



Università degli Studi di Ferrara

DOTTORATO DI RICERCA IN "TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA"

CICLO XXIII

COORDINATORE Prof. Graziano Trippa

UN SUOLO ARTIFICIALE: IL RUOLO DELL'ACQUA NELLA PROGETTAZIONE DELLA COPERTURA A VERDE

Implicazioni tecnologiche e verifica sperimentale

Settore Scientifico Disciplinare Icar/12

Dottorando
Dott. Giacomello Elena

Tutore
Prof. Zannoni Giovanni

Anni 2008/2010

Indice

INTRODUZIONE	9
PRIMO CAPITOLO	
LE PRESTAZIONI DELLA COPERTURA A VERDE.....	15
I.1 Le attività organiche della vegetazione come funzioni tecnologiche.....	17
I.2 Il rapporto sinergico fra vegetazione e costruzione.....	20
I.3 Un suolo in quota: trasferire un sistema vegetale a un sistema edilizio	34
The High Line - New York.....	44
I.4 Un sistema umido: la presenza dell'acqua nell'elemento tecnico di copertura a verde	50
Museo di Pitagora - Crotone.....	54
I.5 Il comportamento termico della copertura a verde: effetti sull'ambiente interno confinato	58
Azienda vinicola Manincor - Caldaro (Bolzano).....	68
I.6 Il comportamento termico della copertura a verde: effetti sull'ambiente esterno immediato	76
SECONDO CAPITOLO	
CONCEZIONE E PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DELLA COPERTURA A VERDE	83
II.1 Riprodurre un ecosistema	84
II.2 L'elemento di confine fra il sistema organico e il sistema inerte.....	90
Padiglione della Svizzera - Expo di Shanghai.....	92
II.3 L'influenza della configurazione geometrica della copertura sul sistema a verde	98
Complesso commerciale Meydan - Istanbul.....	104
II.4 Il sistema di classificazione: inverdimento estensivo e intensivo	108
Campus universitario femminile Ewha - Seoul.....	112
II.5 L'importanza dei fattori di carico nella definizione del pacchetto tecnologico	118

TERZO CAPITOLO

SCELTE TECNOLOGICHE ED EFFICIENZA DEL SISTEMA DI COPERTURA A VERDE	121
III.1 Funzioni, componenti e materiali della copertura a verde.....	122
III.2 Il rapporto fra le scelte tecnologiche e il contesto climatico di riferimento	148
Villa Aloni - Isola di Antiparos.....	156
III.3 Criticità costruttive.....	160
PAV - Padiglione d'Arte Vivente - Torino.....	166
III.4 Il ruolo della manutenzione.....	172

QUARTO CAPITOLO

LA COPERTURA A VERDE COME STRUMENTO DI GESTIONE DELL'ACQUA IN AMBIENTE ANTROPICO.....	175
IV.1 L'alterazione del ciclo dell'acqua nelle città: cause ed effetti.....	177
IV.2 L'importanza di regimentare l'acqua negli ambienti urbani: le opportunità della copertura a verde.....	187
IV.3 La permeabilità della copertura a verde: il ruolo chiave dello strato di coltivo.....	196
Accademia della California delle Scienze - San Francisco.....	206
IV.4 La variazione delle prestazioni idriche in relazione alle differenti tecnologie	214

QUINTO CAPITOLO

LA REAZIONE DELLA COPERTURA A VERDE ALL'ACQUA METEORICA: UN CASO SPERIMENTALE.....	219
V.1 Verifica del comportamento idrico: premesse e scopo dell'esperimento.....	220
V.2 Descrizione della strumentazione: la camera della pioggia.....	221
V.3 I dati in ingresso: il clima padano-veneto	229
V.4 Fasi e sessioni dell'esperimento.....	235
V.5 I dati in uscita: analisi e confronto dei risultati.....	239
V.6 Ipotesi di conversione delle superfici di copertura e uso del suolo della città di Vicenza.....	246

CONCLUSIONI.....	259
------------------	-----

BIBLIOGRAFIA.....	269
-------------------	-----

Introduzione

Il ricorso alle tecnologie di copertura a verde, recentemente tornate oggetto di un forte interesse nel settore edilizio, deve essere posto in relazione a una sostanziale trasformazione culturale avvenuta nell'ambito dello sviluppo di una coscienza sostenibile nel settore delle costruzioni: il rapporto tra architettura e paesaggio, tra artificio e natura, tra manufatto e suolo è divenuto in molti casi un fattore rilevante nella valutazione della compatibilità ambientale di alcuni interventi edilizi, mentre in altri si è tradotto in una vera e propria strategia di compensazione.

Se si allontana il concetto di copertura o di involucro a verde dalla dimensione sostenibile che pervade buona parte dei progetti contemporanei, pur con tutti i distinguo del caso, e lo si avvicina agli usi e agli esempi storici che si possono riscontrare nelle diverse epoche, ci si rende facilmente conto che una superficie inverdita collocata intenzionalmente su un edificio era nella maggior parte dei casi l'espressione di un forte intento qualitativo. Le ragioni erano legate alla rappresentanza, alla forma, alla sorpresa generate dall'artificio e non direttamente correlate a una serie di vantaggi ambientali come invece avviene attualmente. Tuttavia, comune a ogni epoca è l'artificialità dell'atto di riprodurre, imitandone le caratteristiche ecologiche, un suolo naturale.

La tecnologia indagata in questo percorso di ricerca rappresenta l'artificio, il mezzo con il quale conseguire la realizzazione di un "suolo artificiale": una tecnologia ovviamente basata su regole proprie delle discipline tecniche, ma anche su elementi del tutto estranei ad esse e governati dalla ciclicità dei processi biologici che richiedono altri approcci e altri strumenti per essere compresi e integrati in un'analisi tecnologica propriamente detta.

Dal punto di vista metodologico la ricerca si avvale perciò di una serie di conoscenze provenienti da altri settori, come l'agronomia, l'idrogeologia e la pedologia per indagare la natura ibrida di un sistema che associa materia inerte - "inorganica", tipica del settore edilizio - e materia viva - organica, propria di un ecosistema. Il taglio che la ricerca persegue è pertanto quello di cercare sempre la relazione che si instaura tra l'elemento tecnico e ciò

METODOLOGIA

che, almeno apparentemente, è estraneo alla tecnica e più vicino al ciclo ecosistemico. L'obiettivo di una simile modalità di lettura è essenzialmente quello di cogliere le eventuali opportunità che si celano in un sistema che, sebbene normato e conosciuto, presenta proprio in virtù di una componente viva alcuni margini di adattamento in ragione delle condizioni al contorno in cui si trova ad operare.

L'interdisciplinarietà è perciò alla base dell'approccio analitico adottato e sviluppato su due distinti livelli. Uno di carattere induttivo per quanto attiene alle questioni inerenti lo studio delle soluzioni tecnologiche e del funzionamento complessivo dell'elemento tecnico. L'altro di carattere deduttivo per quanto riguarda invece la verifica sperimentale condotta secondo una progressione di azioni e verifiche quanto più aderente al metodo scientifico sperimentale.

Al fine di ottenere una riflessione trasversale sul tema, la ricerca è stata strutturata per livelli di approfondimento successivi mediante un doppio salto di scala: dalle caratteristiche generali al particolare della stratigrafia costruttiva, per poi tornare a una valutazione complessiva riguardante le ricadute dall'applicazione della copertura a verde sul tessuto edilizio. Indispensabile in questa struttura logica si è rivelata la scomposizione del sistema in tutti i suoi principali elementi costitutivi. Nella logica sistemica ogni elemento presuppone il suo livello di autonomia, pur nella stretta relazione che si rende necessaria componendo la stratigrafia. Il sistema di copertura stesso - di qualunque tipo esso sia - presenta, al contempo, un certo livello di autonomia rispetto al sistema edilizio inteso come la fabbrica nella sua interezza: la copertura esiste infatti a prescindere dallo spazio interno tanto che essa può anche delimitare e proteggere uno spazio aperto. Dunque il principale tratto distintivo della copertura è quello di opporsi agli eventi meteorici per proteggere ciò che sotto di essa si svolge e di conseguenza la sua natura è quella di essere concepita per smaltire quanto più rapidamente possibile l'acqua e garantire la totale impermeabilità. La copertura a verde tende a sovvertire questa logica in quanto nella sua concezione è insita la necessità di trattenere l'acqua. Acqua che diviene al tempo stesso un "componente indispensabile", seppur mai dichiarato, della sua stratigrafia. La presenza della vegetazione, inoltre, cambia notevolmente le regole e impone attenzioni progettuali di notevole complessità con l'obiettivo di riprodurre quelle condizioni che permettono la vita in un suolo naturale. Oltre a garantire la sopravvivenza della vegetazione l'acqua contenuta nella stratigrafia diviene determinante anche nel dare luogo a una serie di fenomeni fisici che possono influenzare le condizioni ambientali dell'ambiente interno confinato. Ciò pone una serie di problematiche legate alla verifica di condizioni interne generate da eventi che si svolgono negli strati più esterni. Pertanto, a livello progettuale, è necessario un continuo passaggio di scala tra la parte e il tutto, tra il componente e il sistema per riuscire a tenere sotto controllo il comportamento della soluzione tecnologica nella sua complessità.

I principali obiettivi posti alla ricerca sono sintetizzabili come segue:

1. rilevare le “caratteristiche tecniche” dei componenti vegetali pertinenti alla definizione delle prestazioni del sistema di copertura a verde;
2. descrivere le prestazioni derivanti dall’aderenza della vegetazione a un involucro edilizio attraverso una documentata produzione scientifica, al fine di stabilire le relazioni che intercorrono specificatamente fra la copertura a verde e alternativamente il sistema ambientale interno e il sistema ambientale esterno;
3. indagare e descrivere le specificità progettuali del sistema tecnologico dando evidenza alle relazioni che si instaurano fra componenti inerti e componenti organici, rilevando i limiti di applicazione e le criticità costruttive;
4. analizzare la proprietà di assorbimento dell’acqua operata dalla copertura a verde e fornire scenari di progettazione integrata per la regimazione idrica dei suoli costruiti.

La ricerca è stata svolta escludendo dalla trattazione alcuni ambiti conoscitivi attigui all’argomento:

1. le competenze botaniche sono state strettamente circoscritte. Per quanto riguarda lo strato di vegetazione sono stati trattati i principali comportamenti utili a descrivere l’applicabilità delle specie vegetali al clima mediterraneo e le caratteristiche geometriche degli apparati fogliari (densità e altezza fogliare);
2. le analisi sperimentali hanno riguardato esclusivamente sistemi la cui stratigrafia rispondesse a quanto prescritto dalla normativa (nazionale/europea);
3. per quanto riguarda l’applicazione sperimentale, lo studio della regimazione idrica operata da una copertura a verde è stata contestualizzata all’area climatica padano-veneta, che presenta un certo regime pluviometrico fra i tanti del clima mediterraneo.

Nel primo capitolo sono indagate, a partire dalla documentazione presente nella letteratura scientifica, le principali prestazioni legate al comportamento fisiologico della vegetazione offerte dal sistema in chiave di capacità termiche e controllo delle caratteristiche ambientali. Ciascuna di esse è approfondita e analizzata in relazione alla composizione della stratigrafia e del progetto tecnologico della copertura.

Nel secondo capitolo viene affrontata la progettazione del “sistema a verde” a partire dalle sue caratteristiche intrinseche di ecosistema artificiale per arrivare ad esplicitare la concezione contemporanea di questa tecnologia, andando ad evidenziare le principali ricadute sul manufatto architettonico alla scala edilizia.

Nel terzo capitolo è effettuata una scomposizione degli elementi costitutivi della stratigrafia al fine di evidenziarne il funzionamento. Sono altresì valutati i limiti costruttivi e applicativi della copertura a verde in relazione ai fattori climatici di riferimento.

Il quarto capitolo mette in luce il ruolo strategico del substrato di coltivo per il funzionamento della tecnologia e il rapporto con quello che può essere definito il “componente invisibile” della stratigrafia e cioè l’acqua. Da qui si attua un passaggio di scala e si sviluppano tutti i ragionamenti intorno alle possibilità di mitigazione e controllo delle temperature alla scala urbana, nonché le valutazioni circa la gestione dei deflussi idrici che conseguono alle precipitazioni meteoriche.

Sulla base delle valutazioni e delle analisi esplicitate, nel quinto capitolo viene descritta la verifica sperimentale, vengono analizzati i dati ottenuti e ipotizzata una simulazione di comportamento in un contesto reale. Le prove sono finalizzate a indagare i vantaggi in termini di riduzione e di ritardo del conferimento dell’acqua in eccesso.

Nel corso della trattazione le varie tematiche vengono affrontate anche dal punto di vista applicativo esaminando alcuni progetti di rilievo che offrono interessanti spunti di riflessione riguardo le molte opportunità morfologiche di questa tecnologia. Una tecnologia che ricreando un suolo artificiale suggerisce nuove forme di relazione tra architettura e paesaggio.



Primo capitolo

Le prestazioni della copertura a verde

Un involucro architettonico e in particolare una copertura è per definizione un elemento preposto alla protezione e alla difesa dell'ambiente interno. La complessità del sistema di copertura è data non solo dall'articolazione degli strati che la costituiscono e da fattori geometrici, ma anche e soprattutto da una serie di requisiti a cui deve rispondere attraverso prestazioni di diversa natura.

La possibilità di rivestire una copertura con uno strato vegetale modifica in modo sostanziale non solo la natura della stratigrafia del pacchetto tecnologico, ma anche le prestazioni della stessa: essa può così giovare di una serie di comportamenti propri dei vegetali, quali la capacità di auto-regolazione in dipendenza dalle variazioni climatiche e dalle diverse sollecitazioni degli agenti atmosferici, che lo trasformano in un'interfaccia attiva nei confronti dell'ambiente esterno. La presenza della vegetazione introduce un insieme di variabili tipiche di un sistema organico, che, essendo vivo, è tendenzialmente mutevole e adattabile. Le piante infatti sono caratterizzate da una fisiologia che include tutte quelle attività in grado di assicurare la sopravvivenza dell'organismo e che hanno come effetto principale il miglioramento della qualità dell'aria: in prossimità di una superficie inverdita si possono rilevare alcuni effetti positivi come la variazione dell'umidità relativa, il condizionamento dei moti dell'aria, l'incremento delle concentrazioni di ossigeno e vari altri.

La sola presenza della vegetazione, intesa come componente integrato di un sistema tecnologico, conferisce quindi alla chiusura di un edificio un "valore ecologico intrinseco" dato dalle attività fisiologiche vegetali capaci di contrastare a livello microclimatico alcuni degli effetti negativi della densificazione urbana.

