili nel comportamento termico dovute alla composizione del substrato. Le miscele utilizzate sono così composte:

- 100% terra (SS);
- 50% terra - 50% feltrini (SF_50);
- 50% terra e 50% bobine in feltro (SF50).

Da precedenti esperienze di monitoraggio realizzate dal gruppo di ricerca TEBE del Politecnico di Torino, è emersa la necessità di poter controllare l'ambiente interno con una strategia di controllo che permetta di evitare l'effetto collettore solare dovuto alle dimensioni della cella sperimentale, pertanto è stato adottato un sistema di climatizzazione convettivo. In una prima fase sono state evidenziate alcune problematiche dovute al surriscaldamento del condotto che trasporta l'aria all'interno della cella, essendo lo stesso esposto alla radiazione solare diretta. Il mancato controllo della temperatura interna ha avuto come conseguenza il verificarsi di alcune anomalie nei dati misurati. A fronte di questa problematica è stato necessario filtrare i dati significativi, escludendo dall'analisi quelli che risultavano anomali.

In seguito si è adottata come strategia la schermatura del condotto, in modo tale che non fosse esposto alla radiazione solare diretta.

Prima di affrontare l'analisi quantitativa della performance del living wall relativa ai due periodi di monitoraggio presentati, è bene precisare che il sistema creato con la cella di prova e l'unità di trattamento aria non riproduce le effettive dinamiche di un sistema edificio; tuttavia le analisi effettuate e i risultati ottenuti sono stati ritenuti significativi per il loro valore comparativo tra i moduli Greens e la parete di benchmark.



Figura 19 - Il dimostratore durante il monitoraggio.
Presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino.

Al fine di sintetizzare i dati raccolti e agevolare l'analisi di funzionamento della facciata l'attenzione è stata focalizzata su alcune giornate tipo, che sono di seguito presentate.

GIORNATA SOLEGGIATA (19/03/2012)

La temperatura esterna si è mantenuta più o meno costante sui 9 °C – 10 °C durante la notte, alzandosi durante il giorno fino a raggiungere i 17 °C alle ore 15:00. L'escursione termica tra giorno e notte è quindi rilevante (differenza di temperatura di 8 °C). La giornata analizzata è soleggiata, con alti valori d'irradianza sul piano orizzontale (valore massimo registrato 815 W/m²).

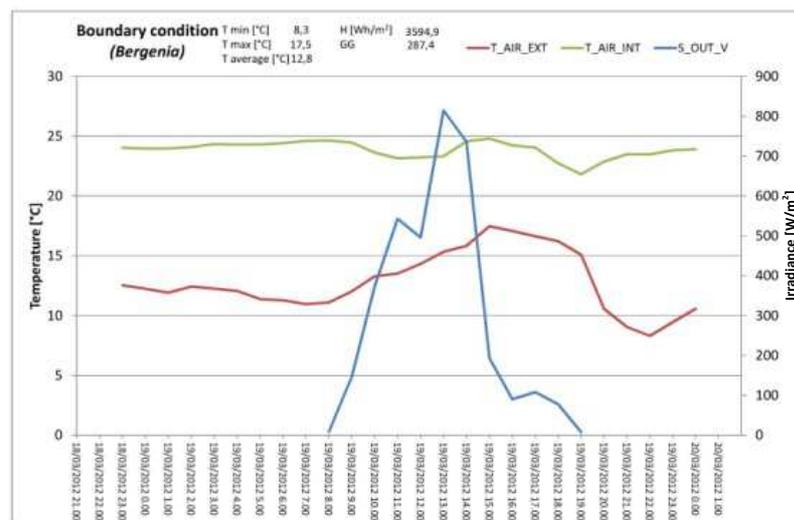


Figura 20 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

La temperatura dell'aria interna, climatizzata dall'unità di trattamento aria, si mantiene per lo più costante tra i 21 °C e i 24 °C per l'intera giornata.

Durante la notte le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili, tranne che durante le prime ore del mattino, quando i moduli verdi hanno una temperatura superficiale maggiore di quella della parete di confronto. La temperatura rilevata sui moduli verdi, invece, cresce molto meno rapidamente, mantenendosi sempre inferiore rispetto a quella della parete di benchmark. La differenza di temperatura maggiore si riscontra alle ore 14:00 (9 °C).

Comparando i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti, non si notano differenze sostanziali.

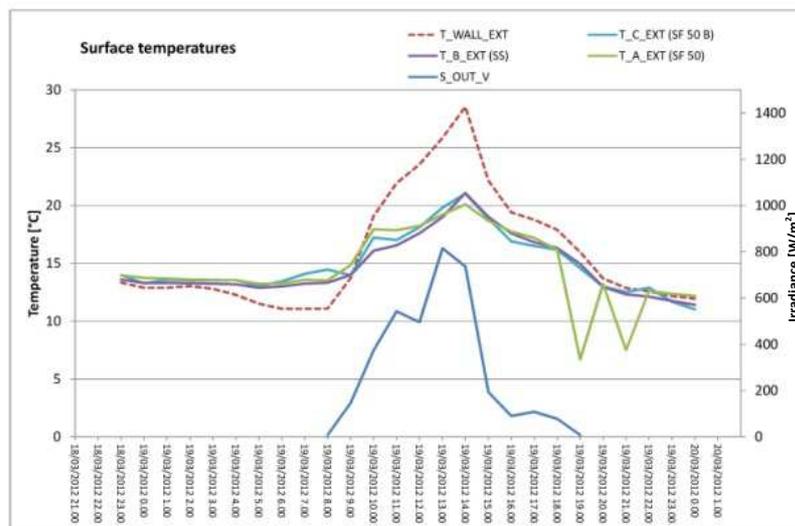


Figura 21 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

I flussi di calore sono, quasi sempre, uscenti dall'interno verso l'esterno, ovvero si verifica dispersione durante l'intera giornata. La dispersione attraverso la parete di benchmark è sempre maggiore rispetto a quella attraverso i moduli verdi (differenza di flusso termico di circa 6 W/m²), tranne che nelle ore di massima irradianza solare, quando i due valori registrati tendono a coincidere. Non sono riscontrabili differenze sostanziali dovute al substrato diversificato dei moduli verdi.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

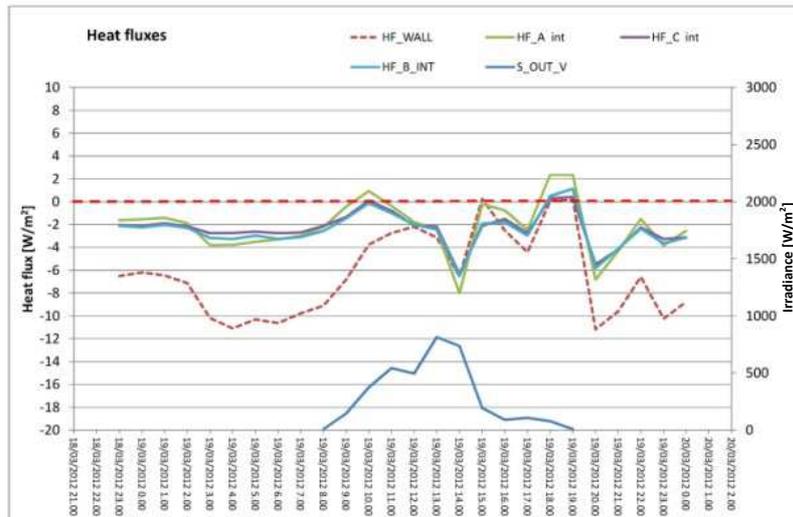


Figura 22 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

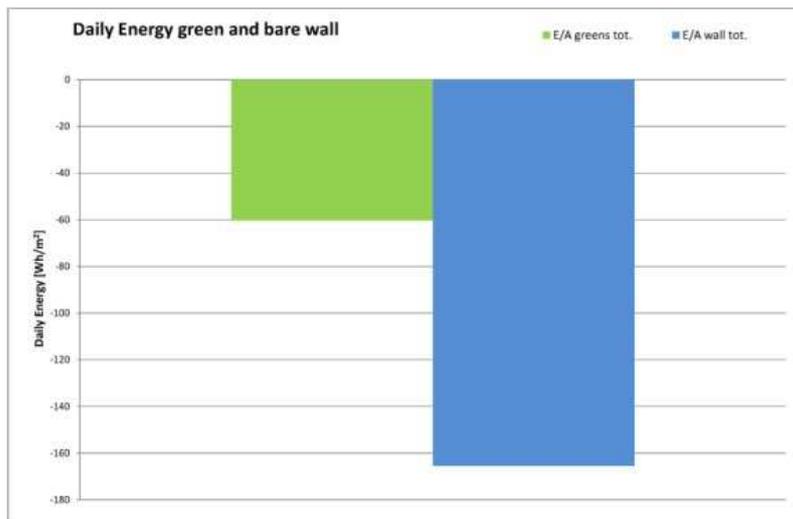


Figura 23 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (E/A greens tot) e per la parete rivestita con intonaco (E/A wall tot).

GIORNATA A NUVOLOSITÀ VARIABILE (18/03/2012)

La temperatura esterna si è mantenuta costante sui 14 °C durante la notte, alzandosi lievemente fino a 15 °C (ore 1:00) durante il giorno, per poi ridiscendere a 12 °C nelle ore serali.

Vi è quindi stata una bassissima escursione termica tra giorno e notte (differenza di temperatura di 3 °C) e una media irradianza sul piano orizzontale (valore massimo registrato 370 W/m²).

La temperatura dell'aria interna, climatizzata dall'unità di trattamento aria, si mantiene per lo più costante sui 24 °C per l'intera giornata.

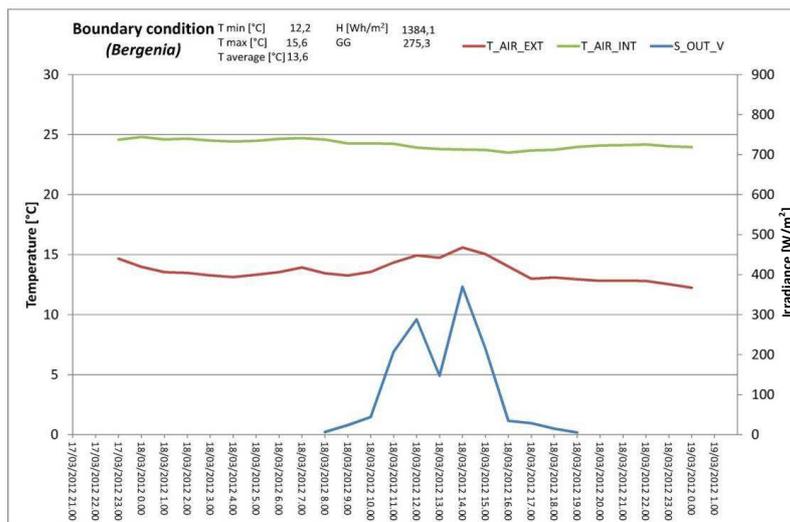


Figura 24 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

Durante la notte le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili. I valori si discostano al crescere della radiazione solare e quindi della temperatura dell'aria esterna, dalle ore 10:00 alle 16:00, con una differenza di temperatura di circa 4 °C.

Non si rilevano differenze significative tra i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

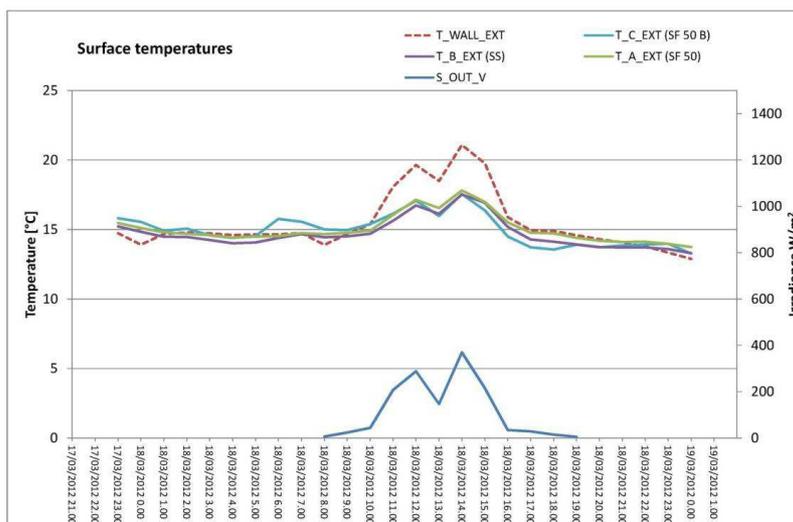


Figura 25 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

I flussi di calore sono sempre uscenti dall'interno verso l'esterno, ovvero si verifica dispersione durante l'intera giornata.

Il calore scambiato dalla parete di benchmark è maggiormente influenzato dal variare dell'irradianza solare, mentre per i moduli verdi, al variare dell'irradianza solare, si registrano solo piccole oscillazioni della dispersione termica. Il flusso di calore che attraversa la parete di benchmark è sempre in quantità maggiore rispetto a quello che attraversa la parete con i moduli verdi: la differenza è sempre di circa 6 W/m^2 tranne che nelle ore centrali della giornata (dalle 12:00 alle 16:00), quando i flussi tendono ad avere valori simili (con uno scarto variabile tra 2 e 1 W/m^2). Anche per il flusso di calore, non sono riscontrabili differenze sostanziali dovute al substrato diversificato dei moduli verdi.

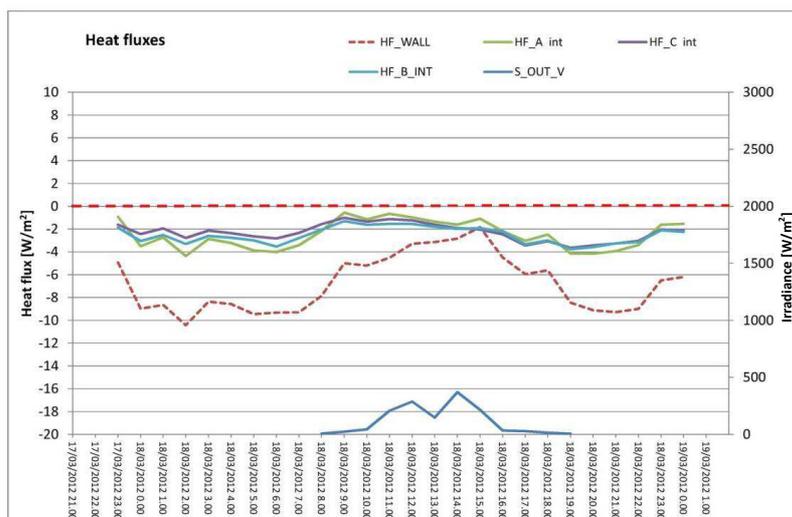


Figura 26 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

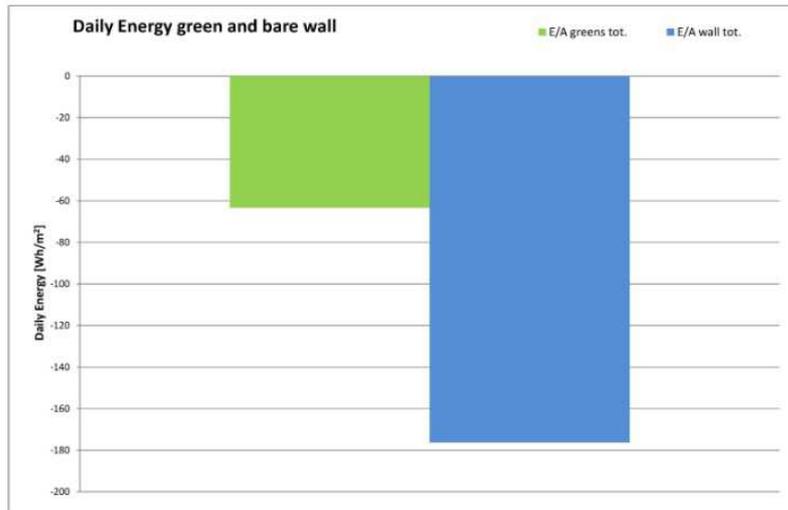


Figura 27 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (E/A greens tot) e per la parete rivestita con intonaco (E/A wall tot).

GIORNATA NUVOLOSA (16/04/2012)

La temperatura esterna si è mantenuta più o meno costante sugli 11 °C durante la notte, alzandosi durante il giorno fino a raggiungere i 16 °C dalle ore 15:00 alle 20:00. L'escursione termica tra giorno e notte è quindi limitata (differenza di temperatura di 5 °C) e si registra una bassa irradianza sul piano orizzontale (valore massimo registrato 155 W/m²), tipico di una giornata nuvolosa. La temperatura dell'aria interna, climatizzata dall'unità di trattamento aria, si mantiene per lo più costante tra i 22 °C e i 24 °C per l'intera giornata.

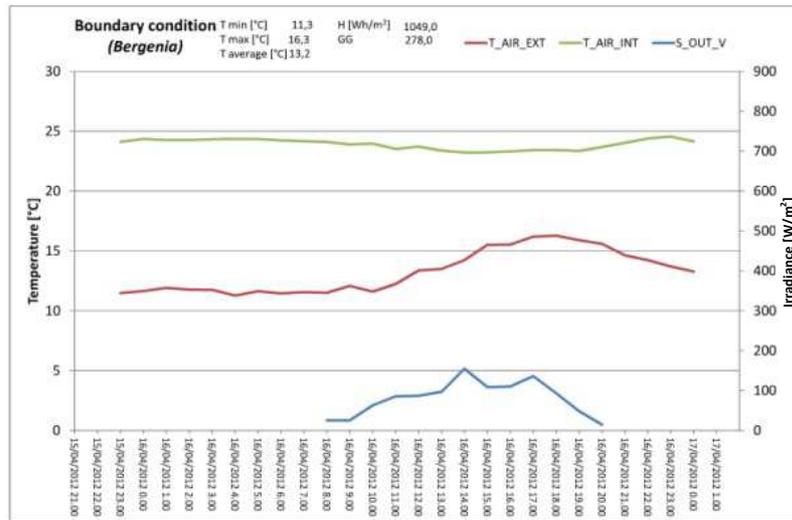


Figura 28 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

Durante la notte le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili. I valori si discostano lievemente durante la giornata, in corrispondenza dell'aumento della temperatura e dell'irradianza solare. La differenza di temperatura di circa 1 - 2 °C. Comparando i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti, si nota che la temperatura superficiale esterna del pannello con substrato SF50 è sempre superiore a quella degli altri due substrati. La differenza di temperatura oscilla attorno a 1 °C.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

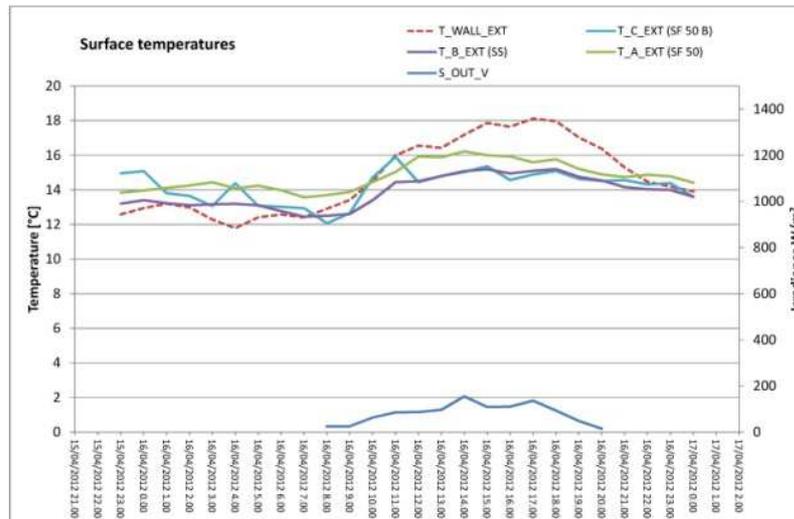


Figura 29 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

I flussi di calore sono sempre uscenti dall'interno verso l'esterno, ovvero si verifica dispersione durante l'intera giornata.

La dispersione attraverso la parete di benchmark è sempre maggiore rispetto a quella attraverso i moduli verdi. Questi ultimi risultano avere una maggiore inerzia termica, infatti il maggiore o minore flusso termico scambiato con l'esterno risulta leggermente sfasato rispetto all'andamento della curva dell'irradianza solare.

La differenza tra il flusso termico che attraversa la parete di benchmark e quello che attraversa i moduli verdi è tra 4 e 7 W/m^2 .

Non sono riscontrabili differenze sostanziali dovute al substrato diversificato dei moduli verdi.