Inoltre la copertura a verde, che per molti versi riproduce un vero e proprio suolo naturale, apporta all'elemento tecnico numerosi vantaggi: le piante che vi crescono, unitamente al substrato di coltivo atto ad alloggiarle, contribuiscono significativamente a incrementare le prestazioni termiche e l'isolamento acustico della copertura, proteggono l'elemento di tenuta

dalle azioni meccaniche e dalle escursioni termiche, offrono una possibilità fruitiva dell'estradosso del tutto singolare. In aggiunta a questi benefici la copertura a verde, analogamente al suolo, è capace di trattenere l'acqua durante e dopo gli eventi meteorici operando una regimentazione dei deflussi idrici alle reti di drenaggio urbano.

Dei vari benefici connessi all'adozione del verde pensile orizzontale alcuni sono particolarmente significativi per la valorizzazione del progetto d'architettura, tanto da un punto di vista prestazionale quanto da un punto di vista funzionale e formale.

I.1

Le attività organiche della vegetazione come funzioni tecnologiche

Nella stratigrafia di un involucro a verde, sia nel caso di coperture che di pareti, le piante rappresentano un elemento estraneo a tutti gli altri componenti edilizi a causa della loro natura non solo organica ma anche vivente.

La parola “organico” riferita alla materia o a un materiale identifica una sostanza derivante da un organismo vivente o un prodotto stesso del suo deperimento. Infatti l’impiego di un materiale organico, in architettura quasi totalmente confinato all’uso del legno e dei suoi prodotti derivati, implica un’attenzione alle caratteristiche del materiale che tenga in considerazione la sua deperibilità: per esempio il legno, collocato in ambiente esterno, viene facilmente intaccato dagli agenti atmosferici, e si rende pertanto necessario applicare dei trattamenti protettivi o accettarne una rapida obsolescenza.

Nel caso della copertura a verde il cosiddetto strato di vegetazione individua l’intera popolazione vegetale che abbia occupato la superficie della copertura e ciascuna pianta che ne faccia parte può essere considerata un singolo componente di questo strato funzionale. In quanto insieme di singoli “componenti-pianta”, lo strato vegetale è uno strato vivo, caratterizzato nel suo insieme da un comportamento variabile: le piante nascono, crescono, si riproducono e muoiono, ma soprattutto interagiscono con l’ambiente in modo attivo, muovendosi e instaurando rapporti con altri esseri viventi. Per queste ragioni la vegetazione rappresenta lo “strato sensibile” del sistema, sia nel significato di “dotato di senso” in quanto vivente e predisposto a ricevere stimoli dall’ambiente esterno e a modificarsi, sia nell’accezione di “debole”, poichè capace di un’adattabilità limitata al contesto di progetto in dipendenza dalla propria fisiologia: la sua vitalità rende quindi lo strato di vegetazione uno strato atipico, che richiede al progetto tecnologico dell’involucro una stratigrafia sofisticata, finalizzata a garantire la continuità dei processi vitali.

La figura I.1 espone schematicamente la differenza fra un componente di un materiale organico tradizionale, in questo caso un listello di legno, e un “componente-pianta” dello strato di vegetazione: entrambi sono carat-

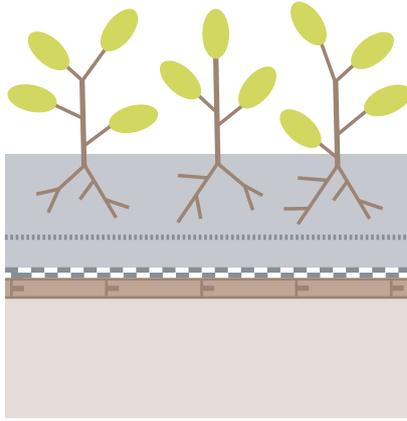
terizzati da una deteriorabilità maggiore rispetto ai materiali edilizi di natura inorganica. Tuttavia, mentre la progressione che porta un albero a divenire uno strato di supporto di legno passa attraverso processi di trasformazione che alterano, potenziandole, le qualità fisiche e chimiche della materia prima, e ne adattano le forme a seconda della funzione che deve svolgere, le piante che costituiscono lo strato di vegetazione sono impiegate in quanto tali. La vegetazione, potendo subire limitati processi di artificializzazione, rappresenta quindi una sorta di “componente primitivo”, le cui prestazioni sono in larga parte costituite dai prodotti stessi della sua attività organica. In questo senso la vegetazione, intesa come parte integrante di un sistema tecnologico, attribuisce all’elemento tecnico di copertura tutte quelle attività che essa svolge normalmente vivendo: così, per sineddoche, una copertura a verde “produce” ossigeno, “assimila” anidride carbonica, “sottrae” calore, “usa” la radiazione solare, “trattiene” le polveri sottili e così via. In contrapposizione a qualsiasi altro tipo di elemento edilizio la copertura a verde è quindi un elemento tecnico “attivo”, in virtù dell’appropriazione di quelle attività fisiologiche del suo strato funzionale di vegetazione.

Da un punto di vista dell’analisi delle prestazioni se da un lato è evidente come tutte queste attività siano dei guadagni effettivi, strettamente caratteristici di una tecnologia di involucro a verde, dall’altro tali guadagni sono da considerarsi intrinseci, nel senso che una superficie di copertura a verde svolge un’attività primaria (intendendo per “attività primaria” la produzione di ossigeno, la fissazione del carbonio, l’assorbimento delle polveri sottili e tutti gli effetti generati dagli organismi autotrofi) pari a quella di una superficie di copertura su cui siano appoggiate delle piante, o a quella di una facciata a verde o a quella di un prato: ovunque cresca della vegetazione, lì si verificano delle “alterazioni” microclimatiche.

Figura I.1: Differenze fra un componente organico “vivo” e uno “inerte”

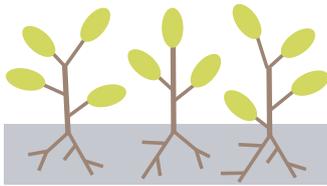
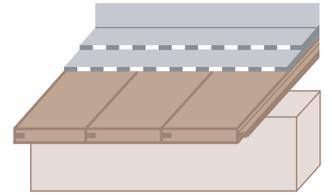
Lo schema mette a confronto i processi che portano alla realizzazione dello strato di vegetazione e dello strato di supporto ligneo. Nel caso di un componente edilizio tradizionale, la possibilità di ottenere determinate prestazioni dalla materia prima di cui è costituito è frutto di una serie di adattamenti tecnologici che ne trasformano la natura originaria.

SISTEMA TECNOLOGICO
copertura a verde



STRATO FUNZIONALE

strato di vegetazione strato di supporto



FUNZIONI ORGANICHE



COMPONENTE = MATERIA PRIMA



MATERIALE = MATERIA PRIMA



COLTIVAZIONE

CONSERVAZIONE DELLO STATO VITALE

COMPONENTE

pianta

listello

MATERIALE

pianta

legno multistrato

MATERIA PRIMA

pianta

legno

ARTIFICIALIZZAZIONE

ADEMPIMENTO DI UNA FUNZIONE



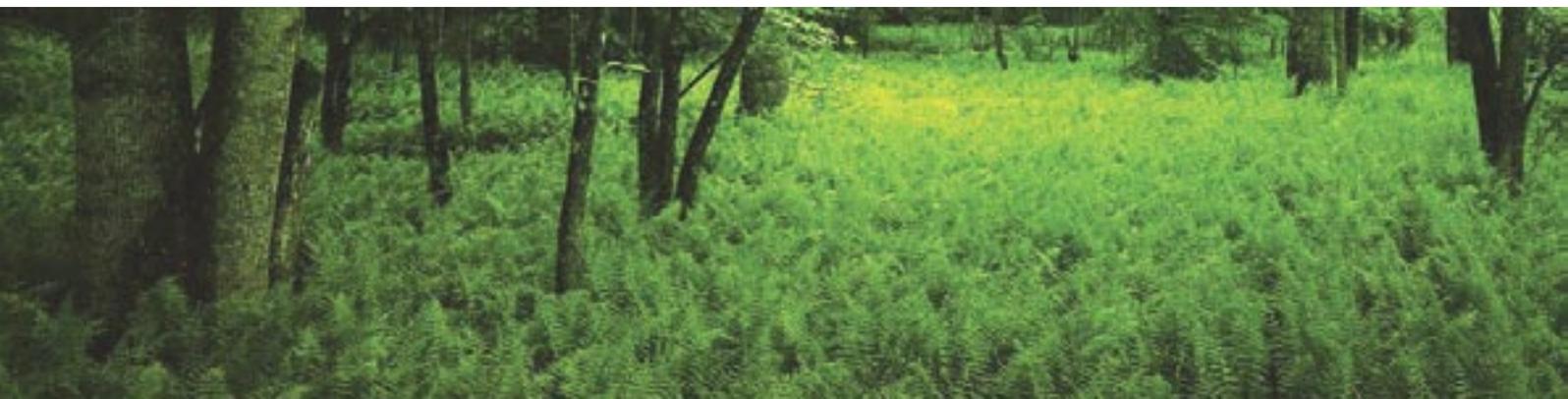
PROGETTAZIONE DELLA FORMA



ALTERAZIONE DELLA STRUTTURA
CHIMICO-FISICA



ESTRAZIONE



I.2 Il rapporto sinergico fra vegetazione e costruzione

Nel momento in cui viene riprodotto un suolo al di sopra di una copertura attraverso un'azione di carattere artificiale, il sistema tecnologico che ne deriva deve realizzare una certa integrazione fra la natura organica della vegetazione e i componenti inerti. La sinergia che si determina genera determinate prestazioni, le cui ricadute possono essere esaminate a differenti scale dimensionali di influenza.

Come descritto nel paragrafo precedente le piante, per la loro stessa natura di organismi autotrofi e cioè di produttori primari degli ecosistemi, generano quelle condizioni microclimatiche favorevoli alla vita e al benessere di tutti gli altri organismi e queste proprietà, all'interno di un ambiente urbano, sono tanto più rilevanti quanto maggiore è la densificazione delle costruzioni, poiché, in particolare da un punto di vista microclimatico, le città sono spesso caratterizzate da una carenza di attività primaria vegetale e da un contestuale livello elevato di inquinamento per effetto delle immissioni dei gas da combustione generati dalle attività antropiche.

BENEFICI MICROCLIMATICI

Le attività fisiologiche equilibratrici della qualità dell'aria sono fondamentalmente tre: il fototropismo, la fotosintesi clorofilliana e la traspirazione vegetale. Tali attività esercitano tanto maggiore impatto, quanto più estesa è l'occupazione del suolo operata dalla vegetazione e, al contempo, quanto più grandi sono i corpi vegetali.

Innanzitutto le piante, che sono organismi fotosintetici immobili, svolgono un'azione schermante dai raggi solari e l'effetto di ombreggiamento è reso particolarmente efficace da un comportamento caratteristico, chiamato **fototropismo**, secondo cui le foglie tendono a disporsi in modo quanto più favorevole all'intercettazione diretta dei raggi luminosi. In virtù di questo comportamento le chiome tendono, man mano che la pianta si sviluppa nel tempo, a schermare totalmente porzioni di superfici costruite progressivamente maggiori. In prossimità delle costruzioni l'ombreggiamento generato dalla vegetazione ha quindi come effetto la riduzione dell'assorbimento della radiazione solare da parte

FUNZIONE VEGETALE	EFFETTO SULL'AMBIENTE	GUADAGNO PER LA COSTRUZIONE
FOTOTROPISMO COMPORTAMENTO PER IL QUALE LE FOGLIE DELLE PIANTE ASSUMONO UNA CONFIGURAZIONE QUANTO PIÙ FAVOREVOLE ALL'INTERCETTAZIONE DELLA LUCE SOLARE, AL FINE DI GARANTIRE I PROCESSI DELLA FOTOSINTESI CLOROFILLIANA	OMBREGGIAMENTO ORIENTANDOSI PERPENDICOLARMENTE ALLO STIMOLO LUMINOSO, LE FOGLIE IMPEDISCONO AI RAGGI SOLARI DI RAGGIUNGERE LE SUPERFICI A ESSE SOTTOSTANTI. LE CHIOME DELLE PIANTE RAPPRESENTANO UNO STRATO "STRATO DI SCHERMATURA MOBILE", CHE SI AUTO-REGOLA A SECONDA DELLA POSIZIONE DEL SOLE	1. RIDUZIONE DELL'ASSORBIMENTO, DA PARTE DELLE SUPERFICI EDIFICATE, DELLA RADIAZIONE SOLARE QUINDI: - CONTENIMENTO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI INTERNE DELLE CHIUSURE - RIDUZIONE DELLE EMISSIVITÀ SUPERFICIALI ESTERNE A ELEVATA LUNGHEZZA D'ONDA (QUINDI RIDUZIONE DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE)
FOTOSINTESI CLOROFILLIANA REAZIONE ATTRAVERSO CUI LE PIANTE TRASFORMANO, IN PRESENZA DI ENERGIA LUMINOSA, ACQUA E ANIDRIDE CARBONICA NEL PROPRIO NUTRIMENTO (CARBOIDRATI)	IMPIEGO DI ENERGIA SOLARE UNA PARTE DELLA RADIAZIONE SOLARE INCIDENTE VIENE "CATTURATA" DALLE PIANTE PER IL INNESCARE I PROCESSI DELLA SINTESI DEI CARBOIDRATI	1. RIDUZIONE DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE 2. ASSORBIMENTO DI ANIDRIDE CARBONICA (FISSAZIONE DEL CARBONIO) 3. PRODUZIONE DI OSSIGENO (FOTOLISI)
TRASPIRAZIONE FENOMENO PER IL QUALE LE PIANTE CEDONO ACQUA ALL'ATMOSFERA SOTTO FORMA DI VAPORE ACQUEO	IMPIEGO DI ENERGIA SOLARE IL PASSAGGIO DALLO STATO LIQUIDO ALLO STATO DI VAPORE DELL'ACQUA IMPLICA L'USO DI ENERGIA SOLARE	1. RIDUZIONE DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE 2. GENERAZIONE DI VENTILAZIONE E MOTI D'ARIA FRA LA VEGETAZIONE E IL SUOLO

dei materiali edilizi e in un ambiente urbano questo fenomeno genera fondamentalmente due effetti virtuosi: il contenimento delle temperature superficiali interne degli edifici e, di conseguenza, la riduzione delle emissività superficiali esterne.

Secondariamente, attraverso l'attività nutritiva di **fotosintesi clorofilliana**, le piante immettono ossigeno nell'atmosfera e sottraggono anidride carbonica, impiegando energia luminosa che la pianta è in grado di captare attraverso le foglie e che viene sottratta all'ambiente dove darebbe luogo a un incremento della temperatura media radiante.

La quantità di energia solare che una pianta assorbe solo per l'attività di fotosintesi dipende naturalmente dalla sua morfologia, ma può raggiungere valori pari al 70-80% della radiazione solare incidente sulle sue foglie.

Infine, il terzo dei processi vegetali influenti sulla qualità climatica dell'ambiente è l'attività di **traspirazione** vegetale: al pari di qualsiasi organismo vivente, la pianta traspira per mantenere stabilmente bassa la propria temperatura. Se l'organismo non fosse in grado di liberare acqua dai propri tessuti la temperatura interna aumenterebbe fino a danneggiarne le cellule, invece, cedendo acqua all'atmosfera sotto forma di vapore, la temperatura dell'organismo resta costantemente bassa. Anche questo processo avviene attraverso l'esercizio di un lavoro: il calore assorbito dalla pianta viene utilizzato per innescare il passaggio dell'acqua dai tessuti dell'organismo all'atmosfera e l'energia solare, presente nell'atmosfera sotto forma di calore, viene utilizzata dalla pianta per una propria attività

Tabella I.1: Attività vegetali che influenzano il microclima di un ambiente costruito

Negli ambienti urbani, parimenti a un qualsiasi ambiente naturale, la presenza delle piante è un fattore sempre migliorativo e la definizione stessa di vegetazione come "elemento di compensazione ambientale" deriva proprio dall'azione equilibratrice della qualità dell'aria generata dalle attività fisiologiche delle piante.

Fonte: Elena Giacomello, "Verde verticale: Utilizzo del verde oltre le coperture. Tecnologie e applicazioni a confronto", *Modulo*, 349 (2009):156.

fisiologica, riducendo così la temperatura media radiante del suo immediato intorno ambientale. Si consideri che “un grosso albero durante una giornata estiva può far evaporare 300-400 litri d’acqua con un corrispondente impiego di 750-1000 megajoule”².

In sintesi, quindi, la vegetazione che si trova in un ambiente antropico svolge una funzione riequilibratrice microclimatica. Ciò accade non solo per la funzione schermante delle foglie che riduce l’irraggiamento sulle superfici edificate, ma anche perché la pianta sottrae all’atmosfera luce e calore per le proprie attività fisiologiche, riducendo ulteriormente sia l’assorbimento che l’emissività delle superfici edilizie: “da una parte quindi viene assorbita una minore quantità di energia solare, dall’altra anche l’emissione viene limitata. Nel complesso la temperatura media radiante delle aree verdi vicino agli edifici diminuisce e questi spazi migliorano la loro vivibilità durante il periodo estivo. Gli scambi radiativi infrarossi tra l’intorno e le superfici degli edifici sono così diminuiti [...] Si hanno di conseguenza minori temperature superficiali interne e quindi migliore comfort e minori carichi termici che penetrano nell’edificio”³. Per tutte queste ragioni le piante sono perciò definite “elementi di compensazione ambientale”.

Uno degli esperimenti più importanti riguardanti l’influenza della vegetazione sulle costruzioni è stato condotto da Akira Hoyano⁴ nella città di Fukuoka in Giappone: attraverso una serie di misurazioni egli ha dimostrato quanto uno schermo vegetale, collocato in prossimità o in

² Fabio Peron, “Vegetazione e ambiente costruito: Aspetti termigrometrici”, In *Verde: Naturalizzare in verticale*, a cura di Valeria Tatano (Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2008): 70.

³ Fabio Peron, “Vegetazione e ambiente costruito”: 67-68.

⁴ Akira Hoyano, “Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building”, *Energy and Buildings*, 11 (1988): 181-199.

Figura 1.2: Ombra proiettata da un albero su una parete durante un pomeriggio invernale

Anche se privo delle foglie quest’albero ombreggia una vasta porzione di parete, qui rivolta a ovest.



aderenza a differenti tipi di superfici costruite, migliori l'ambiente termico esterno e/o interno di un edificio, contribuendo significativamente a contenere le temperature dei corpi a seguito dell'irraggiamento solare. In uno di questi esperimenti Hoyano ha verificato l'efficacia di una pergola posta in uno spazio aperto. Le condizioni dell'esperimento sono rappresentate nelle figure I.3 e I.4: la pergola è costituita da una grande pianta di glicine posta a 2 metri e mezzo di altezza dal suolo di dimensioni pari a 60 metri quadri; sotto di essa è stata installata la strumentazione necessaria per svolgere l'esperimento, e la stessa apparecchiatura è stata contemporaneamente installata sullo spazio aperto adiacente al fine di poter confrontare i dati provenienti simultaneamente dall'area ombreggiata e dall'area soleggiata.

La figura I.5 nella pagina seguente mostra una termografia della pergola e delle superfici circostanti non schermate: confrontando le tonalità di grigio dei differenti elementi dell'immagine con la scala cromatica di riferimento, posta sul lato destro della stessa, si nota che la temperatura superficiale delle foglie di glicine si aggira attorno ai 34-36 gradi Celsius, mentre la temperatura della sabbia collocata a terra, che gode dell'ombra della pergola, presenta una temperatura addirittura inferiore a quella delle foglie della pianta. Differentemente tutte le superfici esposte al sole hanno una temperatura di oltre 42 gradi (a seconda del materiale di cui sono costituite e del loro orientamento) e la temperatura superficiale del suolo soleggiato supera i 50 gradi.

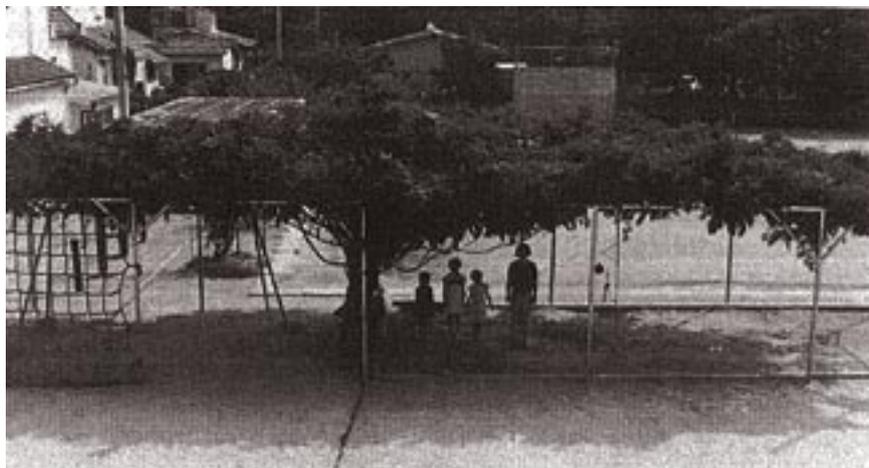


Figura I.3: Vista della pergola usata per l'esperimento di Hoyano

La pianta di glicine installata per l'esperimento crea uno schermo totale al passaggio della luce: le sue foglie costituiscono uno strato denso uniforme durante tutta la stagione estiva.

Il clima della città di Fukuoka, dove hanno avuto luogo gli esperimenti di Hoyano, è mite: le temperature scendono raramente sotto gli 0 gradi Celsius d'inverno e si aggirano fra 25 e 32 gradi d'estate, con punte superiori ai 37-38 gradi; le stagioni intermedie sono soleggiate.

Hoyano, "Climatological use of plants": 182.

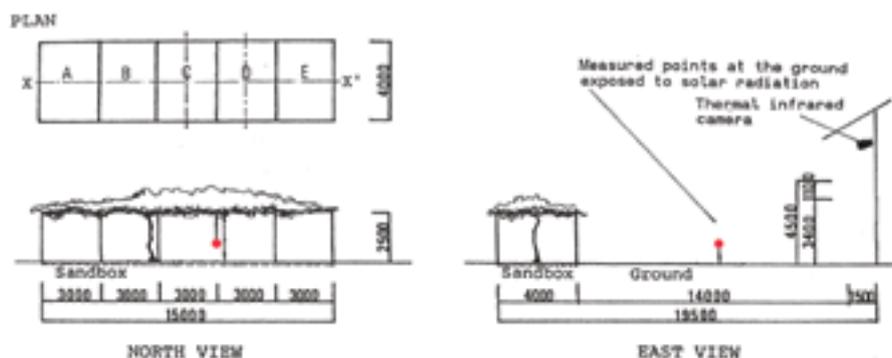


Figura I.4: Rappresentazione quotata del contesto dell'esperimento

La pergola è estesa 60 metri quadri (15x4 metri) e ricopre una vasca di sabbia, posta a livello del suolo, di pari estensione. I due punti evidenziati in rosso, collocati rispettivamente sotto la pergola e sullo spazio aperto circostante, indicano i corpi sferici di cui è stata calcolata la temperatura superficiale durante l'esperimento.

Hoyano, "Climatological use of plants": 182.

Figura I.5: Termografia della pergola

La pergola è stata fotografata con una fotocamera a infrarosso: a destra dell'immagine si trova la scala cromatica corrispondente alle diverse temperature. La chioma della pianta di glicine presenta una temperatura di circa 34-36 gradi Celsius (pari alla temperatura dell'aria), mentre le superfici circostanti esposte al sole presentano temperature superiori, anche oltre i 50 gradi. È interessante notare che la vasca di sabbia che si trova sotto la pergola ha una temperatura addirittura inferiore di qualche grado a quella della superficie delle foglie del glicine. Hoyano, "Climatological use of plants": 184.

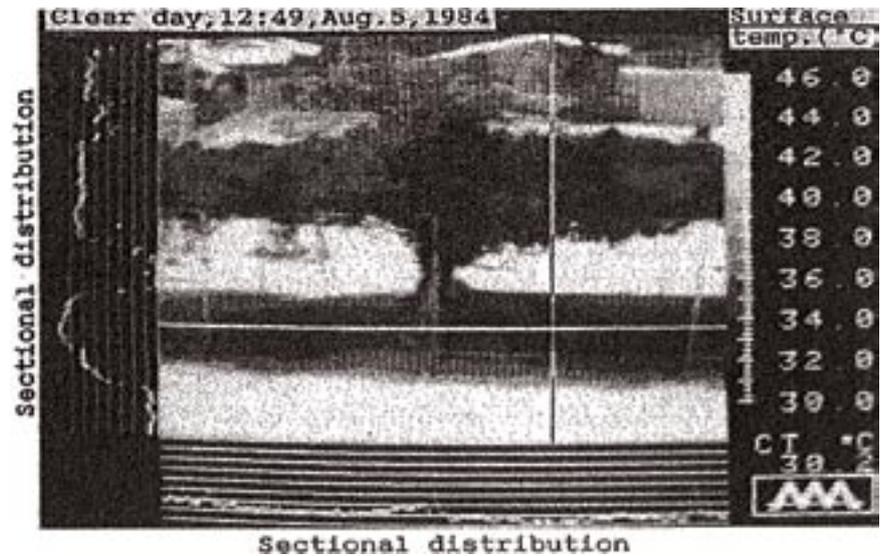


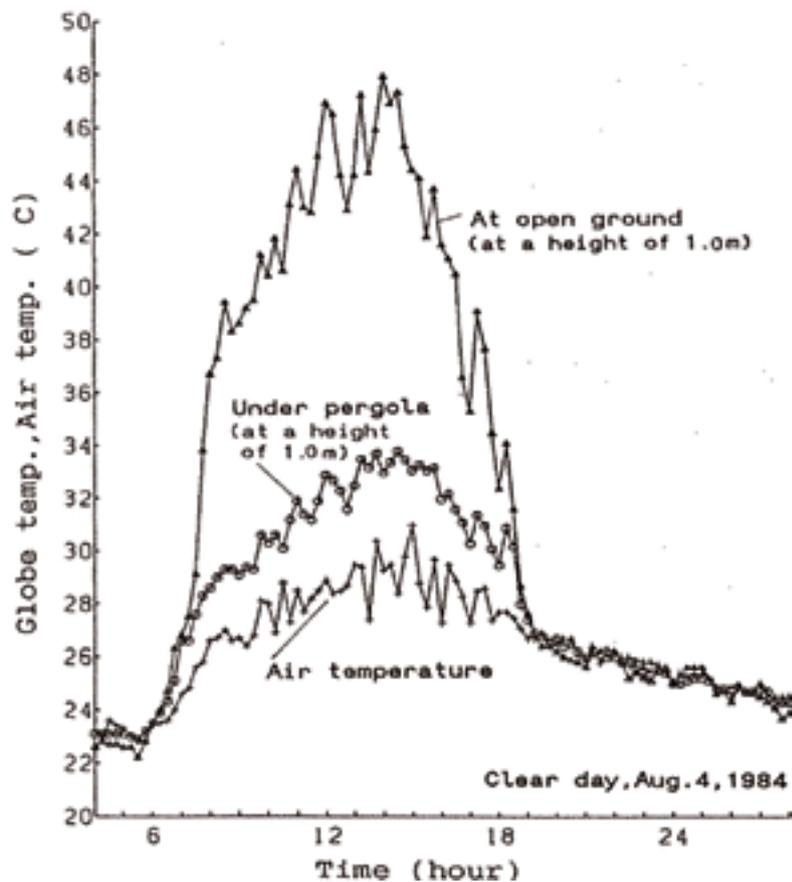
Figura I.6: Temperatura delle sfere collocate sotto la pergola e sullo spazio aperto

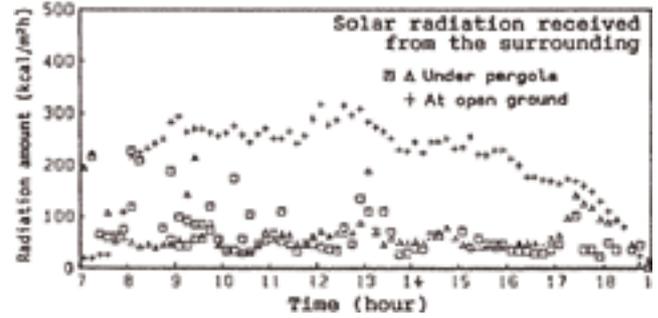
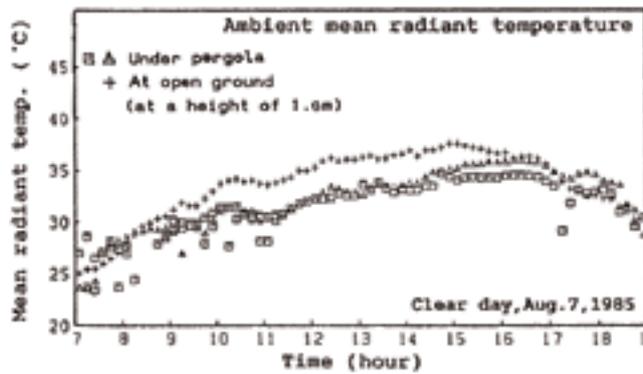
La curva poligonale più bassa del grafico rappresenta la temperatura dell'aria registrata durante una giornata estiva, mentre, dal basso all'alto, le altre due curve descrivono la temperatura superficiale della sfera ombreggiata e quella della sfera esposta al sole (cfr. figura I.4).

Durante le ore centrali della giornata la differenza di temperatura fra le due sfere raggiunge i 16 gradi Celsius.

La differenza di temperatura fra la sfera ombreggiata e l'aria, pari a 3-4 gradi, è causata dall'irraggiamento delle superfici soleggiate circostanti.

Hoyano, "Climatological use of plants": 185.