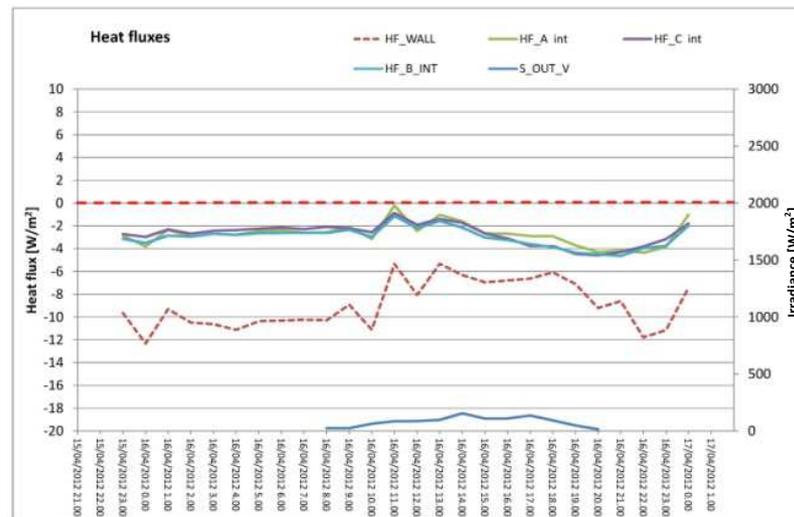


Figura 30 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

CAPITOLO 5 CARATTERIZZAZIONE TERMICA

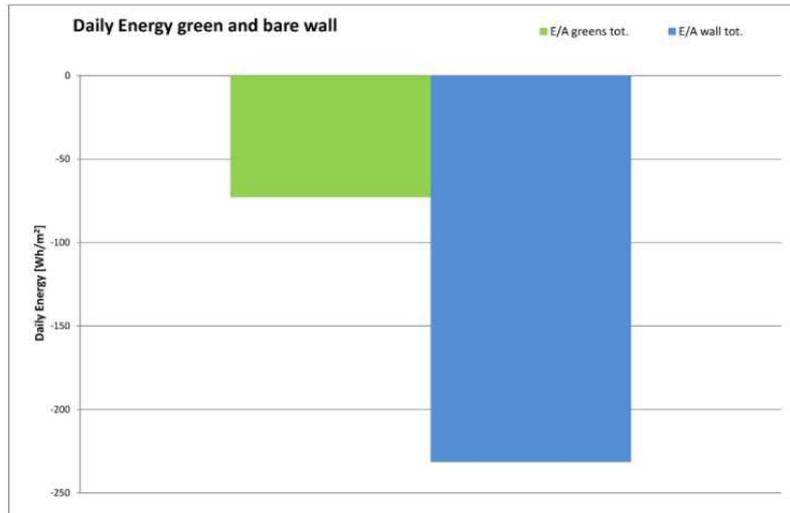


Figura 31 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (E/A greens tot) e per la parete rivestita con intonaco (E/A wall tot).

Per il calcolo delle trasmittanze termiche si sono utilizzate le medie progressive, eliminando l'influenza della radiazione solare sui dati monitorati e l'inerzia termica della cella.

La trasmittanza termica della parete verde risulta essere 0,25 W/m²K mentre quella della parete intonacata di 0,81 W/m²K.

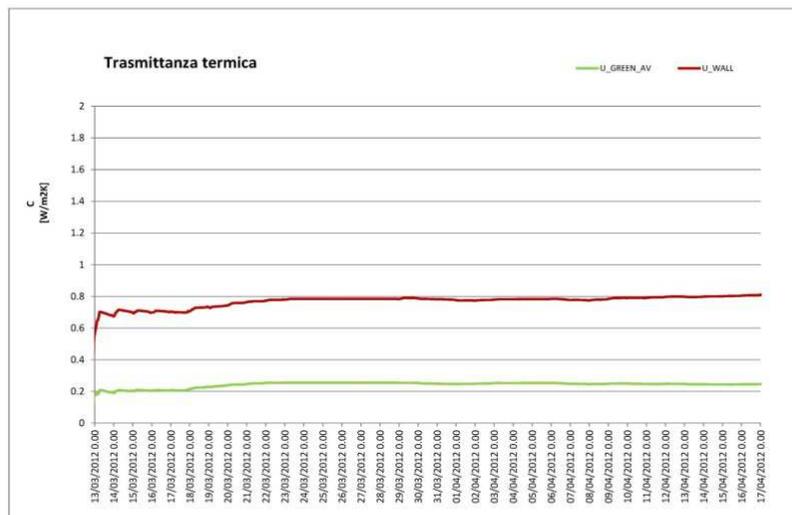


Figura 32 - Trasmittanza termica calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (U_GREEN_AV) e per la parete rivestita con intonaco (U_WALL).

5.2.2 Periodo II

Il secondo periodo di monitoraggio ha visto protagonista la specie *Heuchera villosa*; le miscele di substrato selezionate per questo secondo periodo sono state:

- 100% terra (SS);
- 50% terra - 50% viscosa (SF_50);
- 100% viscosa (SS_V).

Il monitoraggio è stato effettuato in periodo primaverile ed estivo, dal 22/04/2012 al 02/07/2012.

Si presentano di seguito alcune giornate tipo di questa seconda campagna di monitoraggio.

GIORNATA SOLEGGIATA (16/06/2012)

La temperatura esterna oscilla tra i 20 °C e i 32 °C (ore 18:00), in una giornata mediamente calda. Le temperature maggiori sono raggiunte nella seconda parte del pomeriggio. L'escursione termica è piuttosto rilevante (differenza di temperatura di 12 °C). Il valore massimo d'irradianza sul piano orizzontale è di 525 W/m², alle ore 14:00. La temperatura dell'aria interna oscilla tra i 24 °C e i 30 °C, con uno sfasamento rispetto alla curva d'irradianza di circa due ore e si mantiene più bassa della temperatura dell'aria esterna durante il giorno.

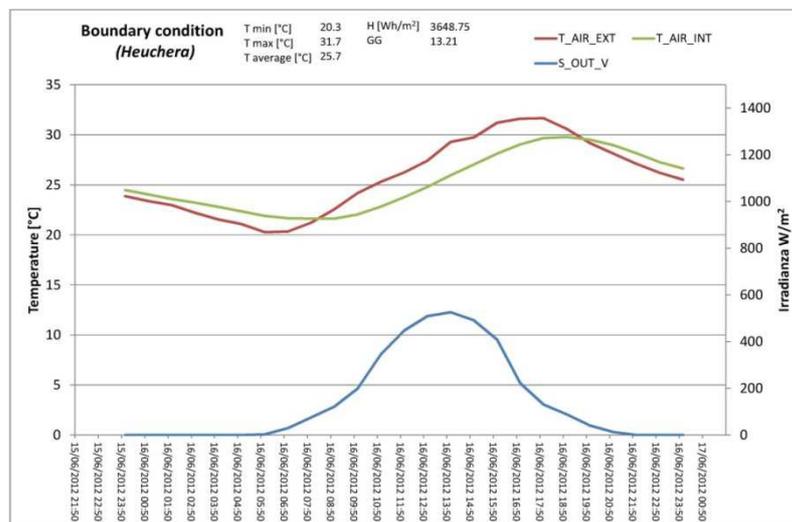


Figura 33 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

Durante la notte le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili. Al crescere dell'irradianza solare la parete di benchmark aumenta la propria temperatura superficiale esterna rapidamente, fino a toccare i 37 °C. La temperatura rilevata sui

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

moduli verdi, invece, cresce molto meno rapidamente, mantenendosi sempre inferiore rispetto a quella della parete di benchmark e non oltrepassando mai i 33 °C. La differenza di temperatura maggiore si riscontra alle ore 12:00 (differenza di temperatura di 9 °C). Comparando i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti, si nota che le prestazioni migliori (contenimento della temperatura superficiale) sono date dal modulo A (SF 50%); quelle “peggiori” dal modulo B (SS).

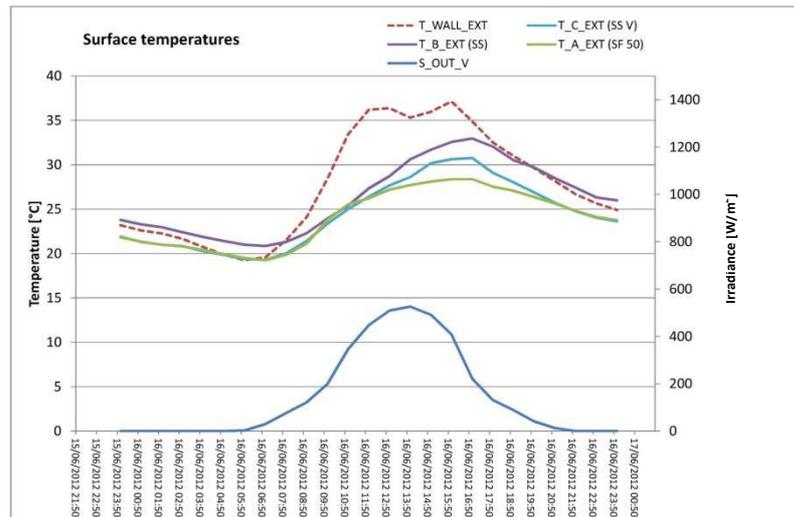


Figura 34 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

L'andamento dei flussi di calore si differenzia tra parete di benchmark e parete GREENS. Il benchmark disperde calore (flussi negativi) in assenza di radiazione solare, mentre in presenza di radiazione solare il flusso è positivo (acquisisce calore dall'esterno) a partire dalle ore 10:00. I moduli GREENS invece aumentano la cessione del calore verso l'esterno in corrispondenza dell'aumentare della radiazione solare. L'andamento risale, tendendo a zero, dalle ore 16:00, ed è positivo (acquisisce calore dall'esterno) dalle ore 22:00.

In conclusione durante le ore più calde la parete GREENS cede calore all'esterno, mentre quella di benchmark acquisisce calore. Le differenze tra i pannelli di differente substrato sono dell'ordine di grandezza di 1 W/m², quindi comparabile con l'incertezza di misura.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

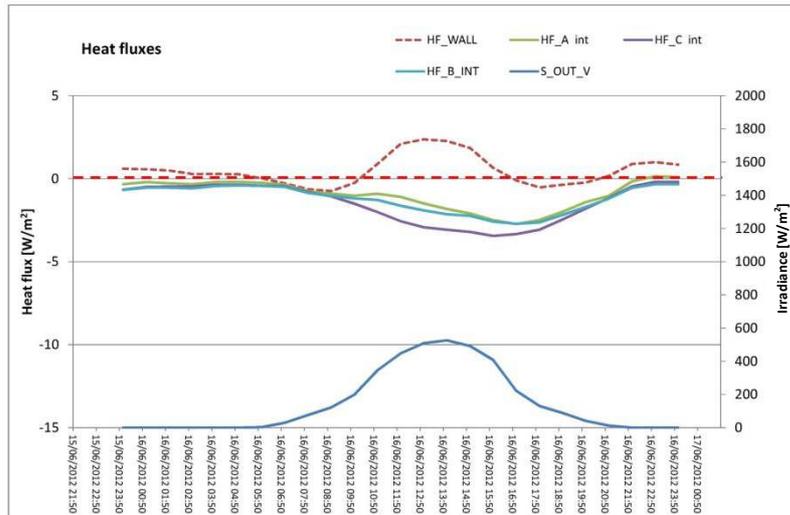


Figura 35 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

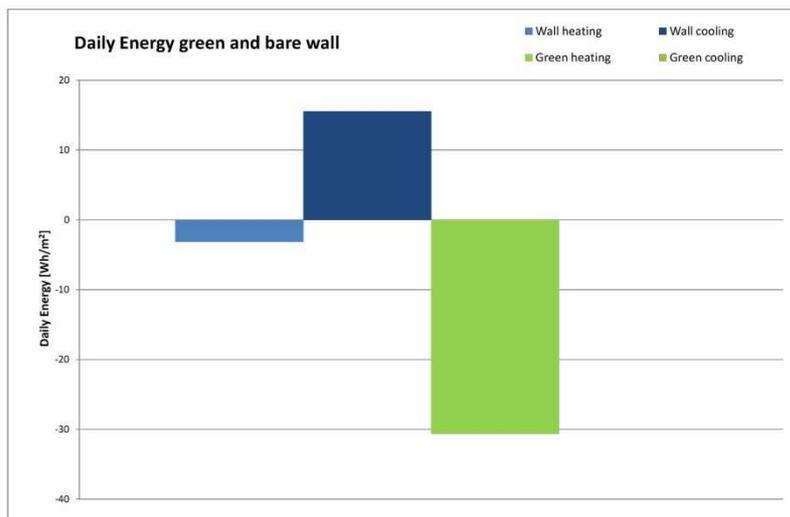


Figura 36 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (Green) e per la parete rivestita con intonaco (Wall).

GIORNATA A NUVOLOSITÀ VARIABILE (28/05/2012)

La temperatura esterna oscilla tra i 18 °C e i 29 °C (ore 18:00). Le temperature maggiori sono raggiunte nel tardo pomeriggio, con un leggero sfasamento rispetto all'irradianza massima. L'escursione termica è nella media di una giornata primaverile, con una differenza di temperatura di 11 °C. Il valore massimo d'irradianza sul piano orizzontale è di 528 W/m², alle ore 15:00. La temperatura dell'aria interna oscilla tra i 19 °C e i 30 °C, seguendo l'andamento della curva della temperatura esterna.

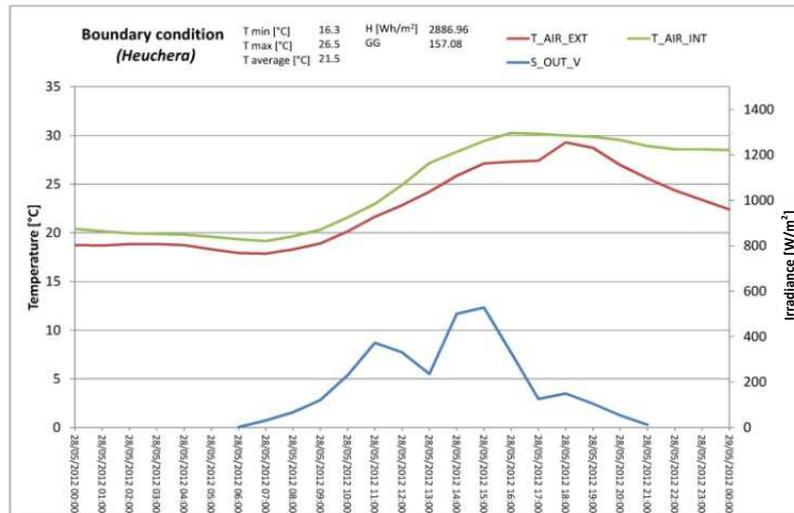


Figura 37 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

Durante la notte le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili. I valori si discostano durante la giornata, in corrispondenza dell'aumento della temperatura e dell'irradianza solare. La differenza di temperatura è di circa 10 °C.

Comparando i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti, si nota che la temperatura superficiale esterna del pannello con substrato SF50 è sempre inferiore a quella degli altri due substrati, mentre quella del pannello con substrato SSV è sempre superiore. La differenza di temperatura oscilla attorno a 1 - 1.5 °C.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

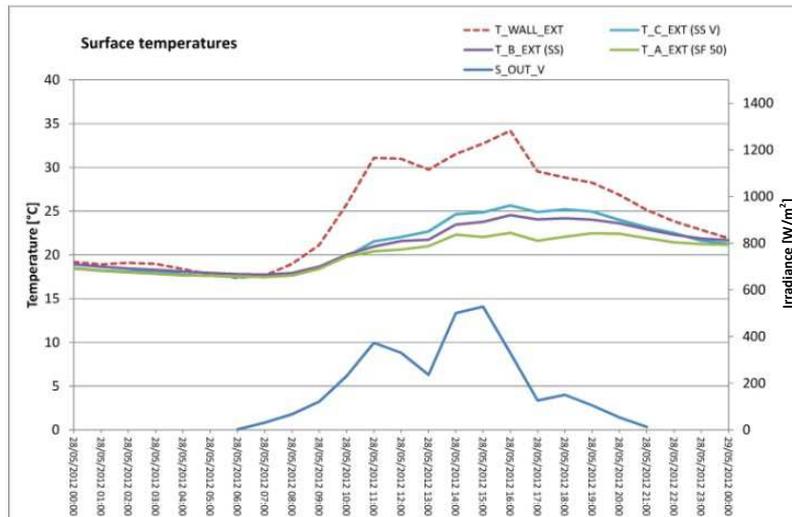


Figura 38 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

I flussi di calore si attestano attorno allo zero durante la notte, mentre sono sempre uscenti dall'interno verso l'esterno (dispersione) durante il giorno, fin dal sorgere del sole. La dispersione attraverso la parete di benchmark è lievemente maggiore rispetto a quella attraverso i moduli verdi. La quantità di flusso si differenzia in modo significativo solo dalle ore 21:00. Non sono riscontrabili differenze sostanziali dovute al substrato diversificato dei moduli verdi.

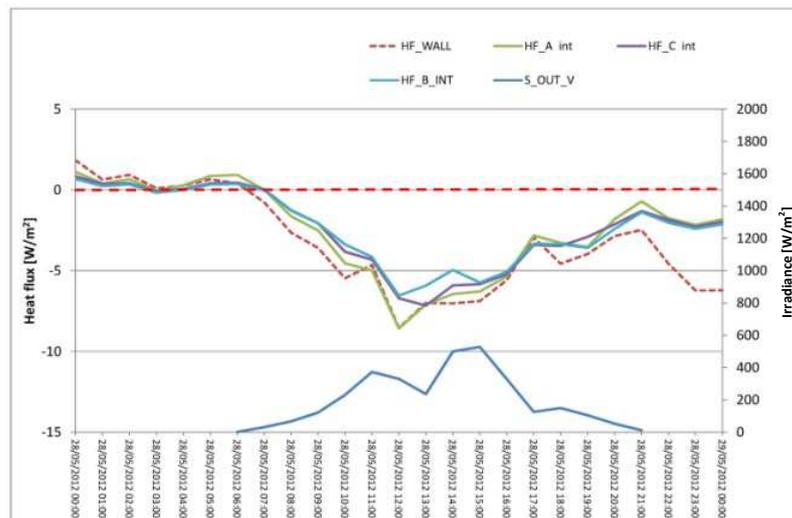


Figura 39 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

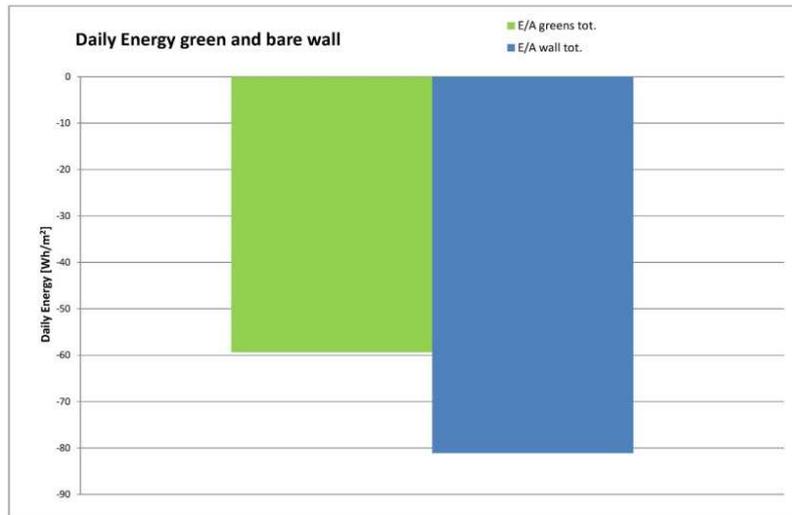


Figura 40 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (E/A greens tot) e per la parete rivestita con intonaco (E/A wall tot).

GIORNATA NUVOLOSA (08/05/2012)

La temperatura esterna oscilla tra i 16 °C e i 20 °C (ore 13:00). Le temperature maggiori sono raggiunte in corrispondenza della massima irradianza sul piano orizzontale: 328 W/m². L'escursione termica è limitata (differenza di temperatura di 4 °C). La temperatura dell'aria interna, climatizzata dall'unità di trattamento aria, si mantiene per lo più costante sui 25 °C.

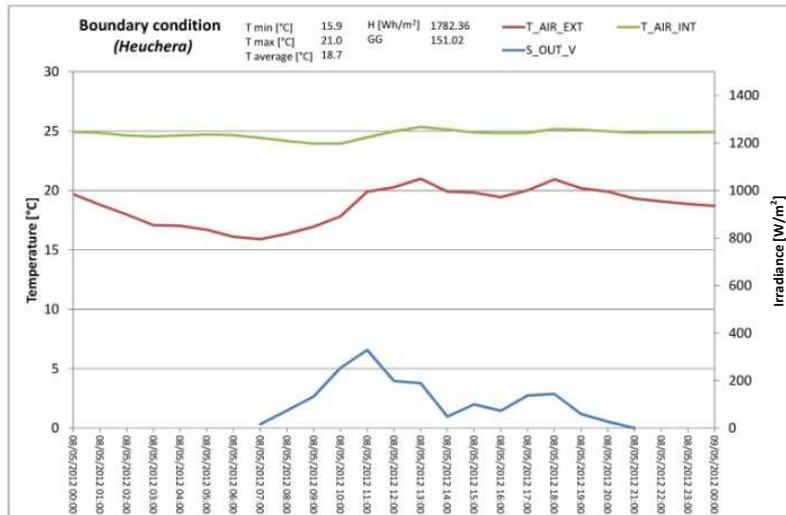


Figura 41 - Condizioni al contorno: temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

Durante l'intera giornata le temperature rilevate sulla superficie esterna dei moduli verdi e della parete di benchmark hanno valori simili. La massima differenza di temperatura è di circa 5 °C, in corrispondenza del picco di irradianza solare. Comparando i moduli verdi caratterizzati da substrati differenti, si nota che durante il giorno la temperatura superficiale esterna del pannello con substrato SF50 è inferiore a quella degli altri due substrati, mentre quella del pannello con substrato SSV è superiore. Durante la notte, benché queste tendenze siano invertite, la differenza di temperatura tra i moduli è trascurabile.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

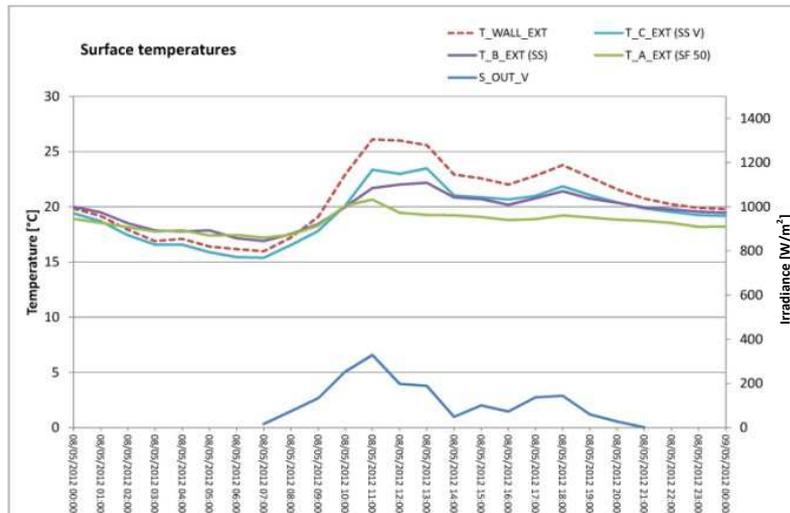


Figura 42 - Temperature superficiali esterne: muro intonacato (T_WALL_EXT), tre pannelli vegetati (T_A_EXT, T_B_EXT, T_C_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

L'andamento dei flussi di calore si differenzia tra parete di benchmark e parete GREENS.

Tutti i flussi sono sempre negativi, ovvero si verifica dispersione termica. Il benchmark disperde maggiormente in assenza di radiazione solare, mentre in presenza di radiazione solare l'andamento delle curve del benchmark e dei moduli GREENS si avvicinano, per poi riallontanarsi verso le ore 22:00. Le differenze tra i pannelli di differente substrato non sono rilevanti.

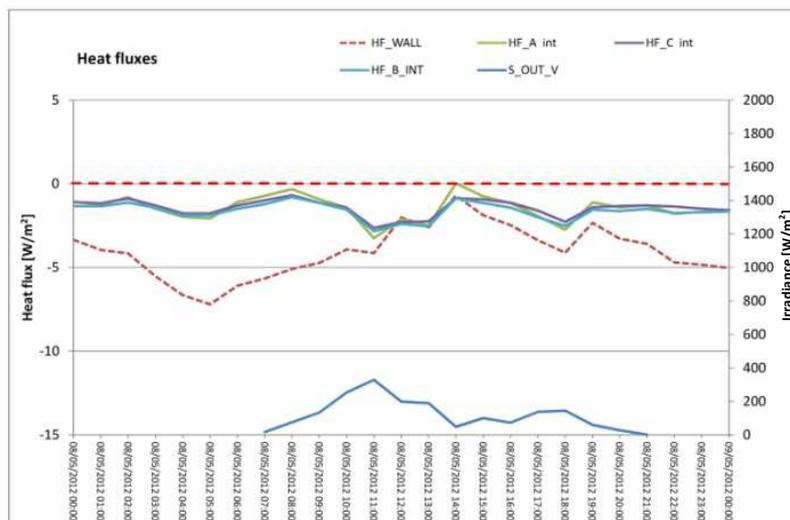


Figura 43 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato (HF_WALL), il muro in corrispondenza dei tre pannelli vegetati (HF_A_INT, HF_B_INT, HF_C_INT), irradianza sul piano verticale della facciata (S_OUT_V).

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

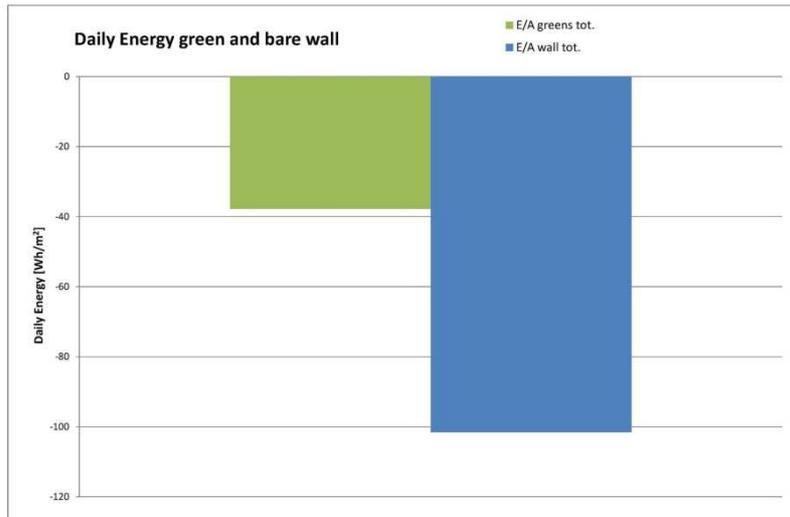


Figura 44 - Daily energy calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (E/A greens tot) e per la parete rivestita con intonaco (E/A wall tot).

Per il calcolo delle trasmittanze termiche si sono utilizzate le medie progressive (Eq. 3), eliminando l'influenza della radiazione solare sui dati monitorati e l'inerzia termica della cella. La trasmittanza termica della parete verde risulta essere 0,18 W/m²K mentre quella della parete intonacata è di 0,66 W/m²K. Va considerato che, rispetto alle misure effettuate sui prototipi di Bergenia, le presenti misure sono effettuate in una stagione più calda. La diminuzione delle trasmittanze risulta essere del 13% sia per la parete GRE_EN_S che per la parete di confronto.

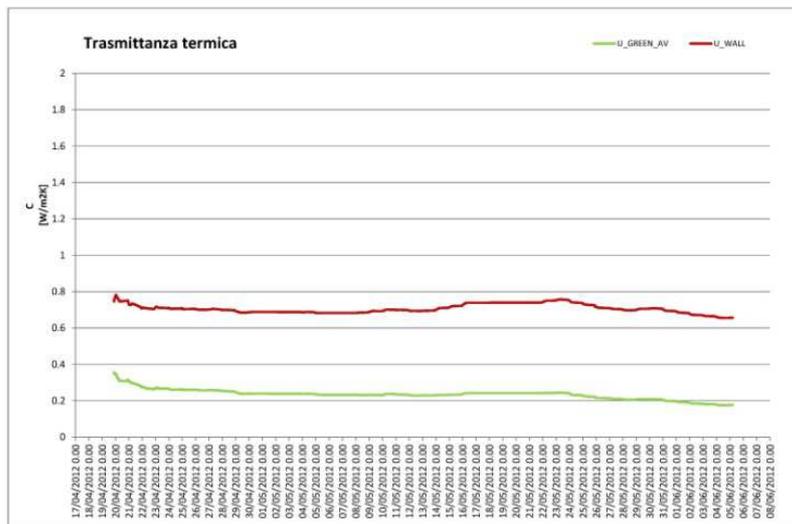


Figura 45 - Trasmittanza termica calcolata per la parete rivestita con pannelli vegetati (U_GREEN_AV) e per la parete rivestita con intonaco (U_WALL).

5.2.3 Confronto dati emersi nelle due campagne di monitoraggio

Dall'analisi dei dati misurati, le differenze che si rilevano tra i pannelli con diversa composizione della miscela del substrato, non sono significative perché spesso sono inferiori all'incertezza di misura. I substrati analizzati non sembrano incidere in maniera determinante sulla performance termica del living wall. Le differenze rilevate tra i tre substrati sono dovute al diverso posizionamento e quindi influenzate da ponti termici, ombreggiamento, eccetera.

Un'ulteriore analisi è stata condotta considerando le due diverse specie testate: *bergenia cordifolia* e *heuchera villosa*. Per valutare l'eventuale differenza di prestazione di queste due essenze sono state scelte due giornate con condizioni al contorno molto simili, in modo che i dati misurati fossero confrontabili. Si è assunto che le giornate fossero confrontabili quando i flussi della parete opaca di riferimento presentano, nell'arco delle due giornate messe a confronto, andamento e valori simili.

L'analisi dei dati non evidenzia particolari differenze tra i flussi termici che attraversano il muro rivestito di moduli con la specie *Bergenia* e rispetto a quello rivestito con l'*Heuchera*. Le energie giornaliere che attraversano i due moduli verdi sono intorno ai 50 Wh/m². Le dispersioni che attraversano la parete opaca si confermano essere superiori di circa il 70% rispetto a quelle della parete verde.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

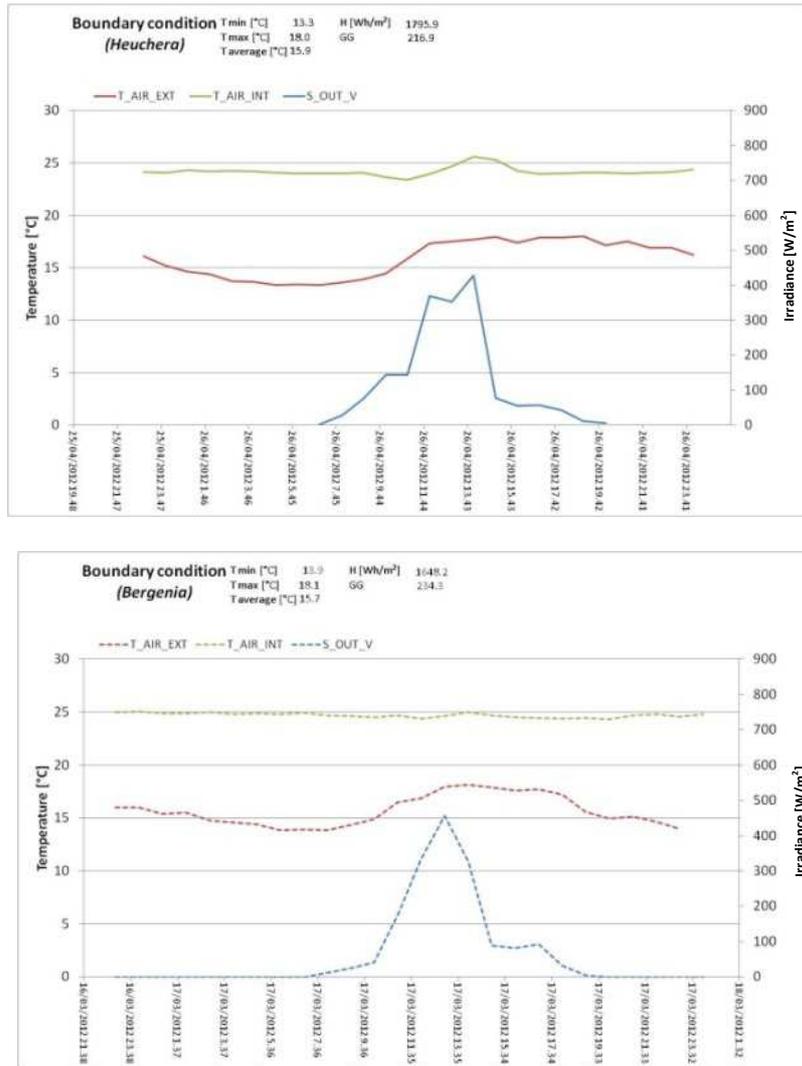


Figura 46 - Confronto tra le condizioni al contorno di una giornata tipo del dimostratore rivestito con l'Heuchera (in alto) e la Bergenia (in basso). Temperatura dell'aria esterna (T_{AIR_EXT}), temperatura dell'aria interna (T_{AIR_INT}), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL_OUT_V).

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

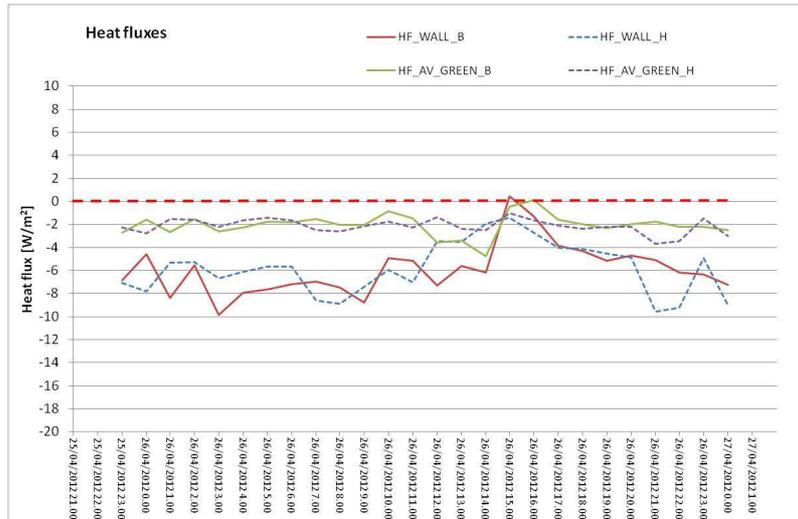


Figura 47 - Flussi termici che attraversano il muro intonacato nel primo periodo di monitoraggio (HF_WALL_H), nel secondo periodo di monitoraggio (HF_WALL_B), il muro in corrispondenza del pannello vegetato con l'Heuchera (HF_AV_GREEN_H), e in corrispondenza del pannello vegetato con la Bergenia (HF_AV_GREEN_B).

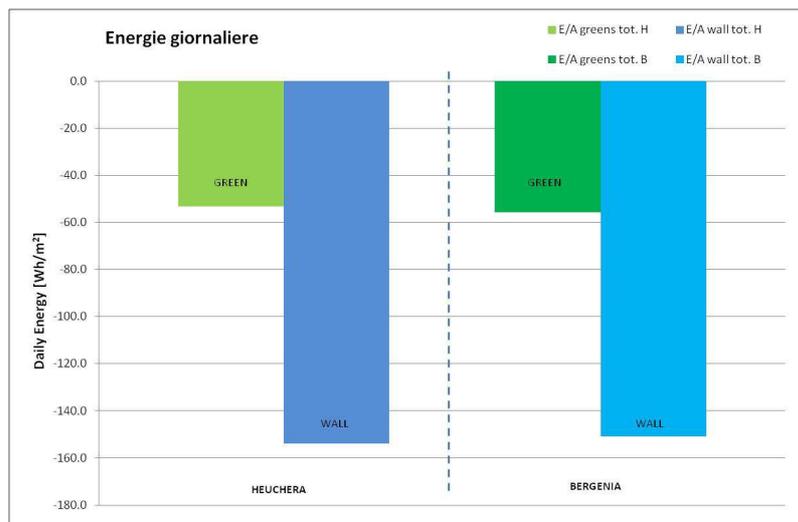


Figura 48 - Confronto tra le energie giornaliere calcolate per la parete rivestita con pannelli vegetati con l'Heuchera e per la parete rivestita con intonaco nel primo periodo di monitoraggio (istogramma a sinistra), e quelle calcolate per la parete rivestita con pannelli vegetati con la Bergenia e per la parete rivestita con intonaco nel secondo periodo di monitoraggio (istogramma a destra).

5.3 MONITORAGGIO DEL MODELLO IN SCALA REALE PRESSO ENVIRONMENT PARK (TORINO)

L'obiettivo del monitoraggio di un modello insediativo costruito in scala 1:1 è quello di studiare le effettive dinamiche relative agli andamenti dei flussi termici e delle temperature su un modello in grado di riproporre le dinamiche che si svolgerebbero in un edificio reale.

Il modello "campione" è stato realizzato presso il centro di ricerca torinese Environment Park, sede del Polo Innovazione Green building and Hydrogen Technologies (POLIGHT) che ha finanziato il progetto GRE_EN_S.

Il sito è stato scelto poiché il contesto urbano nonché la disposizione degli edifici che costituiscono il sito stesso, permettono di evitare effetti di ombreggiamento che possono interferire con le misure adducendo un'incertezza sistematica alle stesse, non facilmente quantificabile ed eliminabile.

L'installazione è avvenuta su un solaio carrabile con portata di 2000 Kg/m² adatto all'alloggiamento di una struttura temporanea prefabbricata.

Il posizionamento del modello in loco è stato deciso in seguito ad uno studio preliminare al fine di tener conto degli aspetti ambientali ad esso correlati, come l'orientamento e la direzione prevalente del vento.

Si è quindi scelto di orientare il mock up lungo l'asse est ovest in modo da avere le facciate più grandi esposte a nord e a sud. Tale scelta è motivata dalla volontà di approfondire alcuni aspetti legati alle esposizioni critiche quali lo sviluppo del fogliame e le prestazioni termiche in condizioni estive (sud) e invernali (nord). Al fine di avere sempre un benchmark di confronto, sono stati realizzati due modelli insediativi: uno rivestito con il sistema parete GRE_EN_S, mentre per l'altro è stato adottato un rivestimento tradizionale in doghe di legno di abete (spessore 18 mm).

Il modello insediativo ha dimensioni esterne di 2,5 x 4,0 x 2,9 m e racchiude un volume di 29 m³. L'accesso avviene sul lato corto mediante un serramento a taglio termico con vetrocamera a doppio battente.

La composizione dei pannelli vegetati è quella del prototipo PT03 (vedi capitolo 4).

Le essenze vegetali utilizzate sono quelle già selezionate secondo i criteri agronomici:

- *lonicera nitida*,
- *heuchera villosa*,
- *bergenia cordifolia*.

Sono state inoltre testate alcune piante quali *rosmarino* e *salvia* (piante aromatiche) al fine di studiare la realizzabilità e la performance energetica del cosiddetto "orto verticale".



Figura 49 - Il modello insediativo in scala reale rivestito con il living wall (in alto) e quello rivestito in legno (in basso) presso Environment Park.

La struttura portante è data dal sistema BYBOX™, brevettato dall'azienda CEIT, opportunamente isolato. Si tratta di un telaio in acciaio zincato, cui sono stati agganciati i pannelli vegetati 50 x 50 cm nel caso del modello insediativo campione, e le doghe in

legno nel caso del modulo insediativo benchmark. La stratigrafia che determina l'isolamento termico dei due mock up è costituita da un doppio pannello in polistirene espanso estruso (XPS), il cui spessore totale varia da 5 cm (mock up rivestito con il living wall) agli 8 cm (mock up rivestito in legno). Tale differenza è stata motivata da esigenze legate al progetto GRE_EN_S, per cui si è cercato di minimizzare l'impiego dell'isolante pur rispettando il valore limite di trasmittanza termica richiesto dalla normativa nazionale per edifici residenziali (DM 26 gennaio 2010).

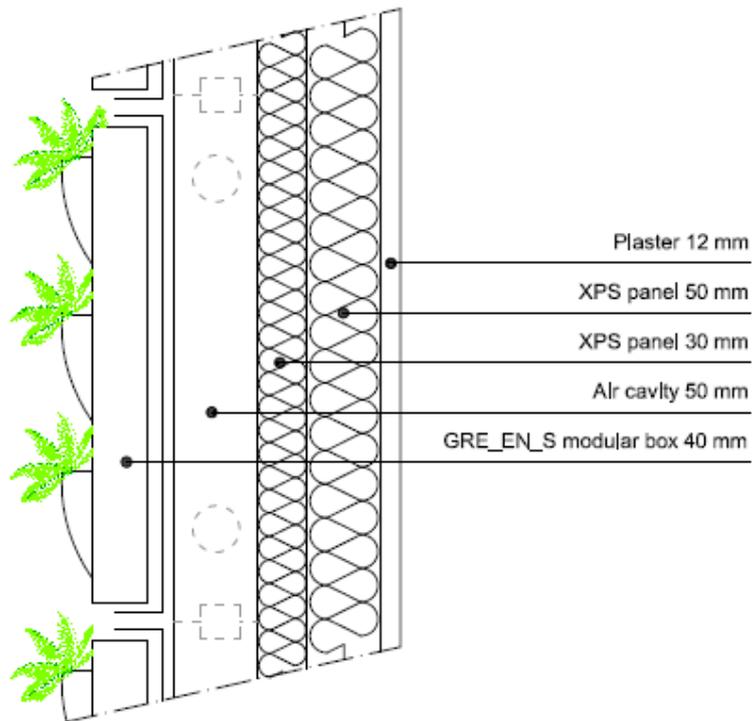


Figura 50 - Stratigrafia della chiusura verticale del modello insediativo rivestito con il living wall.