Con questa stessa configurazione sono state confrontate le temperature raggiunte da due corpi sferici posti rispettivamente sotto l'ombra della pergola e sullo spazio aperto, entrambi collocati all'altezza di un metro dal suolo (corrispondenti ai punti rossi della figura I.4). Il grafico della figura I.6 mostra la differenza fra le due temperature: la curva più alta descrive la temperatura della sfera esposta al sole, la curva mediana quella della sfera ombreggiata dalla pergola, mentre la curva più bassa la temperatura dell'aria. La differenza di temperatura fra le due sfere durante le ore più soleggiate, fra le 10 del mattino e le 16 del pomeriggio, è di circa 16-18 gradi Celsius, mentre al mattino presto e nel tardo pomeriggio tale differenza diminuisce fino ad annullarsi al calar del sole. Differentemente dalla superficie delle foglie, di temperatura pari a 34-36 gradi, e dalla sabbia collocata a livello del suolo che ha una temperatura inferiore dell'aria, il corpo ombreggiato è 4-6 gradi più caldo dell'aria. Questo incremento di temperatura, ampiamente inferiore all'incremento di 22 gradi del corpo esposto al sole, è causato dall'irraggiamento delle superfici calde circostanti: mentre le foglie, attraverso la traspirazione, riescono a mantenere stabile la temperatura dei propri tessuti, e la sabbia, collocata al suolo, espone poca della sua superficie all'irraggiamento, la sfera, che è sospesa all'altezza di un metro sopra la linea di terra, subisce maggiormente l'effetto dell'irraggiamento di tutte le superfici soleggiate circostanti.

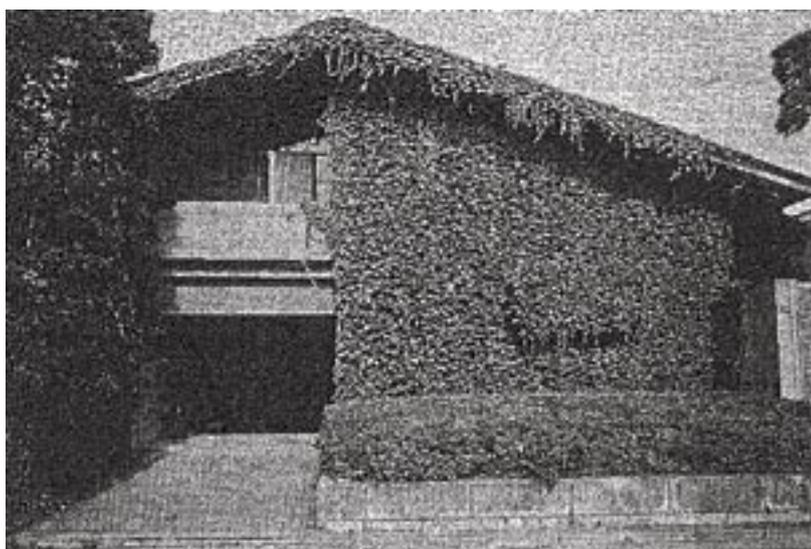
Il grafico della figura I.8 indica i valori della radiazione solare ricevuta dalla sfera sotto la pergola: tali valori sono pari a circa 60 chilocalorie al metro quadro ogni ora e sono responsabili di quell'innalzamento, appena citato, di 4-6 gradi Celsius della temperatura superficiale della sfera. Confrontando i diversi valori registrati nel grafico emerge che la radiazione solare che un corpo riceve sotto la pergola è circa $\frac{1}{4}$ della radiazione solare che lo stesso corpo riceve senza alcuna schermatura: 50-60 chilocalorie al metro quadro ogni ora contro 200-220 chilocalorie.

A conferma dei dati rilevati dalle varie prove sperimentali il grafico della figura I.7 mette a confronto la differenza della temperatura media radiante all'ombra della pianta e sotto il sole: durante le ore più calde della giornata, fra le ore 10 e le ore 16, tale differenza è pari a circa 4 gradi.

Figure 1.7 e 1.8: Variazione della temperatura media radiante e della radiazione solare proveniente dall'intorno sotto la pergola e sullo spazio aperto

Il grafico rappresentato in figura 1.7 mostra la differenza fra la temperatura media radiante sotto la pergola e sullo spazio aperto: tale differenza è pari a circa 4 gradi Celsius. Il grafico in figura 1.8 mette in evidenza che la radiazione solare diretta ricevuta da un corpo collocato al sole è pari a 250 chilocalorie al metro quadro ogni ora, mentre sotto la pergola tale valore si riduce di circa 4 volte, cioè a 60 chilocalorie al metro quadro ogni ora.

Hoyano, "Climatological use of plants": 185.



residential house for experiment

Figura I.9: Prospetto e pianta della residenza utilizzata nell'esperimento

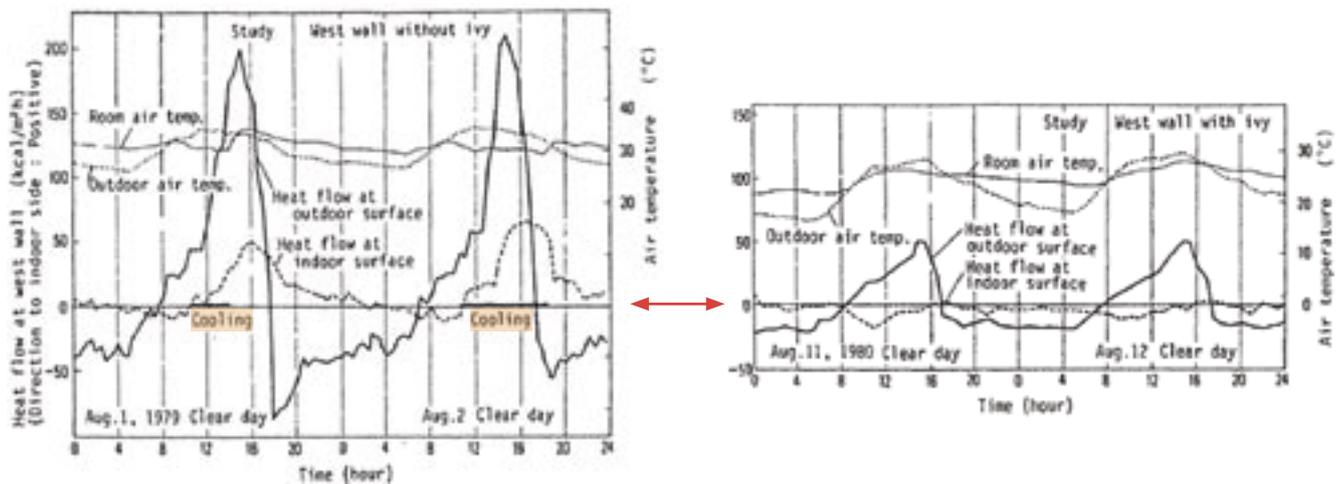
La parete di chiusura impiegata nell'esperimento è completamente rivestita da una vigorosa pianta di edera. Questa parete è orientata a ovest.

Hoyano, "Climatological use of plants": 189.

In un altro esperimento, che può essere considerato uno dei capostipiti in questo ambito, Akira Hoyano ha verificato l'influenza di una pianta di edera posta in aderenza a una parete di chiusura di una casa, anche in questo caso collocata nella città di Fukuoka. La figura I.9 illustra la configurazione di partenza: la pianta di edera riveste la facciata ovest della casa, ad eccezione della porzione di parete arretrata dove si trova una terrazza. I valori misurati in quest'esperimento sono stati la temperatura interna ed esterna dell'aria e la temperatura superficiale interna ed esterna del muro ombreggiato; successivamente, con questi dati, è stato calcolato il flusso termico passante dall'esterno all'interno. Le misurazioni si riferiscono necessariamente a due annate distinte: nell'agosto del 1979 la facciata è priva della pianta, mentre nell'agosto del 1980 la stessa facciata è rivestita con una vigorosa edera. Questo ha permesso di paragonare direttamente valori sperimentali senza l'ausilio di simulazioni numeriche. Nella figura I.10 sono rappresentati gli esiti dell'esperimento. I due grafici si riferiscono alle misure effettuate nelle due differenti annate: le curve più basse si riferiscono al flusso termico e confrontandole emerge che "senza la pianta di edera il calore massimo entrante è pari a 200 chilocalorie al metro quadro ogni ora. Installando lo schermo di edera tale valore si riduce di $\frac{3}{4}$ [assume cioè il valore di 50 chilocalorie]. Attraverso l'impiego dell'edera come schermo, il flusso termico sulla superficie interna della parete è frequentemente negativo, vicino alla linea dello zero. Quindi l'influenza della radiazione solare nell'ambiente termico interno può essere quasi completamente eliminata installando uno schermo vegetale di edera all'esterno"⁵.

Il grafico a sinistra della figura I.10 mostra inoltre che, per mantenere la temperatura interna prossima a quella esterna, è necessario utilizzare un climatizzatore: dalle ore 11 alle 14 del 1 agosto e dalle ore 11 alle 18.30 del 2 agosto 1979 si è reso necessario raffrescare l'aria all'interno dell'alloggio. Diversamente, anche nelle ore più calde dell'11 e del 12 agosto 1980, quando la parete ovest è schermata dalla pianta, la temperatura interna

⁵ Hoyano, "Climatological use of plants": 190.



della casa risulta lievemente inferiore alla temperatura esterna senza alcun impiego di macchine per il raffrescamento.

Svariati altri studi confermano che l'integrazione delle piante all'ambiente edificato è in grado di apportare significativi benefici termici in regime estivo.

Hashem Akbari⁶ ha rilevato che la riduzione dell'energia spesa per il raffrescamento di 2 case, situate a Sacramento in California, attraverso la schermatura di una fila di alberi posta all'esterno delle stesse, è pari per l'intera stagione estiva al 30% circa, con una riduzione dei picchi di potenza del 22-23% (pari a 1 chilowattora).

Chen Yu⁷ ha dimostrato che la presenza di un parco in un ambiente urbano (Singapore è il luogo dell'esperimento) è in grado di contenere le temperature delle aree costruite circostanti di 1,3 gradi Celsius con una conseguente riduzione dei carichi per il raffrescamento del 10%. Ha inoltre dimostrato "con evidenza che la vegetazione ha la capacità di stabilizzare le fluttuazioni termiche dei materiali edilizi [...] e che le temperature misurate all'interno del parco sono strettamente legate alla densità e alla dimensione delle piante"⁸. Fritz Wilmers⁹ ha riscontrato che anche superfici edilizie poco estese, collocate fra edifici e dove sia presente della vegetazione da giardino, presentano temperature superficiali inferiori di 20 gradi Celsius rispetto alle superfici esposte, godendo quindi dei positivi effetti bioclimatici generati da una pur scarsa vegetazione.

Dalla lettura di questi dati si può quindi intuire come la possibilità di incrementare la quantità di vegetazione sfruttando le superfici degli edifici rappresenti una significativa opportunità di condizionamento del microclima di un isolato urbano attraverso il contenimento delle temperature superficiali dei materiali edilizi.

Figura I.10: Variazione giornaliera del flusso termico della parete ovest, "senza" e "con" l'edera

I due grafici descrivono le curve delle temperature e del flusso termico sulla superficie interna ed esterna della parete a ovest. Il grafico di sinistra riguarda la parete senza la pianta di edera (1 e 2 agosto 1979), mentre il grafico di destra riguarda la parete con la pianta di edera (11 e 12 agosto 1980). Confrontando i valori dei due grafici si vede che il flusso termico entrante nella parete senza edera, durante le ore più soleggiate della giornata, è 4 volte superiore a quello entrante nella parete con l'edera (200 chilocalorie al metro quadro ogni ora, contro 50 chilocalorie). Dalle curve delle temperature emerge che, per mantenere il valore della temperatura interna prossima a quella esterna, senza edera è necessario utilizzare un climatizzatore. Contrariamente la temperatura interna con l'edera non subisce sensibili aumenti rispetto alla temperatura esterna. Hoyano, "Climatological use of plants": 191.

⁶ Hashem Akbari et al., "Peak power and cooling energy savings of shade trees", *Energy and Buildings*, 25 (1997): 139-148.

⁷ Chen Yu e Wong Nyuk Hien, "Thermal benefits of city parks", *Energy and Buildings*, 38 (2006): 105-120.

⁸ Chen Yu, "Thermal benefits of city parks": 119.

⁹ Fritz Wilmers, "Green for melioration of urban climate", *Energy and Buildings*, 11 (1988): 289-299.

Gli effetti microclimatici che la vegetazione apporta agli spazi costruiti, in modo più o meno significativo in dipendenza delle dimensioni delle piante, non sono gli unici benefici rilevabili. La vegetazione in un ambiente edificato rappresenta un fattore migliorativo anche da un punto di vista strettamente percettivo. Questo appare evidente dal fatto che gli immobili che godano di un affaccio su un'area verde, un parco, un campo da gioco, una zona ricreativa o anche un piccolo giardino, risultano avere un valore economico superiore rispetto alla media del mercato. Pur essendo la stima di un immobile determinata da una grande numero di fattori, in cui concorrono, oltre alla dimensione e alla qualità complessiva del manufatto, l'appartenza a una certa area urbana, la vicinanza ai servizi e ai mezzi di trasporto ecc., la vista diretta del verde o la vicinanza a un parco costituiscono degli attributi significativi a orientare il valore economico di un immobile.

¹⁰ Sarah Nicholls, "Measuring the impact of parks on property values: new research shows that green spaces increase the value of nearby housing", www.findarticles.com > Parks > March 2004, marzo 2004.

Tabella I.2: Impatto della vicinanza delle aree verdi sul valore degli immobili

Numerosi studi hanno dimostrato che la vista o la vicinanza di un edificio a un'area verde ne incrementa il valore economico. Le analisi citate, che riguardano una casistica molto estesa, dimostrano che la rendita di un edificio collocato in prossimità di un'area verde, cresce in media del 13%. Nicholls, "Measuring the impacts of parks": 4.

La tabella I.2 sintetizza i risultati di uno studio¹⁰ che ha raccolto svariate statistiche effettuate in alcune città degli Stati Uniti riguardanti l'incremento dei valori immobiliari degli edifici che si affacciano su aree verdi urbane e periurbane. Innanzitutto si evidenzia che nella quasi totalità dei casi considerati dai diversi autori (il numero che affianca il "Tipo di spazio aperto" della terza colonna in tabella indica la quantità di casi, cioè di spazi verdi presi in considerazione) la vicinanza di un parco incrementa il valore immobiliare degli edifici circostanti. In secondo luogo è chiaro che tale valore cresca in relazione alla vicinanza fra il parco e gli edifici: un'affaccio diretto o una distanza inferiore a 60 metri può far aumentare il valore immobiliare anche del 21-22%.

AUTORE	SITO DELLO STUDIO	TIPO DI SPAZIO APERTO VERDE (numero di casi considerati)	IMPATTO SUL VALORE IMMOBILIARE DALLA VICINANZA DI AREE VERDI [% di incremento del valore]
Bolitzer & Netusil (2000)	Portland-Oregon	Parco pubblico: 193	Distanza < 500 metri = 1-3%
		Campo da golf: 8	Distanza < 500 m = 5%
Lutzenhiser & Netusil (2001)	Portland-Oregon	Parco pubblico: 115	Distanza < 500 m = 2%
		Campo da golf: 8	Distanza < 60 m = 21% 350 m < Distanza < 500 m = 7%
Miller (2001)	Dallas-Texas	Parco urbano: 14	Con affaccio = 22%
Nicholls (2002)	Austin-Texas	<i>Cintura verde Barton Creek</i>	Immediata vicinanza = 12% Vicinanza = 6%
		Parco urbano: 2	Nessun impatto rilevato
	College Station- Texas	Campo da golf: 1	Immediata vicinanza = 16-19%
Lindsey, Man, Payton & Dickson (2003)	Indianapolis-Indiana	<i>Manon Trail</i>	Distanza < 800 m = 15%
		Strade alberate: 6	Nessun impatto rilevato
		Corridoi verdi: 7	Distanza < 800 m = 2%



Nella maggior parte dei casi l'incremento di valore non è determinato solo dalle possibilità fruibili che l'area verde, posta nelle vicinanze, è in grado di offrire agli abitanti; la possibilità che viene ancor più riconosciuta come qualità aggiunta è la semplice "fruibilità visiva" del verde. Escludendo contesti di eccezionale rilevanza architettonica, un affaccio su un parco è preferibile a un affaccio sul costruito: questo accade perché esiste una diretta corrispondenza causa-effetto fra il benessere psicofisico dell'uomo e la percezione visiva della vegetazione.

Tale corrispondenza va ben oltre il retaggio culturale che associa le piante a un paesaggio integro; nemmeno l'assunzione di un comportamento "ecologico" o l'affezionamento a stili di vita "sostenibili", attribuibili al pensiero volontario del singolo individuo, determinano l'attrazione visiva dell'uomo per le piante. In realtà la percezione del verde è connessa a uno stato di benessere e di equilibrio psicofisico che l'uomo "subisce" quando è in grado di godere per un tempo sufficientemente prolungato dell'esposizione alle piante. Alla base di questo benessere c'è una memoria subcorticale che associa la vegetazione (quindi la sua percezione) alla presenza d'acqua, di cibo e di riparo: in altre parole di possibilità di vita.

Nell'ambito delle neuroscienze la relazione fra la percezione della vegetazione e i benefici per l'uomo è stata indagata. Roger S. Ulrich¹¹ ha condotto svariate ricerche riguardanti la salute umana degli individui che vivono nelle città, dalle quali sono emerse inequivocabili conferme dell'apporto benefico della vegetazione all'ambiente costruito. Una di queste ricerche descrive sperimentalmente l'attività fisiologica del corpo esposto alla visione di differenti tipi di paesaggio. Ulrich ha sottoposto un campione di 120 persone adulte (*tester*) alla visione di due documentari in sequenza, della durata di circa 10 minuti: un primo filmato, definito "stressante" (*stressor*), è in grado di generare un certo senso d'ansia nell'osservatore, e un secondo (*recovery*), a scelta fra sei differenti e ritraenti altrettanti paesaggi, durante il quale valutare le reazioni fisiche dei *tester*. La tabella I.3 nella pagina seguente sintetizza le caratteristiche dei sei filmati

Figura I.11: Central Park di New York

Il valore economico degli alloggi che si affacciano sul Central Park di New York, o che si trovano nelle immediate vicinanze, è superiore del 60% rispetto al valore delle circostanti aree di Manhattan.

Fonte: Jason Sheftell, www.nydailynews.com > real estate > central_park, 4 giugno 2010.

QUALITÀ PERCETTIVE

¹¹ Roger Ulrich, professore della facoltà di Architettura A&M del Texas, ha fondato il centro di ricerca interdisciplinare "Center for Health Systems & Design", che unisce ricercatori dell'ambito delle discipline della progettazione (interior design, architettura, pianificazione del territorio e ingegneria) con ricercatori delle varie discipline mediche, al fine di approfondire gli effetti sulla salute umana delle varie attività antropiche.

In questo contesto si cita la seguente ricerca: Roger S. Ulrich et al., "Stress recovery during exposure to natural and urban environments", *Journal of Environmental Psychology*, 11 (1991): 201-230.

PAESAGGIO	CONTENUTO	DESCRIZIONE	SUONO/RUMORE
NATURA E VEGETAZIONE		Scenario dominato dagli alberi e da altra vegetazione; qualche apertura fra i rami; luce e brezza sullo sfondo; nessun animale e nessuna persona presenti.	Canto degli uccelli e brezza 42-64 dB
ACQUA		Scenario dominato dagli alberi e da un torrente che scorre velocemente; onde e guizzi sono visibili sulla sua superficie; nessun animale e nessuna persona presenti.	Scorrere dell'acqua 63-64 dB costantemente
CITTÀ TRAFFICO INTENSO		Strada commerciale a doppio senso di circolazione con traffico moderatamente intenso (24 veicoli/minuto); differenti tipi di veicoli (auto, bus, camion) alla velocità di 55-75 Km/ora.	Traffico 65-93 dB
CITTÀ TRAFFICO SCARSO		Stessa strada commerciale a doppio senso di circolazione con traffico scarso (4 veicoli/minuto); minore varietà di veicoli alla velocità di 40-55 Km/ora.	Traffico 64-85 dB
CITTÀ MOLTI PEDONI		Strada pedonale commerciale; molta gente (35 persone/minuto); svariate vetrine; moderata apertura; nessun animale presente.	Voci, passi 65-78 dB
CITTÀ POCHI PEDONI		Stessa strada pedonale commerciale; poca gente (7 persone/minuto); svariate vetrine; moderata apertura; nessun animale presente.	Voci, passi 52-72 dB

Tabella I.3: Scenari proiettati durante il periodo recovery

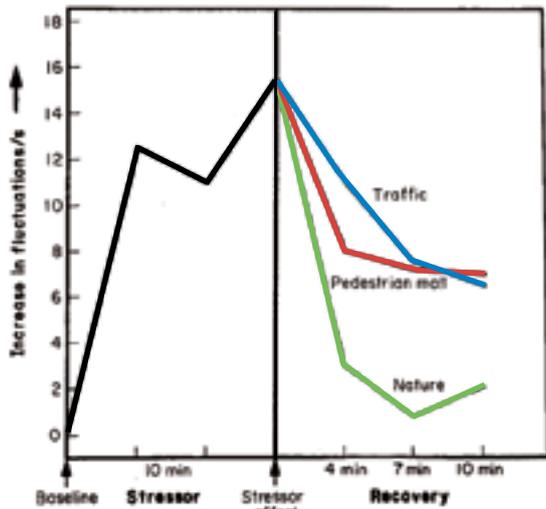
Dopo la visione del filmato *stressor* i 120 individui hanno assistito alla proiezione di 6 differenti documentari *recovery* (20 persone per ciascun documentario). I sei documentari sono caratterizzati da scenari differenti. I primi due hanno mostrato "scene naturali" (una fitta vegetazione e un torrente); i due successivi una via urbana carrabile in condizioni di traffico diverse: con traffico intenso e con traffico scarso; infine gli ultimi due una strada pedonale sia molto frequentata, sia poco frequentata.

Ulrich, "Stress recovery": 211.

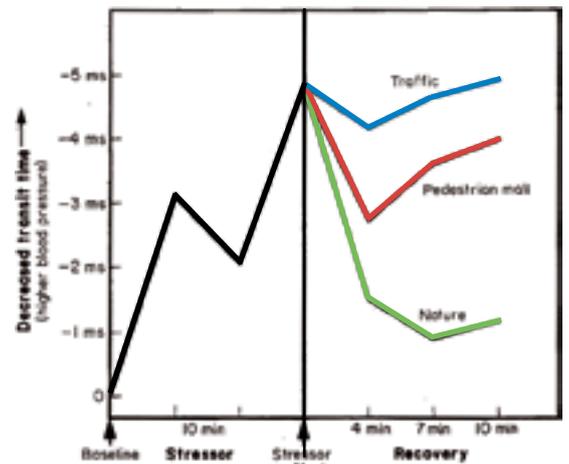
recovery successivi al documentario *stressor*: i primi due scenari sono naturali, caratterizzati da suoni propri dei paesaggi naturali (lo scorrere dell'acqua, il cinguettio degli uccelli, il fruscio delle foglie) e dall'assenza di interferenze antropiche; gli altri quattro sono urbani: due strade carrabili e due strade pedonali. Le viste delle due strade sono le medesime, riprese però ciascuna sia in un momento di caos, sia in un momento di quiete.

Durante la proiezione dei filmati sono stati misurati quattro parametri fisiologici di ciascuna persona: la conduttanza della pelle, la frequenza del battito cardiaco, la tensione muscolare e il periodo cardiaco. I risultati sono visualizzati nei grafici della figura I.12: ad eccezione del periodo cardiaco, che ha una particolare relazione con lo stato di attenzione involontaria (generato per ragioni diverse sia dallo *stressor* che dalla visione di paesaggi

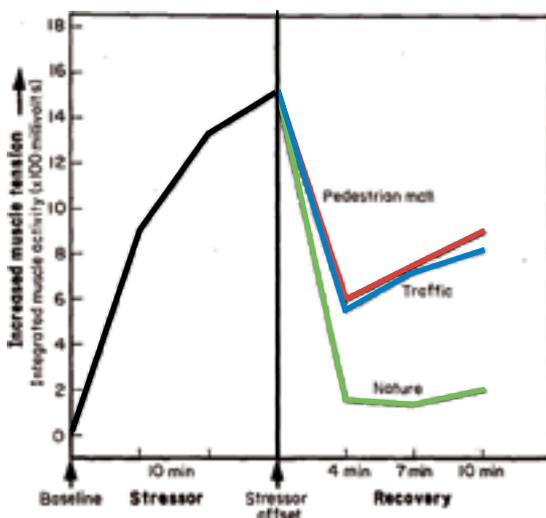
Variazione della CONDUTTANZA DELLA PELLE



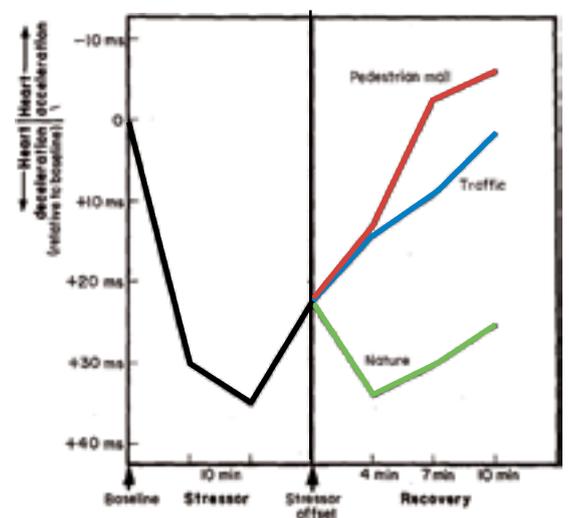
Variazione della FREQUENZA DEL BATTITO CARDIACO



Variazione della TENSIONE MUSCOLARE



Variazione della PERIODO CARDIACO



naturali), i parametri rilevati mostrano un accrescimento dei loro valori durante l'esposizione (della durata di 10 minuti) al documentario *stressor*; questo significa che le emozioni generate dalla sola vista di "immagini stressanti", emozioni come la cautela, l'ansia, l'infelicità, sono sufficienti a generare risposte attive di diversi sistemi del corpo, quali il sistema cardiovascolare, scheletromuscolare e neuroendocrino, che mobilitano l'individuo per riuscire a superare o reagire alla circostanza in grado di suscitare stress. Questa mobilitazione richiede al corpo molte risorse ed energia e, se prolungata, contribuisce significativamente all'affaticamento mentale e fisico"¹². Durante la successiva esposizione ai diversi documentari *recovery* i valori dei parametri analizzati variano in relazione al tipo di scenario che gli individui vedono: ciò che emerge con chiarezza è che le persone recuperano al meglio il proprio equilibrio fisico attraverso la visione degli scenari naturali, ossia dell'acqua e della vegetazione. Differentemente, la visione di scenari urbani non consente al corpo un

Figura I.12: Variazione dei quattro parametri fisiologici monitorati

Ciascun grafico mostra la variazione del parametro durante la visione dei filmati, proiettati in sequenza, *stressor* e *recovery*. I filmati *recovery* aventi come scenario elementi naturali (vegetazione e acqua), rappresentati dalle curve verdi, dimostrano che i 4 parametri monitorati assumono valori ottimali. Differentemente accade per i filmati con scenari urbani, dove i valori riguardanti l'attività cardiaca aumentano rispetto ai valori generati durante la visione dello *stressor*. Ulrich, "Stress recovery": 216-217.

¹² Ulrich, "Stress recovery": 211.

recupero dello stato ottimale e, nel caso del battito e del periodo cardiaci, la visione si traduce addirittura in uno stato di mobilitazione superiore a quello generato dalla visione dello *stressor*.

“I risultati ottenuti dall’esperimento indicano che differenti paesaggi urbani possono avere influenze radicalmente diverse sulla tensione degli individui e che i paesaggi naturali consentono un recupero dall’affaticamento più veloce e più completo dei paesaggi urbani. [...] Appare possibile che la velocità del recupero dei parametri monitorati in laboratorio durante la visione di un paesaggio naturale, possa essere trasferita a molti contesti reali, caratterizzati da brevi contatti con la natura. Nelle regioni urbanizzate la maggior parte degli incontri con elementi naturali sono episodi brevi di durata che varia da alcuni secondi a pochi minuti. I contatti che comunemente i cittadini hanno con la natura includono, ad esempio, la vista degli alberi da una finestra, pranzare in un parco, guidare ai margini di un’area non costruita. I risultati di questa sperimentazione giustificano l’ipotesi che brevi esposizioni alla vegetazione possano avere una funzione importante nel facilitare il recupero dagli *stressor* quali le irritazioni e gli inconvenienti quotidiani”¹³.

La vegetazione è quindi in grado di conferire qualità paesaggistica al territorio costruito, in quanto l’uomo ne è significativamente sensibile e influenzabile in modo positivo. Il miglioramento dei prospetti urbani, in quanto contenuti di scenari e sequenze di immagini, avviene anche attraverso l’incremento della presenza della vegetazione: “la capacità di un paesaggio urbano di stimolare effetti psicofisici positivi è alla base del futuro sviluppo della disciplina della progettazione paesaggistica”¹⁴.

Nell’ottobre del 2000 si chiusero i lavori per la stesura della “Convenzione Europea del Paesaggio”¹⁵, secondo cui i 27 Stati della Comunità Europea, fra cui l’Italia che ratificò il testo nel 2006, si impegnarono a tutelare il paesaggio quale patrimonio collettivo di valenza culturale, ambientale, sociale e storica.

¹³ Ulrich, “Stress recovery”: 223-224.

¹⁴ Hyukjae Lee e Hajime Koshimizu, “The psychological and physiological stress relief effect of the green roof”, *World Green Roof Congress*, Minneapolis, 2007.