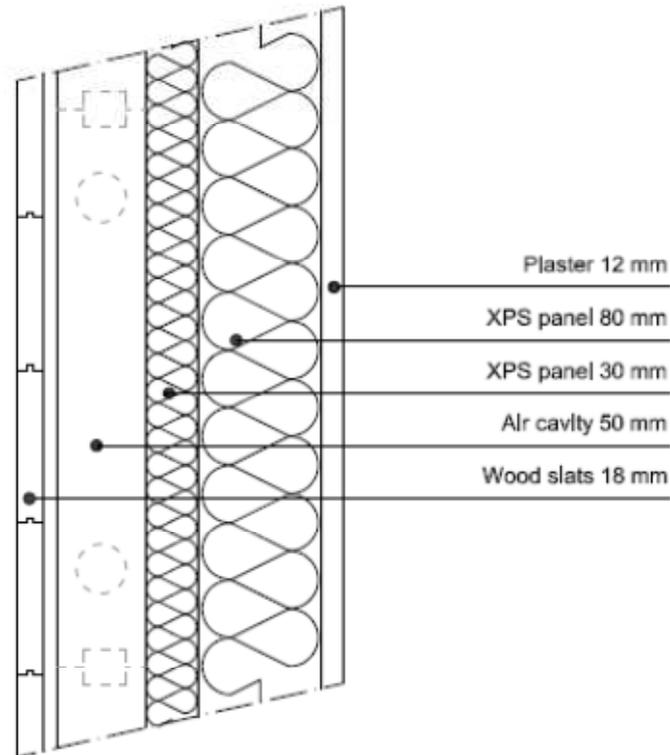


Figura 51 - Stratigrafia della chiusura verticale del modello insediativo rivestito con le doghe in legno.

L'assemblaggio è avvenuto presso l'azienda CEIT e la struttura è stata trasportata già montata, ad eccezione del rivestimento esterno con i moduli vegetati, montati in loco, e della copertura. Quest'ultima è costituita da un traliccio reticolare leggero in alluminio con rivestimento superiore in policarbonato impermeabilizzato e coibentato nel lato interno. La copertura presenta una pendenza verso il centro, in modo da convogliare l'acqua piovana.

I parametri monitorati sono stati i seguenti:

- temperature della superficie interna ed esterna,
- temperature dell'aria interna ed esterna,
- flussi di calore che attraversano le pareti,
- radiazione solare incidente sul piano verticale della facciata.

Per misurare la temperatura superficiale esterna, il sensore di temperatura è stato posizionato in aderenza al feltro esterno dei pannelli vegetati.

L'apparato di misura consisteva in termocoppie, termoflussimetri e piranometro, collegati a un data logger.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

MISURANDO	SENSORE	OUTPUT SENSORE ¹²	UNITÀ DI MISURA	N° DI SENSORI
Temperatura dell'aria esterna	Termocoppia	T_AIR_EXT	°C	1
Temperatura dell'aria interna mock up living wall	Termocoppia	T_AIR_INT_G	°C	1
Temperatura dell'aria interna mock up legno	Termocoppia	T_AIR_INT_W	°C	1
Temperatura superficiale interna mock up living wall	Termocoppia	T_G_INT	°C	1
Temperatura superficiale interna mock up legno	Termocoppia	T_W_INT	°C	1
Temperatura superficiale esterna mock up living wall	Termocoppia	T_G_EXT	°C	1
Temperatura superficiale esterna mock up legno	Termocoppia	T_W_EXT	°C	1
Temperatura dell'intercapedine tra i moduli verdi e la parete retrostante	Termocoppia	T_G_MID	°C	1
Flusso termico che attraversa la parete rivestita con i moduli verdi (posto all'interno del mock up living wall)	Termoflussimetro	HF_G_INT	W/m ²	1
Flusso termico che attraversa la parete del mock up legno	Termoflussimetro	HF_W_INT	W/m ²	1
Flusso termico che attraversa i moduli verdi (posto nell'intercapedine)	Termoflussimetro	HF_G_MID	W/m ²	1
Irradianza solare sul piano verticale della facciata	Piranometro	SOL_OUT	W/m ²	1

Tabella 2 - Elenco dei sensori utilizzati e relativi output per il monitoraggio presso Environment Park.

¹² L'output del sensore che viene riportato in tabella si riferisce alla schema dei sensori di Figura 52.

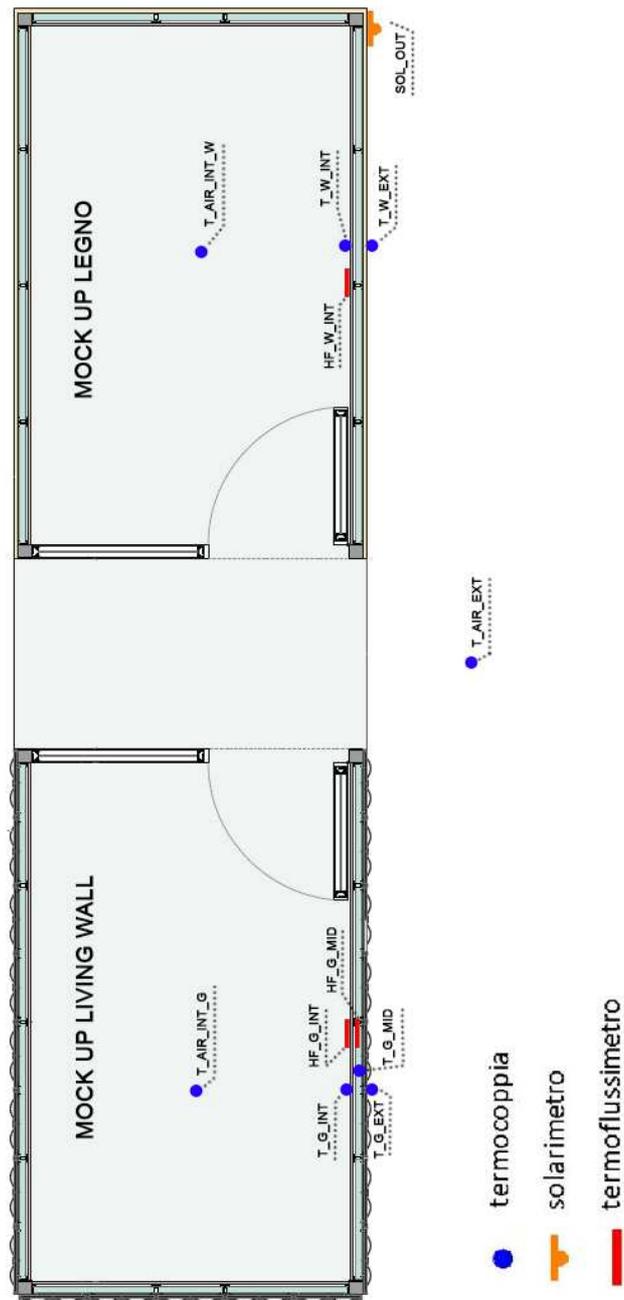


Figura 52 - Posizionamento dei sensori in pianta.

5.3.1 Periodo I

Il primo periodo di monitoraggio presso Environment Park è stato effettuato in condizioni primaverili – estive. I sensori sono stati posti sulla parete nord e le misure sono state condotte dal 09/04/2013 al 31/06/2013.

Il posizionamento dei sensori sulle facciate nord dei due mock up ha permesso di valutare la performance dei due rivestimenti tenendo conto della sola radiazione diffusa.

In questo primo periodo sono state evidenziate alcune problematiche legate al surriscaldamento del mock up vegetato dovuto alla radiazione solare diretta, entrante attraverso il serramento, che in questo modello insediativo è posto sulla facciata ovest; tale problema non si riproponeva nel modello rivestito in legno, che invece presenta il serramento sul lato est. In condizioni estive, l'irraggiamento diretto sul fronte ovest può essere particolarmente problematico. Per tale motivo, al fine trarre informazioni significative sulla prestazione termica del living wall è stato necessario filtrare i dati ottenuti, escludendo dall'analisi i parametri legati alla temperatura interna.

Nei monitoraggi successivi si è provveduto a ovviare il problema realizzando una schermatura orizzontale in doghe di abete. La realizzazione della schermatura è stata possibile previa acquisizione del parere favorevole dei soggetti coinvolti.

GIORNATA NUVOLOSA CON BASSE TEMPERATURE DELL'ARIA ESTERNA (10/06/2013)

Durante la notte, in assenza di radiazione solare, le temperature superficiali esterne dei due mock up si mantengono pressoché uguali e costanti. Con l'arrivo del contributo solare, benché si consideri solo la radiazione diffusa (i sensori sono sul lato nord), la temperatura del rivestimento in legno è superiore a quella della superficie esterna del living wall per tutto l'arco della giornata. La differenza di temperatura è di circa 5 °C già da metà mattina fino al tramonto del sole. Inoltre la temperatura misurata sul living wall si mantiene sempre inferiore alla temperatura dell'aria esterna, con un delta è di circa 2 °C.

CAPITOLO 5 CARATTERIZZAZIONE TERMICA

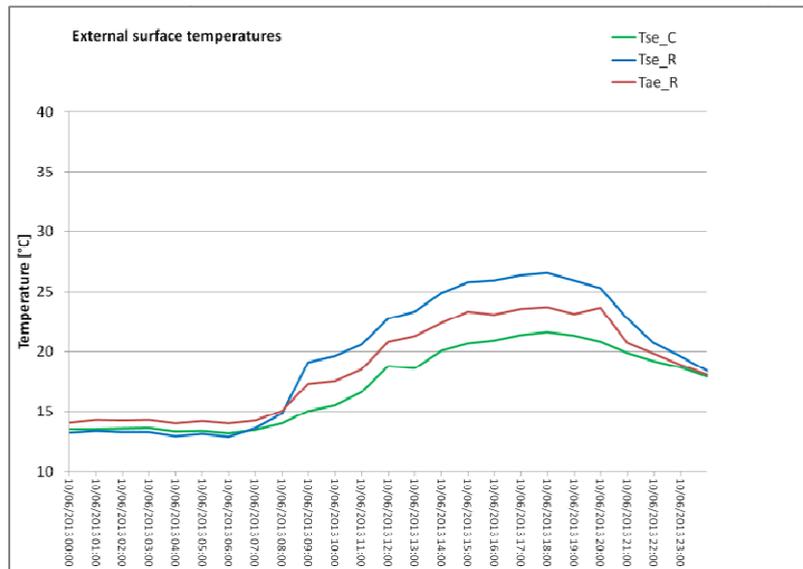


Figura 53 - Temperature superficiali esterne: rivestimento in legno (Tse_R), rivestimento living wall (Tse_C), temperatura dell'aria esterna (Tae_R).

GIORNATA MOLTO SOLEGGIATA CON ELEVATE TEMPERATURE DELL'ARIA ESTERNA (18/06/2013)

Nelle giornate estive con condizioni al contorno più sfavorevoli, cioè temperatura dell'aria esterna elevata e maggior irradianza, è ancora più evidente la differenza di temperatura superficiale esterna tra il living wall e il mock up rivestito in legno. Il delta è di circa 9 °C per tutto l'arco della giornata; sussiste una differenza di temperatura, benché minima, anche durante la notte (tra 0,7 °C e 1 °C). Anche in questo caso la temperatura misurata sul living wall si mantiene sempre inferiore alla temperatura dell'aria esterna, con un delta che durante il giorno è attorno ai 5 °C.

CAPITOLO 5 CARATTERIZZAZIONE TERMICA

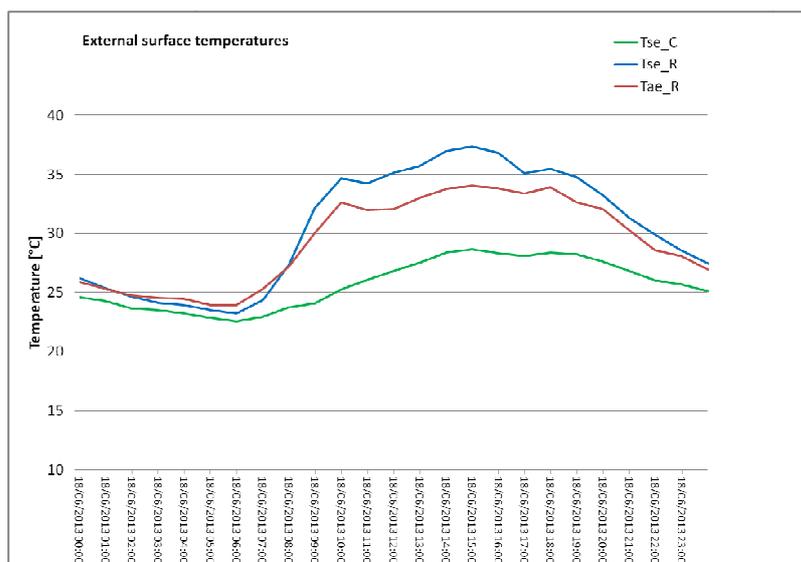


Figura 54 - Temperature superficiali esterne: rivestimento in legno (Tse_R), rivestimento living wall (Tse_C), temperatura dell'aria esterna (Tae_R).

In questa prima campagna di monitoraggio, effettuata sui modelli insediativi in scala reale, si sono confrontate le prestazioni del living wall con le prestazioni di un rivestimento leggero quale il legno, in condizioni estive. Benché quest'ultimo sia considerato un materiale con elevato calore specifico, che quindi non si surriscalda, le temperature raggiunte dalla superficie del living wall sono sempre inferiori.

Il living wall mantiene temperature inferiori a quelle dell'aria esterna; tale fenomeno è maggiormente apprezzabile soprattutto quando la temperatura dell'aria esterna è particolarmente elevata a causa della radiazione solare. La performance del living wall è dovuta a vari motivi: innanzitutto le piante, come si è visto in precedenti capitoli, utilizzano parte della radiazione solare per il processo di fotosintesi, andando quindi a "sottrarre" una quota della radiazione totale che arriva sulla parete. Inoltre, le foglie agiscono come componente schermante sulla parete stessa. Infine, i cicli d'irrigazione del living wall contribuiscono ad abbassare la temperatura superficiale della parete stessa; tale effetto "raffrescante" risulta protrarsi nel tempo grazie all'azione idroretentrica del feltro e del substrato stesso.

Una temperatura superficiale esterna contenuta influenza, inoltre, la radiazione emessa dalla superficie stessa nel campo dell'infrarosso, contribuendo a limitare in modo significativo l'effetto isola di calore.

5.3.2 Periodo II

Il secondo periodo di monitoraggio presso Environment Park è stato effettuato in condizioni invernali. I sensori sono stati posizionati sulla parete nord e le misure sono state condotte dal 28/01/2014 al 11/02/2014.

Dopo l'esperienza dei precedenti monitoraggi realizzati sul dimostratore presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, confermata anche da un primo periodo di monitoraggio del modello insediativo in free running (senza climatizzare i mock up), si è evidenziata la necessità di controllare la temperatura interna in modo che la differenza di temperatura tra ambiente interno e ambiente esterno fosse apprezzabile.

I due modelli insediativi sono dunque stati riscaldati mediante un radiatore a olio collegato a un sistema di regolazione automatico in grado di mantenere la temperatura interna costante a 21 °C.

L'analisi dei dati rilevati ha permesso di calcolare la conduttanza delle pareti dei due mock up. Per quanto riguarda il mock up con il living wall, si è provveduto a rimuovere alcuni pannelli di rivestimento al fine di calcolare quale sarebbe stata la conduttanza della medesima parete senza il living wall.

In Tabella 3 sono riportate le conduttanze misurate:

	C [W/m ² K]
Parete con il pannello (C _{TOT})	0.33
Parete senza il pannello (C ₁)	0.39

Tabella 3 - Confronto conduttanze tra la parete con il rivestimento living wall (C_{TOT}) e senza i pannelli di rivestimento living wall (C₁).

È possibile calcolare, per differenza, la resistenza termica del pannello di rivestimento più quella dell'intercapedine d'aria compresa tra il pannello e la parete retrostante;

$$R_x = \frac{1}{C_{TOT}} - \frac{1}{C_1} \quad [\text{m}^2\text{K} / \text{W}]$$

Eq. 4

Dove:

- R_x è la resistenza termica del pannello di rivestimento più quella dell'intercapedine d'aria compresa tra il pannello e la parete retrostante [m²K /W];
- C_{TOT} è la conduttanza della parete rivestita con il living wall [W/m²K];
- C_1 è la conduttanza della parete senza i pannelli di rivestimento living wall [W/m²K].

La resistenza termica del pannello di rivestimento (spessore medio 4 cm) più quella dell'intercapedine d'aria compresa tra il pannello e la parete retrostante (spessore 6 cm), che si ottiene dalla Eq. 4, è di 0,47 m²K/W.

Confrontando tale dato con i valori di resistenza termica delle intercapedini d'aria riportati dalla norma UNI EN ISO 6946, è possibile ricavare la resistenza termica del pannello (escludendo quindi il contributo dell'intercapedine), che risulta essere di 0,29 m²K/W.

La resistenza termica calcolata si riferisce a una misura in opera, pertanto in questo valore è incluso il calo di prestazione dovuto all'irrigazione dei pannelli vegetati.

Un'ulteriore considerazione è stata fatta relativamente alle temperature superficiali esterne. Come si evince dalla Figura 55, in condizioni invernali, la temperatura esterna raggiunta dal legno è leggermente superiore a quella raggiunta dal living wall, in presenza di radiazione solare. Durante la notte, invece il living wall riesce a mantenere una temperatura più alta. Le differenze sono in entrambi i casi, limitate a un paio di gradi centigradi.

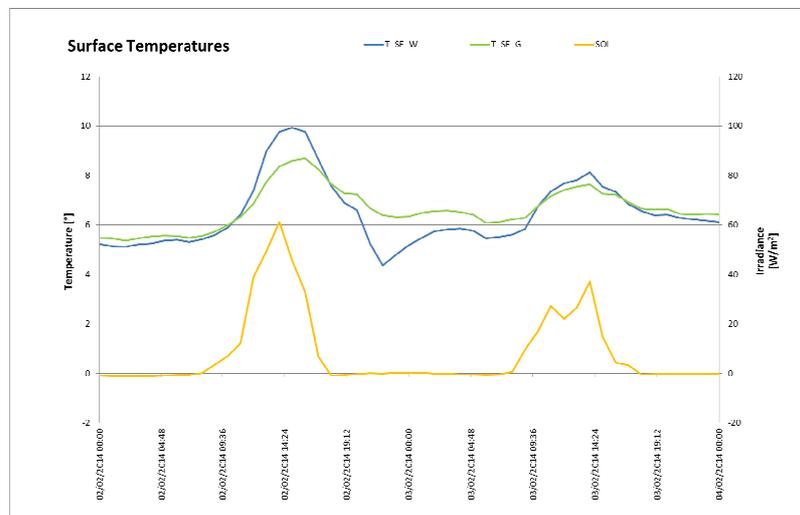


Figura 55 - Temperature superficiali esterne: rivestimento in legno (T_SE_W), rivestimento living wall (T_SE_G), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL).

5.3.3 Periodo III

L'ultimo periodo della sperimentazione è stato dedicato al confronto tra le specie vegetali precedentemente caratterizzate e alcune piante aromatiche selezionate. Nell'ambito del verde verticale, la committenza apprezza molto l'utilizzo di queste piante, legate al tema dell'orto verticale.

Si è scelto di valutare l'influenza della copertura fogliare, monitorando in condizioni estive due diverse essenze: il *rosmarino* e la *salvia*. La prima presentava una scarsa copertura vegetale del pannello, dovuta alla tipologia di foglie (aghiforme) e allo sviluppo della pianta stessa, il cui adattamento alla condizione verticale è stato particolarmente faticoso. La salvia, invece, grazie alle sue foglie più larghe e a un migliore adattamento alle condizioni imposte, si è sviluppata maggiormente.

Come termine di confronto, sono stati impiegati sia la lonicera nitida sia il rivestimento in legno.

I sensori sono stati posizionati sulle facciate esposte a sud rispettando l'esposizione privilegiata delle essenze aromatiche.

Le misure sono state condotte a settembre in condizioni estive poiché le essenze scelte hanno una scarsa resistenza a condizioni climatiche invernali.

In presenza di radiazione solare (giornata soleggiata), la temperatura del rivestimento in legno raggiunge valori maggiori rispetto al living wall, con delle differenze che possono superare i 15 °C.

Tra i tre pannelli di living wall monitorati, la salvia e la lonicera sono quelle che mantengono una temperatura più bassa, grazie all'ombreggiamento del pannello esercitato dalle foglie. Il pannello con il rosmarino presenta una temperatura superficiale più elevata, ma i valori non salgono al di sopra della temperatura dell'aria esterna.