¹⁵ Il testo integrale della *Convenzione Europea del Paesaggio* è disponibile nel sito del Ministero per i beni e le attività culturali: www.darc.beniculturali.it/ita/paesaggio/convenzione.htm. Il testo è stato presentato da: Riccardo Priore, “La Convenzione Europea del Paesaggio: un cambiamento concreto di idee e di norme”, Treviso: Fondazione Benetton Studi e Ricerche, 11 novembre 2004.

In sintesi i benefici che la vegetazione è in grado di apportare all'ambiente costruito sono:

1. a livello microclimatico in regime estivo:

- riduzione della temperatura media radiante esterna per effetto dei processi fisiologici di fotosintesi clorofilliana e di traspirazione;
- riduzione della temperatura delle superfici edilizie (involucri e pavimentazioni), sia per l'ombreggiamento, sia come conseguenza della riduzione della temperatura media radiante;

2. a livello di qualità paesaggistica urbana:

- la vegetazione è un elemento di compensazione ambientale, anche da un punto di vista visivo e per questo capace di attribuire un "valore estetico" e una percezione di vivibilità agli spazi costruiti;
- in ragione di ciò, la vicinanza o la presenza di vegetazione è in grado di influire sulla qualità ambientale percepita dalla popolazione e quindi sul valore economico degli edifici;

3. a livello di qualità dell'aria, per la produzione primaria svolta dalla vegetazione:

- le piante producono ossigeno e fissano il carbonio;
- le foglie delle piante assorbono polveri sottili;
- la traspirazione contribuisce alla variazione dell'umidità relativa; dell'aria e genera una microcircolazione ventosa;

4. inoltre la vegetazione:

- ha una funzione schermante dal vento;
- contribuisce a mantenere un livello, pur minimo, di biodiversità negli ambienti urbani.

I.3

Un suolo in quota: trasferire un sistema vegetale a un sistema edilizio

LA COPERTURA A VERDE NELLA TRADIZIONE

¹⁶ Si definisce copertura continua quella “copertura in cui l’elemento di tenuta assicura la tenuta all’acqua indipendentemente dalla pendenza della superficie di copertura.” (Tratto da: UNI 8178:1980 *Edilizia. Coperture. Analisi degli elementi e strati funzionali*: 1).

Le coperture continue si definiscono tali in quanto presentano un elemento di tenuta “stagno”, ossia una membrana che può essere di bitume o polimerica (e loro miscele/derivati). Tutte le coperture a falda piana sono necessariamente coperture continue, mentre le coperture a falda inclinata possono essere continue o, più frequentemente, discontinue, costituite cioè da un elemento di tenuta composto di pezzi non stagni, come i coppi, le tegole, le lastre, le lamiere grecate.

¹⁷ UNI 11235:2007 *Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*: 1-37). “Tetto giardino”, “tetto verde”, “giardino pensile”, “terrazza giardino”, “copertura vegetale”... sono denominazione gergali o identificative di un determinato tipo di copertura a verde.

¹⁸ Si definiscono “superiori” le piante costituite da apparati più evoluti (foglie, fusto e radici). Le piante superiori sono le *Spermatofite*, che comprendono le *Gimnosperme* e le *Angiosperme*.

A fronte di una progressiva riduzione degli spazi aperti verdi nelle città, generata dalla densificazione delle costruzioni e delle infrastrutture, una delle poche opportunità di godere della vegetazione in ambiente urbano è quella di portare le piante a vivere sulle superfici orizzontali degli edifici, ossia di costruire una copertura a verde. La *copertura a verde* è un elemento tecnico di chiusura superiore costituito da una copertura continua¹⁶ a cui sono sovrapposti materiali e componenti atti a garantire la vita alla vegetazione. La *copertura a verde*, così recentemente definita dalla normativa italiana¹⁷, è una tipologia di copertura conosciuta dalla tradizione con i nomi di “terrazza giardino” o “giardino pensile”.

In Italia, e più in generale nei Paesi mediterranei, le coperture a verde, infatti, si applicavano alle terrazze dei palazzi nobiliari e delle ville urbane e periurbane per scopi prettamente ornamentali. La caratteristica delle terrazze giardino era la valorizzazione di una residenza attraverso uno spazio inverdito piccolo, ma rigoglioso, popolato da aiuole, fiori e anche piante legnose ad alto fusto, uno spazio esterno progettato e curato al pari di un giardino all’italiana vero e proprio. Il Palazzo Reale di Napoli, il Palazzo Piccolomini di Pienza, la Villa Medici di Careggi e così molte ricche residenze urbane italiane sono state dotate di superbi giardini pensili di considerevoli dimensioni.

Da un punto di vista tecnologico le terrazze giardino del passato, proprio perché ospitanti piante superiori¹⁸, venivano realizzate impiegando spessori di terriccio molto alti, pari a 1 metro e anche più, pertanto il sistema era complessivamente caratterizzato da carichi permanenti molto elevati, supportati da strutture imponenti e solai di luci ridotte.

La stratigrafia delle terrazze giardino tradizionali era piuttosto sofisticata: sopra al solaio di copertura di calcestruzzo si stendeva uno strato di bitume, successivamente una soletta di calcestruzzo come elemento di protezione dalla penetrazione delle radici (possibilmente alleggerito con della pozzolana) e infine si ricopriva la copertura con terra di riporto di composizione differente: mischiata a ghiaia negli strati più profondi e a sabbia negli strati



Figure I.13 e I.14: Torre Guinigi a Lucca

La Torre Guinigi fu costruita nei primi anni del '300 per volere della più importante famiglia della città, i Guinigi. Sin dalla sua costruzione la torre ospitò degli alberi, per volere dei proprietari stessi: attualmente sono presenti cinque lecci molto anziani.



Figura I.15: Rappresentazione dei giardini di Babilonia

I celebri giardini pensili di Babilonia, città situata vicino all'odierna Baghdad, furono costruiti nel VI secolo a.C. sotto il regno di Nabucodonosor II. Secondo la ricostruzione di alcuni storici questi giardini sarebbero stati dotati di impianti di irrigazione relativamente sofisticati, collegati al fiume Eufrate.

Fonte: www.aje.it/Notizie-Commenti/AGE_010809-2.html



Figure I.16: Edificio ACROS, prefettura di Fukuoka

Il nuovo palazzo della prefettura di Fukuoka, progettato da Emilio Ambasz, presenta una copertura a verde composta da 15 grandi gradonate rivestite da un inverdimento intensivo.

Fonte: www.treehugger.com/files/2008/07/green-roofs-fukuoka-japan.php

più superficiali. La consistenza di questa stratigrafia, spessa e pesante, impediva che questa tecnologia venisse applicata all'edilizia popolare e il lavoro speso per la manutenzione, in particolare l'approvvigionamento idrico, non giustificava l'uso di una copertura i cui benefici principali riguardavano la percezione estetica, il prestigio e le possibilità fruttive di uno spazio verde in quota. In Italia, infatti, la tradizione costruttiva popolare non ha conosciuto la diffusione di coperture che fossero in grado di ospitare vegetazione: l'associazione delle piante alle costruzioni si limitava alle chiusure verticali (attraverso l'impiego di piante dotate di radici aeree o ventose) e alle strutture temporanee o leggere che normalmente ombreggiavano le corti (attraverso l'impiego di piante volubili e viticci).

Differentemente dalla tradizione mediterranea, nel Nord Europa, e in particolare in Norvegia, le coperture a verde venivano invece impiegate proprio nelle case rurali, poichè rappresentavano un sistema rudimentale per isolare i tetti dalle rigide temperature esterne. La tecnologia prevedeva che al di

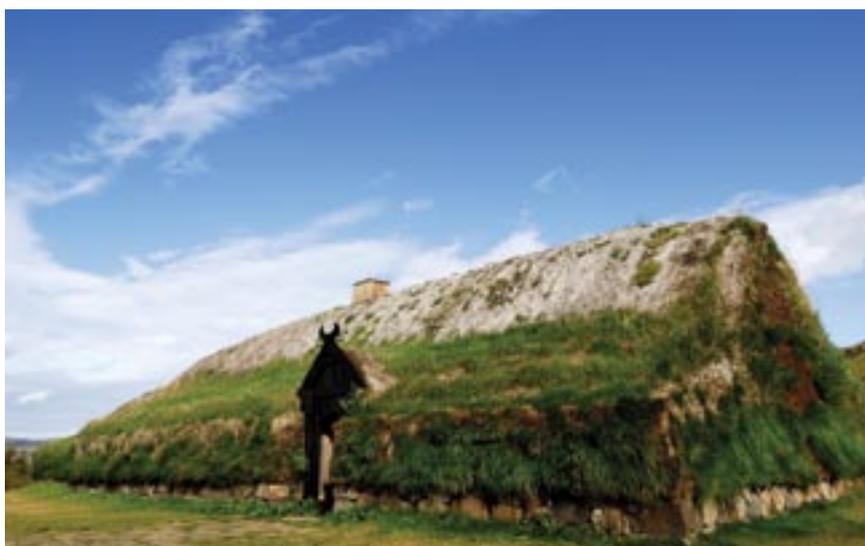
Figura I.17: Tetti d'erba di case norvegesi

Fonte: Luruoppo, www.homerresult.com > traditional-grass-green-roof > norway



Figura I.18: Tetto d'erba di una casa islandese

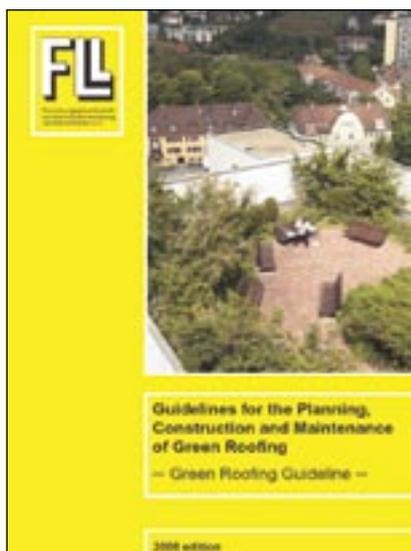
Fonte: Luruoppo, www.clikon.it



sopra dell’impalcato ligneo dei tetti venisse appoggiato del terriccio, come strato dotato di massa per isolare dal freddo, e successivamente delle zolle d’erba per fissare il sottostante strato di terra. In questo caso la vegetazione aveva il solo compito di stabilizzare il substrato (utilizzato come isolamento termico) con l’esito che i tetti venivano popolati da erbacee al pari di un prato. Dagli esiti di questa sovrapposizione deriva il nome “tetto d’erba”, che identifica le coperture a falde, e non piane, delle case rurali norvegesi.

Entrambe queste tecnologie costruttive, sia le terrazze giardino della tradizione mediterranea, sia i tetti d’erba della tradizione nordeuropea, non sono più attualmente diffuse. A partire dagli anni ‘70 del secolo scorso, infatti, le coperture a verde subirono un’evoluzione tecnologica attraverso cui l’elemento tecnico viene reso sicuro, leggero e industrializzabile. Questo sforzo di ricerca applicata, unito a una vasta sperimentazione agrotecnica riguardante le coltivazioni fuori suolo, avvenne quasi esclusivamente in Germania per opera di un numeroso ed eterogeneo gruppo di professionisti del settore: le figure coinvolte, prevalentemente agrotecnici, produttori e costruttori, fondarono un ente di ricerca, ancora oggi esistente e operativo, chiamato *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*¹⁹, che nel 1981 pubblicò per la prima volta una normativa riguardante la progettazione e la costruzione di coperture a verde: *The principles for establishing green roofs*. Dal momento della pubblicazione della normativa tedesca, riveduta e ampliata negli anni e di cui sono uscite svariate versioni, questa tecnologia ha goduto di una progressiva diffusione in particolare nei Paesi europei anglosassoni. Fin dalle sue prime versioni la normativa istruiva, oltre che sulle specie vegetali più adatte da impiegare in copertura, sui substrati più idonei, sulla capacità drenante del sistema e sulle metodologie più sicure per preservare l’elemento di tenuta.

Parallelamente alla pubblicazione della normativa, l’industria tedesca, che contribuì significativamente al consolidarsi di una “regola d’arte” delle coperture a verde, produsse ed esportò numerose e differenti tecnologie e altrettanti brevetti tutt’ora commercializzati.



LE NORMATIVE DI RIFERIMENTO

¹⁹ FLL è la “Società di ricerca per lo sviluppo e la costruzione del paesaggio”, tutt’ora esistente e operativa. A partire dai primi anni ‘70 del Novecento organizza una sezione dedicata alle “Tecnologie vegetali per gli spazi verdi nelle aree urbane residenziali” le cui attività erano coordinate da H.J.Liesecke. Liesecke scrisse nel 1975 il primo documento tecnico inerente alle coperture a verde “Appunti riguardanti l’inverdimento dei tetti piani”.

Figura I.19: Frontespizio dell’ultima versione della normativa tedesca FLL del 2008, in versione inglese

La così detta FLL, cioè la normativa tedesca *Guidelines for planning, construction and maintenance of green roofing*, è la normativa più importante riguardante le coperture a verde. Da essa traggono ispirazione tutte le altre normative esistenti.

In Italia, prima della pubblicazione della normativa UNI 11235, gli operatori del settore facevano riferimento all’FLL.

Figura I.20: Frontespizio della normativa UNI 11235

I contenuti della normativa italiana *Istruzioni per la progettazione, costruzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde* sono tratti fondamentalmente dalla normativa tedesca. Opportune differenze si riscontrano rispetto alla progettazione dello strato culturale. La normativa italiana presenta un’ampia sezione dedicata all’elemento di tenuta.

LE POSSIBILITÀ FRUITIVE

Il mercato italiano delle coperture a verde iniziò a crescere solo a partire dagli anni 2000, quando, divenute concessionarie di sistemi tecnologici tedeschi, alcune aziende italiane ampliarono la propria offerta fornendo oltre alla produzione di uno specifico componente per copertura (membrane impermeabilizzanti, componenti plastici, ecc.) l'intero sistema tecnologico della copertura a verde. Inoltre, durante i primi anni 2000 ebbe inizio anche in Italia la stesura della normativa inerente alla tecnologia della copertura a verde. La prima versione fu pubblicata nel maggio del 2007 e nel 2008 uscì una seconda versione rivisitata e corretta.

Uno degli aspetti più interessanti connessi all'applicazione del verde in copertura è l'occasione progettuale di funzionalizzare quella porzione di involucro di un edificio che normalmente non offre alcuna possibilità di fruizione. Differentemente dai tetti tradizionali, il cui strato più esterno è costituito dall'elemento di tenuta, la copertura a verde si presenta come un vero e proprio suolo ricostruito e, in quanto tale, predisposto a ospitare una serie di attività legate alla presenza o all'impiego delle piante: giardini pensili, orti urbani, zone ricreative, piccoli parchi attrezzati, sono alcune delle soluzioni applicabili a una copertura piana in quota, che portano a un livello fuori terra quelle attività normalmente confinate alla quota zero.

Le Corbusier per primo teorizzò l'impiego sistematico del verde pensile intravedendo nella possibilità di compensare la sottrazione di suolo generata dall'edificazione un fondamentale beneficio per l'architettura fatta per l'uomo contemporaneo, privato nelle residenze di città del contatto con gli elementi naturali e con quegli "spazi filtro" esterni utili e al contempo dilettevoli in grado di estendere le funzioni di un'abitazione e di incrementare la qualità del vivere.

Più recentemente, a seguito dell'evoluzione tecnologica che ha portato alla generazione di sistemi per la vegetazione particolarmente leggeri, la copertura a verde si è vista impiegata in progetti di ampie dimensioni e di notevole articolazione formale: il Campus universitario Ewha a Seoul di Dominique Perrault, l'Accademia delle scienze a San Francisco di Renzo Piano, il

Figura I.21: La copertura a verde del convento de La Tourette

Uno dei "5 Punti dell'architettura" di Le Corbusier è dedicato alle coperture a verde. Le Corbusier riteneva fondamentale ripristinare la vegetazione in copertura, per compensare la sottrazione di suolo generata dalle costruzioni.





Central Park Grin Grin a Fukuoka di Toyo Ito sono alcuni fra i noti esempi dell'applicazione di inverdimenti a estese superfici di copertura.

Proprio per gli edifici di dimensioni eccezionali, la copertura a verde viene frequentemente impiegata perchè capace di attutire l'impatto visivo delle volumetrie: la vegetazione che cresce al di sopra di una copertura "mimetizza" in un certo senso la costruzione, favorendo l'integrazione tra edificio e territorio, in particolare in tutti quei contesti caratterizzati da una forte valenza paesaggistica.

Da un punto di vista strettamente percettivo, infatti, un edificio rivestito di vegetazione assume quelle colorazioni e quelle configurazioni proprie delle piante variabili nel tempo e a seconda delle stagioni. Inoltre lo strato vegetale non è una superficie piana ma un volume vero e proprio caratterizzato dalla presenza di pieni (le foglie e i rami delle piante che hanno diverse forme e altezze) e di vuoti (lo spazio fra esse). Le piante si muovono, mischiano le ombre proiettate con la varietà cromatica delle loro chiome, presentano qualità tattili e sonore: escludendo i giardini pensili, che per definizione sono oggetto di pratiche compositive proprie della progettazione e dell'arte dei giardini, anche solo la colonizzazione di specie spontanee genera forme e colori in continuo mutamento, andando incontro alle fioriture, ai verdi acquosi, ai rossi intensi, ai periodi di siccità e agli stati di quiescenza. Queste proprietà fanno della copertura a verde una superficie in grado di aggiornare la propria configurazione superficiale attraverso il processo di crescita dei suoi componenti-pianta. Per tale peculiarità le applicazioni che impiegano il verde come pelle di un edificio rientrano a pieno titolo in quella tipologia di sistemi in grado di stimolare la percezione sensoriale. La possibilità relativamente semplice e poco onerosa di cambiare la tipologia di vegetazione di una copertura consente altresì di variare radicalmente l'aspetto di una copertura in breve tempo, andando a configurare ambienti molto diversi.

Oltre alle possibilità espressive inedite che offre, la copertura a verde si configura come un'opportunità progettuale, una sorta di tecnologia carica di progettualità latente, in grado di favorire l'investigazione delle relazioni fra l'interno e l'esterno, dando luogo a esiti funzionali svariati e originali. Attraverso il suo impiego non si ha solo un incremento della superficie fruita, ma anche una generazione di idee di progetto e di forme che combinano interno ed esterno, sopra e sotto, artificiale e naturale arricchendo il programma funzionale dell'intero edificio.

Questo passaggio da tradizionale giardino in quota a copertura come elemento dotato di forte carattere progettuale è stato reso possibile da un progressivo perfezionamento tecnologico delle stratigrafie, che han-

Figura I.22: Il Vulcano buono a Nola

La copertura del Vulcano buono di Nola è un involucro che si imposta direttamente alla quota del suolo per tutto il perimetro esterno dell'edificio. Concepita come un involucro globale, la copertura trasforma l'edificio, che copre 150 mila metri quadri di superficie calpestabile, in una collina artificiale, il cui "cratere", il punto più alto della copertura, è alto 41 metri.

LE QUALITÀ SUPERFICIALI

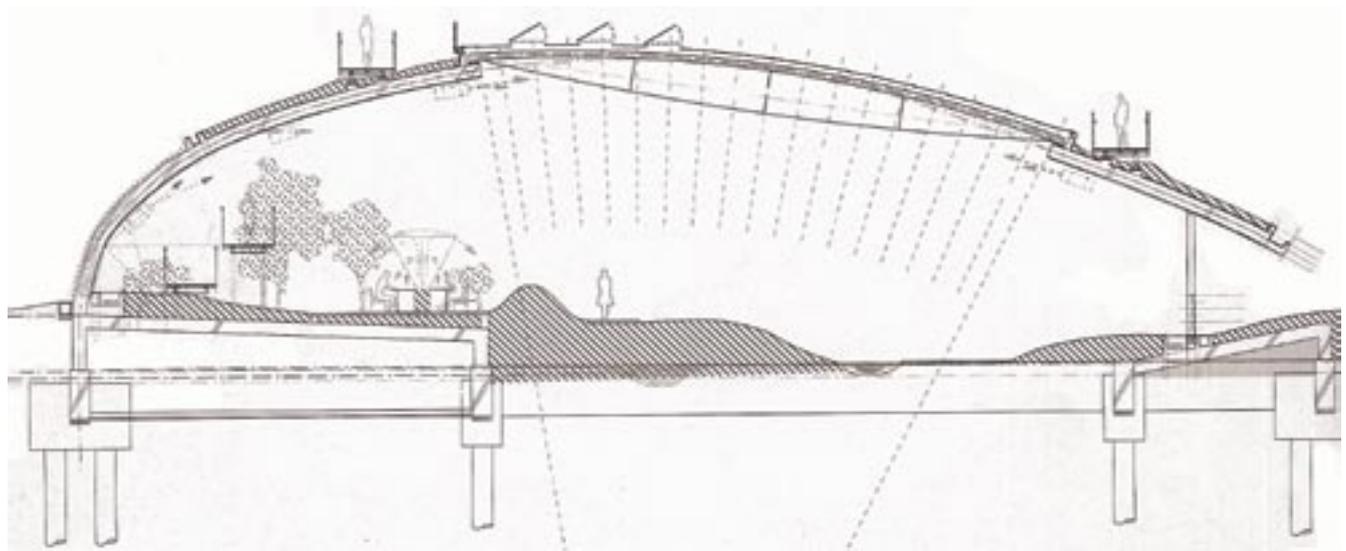


Figure I.23 e I.24: Vista del complesso Grin Grin a Fukuoka e sezione dell'edificio

Grin Grin, progettato da Tyo Ito, è il primo edificio costruito sull'Island City di Fukuoka, isola artificiale di circa 400 ettari situata sulla parte orientale della baia Hakata. Il fulcro del parco è proprio Grin Grin, un edificio studiato come luogo di incontro, ospitante

al suo interno 5000 metri quadri di ambienti naturali ricostruiti. La copertura dell'edificio è interamente rivestita dalla vegetazione e presenta un lungo camminamento dal quale poter ammirare il paesaggio naturale circostante. Il percorso è accessibile sia dall'interno dell'edificio sia dall'area esterna che è posta in continuità con l'estradosso della copertura. "Secondo i diversi punti di

vista, ci troviamo in presenza di un parco che assomiglia a un edificio o, viceversa, di un edificio che assomiglia a un parco." Dalla sezione è visibile che la copertura è dotata, oltre che dell'inverdimento, di un elemento di tenuta metallico nei versanti più pendenti.

Fonte: *Area*, 105 (2009): 26.

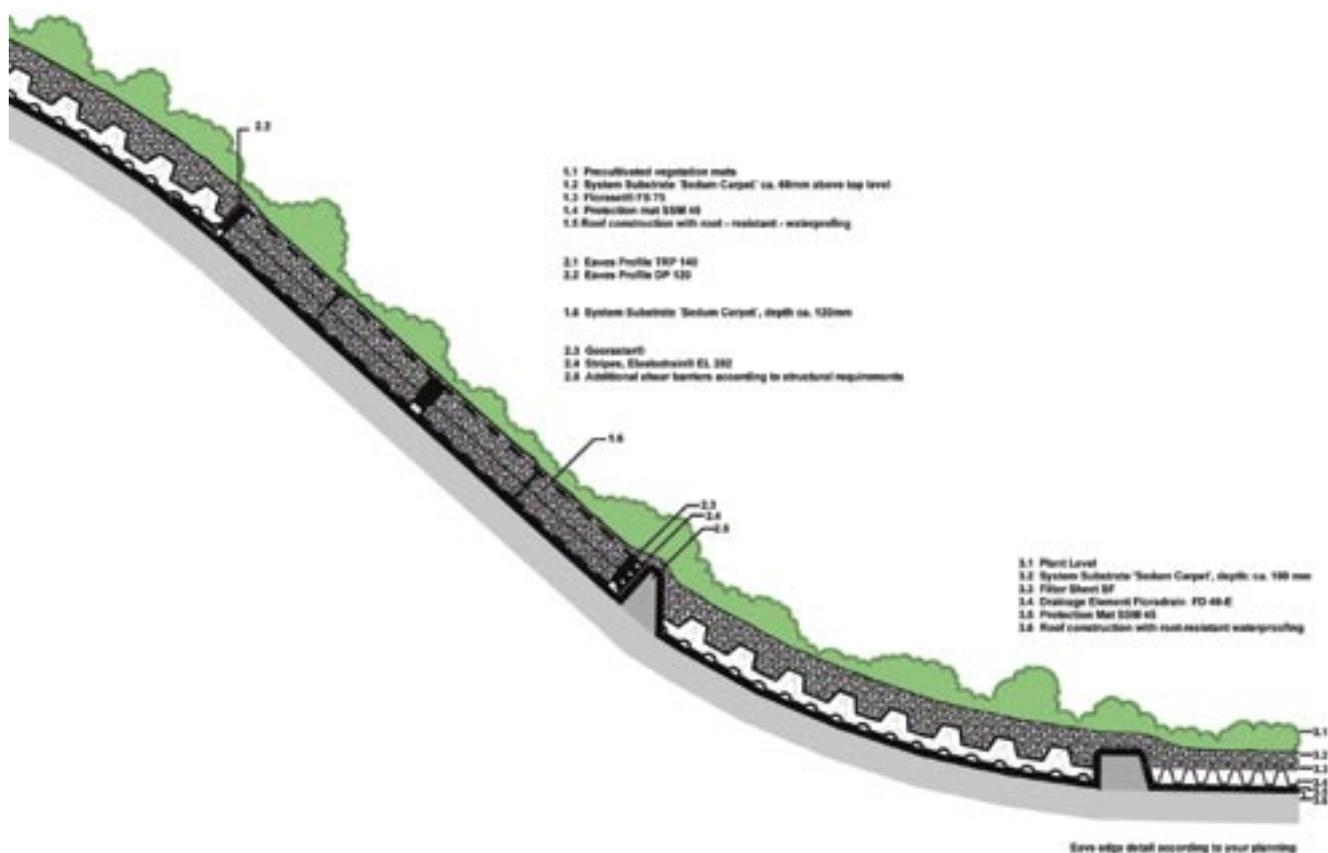


Figura I.25: Sezione tecnologica di una copertura curva

Al giorno d'oggi i sistemi tecnologici di chiusura orizzontale a verde sono caratterizzati dalla multistratigrafia: questo consente al sistema la leggerezza e l'impiego del verde anche per superfici particolarmente inclinate o curve. Il dettaglio, riferito a una generica copertura curva, mostra che una sezione passante di una copertura a verde può avere 3 differenti pacchetti in relazione alla variazione dell'inclinazione della falda.

Fonte: ZinCo

no raggiunto prima adeguate garanzie a livello di impermeabilizzazione e di isolamento termico, e poi flessibilità funzionale dando il via libera alle applicazioni del verde non solo alle coperture piane in calcestruzzo armato, ma anche a quelle in metallo e legno, consentendo l'impiego in sicurezza del verde anche su strutture inclinate e curve.

Un uso che ha incrementato le possibilità fruibili dell'edificio a mezzo della copertura a verde è dato inoltre dalla potenziale continuità fra suolo ed edificio: ne sono degli esempi il progetto dell'Environment Park a Torino o il Museo di Pitagora a Crotona, dove la continuità fisica fra edificio, cioè copertura, e intorno urbano consente la fruizione libera della superficie da parte dei cittadini. In questo caso i gradi di relazione fra suolo pubblico e suolo privato sono aumentati al punto tale che la copertura, pur di proprietà privata, si mette a disposizione della libera fruizione pubblica.

Tali interventi si collocano al limite fra la progettazione architettonica e la progettazione urbana, in quanto coinvolgono estese superfici edilizie e restituiscono alla collettività ampi spazi verdi liberamente godibili dove è possibile accedere a uno spazio altrimenti sottratto.

In questo caso si evidenzia anche come coperture piane e coperture inclinate a verde consentano entrambe, pur in modi diversi, una possibilità di fruizione: la distinzione geometrica che un tempo separava nettamente due tipologie di copertura e che segnava un limite fra accessibilità e non accessibilità, diventa oggi un pretesto formale.

Da un punto di vista tecnologico, la necessità di riprodurre condizioni necessarie per ospitare specie vegetali in grado di sopravvivere in un ambiente artificiale, impone la costruzione di un elemento tecnico dimensionato per sostenere carichi consistenti e specifiche misure di sicurezza per la protezione dell'elemento di tenuta. Questa condizione intrinseca della tecnologia consente di progettare l'estradosso della copertura al pari di un vero e proprio spazio aperto, integrando al verde pavimentazioni o finiture superficiali diverse: è infatti possibile inserire senza alcuna particolare difficoltà finiture quali gli arredi urbani, fontane o alberi ad alto fusto. Questa caratteristica tecnologica, a meno dei limiti di carico sostenibili dalla struttura, consente un impiego della copertura a verde anche per attività particolari. Così si vede utilizzato il verde pensile come campo sportivo, o come copertura di un parcheggio, come vigneto, come prato da pascolo. Queste attività, sebbene estreme, mostrano la grande flessibilità funzionale che la tecnologia è in grado di offrire al giorno d'oggi.

Figura I.26: Fifty Two Degrees Innovation Center

Il progetto di Mecanoo per il centro direzionale 52 Degrees a Nijmegen (Paesi Bassi) è un imponente edificio alla cui base si trova un esteso parcheggio dell'altezza di un piano coperto da una falda inclinata a verde semi-intensivo. La superficie di copertura è accessibile al pubblico direttamente dalla strada che fiancheggia l'edificio.

Appare evidente che un ipotetico requisito di fruibilità di una copertura sia intrinsecamente di gran lunga superiore nel caso dell'impiego del verde pensile rispetto a qualsiasi altro tipo di finitura superficiale. La possibilità di fornire uno spazio inverdito in quota, così come di innescare idee progettuali dove l'interno e l'esterno si possano integrare, rappresenta una caratteristica assolutamente singolare della tecnologia. La conseguenza del suo impiego può quindi essere un'implementazione funzionale: un verde fruibile o quantomeno visibile dal singolo e/o dalla collettività.