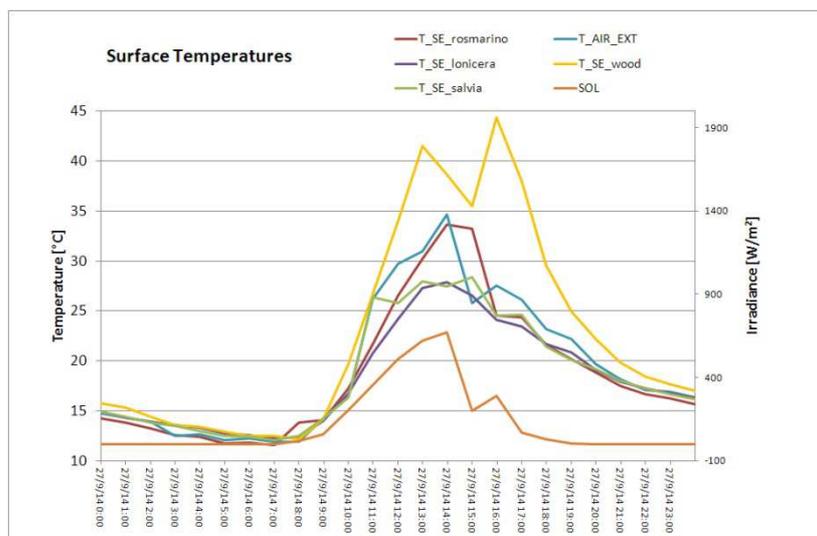


Figura 56 - Temperature superficiali esterne: rivestimento in legno (T_SE_wood), pannello vegetato con rosmarino (T_SE_rosmarino), pannello vegetato con salvia (T_SE_salvia), pannello vegetato con lonicera (T_SE_lonicera), temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL).

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

Durante le giornate nuvolose, invece, le temperature dei tre pannelli vegetati presentano pressoché gli stessi valori e andamenti della temperatura dell'aria esterna. Durante il giorno, soprattutto nelle ore centrali, il rivestimento in legno raggiunge temperature più elevate di qualche grado.

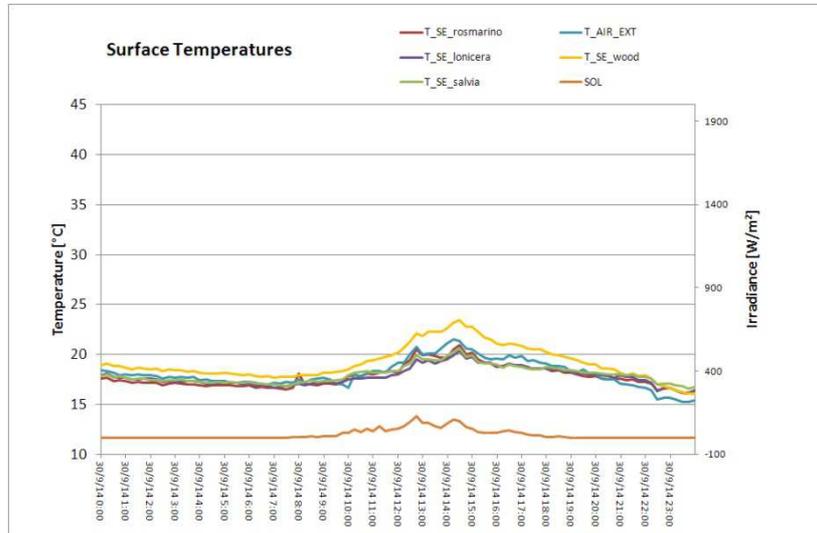


Figura 57 - Temperature superficiali esterne: rivestimento in legno (T_SE_wood), pannello vegetato con rosmarino (T_SE_rosmarino), pannello vegetato con salvia (T_SE_salvia), pannello vegetato con lonicera (T_SE_lonicera), temperatura dell'aria esterna (T_AIR_EXT), irradianza sul piano verticale della facciata (SOL).

5.4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Dall'analisi congiunta e comparativa di quanto emerso dai monitoraggi effettuati, considerando sia quelli relativi al dimostratore che quelli relativi ai modelli insediativi in scala reale, è possibile trarre alcune conclusioni relative alla performance termica del living wall.

Relativamente al comportamento in condizioni invernali, è stata calcolata la trasmittanza termica con il metodo delle medie progressive, così come previsto dalla normativa EN 12494.

Il raffronto tra la trasmittanza termica del mock up rivestito con il living wall e quello rivestito con il tavolato di legno, risulta utile ai fini di altre considerazioni, per quanto restituisca dei valori non utilizzabili in termini assoluti, essendo la migliore prestazione del secondo mock up dovuta a uno spessore maggiore dello strato isolante. I valori di trasmittanza, sono infatti stati confrontati con i valori di conduttanza misurati. La differenza fra trasmittanza e conduttanza è equivalente alla somma delle resistenze liminari esterna e interna, come illustrato nell'equazione:

$$R_{se} + R_{si} = \frac{1}{U} - \frac{1}{C}$$

Eq. 5

Dove:

- R_{se} è la resistenza superficiale esterna [m^2K/W],
- R_{si} è la resistenza superficiale interna [m^2K/W],
- U è la trasmittanza [W/m^2K],
- C è la conduttanza [W/m^2K].

Dai dati misurati è possibile calcolare che la somma delle resistenze liminari ($R_{se}+R_{si}$) per il mock up vegetato è di 0,42 m^2K/W , mentre quella per il mock up rivestito in legno è di 0,15 m^2K/W .

Questo dato risulta particolarmente interessante poiché, partendo dall'ipotesi che le resistenze liminari interne siano uguali, essendo identiche le condizioni al contorno, tale differenza è ascrivibile a una diversa resistenza liminare esterna.

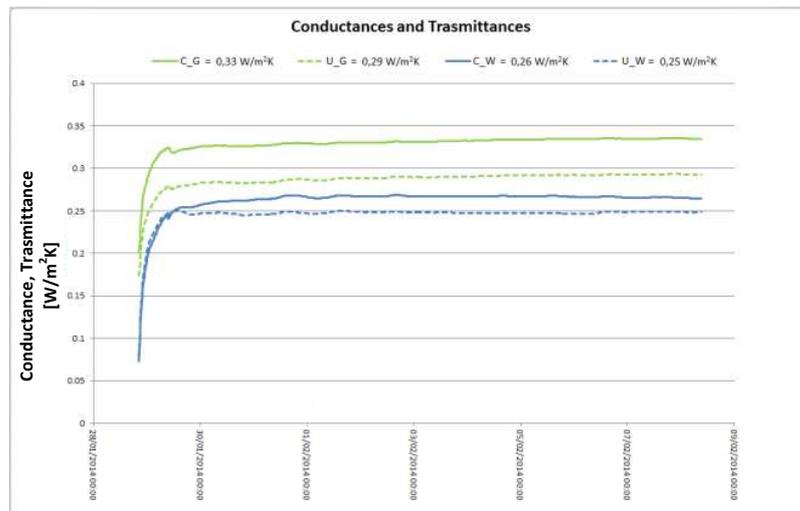


Figura 58 - Confronto tra le conduttanze e le trasmittanze dei due mock up realizzati presso Environment Park.

La resistenza liminare nel caso del modello living wall è influenzata dalla presenza della vegetazione, la quale riduce la velocità dell'aria che lambisce la parete, diminuendo di conseguenza il coefficiente di scambio termico convettivo tra l'ambiente esterno e la parete stessa.

Un altro importante aspetto da considerare ai fini della performance invernale è quello legato alla presenza di un'intercapedine di aria tra i moduli vegetati e la parete retrostante.

Al fine di analizzare nel dettaglio gli effetti termici dovuti alla presenza di questo cuscinetto d'aria, una termocoppia è stata messa all'interno dell'intercapedine delimitata da un lato dai pannelli vegetati e dall'altro dallo strato d'isolante in polistirene espanso estruso (XPS).

Come si evince dai grafici riportati di seguito, l'intercapedine è in grado di mantenere una temperatura maggiore rispetto alla temperatura superficiale esterna, senza subire grandi oscillazioni. In assenza di radiazione solare, la differenza di temperatura rispetto alla superficie esterna è di circa 18 °C per una facciata orientata sud (dati misurati nella test cell), e di circa 3 °C per la facciata esposta a nord (dati misurati sul mock up). In presenza di radiazione solare l'aria esterna viene riscaldata dal sole, e il delta si riduce a un paio di gradi per entrambe le esposizioni.

L'intercapedine d'aria funziona come un buffer caldo e può essere considerato un extra isolamento della parete, grazie al quale è possibile ridurre la domanda di energia giornaliera necessaria per il riscaldamento.

CAPITOLO 5
CARATTERIZZAZIONE TERMICA

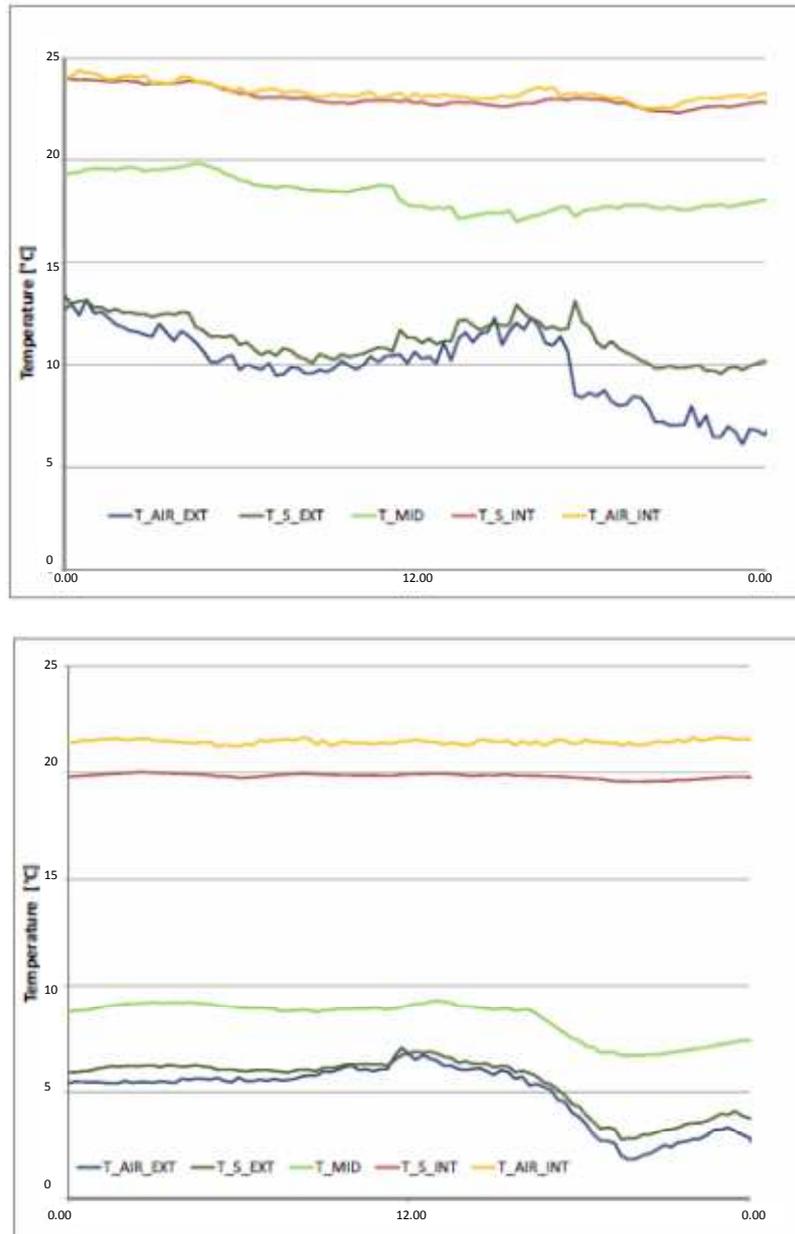


Figura 59 - Temperature misurate nell'arco della giornata attraverso la stratigrafia della parete rivestita con il living wall in condizioni invernali, sulla facciata sud (in alto) e nord (in basso). Temperatura dell'aria esterna (T_AIR_MID), temperatura superficiale esterna (T_S_EXT), temperatura dell'intercapedine (T_MID), temperatura superficiale interna (T_S_INT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT).

La presenza dell'intercapedine, se correttamente ventilata, può svolgere un ruolo importante anche in estate. Come illustrano i grafici in Figura 59, essa mantiene una temperatura inferiore (facciata sud) o uguale (facciata nord) rispetto all'aria esterna, senza innescare effetti di surriscaldamento.

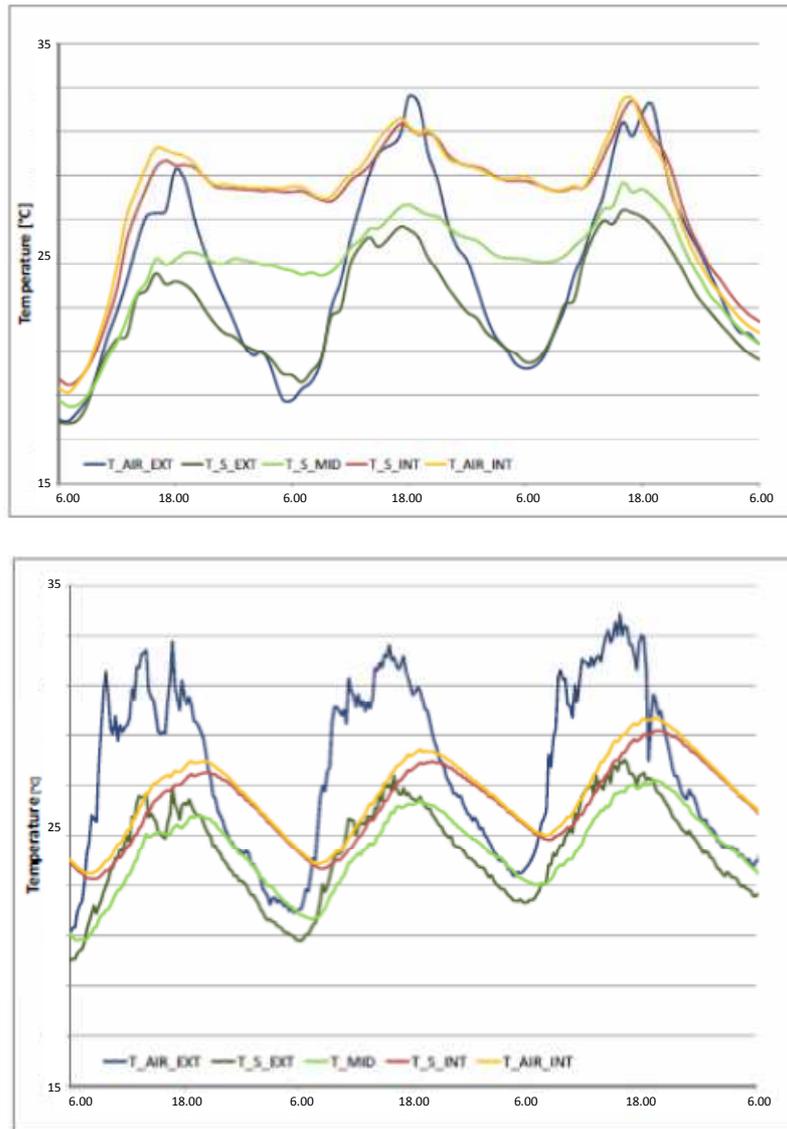


Figura 60 - Temperature misurate attraverso la stratigrafia della parete rivestita con il living wall in condizioni estive, sulla facciata sud (in alto) e nord (in basso). Temperatura dell'aria esterna (T_AIR_MID), temperatura superficiale esterna (T_S_EXT), temperatura dell'intercapedine (T_MID), temperatura superficiale interna (T_S_INT), temperatura dell'aria interna (T_AIR_INT).

In condizioni estive non si rilevano effetti di spostamento del picco di calore significativi poiché la parete nel suo complesso è un sistema leggero e il substrato (8 cm) del living wall è anch'esso a bassa densità. La massa complessiva non ha quindi un'inerzia significativa.

È conseguentemente possibile affermare che il living wall sia particolarmente efficace nel ridurre i flussi termici durante il periodo di riscaldamento, mentre il suo contributo nell'attenuazione e sfasamento dell'onda termica durante la stagione estiva è meno significativo.

Un'importante considerazione va fatta riguardo alle temperature superficiali esterne. Il living wall, come già accennato contribuisce a mitigare l'effetto isola di calore urbana.

Il grafico riportato confronta le temperature superficiali dei tre rivestimenti testati: living wall, intonaco e legno. In una tipica giornata estiva si osserva che in presenza di radiazione solare le temperature misurate sul living wall sono decisamente inferiori rispetto a quelle misurate sugli altri due rivestimenti. In particolare, la massima differenza è di 11 °C tra il muro intonacato e il living wall (facciata a sud). Anche sulla facciata nord del mock up, che riceve soltanto la radiazione diffusa, la differenza rimane apprezzabile, anche se più contenuta (circa 6,5 °C).

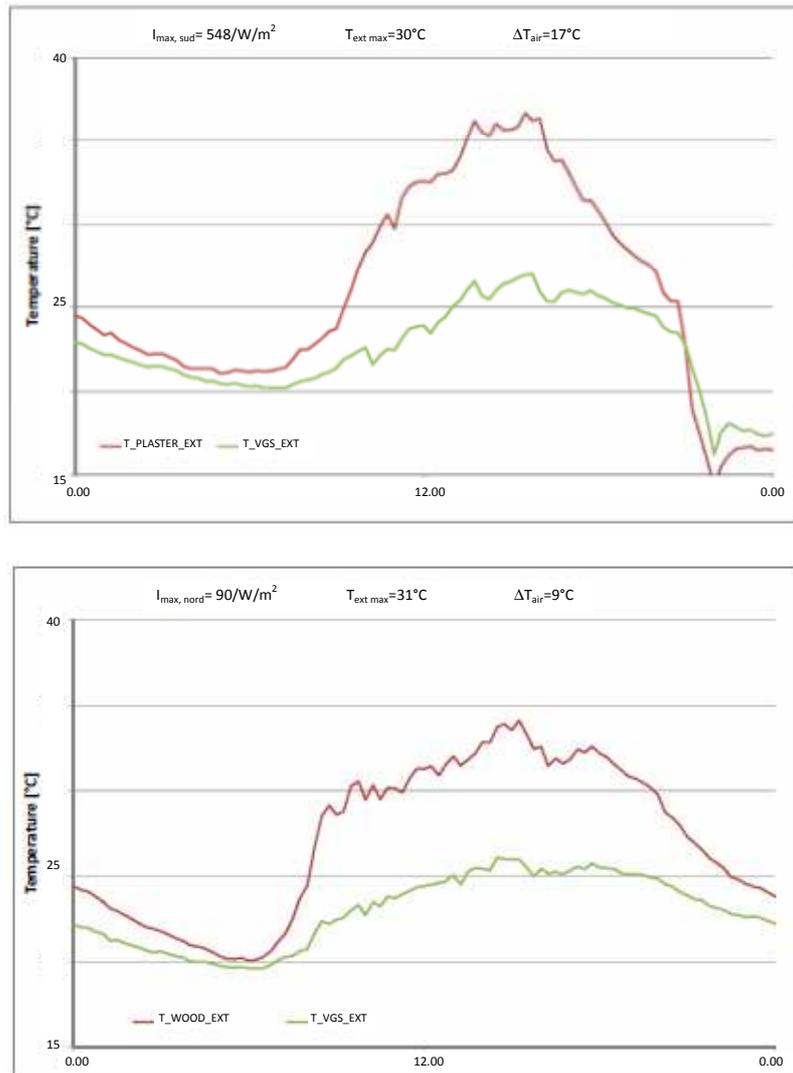


Figura 61 - Temperature superficiali esterne misurate in una tipica giornata estiva sui tre rivestimenti testati: intonaco ($T_{PLASTER_EXT}$), living wall (T_{VGS_EXT}) e legno (T_{WOOD_EXT}). Facciata sud (in alto) e facciata nord (in basso).

La riduzione delle temperature superficiali esterne ha effetti positive sul microclima urbano, con ricadute sul comfort termico outdoor.

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

CAPITOLO 6

6.1 STRUMENTI E METODOLOGIA

La caratterizzazione acustica è stata effettuata mediante la misura sperimentale del *coefficiente di assorbimento acustico* “ α ” del living wall.

Tale parametro è stato ritenuto adeguato poiché esprime la capacità di una superficie di assorbire l'onda sonora incidente. Considerato che il living wall è utilizzato come rivestimento esterno degli edifici, la sua prestazione acustica in termini di assorbimento può influenzare il comfort acustico outdoor dell'ambiente urbano.

La misura del coefficiente di assorbimento acustico è stata fatta sia in camera riverberante sia in tubo di Kundt, presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) di Torino.

Attraverso la misura in camera riverberante si esprime il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza casuale; tale metodologia di misura ha il vantaggio di riprodurre le effettive dinamiche di incidenza dell'onda sonora sulla superficie esterna di un edificio. Per contro, la misura richiede una superficie da misurare compresa tra 10 m² e 12 m². Pertanto risulta, nel caso dello studio dei living wall, piuttosto oneroso dal punto di vista economico e organizzativo soddisfare tale richiesta.

La misura nel tubo di Kundt, per contro, è effettuata su un campione di materiale la cui dimensione dipende dal diametro del tubo utilizzato. Gli strumenti disponibili presso l'INRiM avevano un diametro di 40 cm e 50 mm.

La dimensione del diametro determina l'intervallo di frequenza entro il quale la misura è valida. I diametri degli strumenti utilizzati hanno permesso di misurare il coefficiente di assorbimento acustico alle medie e alte frequenze. Per ottenere il coefficiente di assorbimento acustico a frequenze più basse (inferiori a 100 Hz) il diametro dello strumento di misura

avrebbe avuto dimensioni decisamente maggiori. Di conseguenza, anche la superficie del misurando necessaria per la misura, sarebbe aumentata, accrescendo i costi e la difficoltà della misura.

Mediante la misura in tubo di Kundt è possibile esprimere il *coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale* " α_0 ". Poiché tale situazione non corrisponde alle reali condizioni in opera del living wall, sui quali le onde sonore arrivano senza un angolo di incidenza privilegiato, sono stati confrontati i dati ottenuti dalle due metodologie di misura (in camera riverberante e in tubo di Kundt) applicate allo stesso misurando.

Inoltre, le misure in tubo di Kundt, secondo la normativa UNI EN ISO 10534, prevedono che il campione di misura sia composto da materiale omogeneo e che la sua superficie sia piana. È stato quindi necessario mettere a punto una metodologia di misura compatibile con la natura dei campioni misurati.

Le prime misure sono quindi state fatte in camera riverberante e hanno permesso di validare la metodologia di misura effettuata nel tubo di Kundt, oltre che a fornire una prima valutazione quantitativa relativa al fono assorbimento.

La misura del coefficiente di assorbimento nel tubo di Kundt ha permesso di ottimizzare tempi e costi delle misure, offrendo così la possibilità di ampliare l'indagine sperimentale.

La valutazione del coefficiente di assorbimento ha, infatti, tenuto conto dei diversi parametri che compongono il living wall, indagando le diverse soluzioni al fine di individuare i materiali e le stratigrafie più efficienti dal punto di vista acustico.

È stato quindi verificato e quantificato il ruolo della componente vegetale in funzione dell'apparato fogliare (dimensioni, spessore, tessitura, grado di tomentosità¹³) poiché la formazione di strati vegetali con differenti proprietà può determinare eventuali differenze in termini di prestazioni acustiche.

Si è inoltre tenuto conto del grado di umidità (% acqua) presente nel modulo (modulo secco, modulo umido), delle prestazioni acustiche del substrato e del feltro, che costituisce lo strato più esterno, escludendo le foglie.

¹³ Il grado di tomentosità è la misura della feltratura o cotonatura delle foglie, ovvero è una misura della maggiore o minore presenza di "peluria" sulla superficie fogliare.

6.2 MISURE IN CAMERA RIVERBERANTE

La misura in laboratorio del coefficiente di assorbimento in camera riverberante è stata effettuata presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) a Torino, secondo il metodo descritto dalla Norma UNI EN ISO 354.



Figura 62 - La camera riverberante all'interno della quale sono state effettuate le misure del coefficiente di assorbimento acustico, presso l'INRiM di Torino. (Fonte: www.inrim.it)

La camera riverberante fornisce un ambiente in cui il campo acustico è altamente diffuso grazie alla riflessione multipla delle onde sonore che incidono sulle superfici della camera stessa, per cui la pressione acustica risulta essere uniforme in tutte le direzioni.

Il campione di misura, costituito da una superficie di 12 m², è stato posato in camera riverberante, all'interno della quale è stato misurato il tempo di riverberazione in funzione della frequenza, con e senza il campione di misura.

Dai valori ottenuti, utilizzando la formula di Sabine, si ottengono i valori dell'assorbimento totale della camera riverberante nei due casi (Eq. 6).

$$A_T = \frac{0,16V}{\tau_{60}} \quad [\text{m}^2]$$

Eq. 6

Dove:

- A_T è l'area di assorbimento acustico equivalente del campione [m²];
- V è il volume della stanza [m³]
- τ_{60} è il tempo necessario affinché il livello della pressione sonora diminuisca di 60 dB rispetto al valore che esso ha nell'istante in cui viene disattivata la sorgente [s].

La differenza tra questi due valori di assorbimento totale (con e senza il campione di misura) dà come risultato l'assorbimento dovuto al campione; quest'ultimo, diviso per la superficie del campione stesso, permette di ottenere il coefficiente α del campione di misura, espresso per ogni banda di frequenza.

$$\alpha = \frac{A_T}{S} \quad [-]$$

Eq. 7

Dove:

- α è il coefficiente di assorbimento acustico del campione di misura [-];
- A_T è l'area di assorbimento acustico equivalente del campione [m²];
- S è la superficie del campione [m²].

A_T dipende dalla differenza tra i tempi di riverberazione, dal volume della stanza, dalla velocità di propagazione del suono e da un coefficiente di attenuazione legato alle condizioni termogrometriche della camera durante le misure.

Tre differenti campioni sono stati testati in camera riverberante; la stratigrafia del primo campione (GMS1), corrispondente al PT01, è riportata in Tabella 4:

GMS 1	
1	Feltro esterno in polipropilene
2	Substrato a base di fibra di cocco e polimeri idroretentori (2 cm, ρ 85 kg/m ³)
3	Feltro interno in polipropilene e poliestere
4	Substrato a base di fibra di cocco e polimeri idroretentori (4 cm, ρ 85 kg/m ³)
5	Feltro interno in polipropilene e poliestere
6	Feltro esterno in polipropilene

Tabella 4 - Stratigrafia del campione (GMS1) PT01.



Figura 63 - Il campione GMS1 in camera riverberante presso INRiM.

La stratigrafia del secondo campione (GMS2), corrispondente al PT03, è riportata in Tabella 5:

GMS 2	
1	Feltro esterno in poliestere
2	Substrato a base di fibra di cocco e polimeri idroretentori (2 cm, ρ 85 kg/m ³)
3	Feltro interno in polipropilene e viscosa
4	Substrato a base di fibra di cocco e polimeri idroretentori (4 cm, ρ 85 kg/m ³)
5	Feltro interno in polipropilene e viscosa
6	Feltro esterno in poliestere

Tabella 5 - Stratigrafia del campione (GMS2) PT03.

Entrambi i campioni erano vegetati con lonicera nitida, mentre l'ultimo campione misurato presentava la stessa stratigrafia del primo campione (GMS1) ad eccezione dei 2 cm di substrato più esterni e non era vegetato.



Figura 64 - Il campione GMS1 senza piante e substrato esterno in camera riverberante presso INRiM.

Dai risultati del test (Figura 65), si evince che tutti e tre i campioni hanno un coefficiente di assorbimento acustico molto elevato già dalle medie frequenze. Il GMS1 e il GMS2 mostrano andamenti simili; le differenze riscontrabili non sono significative ai fini di una superficie assorbente posta in un contesto urbano; infatti, si mantengono sempre al di sotto del 5% (tranne che a 400 Hz, dove il delta è del 7%). L'influenza delle piante si osserva comparando la curva del GMS1 con quella del medesimo campione senza lonicera (GMS1 senza piante e substrato). Questo terzo campione è meno performante, tuttavia la differenza non è molto elevata essendo la variazione compresa tra 1% e 20%, in funzione della frequenza. Oltre alla mancanza delle foglie, va considerata l'assenza del substrato più esterno (circa 2 cm).

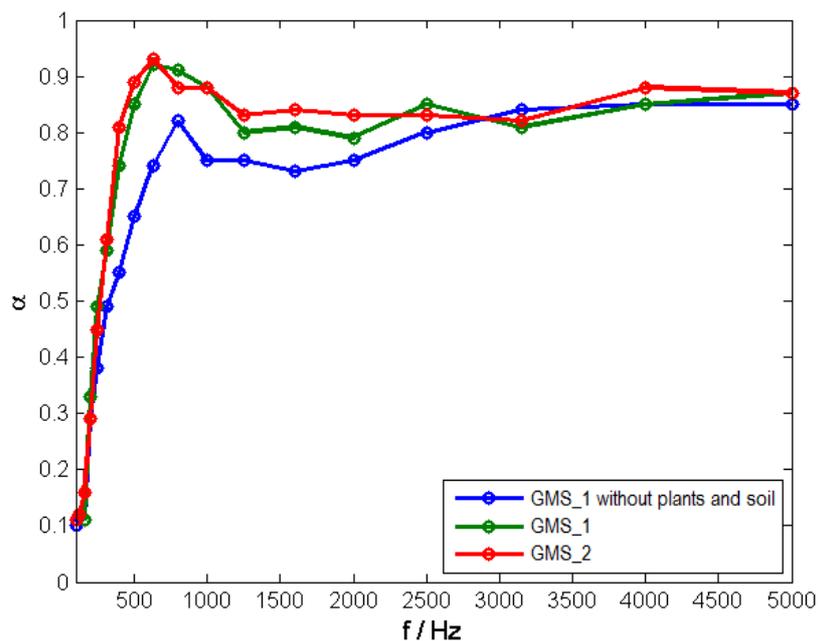


Figura 65 - Coefficiente di assorbimento acustico dei tre campioni testati in camera riverberante.

6.3 MISURE NEL TUBO DI KUNDT

La misura del coefficiente di assorbimento nel tubo di Kundt¹⁴ è stata eseguita in accordo con la norma UNI EN ISO 10534-2. Il metodo si basa sul calcolo di una funzione di trasferimento tra il segnale rilevato da due microfoni posti all'interno del tubo quando questo è eccitato da un altoparlante posto a una delle due estremità e termina con il provino di misura posto all'altra estremità.

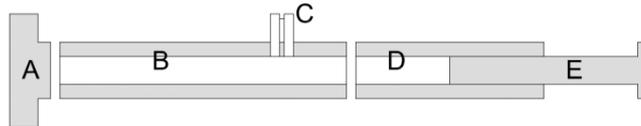


Figura 66 - Sezione longitudinale del tubo a onde stazionarie utilizzato per le misure: altoparlante (A), corpo centrale (B), due microfoni (C), estensione del tubo (D), terminazione mobile rigida (E).

L'ipotesi di partenza prevede che le onde all'interno del tubo siano piane.¹⁵ Tale ipotesi è valida fino a una frequenza limite superiore f_u , che dipende dal diametro interno del tubo e dalla distanza tra i due microfoni, oltre la quale l'ipotesi non è più verificata.

$$f_u = \frac{0,58c_0}{d} \quad \text{e} \quad f_u = \frac{0,45c_0}{s} \quad [\text{Hz}]$$

Eq. 8

Dove:

- f_u è la frequenza limite superiore [Hz],
- d è il diametro del tubo [m],
- c_0 è la velocità del suono nell'aria [m/s],
- s è la distanza tra i due microfoni [m].

¹⁴ Il tubo di Kundt deve le sue origini a Agust Kundt (1839 - 1894), professore di fisica presso il Politecnico Federale di Zurigo. Egli fu fra i primi a riuscire a visualizzare la forma di propagazione delle onde sonore. A tal fine sviluppò il tubo che oggi porta il suo nome, che è costituito da un tubo di quarzo, chiuso alle estremità da opportuni tappi e bloccato in due punti equidistanti dagli estremi di un quarto della lunghezza complessiva del tubo. In Figura 66 è riportato uno schema del tubo di Kundt utilizzato.

¹⁵ Con onda piana s'intende un'onda a frequenza costante il cui fronte è costituito da infiniti piani paralleli normali alla direzione di propagazione dell'onda stessa. Se tale ipotesi è verificata, non si ha attenuazione isotropica nello spazio, per cui l'unica eventuale attenuazione è imputabile all'assorbimento del mezzo attraversato dall'onda.

Per le misure sono stati utilizzati due tubi in plexiglass di diverso diametro:¹⁶ uno di 30 mm (T1) e l'altro di 50 mm (T2), al fine di poter estendere l'indagine a un range di frequenze più ampio. La distanza tra i due microfoni è di 0,018 m per il tubo T1 e di 0,026 m per il tubo T2.

La frequenza limite inferiore f_l è stata calcolata attraverso l'equazione Eq. 9.

$$f_l = 0,05 \frac{c_0}{s} \quad [-]$$

Eq. 9

Dove:

- f_l è la frequenza limite inferiore [Hz],
- c_0 è la velocità del suono nell'aria [m/s],
- s è la distanza tra i due microfoni [m].

L'intervallo di frequenza all'interno del quale la misura del coefficiente di assorbimento a incidenza normale α_0 è valida, calcolato attraverso le equazioni Eq. 8 e Eq. 9, è riportato in Tabella 6.

TUBO	DIAMETRO [m]	FREQUENZA LIMITE SUPERIORE f_u [Hz]	FREQUENZA LIMITE INFERIORE f_l [Hz]
T1	0,03	250	5000
T2	0,05	100	3800

Tabella 6 - Intervalli di frequenze all'interno dei quali la misura del coefficiente di assorbimento per incidenza normale α_0 è valida.

La strumentazione utilizzata per la realizzazione dell'intero sistema di misura è la seguente:

- generatore di rumore rosa (B&K™ Type 1405 o Scheda NI™ - USB 4431);
- amplificatore finale di potenza (B&K™ Type 2706);
- altoparlante (Electro Voice™ ID30CT);
- due microfoni da ¼" (B&K™ Type 4136);
- alimentatore microfónico a due canali (B&K™ Type 5935);
- scheda di acquisizione (NI™ - USB 4431);
- software di analisi e di calcolo (NI™ SV, LabView™).

¹⁶ Le dimensioni si riferiscono al diametro interno del tubo.



Figura 67 - Strumentazione utilizzata per la misura del coefficiente di assorbimento acustico (presso INRiM).

Partendo dallo strato più esterno (feltro), si è proceduto aggiungendo uno a uno i vari strati e misurando a ogni aggiunta il coefficiente di assorbimento acustico, in modo da verificare il contributo di ciascuno strato rispetto alla prestazione globale.

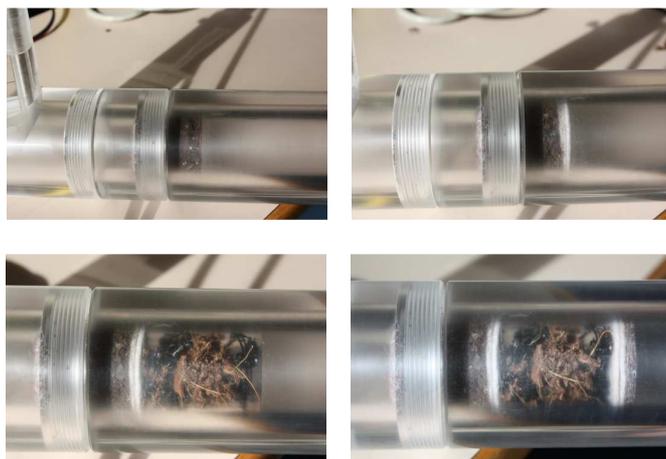


Figura 68 - Alcuni passaggi della misura in tubo di Kundt (presso INRiM).

I risultati ottenuti nel tubo a onde stazionarie sono confermati dalle misure effettuate in camera riverberante dove l'incidenza delle onde sonore è casuale, permettendo quindi di validare il metodo di misura nel tubo di Kundt anche per campioni multistrato e materiali non omogenei.

CAPITOLO 6
CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

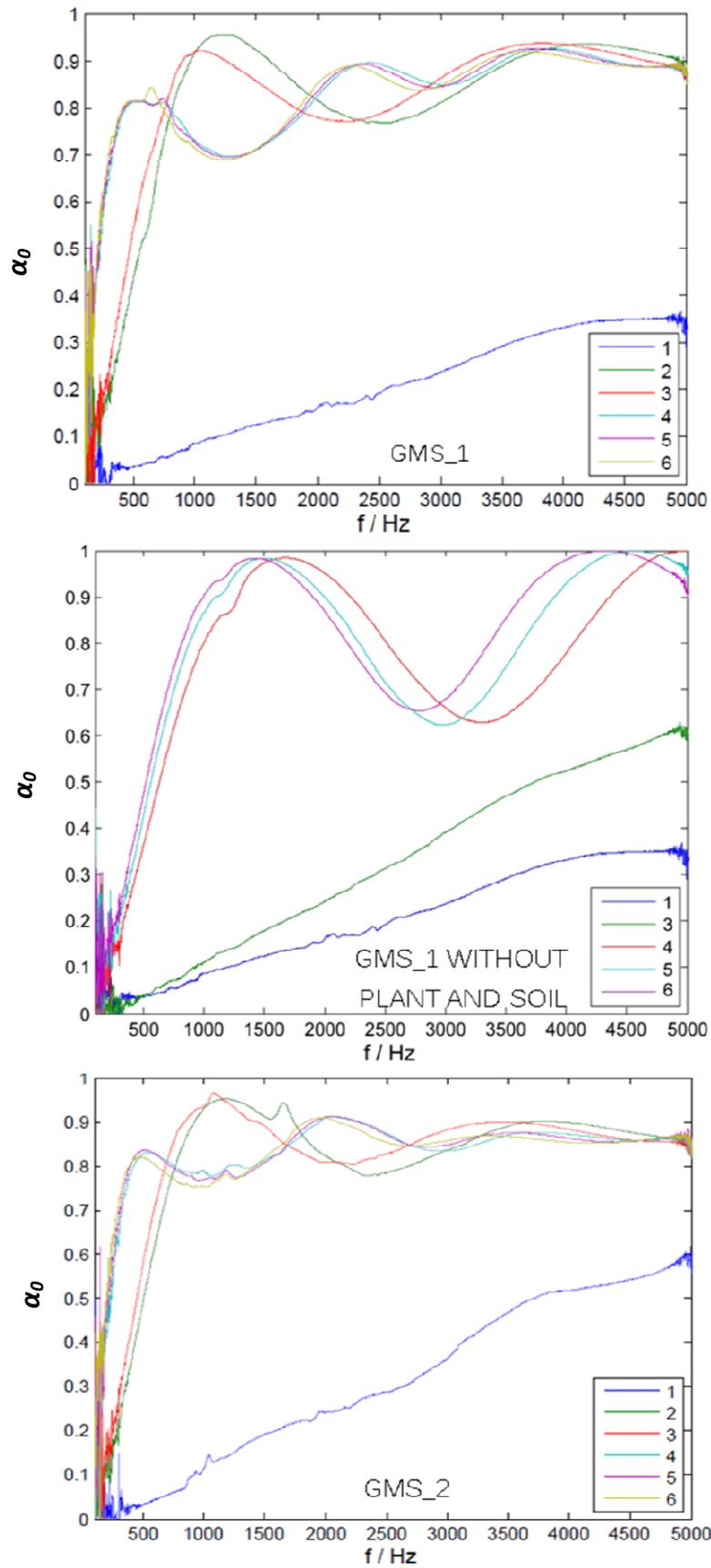


Figura 69 - Coefficiente di assorbimento acustico α_0 dei tre campioni misurato in tubo di kundt. La stratigrafia corrisponde a quella riportata nelle tabelle del paragrafo 6.2.

I risultati ottenuti mostrano che il ruolo più significativo in termini di assorbimento acustico è svolto dal substrato.

Al fine di fornire una valutazione sulla variazione del coefficiente di assorbimento al variare delle condizioni di esercizio di una parete verde modulare e delle specie vegetali, sono state effettuate ulteriori misure di assorbimento acustico introducendo alcune varianti su un sistema tecnologico di riferimento. Il sistema che è stato considerato è il campione GMS2.

Il feltro esterno, misurato da solo, presenta un coefficiente di assorbimento acustico tra 0,1 e 0,25 per le frequenze considerate, mentre il solo substrato (80 mm) presenta un comportamento acustico in frequenza, analogo all'intero carotaggio.

Come dimostrato dai dati della Figura 69, il tipo di feltro non incide sulla prestazione globale, se esso è permeabile all'onda sonora. Pertanto, si è scelto di non considerare il tipo di feltro come variabile nelle misure seguenti.

La prima variabile che è stata considerata è quella relativa al contenuto di umidità. La presenza di acqua all'interno di una parete verde modulare aumenta in modo considerevole la densità totale e, contemporaneamente, occlude un'elevata percentuale di porosità aperta. La miscela utilizzata per il substrato è caratterizzata da un'elevata capacità di ritenzione idrica, necessaria alla sopravvivenza delle piante. Inoltre, anche i feltri (sia esterni sia interni) s'imbibiscono determinando una variazione di prestazione.

CAPITOLO 6
CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

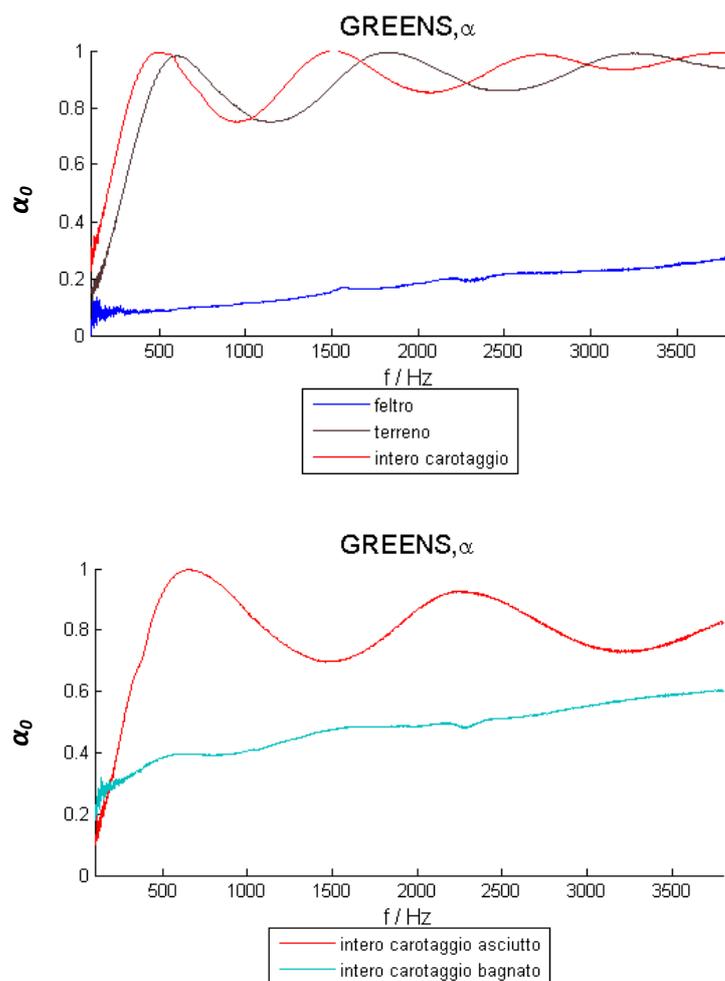


Figura 70 - Coefficiente di assorbimento acustico: confronto tra i diversi materiali del medesimo provino (a) e confronto relativo alla variazione del contenuto di umidità (b).

Ai due campioni misurati (asciutto e bagnato) è stato aggiunto uno strato di foglie, in modo da completare la stratigrafia della parete verde.

Sono state analizzate le tre specie di piante descritte in precedenza (*Lonicera nitida*, *Bergenia cordifolia*, *Heuchera villosa*). L'inserimento di uno strato di foglie all'interno del tubo ha posto un problema metrologico, poiché la norma UNI EN ISO 10534-2 prevede che la superficie del campione di misura sia piana. Tale assunto non sembra in prima battuta applicabile data la configurazione reale di una parete verde, dove le foglie hanno orientamento casuale e si sovrappongono su più livelli.

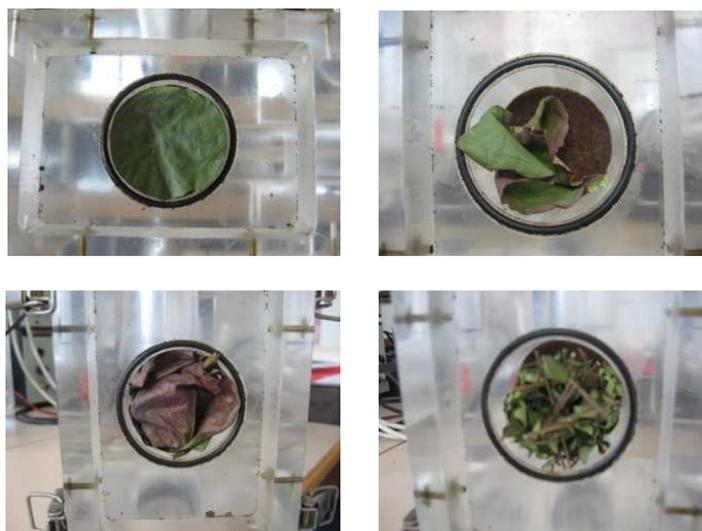


Figura 71 - Campagna di misure preliminari per valutare la componente fogliare.

A seguito di una campagna di misure preliminari, effettuate per stabilire se la metodologia utilizzata fornisce risultati significativi, si è osservato che è possibile ottenere un'indicazione qualitativa del coefficiente di assorbimento acustico misurando un campione completo solo se le dimensioni delle foglie sono nettamente inferiori al diametro del tubo. Per tale motivo, le foglie più grandi (*bergenia cordifolia* ed *heuchera villosa*) sono state sminuzzate in modo da soddisfare questo requisito. È stato, infatti, assunto che rispetto a una superficie di grandi dimensioni, quali quelle di una parete verde, la differenza di scala tra le foglie utilizzate per la misura non è rilevante.

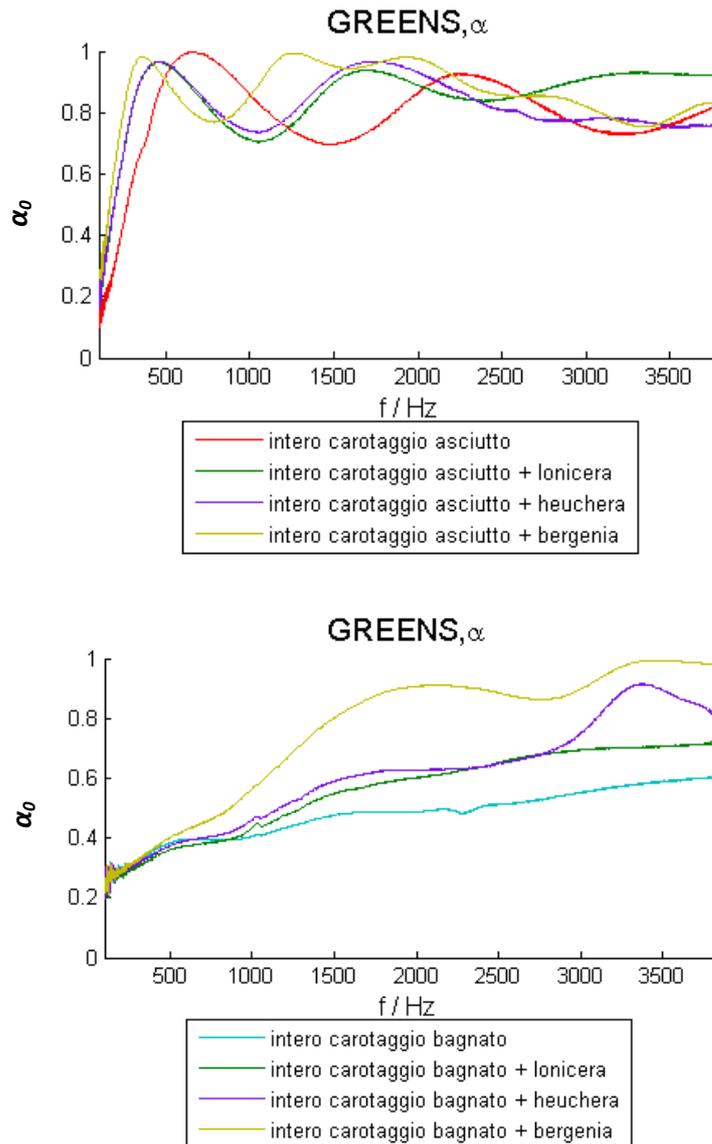


Figura 72 - Coefficiente di assorbimento acustico: confronto tra le diverse specie di piante addizionate al provino asciutto (a) e a quello bagnato (b).

La misura effettuata con il provino secco mostra che la presenza delle foglie non cambia sostanzialmente la prestazione acustica della parete verde modulare. Non s'individuano, inoltre, differenze rilevanti al variare della specie vegetale addizionata al medesimo provino.

Le stesse misure ripetute sul provino bagnato mostrano invece, che la presenza delle foglie migliora la prestazione in termini di assorbimento acustico.

6.4 RISULTATI E DISCUSSIONE

Da un'analisi dei risultati ottenuti con i test effettuati, emerge che il living wall ha un ottimo coefficiente di assorbimento acustico α . I valori del coefficiente α per banda di frequenza sono stati confrontati con altri materiali utilizzati in edilizia.

MATERIALE	COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Living wall asciutto (GMS2)	0,12	0,45	0,89	0,88	0,83	0,88
Living wall bagnato (GMS2)	0,15	0,31	0,40	0,41	0,49	0,49
Lana di roccia	0,38	0,54	0,65	0,76	0,78	0,85
Pannello di fibre di legno	0,15	0,25	0,40	0,50	0,50	0,40
Parete in muratura intonacata	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05

Tabella 7 - Confronto del coefficiente di assorbimento acustico del living wall e di altri materiali edili. I dati di confronto sono stati tratti dal sito www.seieditrice.com.

L'ottima prestazione del living wall in termini di assorbimento acustico è dovuta principalmente alla presenza del substrato, che agisce come adattatore di impedenza tra il mezzo esterno (aria) e il sistema living wall.

In virtù del teorema di massimo trasferimento di potenza attiva, la potenza (o l'energia) trasportata dall'onda sonora è quindi trasferita totalmente o quasi totalmente al sistema living wall, minimizzando le riflessioni e la generazione di eventuali onde stazionarie, che sono la causa del "rumore" comunemente percepito.

I valori di assorbimento acustico ottenuti in funzione della frequenza, assumono una particolare rilevanza se confrontati con lo spettro del rumore da traffico.

La performance acustica del living wall può, infatti, svolgere un'azione volta a mitigare l'effetto canyon dovuto alla multipla riflessione delle onde sonore; tale effetto è particolarmente evidente lungo le strade strette delimitate da alti fronti costruiti. Se si considera lo spettro per bande di terzi d'ottava indicato dallo standard europeo EN 1793-3 per il rumore da traffico, si nota che la maggior parte dell'energia sonora si distribuisce alle medie e alte frequenze, per le quali l'assorbimento del living wall è più elevato.

CAPITOLO 6
CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

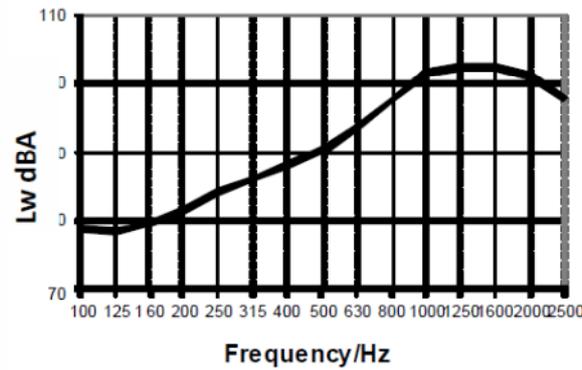


Figura 73 - Traffic noise spectrum. Fonte: EN 1793-3.

Le misure effettuate cercando di riprodurre le reali condizioni di esercizio di un living wall (Figura 70, Figura 72) mostrano che la performance è sensibilmente inferiore, con un decremento compreso tra il 25 e il 50% in funzione della frequenza.

Tuttavia, rispetto ai comuni materiali di rivestimento esterno degli edifici i valori di assorbimento acustico sono significativi ed elevati anche in presenza di acqua, elemento indispensabile alla sopravvivenza della pianta (Tabella 7).

Tuttavia, la presenza del manto fogliare determina un miglioramento quando il substrato è bagnato, soprattutto alle frequenze superiori a 1500 Hz.

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA E AGRONOMICA

CAPITOLO 7

7.1 OBIETTIVI

Al fine di fornire una caratterizzazione del living wall che fosse il più possibile completa, si è scelto di ampliare la sperimentazione effettuando alcune misure che tenessero conto della componente meccanica e agronomica del sistema.

La caratterizzazione meccanica ha riguardato il supporto tecnologico atto a ospitare le piante: diverse tipologie di feltro sono state testate mediante misure di resistività al flusso e resistenza meccanica a trazione. Le misure sono state eseguite presso l'INRiM grazie alla collaborazione del Dr. Alessandro Schiavi.

L'obiettivo della caratterizzazione era quello di individuare quale, tra le varie tipologie di feltro, si dimostrava essere il più adatto alla crescita e allo sviluppo delle piante, mantenendo delle buone prestazioni meccaniche e garantendo quindi una durabilità maggiore.

I requisiti fondamentali relativi ai materiali di supporto sono:

- una resistenza meccanica tale da contrastare la forza peso dell'intera stratigrafia e la spinta esercitata dalle radici delle piante;
- una corretta conduttività idraulica affinché le piante possano trovarsi un ambiente al giusto grado di umidità;
- una buona traspirabilità che preservi le piante dalla condizione di asfissia.

La caratterizzazione agronomica ha invece riguardato le caratteristiche legate alle specie vegetali: attraverso la misura

CAPITOLO 7
CARATTERIZZAZIONE MECCANICA E AGRONOMICA

dell'indice di area fogliare (LAI) è stata valutata la capacità di accrescimento delle diverse essenze, rispetto al substrato di coltivazione e alla condizione di verticalità.

La misura del LAI è stata effettuata grazie alla collaborazione con il dipartimento di Agronomia, Selvicoltura e Gestione del Territorio, dell'Università degli Studi di Torino.

7.2 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

La caratterizzazione meccanica è stata eseguita su quattro diversi tipi di feltro. Questi stessi materiali sono stati utilizzati nella realizzazione dei prototipi del progetto GRE_EN_S descritti nel capitolo 4 e riportati in Tabella 8, dove i feltri interni sono indicati con la lettera I, i feltri esterni sono indicati con la lettera E.

Feltro	Spessore [mm]	Densità [kg/m ³]	Porosità [-]	Descrizione sintetica tipologia
E-1	4,32	77,9	0,92	Fibre di polipropilene
I-2	1,86	131,4	0,86	Fibre di polipropilene e fibre di poliestere
E-3	5,16	54,6	0,96	Fibre di poliestere (calandratura delle fibre sul lato interno)
I-4	3,65	54,4	0,97	Fibre di viscosa e fibre di polipropilene
E-5	5,05	94,5	0,93	Fibre di poliestere (agugliatura delle fibre sul lato interno)

Tabella 8 - Principali caratteristiche dei feltri misurati.

La valutazione della resistenza meccanica a trazione è stata effettuata imponendo al provino di dimensioni note una deformazione ε dovuta alla trazione cui era sottoposto e misurando il relativo sforzo σ .

Sulla base dei dati ottenuti è stata disegnata una curva sforzo-deformazione per ogni provino, individuando il valore di snervamento σ_y , la massima resistenza alla trazione σ_T , e la resistenza alla frattura σ_B .

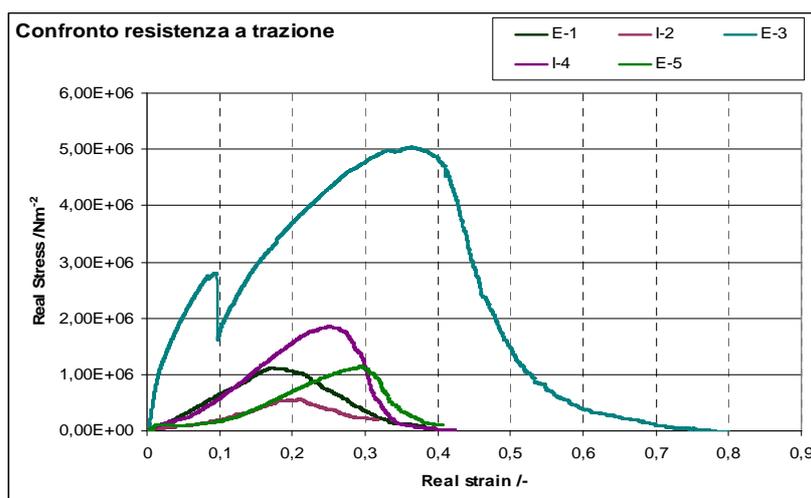


Figura 74 - Resistenze a trazione dei diversi provini.

In tutte le curve riportate in Figura 74 è possibile osservare il tipico comportamento duttile dei materiali fibrosi a base polimerica.

Confrontando i risultati ottenuti (Tabella 9) si evince che il feltro in fibra di poliestere calandrato (provino E3) ha una resistenza a trazione nettamente superiore rispetto agli altri provini, che presentano valori simili tra loro.

Feltro	Modulo di Young [N/m ²]	Snervamento [N/m ²]	Resistenza a trazione [N/m ²]	Resistenza a rottura [N/m ²]
E-1	7,0·10 ⁶	1,0·10 ⁶	1,1·10 ⁶	1,1·10 ⁶
I-2	1,4·10 ⁶	5,3·10 ⁵	5,6·10 ⁵	5,6·10 ⁵
E-3	2,6·10 ⁶	3,0·10 ⁶	5,0·10 ⁶	4,7·10 ⁶
I-4	2,5·10 ⁵	1,6·10 ⁶	1,9·10 ⁶	1,4·10 ⁶
E-5	5,8·10 ⁶	1,0·10 ⁶	1,1·10 ⁶	1,1·10 ⁶

Tabella 9 - Risultati della prova a trazione.

Le tensioni alle quali i provini di feltro esterno E1 ed E5 presentano deformazioni anche superiori al 20%, possono corrispondere alla forza esercitata dal peso proprio del substrato umido unito alla spinta dovuta allo sviluppo delle piante. Per tale motivo, essi si rivelano poco adatti al living wall.

La stima della conduttività idraulica K dei feltri ha permesso di valutare la facilità con cui un dato fluido può transitare attraverso gli spazi interstiziali del materiale poroso, ed è stata effettuata a partire dalla misura di resistività al flusso.

$$K = k \frac{\rho^* g}{\mu} \quad [\text{m/s}]$$

Eq. 10

Dove:

- k è la permeabilità intrinseca del mezzo poroso [m²],
- ρ è la densità del fluido [kg/m³],
- g è l'accelerazione di gravità [m/s²],
- μ è la viscosità dinamica del fluido [Pa*s].

Il calcolo di conduttività idraulica è stato elaborato utilizzando come fluido l'acqua, considerando una viscosità dinamica di 1,002 mPa*s e una densità di 1000 kg/m³.

La permeabilità intrinseca del feltro è stata determinata mediante la seguente relazione:

$$k = \frac{\mu_0}{r} \quad [\text{m}^2]$$

Eq. 11

Dove:

- r è la resistività al flusso d'aria [Pa*s/m²],
- μ_0 è la viscosità dinamica dell'aria [Pa*s].

I valori ottenuti sono riportati in Tabella 10.

Feltro	Resistività al flusso [kPasm⁻²]	Permeabilità [m²]	Conduttività idraulica [ms⁻¹]
E-1	14,7	$1,24 \cdot 10^{-9}$	$1,53 \cdot 10^{-2}$
I-2	74,4	$2,46 \cdot 10^{-10}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$
E-3	42,8	$4,27 \cdot 10^{-10}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$
I-4	25,4	$7,19 \cdot 10^{-10}$	$8,84 \cdot 10^{-3}$
E-5	26,6	$6,87 \cdot 10^{-10}$	$8,44 \cdot 10^{-3}$

Tabella 10 - Confronto tra i valori di resistività al flusso, permeabilità e conduttività idraulica.

La conduttività idraulica dei feltri che è stata calcolata corrisponde alla conduttività idraulica di un terreno composto da sabbia e ghiaia.¹⁷

Da un raffronto tra i valori di resistenza meccanica e quelli di conduttività idraulica è possibile concludere che il feltro E3 si dimostra il materiale più adatto tra quelli testati, ai fini della realizzazione di un living wall. Esso, infatti, ha un'ottima resistenza a trazione, pur garantendo alle piante una buona traspirabilità e una corretta conduttività idraulica.

¹⁷ I valori di riferimento della conduttività idraulica dei terreni sono tratti da V. Shevnin, O. Delgado-Rodríguez, A. Mousatov, A. Ryjov. *Estimation of hy-draulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data*, Geofísica Internacional 45 (3), 2006.

7.3 CARATTERIZZAZIONE AGRONOMICA

La caratterizzazione agronomica è stata eseguita grazie alla collaborazione del dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari dell'Università degli Studi di Torino.

In base un'analisi della letteratura, si è scelto di utilizzare il LAI quale parametro significativo.

In agronomia il LAI viene utilizzato per valutare la copertura delle colture e quindi indirettamente la biomassa prodotta. Esso esprime l'area di tessuto fogliare che insiste su una superficie data.

L'indice di area fogliare è stato adattato alla superficie verticale, considerando l'area di un modulo come unità di superficie attraverso la seguente equazione:

$$LAI_m = \frac{LA_m}{A_m} \quad [-]$$

Eq. 12

Dove:

- LAI_m è l'indice di area fogliare riferito a un modulo vegetato[-];
- LA_m è l'area fogliare totale delle sei piante cresciute su un modulo [mm^2];
- A_m è l'area del modulo [mm^2].

Il LAI_m è stato calcolato per le tre specie vegetali testate sul dimostratore e sui modelli insediativi: *lonicera nitida*, *bergenia cordifolia* ed *heuchera villosa* "palace purple".



Figura 75 - Misura del Leaf Area Index presso i laboratori del Dipartimento Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari dell'Università degli Studi di Torino.

CAPITOLO 7
CARATTERIZZAZIONE MECCANICA E AGRONOMICA

Dopo aver rimosso le foglie prodotte da ciascuna pianta del modulo, il 50% in peso delle foglie è stato scansionato. Le immagini ottenute sono state elaborate in modo da ottenere il numero di foglie e la loro superficie.

In Tabella 11 sono riportati i risultati delle analisi effettuate.

	FOGLIE/PIANTA	SUPERFICIE MEDIA DELLA FOGLIA [mm²]	LAI_m
<i>Lonicera nitida</i>	288	79	0,68
<i>Bergenia cordifolia</i>	11	6700	2,24
<i>Heuchera villosa</i>	37	1700	1,89

Tabella 11 - Leaf Area Index delle specie vegetali testate, calcolato considerando un pannello come unità di superficie.

CONCLUSIONI

CAPITOLO 8

La tecnologia dei living wall si sta diffondendo in misura sempre maggiore, soprattutto negli ultimi anni. Fino ad ora, essa è sempre stata considerata dai progettisti per il suo valore estetico e compositivo.

Alcuni studi presenti in letteratura hanno indagato le potenzialità tecnologiche ed energetiche dei living wall; si tratta di ricerche svolte per lo più nell'ultima decade, che si concentrano su aspetti specifici. All'attuale stato dell'arte, mancano approfondite e complete analisi trasversali che considerino il sistema tecnologico living wall nella sua complessità.

L'obiettivo della tesi è fornire una caratterizzazione fisico tecnica di un living wall tipo, tenendo in considerazione tutti gli aspetti che lo rendono un sistema complesso.

La ricerca è partita con la messa a punto di un sistema, sviluppato attraverso il progetto GRE_EN_S.

Partendo dallo studio delle questioni tecnologiche e agronomiche, relative al living wall, sono stati realizzati numerosi prototipi. Sono inoltre stati realizzati un dimostratore e un modello insediativo rivestiti con la tecnologia living wall.

Il lavoro di caratterizzazione fisico-tecnica è stato condotto sperimentalmente, sia per quanto riguarda le prestazioni termiche sia per quelle acustiche.

È stato necessario, dopo un'attenta analisi della letteratura, scegliere i parametri più significativi per la caratterizzazione e mettere a punto metodologie di misura e protocolli di monitoraggio adeguati al misurando.

I risultati ottenuti, se messi a sistema nell'ambito di una corretta progettazione del living wall, permettono l'ottimizzazione dell'intero pacchetto tecnologico nei suoi diversi aspetti.

8.1 PRINCIPALI RISULTATI DELLA RICERCA E SVILUPPI FUTURI

Si presentano di seguito i principali risultati ottenuti durante il lavoro di ricerca svolto.

Il substrato

Tra i substrati testati dal punto di vista agronomico e termico, quello a base di fibra di cocco offre le prestazioni migliori. Tuttavia, anche il substrato composto da una miscela 50% fibra di cocco e 50% feltrini si può considerare adatto al living wall. Dal punto di vista dell'assorbimento acustico, i due substrati non presentano differenze significative.

Le piante

La bergenia cordifolia, l'heuchera villosa e la lonicera nitida si adattano bene; tuttavia la lonicera nitida crea meno problemi meccanici grazie al suo portamento.

È invece da escludersi la luzula sylvatica, poiché non idonea alla crescita in verticale.

Le piante aromatiche possono costituire un'alternativa interessante ma occorre verificare che l'esposizione e il contesto climatico (molte sono sensibili ai climi freddi) permettano la loro sopravvivenza e il loro sviluppo.

La scelta della specie non influenza la prestazione termica in modo apprezzabile. Tuttavia, è importante garantire una copertura fogliare totale del pannello sia per motivi estetici, sia per motivi legati all'ombreggiamento della facciata.

Al fine di ottenere una buona performance energetica dell'involucro è, infatti, importante la presenza delle foglie: in estate esse diminuiscono la quantità di energia solare che raggiunge la facciata. In inverno, invece, riducono la velocità dell'aria sulla parete limitando le perdite di calore per convezione.

Il feltro

Il feltro in poliestere calandrato è risultato il materiale più adatto tra le varie tipologie prese in analisi per realizzare il pannello atto a contenere pianta e substrato.

Esso coniuga una buona resistenza meccanica e un corretto grado di traspirabilità e conduttività idraulica. Questi ultimi parametri sono indispensabili per la crescita della pianta.

La tipologia di feltro non è rilevante in modo significativo ai fini del comportamento energetico e acustico.

La performance energetica

Il living wall svolge importanti funzioni rispetto alla performance energetica globale dell'involucro.

La presenza delle piante permette un notevole contenimento delle temperature superficiali esterne, anche rispetto a materiali che non si surriscaldano in presenza di radiazione solare diretta (come il legno).

In estate, la temperatura superficiale esterna misurata sul living wall è sempre inferiore a quella dell'aria esterna.

Il contenimento del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva è anche dovuto all'irrigazione, il cui effetto "raffrescante" si protrae grazie all'azione d'idroretenzione svolta dal feltro e dai polimeri presenti nel substrato.

In regime estivo non si evidenziano particolari effetti di accumulo termico ascrivibili al living wall: il substrato presente, infatti, ha densità e spessori contenuti per esigenze strutturali.

In inverno l'ombreggiamento prodotto dalle foglie delle piante non permette di avere un irraggiamento diretto sulla facciata; pertanto la temperatura superficiale della facciata è minore rispetto alla temperatura dell'aria esterna. Tuttavia, durante la notte il living wall agisce come un buffer caldo limitando le dispersioni di calore verso l'esterno.

I flussi termici dall'interno verso l'esterno (dispersioni) sono sensibilmente ridotti grazie alla resistenza termica aggiuntiva data da intercapedine d'aria e pannello vegetato.

Performance acustica

Il living wall è caratterizzato da un coefficiente di assorbimento acustico molto elevato, soprattutto alle medie e alte frequenze.

Tale valore è dovuto principalmente alla presenza del substrato, che agisce come adattatore di impedenza.

Pur rimanendo una prestazione significativa ai fini dell'assorbimento del rumore dell'ambiente urbano, la necessità di irrigazione delle piante ha come conseguenza un peggioramento della prestazione acustica. La presenza delle piante può però migliorare la curva di assorbimento.

Indicazioni progettuali

Mettendo a sistema quanto emerso dal presente lavoro di ricerca, è possibile ricavare alcuni elementi tesi all'ottimizzazione di una tecnologia living wall.

Innanzitutto nella valutazione delle diverse essenze è raccomandabile analizzarne la necessità d'irrigazione. Quest'ultimo parametro influenza non solo il consumo di acqua e i costi legati a esso, ma anche la prestazione energetica e acustica. Se da un lato l'acqua concorre al raffrescamento estivo, essa determina un sensibile peggioramento della prestazione invernale, in quanto diminuisce la resistenza termica del pannello vegetato. La presenza di acqua nel substrato peggiora anche l'assorbimento acustico del living wall.

La scelta delle specie vegetali utilizzate nel living wall è quindi da considerarsi rilevante soprattutto in relazione al loro fabbisogno idrico.

L'intercapedine di aria che si viene a creare tra il living wall e la parete retrostante costituisce un elemento chiave che necessita di un'attenzione specifica. Se in inverno essa funziona come cuscinetto di aria calda, incrementando la resistenza termica totale dell'involucro e limitando le dispersioni di calore, tale effetto è da evitarsi durante la stagione estiva. È quindi importante prevedere la possibilità di ventilare l'intercapedine durante i mesi più caldi.

Il calcolo della trasmittanza termica dell'intero involucro opaco risulta particolarmente problematico. La difficoltà principale è legata alla resistenza termica del pannello vegetato, difficilmente esprimibile in modo univoco a causa dell'estrema variabilità di alcuni elementi: la quantità d'acqua presente, lo spessore e la densità del substrato, e lo spessore e la densità delle foglie, variano nel tempo in modo non lineare.

Inoltre, in corrispondenza della giunzione dei telai dei pannelli si verificano ponti termici, la cui presenza non può essere ignorata. È possibile tuttavia approssimare per difetto la resistenza termica totale della parete considerando tutti gli strati fino all'intercapedine d'aria inclusa.

Tale condizione cautelativa (worst case analysis) non considera la resistenza termica del pannello vegetato, poiché elemento non modellizzabile in modo accurato.

Sviluppi futuri

Partendo dai risultati ottenuti, è possibile delineare futuri sviluppi della ricerca. L'indagine sperimentale può essere ampliata a un maggior numero di specie vegetali, approfondendo la diversa prestazione acustica sul provino bagnato in relazione alle differenti tipologie di foglie e al loro indice di area fogliare (LAI).

Analogamente, è possibile analizzare altre miscele di substrato, includendo nella sperimentazione anche i substrati inorganici e verificandone le prestazioni sia energetiche che acustiche.

La principale criticità dei living wall, che ad oggi ne ostacola una piena diffusione, è legata ai costi di installazione e manutenzione del sistema. A fronte delle ottime potenzialità energetiche e acustiche è auspicabile un ripensamento della filiera produttiva (il progetto GRE_EN_S è infatti andato in questa direzione) e un'ottimizzazione tecnologica che permetta di ridurre almeno i costi iniziali.

BIBLIOGRAFIA

ARTICOLI E PROCEEDINGS

- [1] V. Serra, E. Candelari, R. Giordano. *Vertical Greening Systems as a strategy to mitigate Urban Heat Island: results from an experimental campaign*. In: 3rd International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, Venezia 13-15/10/2014.
- [2] V. Serra, E. Candelari, A. Schiavi, P. Tarizzo, F. Larcher. *Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e acustiche di pareti verdi di tipo modulare*. In: 41° Convegno Nazionale Associazione Italiana di Acustica (AIA), Pisa 17-19/06/2014.
- [3] G. Perez, L. Rincon, A. Vila, J.M. Gonzalez, L.F. Cabeza. *Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39: 139-165, 2014.
- [4] T. Safikhani, A.M. Abdullah, D.R. Ossen, M. Baharvand. *A review of energy characteristic of vertical greenery systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 450-462, 2014.
- [5] H. Feng, K. Hewage. *Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance*. *Journal of Cleaner Production*, 69: 91-99, 2014.
- [6] M. Scarpa, U. Mazzali, F. Peron. *Modeling the Energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate*. *Energy and Buildings*, 79: 155-163, 2014.
- [7] E. Candelari, P. Tarizzo, V. Serra, A. Schiavi, F. Russo. *Acoustic performance of a Green Modular System*. In: AIA-DAGA 2013 Proceedings, Merano, 19-21/03/2013, pp. 746-749.

- [8] H.S. Yang, J. Kang, C. Cheal. *Random-incidence absorption and scattering coefficients of vegetation*. Acta Acustica united with Acustica, 99 (3): pp. 379–388, 2013.
- [9] I. Susorova, M. Angulo, P. Bahrami, B. Stephens. *A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance*. Building and Environment, 67: 1-13, 2013.
- [10] K.V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira. *Acoustic properties of low growing plants*. Journal of the Acoustical Society of America, 133(5): 2554-2565, 2013.
- [11] T. Koyama, M. Yoshinagab, H. Hayashic, K. Maedad, A. Yamauchia. *Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls*. Building and Environment, 66: 96-103, 2013.
- [12] U. Mazzali, F. Peron, P. Romagnoni, R.M. Pulselli, S. Bastianoni. *Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate*. Building and Environment, 64: 57-66, 2013.
- [13] Q. Chen, B. Li, X. Liu. *An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate*. Energy and Buildings, 61: 298-307, 2013.
- [14] T. Van Renterghem, M. Hornikxb, J. Forssenc, D. Botteldooren. *The potential of building envelope greening to achieve quietness*. Building and Environment, 61: 33-34, 2013.
- [15] K. Perini, M. Ottel , A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri. *Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope*. Building and Environment, 46: 2287-2294, 2013.
- [16] K.V. Horoshenkov, A. Khan, H. Benkreira. *Acoustic properties of low growing plants*. The Journal of the Acoustical Society of America, 133 (5):2554-2565, 2013.
- [17] C. Chiquet, J.W. Dover, P. Mitchell. *Birds and the urban environment: The value of green walls*. Urban Ecosystems, 16(3): 453-462, 2013.
- [18] R. Giordano, E. Montacchini, S. Tedesco. *Life Cycle Approach to design, manufacturing and assessing a Living Wall System*. Techne – Journal of Technology for Architecture and Environment, 5: 184-190, 2013.
- [19] R. Fernández-Ca ero, L.P. Urrestarazu, A. Franco Salas. *Assessment of the cooling potential of an indoor living wall using different substrates in a warm climate*. Indoor and Built Environment, 21(5):642-650, 2012.

- [20] A. Franco, R. Fernández-Cañero, L. Pérez-Urrestarazu, D.L. Valera. *Wind tunnel analysis of artificial substrates used in active living walls for indoor environment conditioning in Mediterranean buildings*. Building and Environment, 51: 370-378, 2012.
- [21] M. Urrestarazu, S. Burés. *Sustainable green walls in architecture*. Journal of Food, Agriculture and Environment, 10(1): 792-794, 2012.
- [22] L. Bianco, V. Serra, F. Larcher, M. Perino. *Experimental assessment of a green wall modular system: effects on heat transfer and internal surface temperature control*. In: 5th International Building Physics Conference (IBPC 2012), Kyoto (Giappone), 28-31/05/2012, pp. 417-423, 2012.
- [23] G. Perez, L. Rincon, A. Vila, J.M. Gonzalez, L.F. Cabeza. *Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings*. Applied Energy, 88(12): 4854-4859, 2011.
- [24] R.A. Francis, J. Lorimer. *Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls*. Journal of Environment Management, 92: 1429-1437, 2011.
- [25] M. Ottel , K. Perini, A.L.A. Fraaij, E.M. Haasa, R. Raiteri. *Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems*. Energy and Buildings, 43: 3419-3429, 2011.
- [26] G. Perez, L. Rincon, A. Vila, G.M. Gonzalez, L.F. Cabeza. *Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate*. Energy Conversion and Management, 52(4):1861-1867, 2011.
- [27] M. Ottel , H.D. van Bohemen, A.L.A. Fraaij. *Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls*. Ecological Engineering, 36(2): 154-162, 2010.
- [28] C.Y. Cheng, K.K.S. Cheung, L.M. Chua. *Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls*. Building and Environment, 45: 1779-1787, 2010.
- [29] K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou. *The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone*. Building and Environment, 45: 1287-1303, 2010.
- [30] N.H. Wong, A.Y.K. Tan, Y. Chen, K. Sekar, P.Y. Tan, D. Chan, K. Chiang, N.C. Wong. *Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls*. Building and Environment, 45: 663-372, 2010.

- [31] N.H. Wong, A.Y.K. Tan, P.Y. Tan, K. Chiang, N.C. Wong. *Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls*. Building and Environment, 45: 411-420, 2010.
- [32] K. Ip, M. Lan, A. Miller. *Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy*. Building and Environment, 45:81-88, 2010.
- [33] A. Onishi, X. Cao, T. Ito, F. Shi, H. Imura. *Evaluating the potential for urban heatisland mitigation by greening parking lots*. Urban Forestry and Urban Greening, 9:323-332, 2010.
- [34] E.A. Eumorfopoulou, K.J. Kontoleon. *Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behavior of building envelopes*. Building and Environment, 44: 1024-1038, 2009.
- [35] N.H. Wong, A.Y.K. Tan, P.Y. Tan, N.C. Wong. *Energy simulation of vertical greenery systems*. Energy and Buildings 41: 1401-1408, 2009.
- [36] S.P. Corgnati, F. Ariaudo, G.V. Fracastoro, D. Raimondo. *Verde verticale, abbattimento dei carichi termici estivi e valutazione dei risparmi energetici derivanti*. NEMETON, 1: 87-89, 2009.
- [37] F. Ariaudo, S.P. Corgnati, G.V. Fracastoro, D. Raimondo. *Verso un edificio con pelle verde - Il ruolo del verde nel controllo microclimatico*. Casa & Clima, 4: 66-72, 2009.
- [38] S.P. Corgnati, G.V. Fracastoro, D. Raimondo, F. Ariaudo. *Cooling load reduction by green walls: results from an experimental campaign*. In: The 4th International Building Physics Conference, Istanbul, 15-18 June 2009. pp. 169-175, 2009.
- [39] M. Koeler. *Green façades – a view back and some visions*. Urban Ecosystems, 11(4): 423-436, 2008.
- [40] E. Alexandri, P. Jones. *Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates*. Building and Environment, 43: 480-493, 2008.
- [41] F. Ariaudo, G.V. Fracastoro. *Il verde parietale come elemento di controllo dei carichi termici*. Il Progetto Sostenibile, 15: 56-65, 2007.
- [42] Shevnin, O. Delgado-Rodríguez A., Mousatov, A. Ryjov. *Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data*, Geofísica Internacional 45 (3), 2006.

- [43] Brèda N.J.J., *Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies*, J. Experimental Botany, 54 (392): 2403-2417, 2003.
- [44] G. Papadakis, P. Tsamis, S. Kyritsis. *An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings*. Energy and Buildings, 33: 831-836, 2001.
- [45] B.L. Ong, G.T. Lim, Y. Chen. *A survey of the thermal effect of plants on the vertical sides of tall buildings in Singapore*. In: Proceedings of 17th international conference on passive and low energy architecture. PLEA 2000, Cambridge, UK, p.p. 495-500, 2000.
- [46] A.H. Rosenfeld, H. Akbari, J.J. Romm, M. Pomerantz. *Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction*. Energy and Building, 28: 51-62, 1998.
- [47] F. Wilmers. *Effects of vegetation on urban climate and buildings*. Energy and Buildings, 15:507-514, 1990.
- [48] Y. Miki. *Acoustic properties of porous materials. Generalisation of empirical models*. The Journal of Acoustical Society of Japan, 11: 25-28, 1990.
- [49] A. Hoyano. *Climatological uses of plants for solar control on the effects on the thermal environment of a building*. Energy and Buildings, 11: 181-189, 1988.
- [50] J.Y. Chung, D.A. Blaser. *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory*. The Journal of the Acoustical Society of America, 68: 907-913, 1980.
- [51] J.Y. Chung, D.A. Blaser. *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment*. The Journal of the Acoustical Society of America, 68: 914-921, 1980.

MONOGRAFIE

- [52] K. Perini. *Progettare il verde in città. Una strategia per l'architettura sostenibile*. Franco Angeli Edizioni, ebook, 2013.
- [53] E. Bit. *Il nuovo verde verticale: tecnologie, progetti, linee guida*. Wolter Kluwers, Assago (IT) 2012.
- [54] G. Hopkins, C. Goodwin. *Living architecture. Green roofs and walls*. CSIRO, Collingwood (AUS) 2011.
- [55] M. Corrado. *Il verde verticale*. Sistemi Editoriali, Napoli 2010.
- [56] O.E. Bellini, L. Daglio. *Verde verticale. Aspetti figurativi, ragioni funzionali e soluzioni tecniche nella realizzazione di living walls e green façades*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna (IT) 2009.
- [57] N. Dunnett, N. Kingsbury. *Planting green roofs and living walls*. Timber Press, Portland (USA) 2008.
- [58] V. Tatano (a cura di). *Verde: naturalizzare in verticale*. Maggioli, Santarcangelo di Romagna (IT) 2008.
- [59] J. Newton, D. Gedge, P. Early, S. Wilson. *Building greener – guidance on the use of green roofs, green walls and complementary features on buildings*. Ciria, London (UK) 2007.
- [60] Bellomo. *Pareti verdi. Nuove tecniche*. Sistemi editoriali, Napoli (IT) 2009. Edizione originale: 2003.
- [61] J. Johnston, J. Newton. *Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements*. London Ecology Unit, London (UK) 1993.

TESI

- [62] E. Bit. *La vegetazione per le chiusure verticali. Il percorso evolutivo del verde parietale quale elemento di rinaturalizzazione urbana e dispositivo tecnologico passivo per il controllo del microclima ambientale*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Tutor G. Zannoni. Università degli Studi di Ferrara, Dottorato in Tecnologia dell'Architettura, XXIII ciclo, 2000.
- [63] M. Ottelé. *The Green Building Envelope. Vertical greening*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Tutor E.M. Haas, H.D. van Bohemen. Delft University of Technology, 2011.

- [64] F. Ariaudo. *Il verde parietale e i suoi aspetti architettonici e fisico-tecnici. Esempio di applicazione alla Cascina San Luigi di Stupinigi*. Tesi di Laurea, Rel. E. Tamagno, G.V. Fracastoro, G. Pistone. Politecnico di Torino, II Facoltà di Architettura, Corso di Laurea Specialistica in Architettura (Costruzione), 2006.
- [65] D. Raimondo. *Pareti Verdi: qualcosa in più oltre il fattore estetico. Esempi architettonici, tecniche costruttive e comportamento fisico-tecnico*. Tesi di Laurea, Rel. S. P. Corgnati, M. Robiglio. Politecnico di Torino, II Facoltà di Architettura, Corso di Laurea Specialistica in Architettura (Costruzione), 2008.

NORMATIVA

- [66] EN ISO 6946: 2008 *Thermal resistance and thermal transmittance*.
- [67] UNI EN ISO 13790: 2008. *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*.
- [68] ISO 354: 2003. *Acoustics, Measurement of sound absorption in a reverberation room*.
- [69] EN ISO 10534-2: 1998, *Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tube. Part 2: Transfer function method*.
- [70] UNI EN ISO 6946: 1999. *Componenti ed elementi per edilizia Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo*.
- [71] EN 1793-3: 1997. *Road traffic noise reducing devices – Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum*.
- [72] EN 12494: 1996. *Building components and elements – In situ measurement of the thermal resistance and thermal transmittance*.
- [73] DM 26 gennaio 2010. *Aggiornamento del decreto 11 marzo 2008 in materia di riqualificazione energetica degli edifici*.
- [74] DPCM 5 dicembre 1997. *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*.