Figure I.27 e I.28: L'Environment Park a Torino

L'Environment Park a Torino è un parco scientifico tecnologico progettato per innescare un'operazione di trasformazione urbana del lotto ex-Teksid, area dismessa di superficie pari a 2 ettari e mezzo. Realizzato su progetto di Emilio Ambasz, Benedetto Camerana e Giovanni Durbiano, i vari edifici del complesso sono coronati da una copertura a verde intensivo posta in continuità con il suolo urbano: l'effetto di questa scelta progettuale è che la copertura, resa accessibile alla cittadinanza, è fruibile come un parco vero e proprio. Al contempo il progetto consente che le aree interne del parco tecnologico siano private e quindi non accessibili al pubblico.

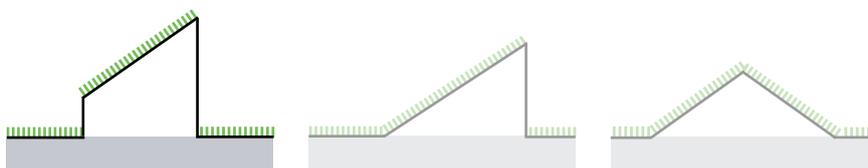


Figura I.29: Vista delle coperture dell'Environment Park

L'insieme delle coperture rappresenta un'area verde molto estesa della città: il lotto su cui è stato costruito il complesso era destinato, secondo il Piano Regolatore, a divenire un parco fluviale della Dora, dopo un processo di bonifica dei suoli. Una variante successivamente approvata, proponeva di insediare il parco scientifico tecnologico proprio all'interno di quest'area verde, sperimentando però forme di integrazione fra parco urbano e costruzioni: da questa esigenza nasce l'Environment Park così concepito con un vastissimo impiego di coperture a verde. Fonte: www.envipark.com > Fotogallery

The High Line

LUOGO	New York
PROGRAMMA	parco lineare
ARCHITETTO	Diller Scofidio + Renfro
PAESAGGISTA	Field Operation
REALIZZAZIONE	2007-2009
USO DELLA COPERTURA	camminamento, zona di sosta, attraversamento
PRATICABILITÀ	accessibile
SUPERFICIE	20000 m ²
PENDENZA	piana
VERDE	semi-intensivo
SISTEMA	ZinCo



Un interessante esempio di suolo ricostruito e restituito alla comunità è rappresentato dal progetto noto con il nome di High Line.

La High Line è stata fino alla metà degli anni Ottanta del secolo scorso una ferrovia sopraelevata che attraversava la città di New York per una lunghezza pari a 2 chilometri e 300 metri; costruita negli anni Trenta del '900 per il trasporto merci, correva lungo la Trentaquattresima strada e Gansevoort Street, nella parte occidentale di Manhattan. Dopo la chiusura nel 1980 e quasi 30 anni di abbandono, recentemente è stata oggetto di un processo di riqualificazione per opera dello studio di architettura Diller Scofidio+Renfro in collaborazione con lo studio di architettura del paesaggio James Corner Field Operation, e trasformata in una grande *promenade* urbana. La piattaforma ferroviaria è ora un parco urbano lineare, attrezzato di panchine e superfici verdi, aree soleggiate e ombreggiate che si alternano a aiuole e pavimentazioni, attraverso un percorso che offre diversi scenari sulla città. Le aree verdi che ricoprono la struttura preesistente sono alternativamente coltivate e lasciate crescere spontaneamente, generando così numerose varianti di superfici lungo la stessa struttura.

La pavimentazione è costituita da elementi prefabbricati in calcestruzzo a giunti aperti, per consentire la crescita della vegetazione spontanea fra elementi affiancati; questi elementi sono moduli allungati che in taluni luoghi si flettono al di sopra del piano del solaio diventando delle sedute. Alcuni dei moduli della pavimentazione presentano delle sagome ridotte e allungate alle estremità per incastrarsi a pettine nelle superfici inverdite, generando



delle varianti del disegno a terra, attraverso contorni indefiniti che in talune zone vincolano i visitatori a passeggiare percorrendo traiettorie non rettilinee fra la vegetazione.

La High Line è diventata un importante segno urbano della prima periferia di Manhattan, uno strumento di riqualificazione che ha generato una naturale rendita di posizione per gli immobili adiacenti.

A questo *ready made* urbano, trasformato in un sinuoso percorso panoramico, i Newyorchesi hanno dato il nome “agritettura”: un incontro fra agronomia e architettura che dimostra come la valorizzazione di un “rudere urbano” attraverso l’impiego della vegetazione abbia nel contempo innescato un processo di riqualificazione urbana a mezzo di un singolo intervento pubblico nello spazio aperto.

Figura I.30: Vista della High Line verso Gansevoort Street

Lungo il parco lineare sopraelevato sono stati conservati alcuni tratti di rotaie a indicare la ragione originaria della presenza di questa struttura sopraelevata.

Fonte: Area, 106 (2009): 101.



Figura I.31: Pianta della High Line

La sopraelevata si estende per una lunghezza di 2 chilometri e 300 metri sul confine occidentale di Manhattan. Lungo il suo percorso si trovano svariati punti di accesso che portano i cittadini dal livello stradale al parco lineare, attraverso scale e ascensori.
Fonte: Area, 106 (2009): 99.

Figura I.32: Vegetazione incolta

Lungo il percorso la vegetazione non viene trattata in egual modo: alcune parti vengono sfalciate o piantumate con bordure, altre invece sono lasciate incolte, costituendosi così come preziosi corridoi verdi dove la piccola fauna urbana riesce a sopravvivere indisturbata.

Fonte: www.thehighline.org > images & videos



Figura I.33: Moduli della pavimentazione e panchine

Il percorso della High Line si apre a viste via via diverse; in alcuni punti è possibile sostare e riposarsi guardando panorami aperti perchè la sopraelevata è alta 10 metri dal suolo. Le panchine su cui sostare sembrano essere delle rotaie piegate che si alzano dalle traversine.

Fonte: www.thehighline.org > images & videos



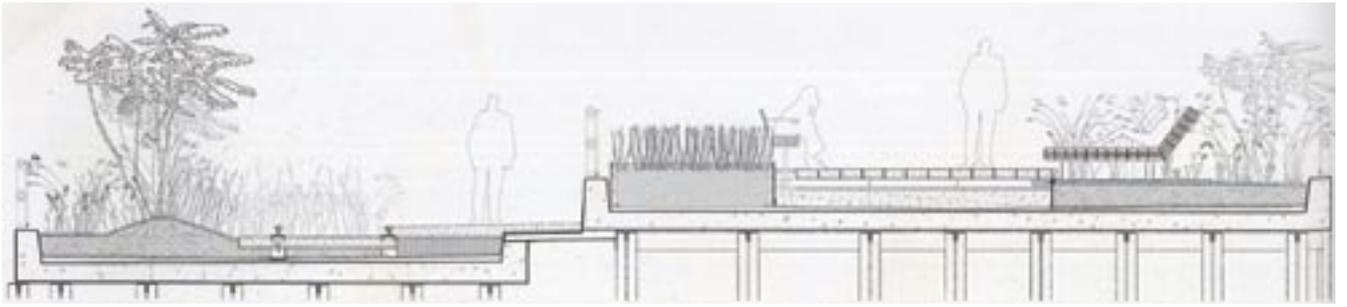


Figure 1.34 e 1.35: Sezioni verticali della High Line

La struttura preesistente in acciaio e calcestruzzo è stata preservata e al di sopra del solaio è stata predisposta un'impermeabilizzazione continua a membrana. La stratigrafia della copertura a verde è stata integrata da elementi di pavimentazione e da arredi urbani.

Fonte: *Area*, 106 (2009): 102.

t

Figura 1.36: Belvedere terminale della High Line verso Gansevoort Street

Figura I.37: Vista della High Line prima della riqualificazione

Dal momento dell'abbandono, nel 1980, la sopraelevata è stata colonizzata da vegetazione spontanea. Gli abitanti dei quartieri limitrofi, affezionati a questo parco incolto, si sono opposti con forza al progetto di demolizione deciso dal sindaco Rudolph Giuliani e con la legislatura successiva di Michael Bloomberg sono stati avviati i lavori di recupero dell'intero segmento ferroviario. Questo progetto di riqualificazione ha avuto delle ricadute positive sui valori degli immobili prospicienti alla High Line.

Fonte: Oscar Arriola, www.fotoflow.blogspot.com



Figura I.38: Moduli della pavimentazione affiancati ai binari preesistenti

Fonte: <http://designnotes.info/?p=1801>



Figura I.39 pagina a fianco: Vista della High Line dall'alto

Fonte: www.thehighline.org > images & videos



I.4

Un sistema umido: la presenza dell'acqua nell'elemento tecnico di copertura a verde

La capacità di ospitare le piante sulla superficie di una copertura implica la compresenza di due componenti fondamentali per la vita vegetale: la terra e l'acqua.

Per una pianta la terra svolge una serie di funzioni fondamentali: ancora le radici, fornisce sali minerali e ospita i batteri degradatori; l'acqua invece consente di nutrirsi e di svolgere tutte le attività proprie fisiologiche (ogni reazione di sintesi di un organismo vegetale avviene fra sostanze disciolte). La triade pianta-terra-acqua rappresenta quindi una sorta di "unità minima di vita vegetale" e la copertura a verde ne ricostruisce una porzione estesa sul suo estradosso.

Da questa considerazione si deduce che differentemente da tutti gli altri tipi di copertura, che tendono ad allontanare la pioggia intercettata nel più breve tempo possibile, la copertura a verde trattiene nella sua stratigrafia l'acqua piovana, al fine di abbeverare e nutrire le piante ospitate: si può affermare quindi che queste coperture abbiano una priorità opposta rispetto a tutte le

Figura I.40: Unità minima di vita vegetale: pianta-terra-acqua



altre tipologie, ossia di non disperdere l'acqua meteorica ma di raccoglierla. Al contempo, però, la copertura a verde è un elemento di chiusura orizzontale e, in quanto tale, la sua funzione primaria è di impermeabilizzare gli ambienti a essa sottostanti. La copertura a verde, quindi, svolge contemporaneamente due funzioni che sono antitetiche: difende l'edificio dall'acqua e allo stesso tempo raccoglie l'acqua per le piante.

La capacità di costituirsi sia come **sistema di impermeabilizzazione** per l'edificio, sia come **bacino idrico di raccolta**, fa della copertura a verde un sofisticato dispositivo di gestione dell'acqua, dove l'aleatorietà degli eventi meteorici (cioè le varie intensità, la frequenza e l'alternanza delle piogge, della neve, del soleggiamento e del vento) non deve alterare il funzionamento della tecnologia, procurare danni a parti dell'edificio e, nello stesso tempo, recare sofferenza alla vegetazione.

Come conseguenza della presenza dell'acqua, la copertura a verde fornisce particolari prestazioni termiche, che variano in funzione del livello di



Figura I.41: Tetti a falda in scandole

Le coperture a falda presentano nella maggior parte dei casi un manto di impermeabilizzazione discontinuo (cfr. nota 16:20). L'inclinazione delle falde garantisce un rapido smaltimento dell'acqua verso gli elementi di gronda e quindi verso gli impianti di raccolta.

Fonte: www.malgabart.blogspot.com



Figura I.42: Tetti a falda in lamiera

Anche i tetti in lamiera metallica sono coperture discontinue (cfr. nota 16:20) e allontanano tutta l'acqua che intercettano molto rapidamente. Differentemente dalle coperture in coppi o in scandole, le lamiere metalliche possono essere utilizzate su falde di inclinazioni ridotte perché il sistema di aggraffatura garantisce una perfetta tenuta all'acqua.

Figura I.43: Pioggia battente sul tetto
Il trattamento che le coperture discontinue riservano all'acqua di origine meteorica è l'allontanamento più rapido possibile.



Figura I.44: Pioggia sulla copertura a verde
Contrariamente alle altre tipologie di tetto, la copertura a verde trattiene l'acqua che intercetta per abbeverare e nutrire la vegetazione che ospita.



Figura I.45 pagina a fianco: Complesso residenziale 8Tallet a Copenhagen
Il complesso residenziale realizzato da Big-Bjarke Ingels Group ha una copertura a verde inclinata di straordinaria lunghezza: le falde rivestite di un tappeto della specie sedum scendono per gli 11 piani dell'edificio fino a toccare il suolo. Le due falde hanno una superficie complessiva di 1700 metri quadri (Sistema Veg Tech).
Fonte: www.davidreport.com > blog > big E8 house wins the 2010 scandinavian green roof award

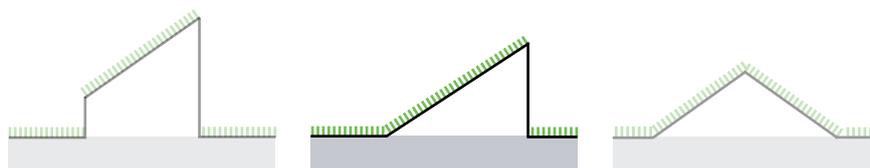
umidità via via assunto dal sistema: una copertura a verde “asciutta”, infatti, presenta un comportamento termico molto diverso da una copertura a verde “umida”.

Se da un lato questa caratteristica rende complessa la quantificazione dei benefici per l'ambiente interno confinato dell'edificio, dall'altro i vantaggi di cui gode l'ambiente esterno immediato sono effettivi e presentano delle ricadute positive sia a livello microclimatico, sia a livello di controllo dei deflussi idrici urbani.



Museo di Pitagora

LUOGO	Crotone
PROGRAMMA	museo scientifico
ARCHITETTO	OBR - Open Building Research
PAESAGGISTA	- - -
REALIZZAZIONE	2007
USO DELLA COPERTURA	camminamento, zona di sosta, belvedere, parco tematico
PRATICABILITÀ	accessibile
SUPERFICIE	1000 m ²
PENDENZA	6%
VERDE	intensivo
SISTEMA	- - -



Il controllo delle acque meteoriche è uno dei principali temi di progetto dell'intervento realizzato a Crotone per il Museo di Pitagora dallo studio genovese Open Building Research, infatti la continuità fra territorio ed edificio qui attuata, lungo un versante scosceso di una montagna, implica un attenta regimazione delle acque provenienti dal pendio naturale e che rifluiscono sulla copertura. Esito di un concorso di idee indetto dal Comune di Crotone nel 2003, il Museo si trova sulle pendici del Monte Pignera, all'interno di un parco comunale che si estende per una superficie di 18 ettari alla periferia sud-est della città. Parte di un più esteso programma di riqualificazione delle aree periferiche atto a dotare di nuove attività culturali le aree adiacenti alla città storica, il progetto si pone un duplice obiettivo: da un lato quello di estendere i percorsi museali interni verso il Parco e viceversa dall'altro quello di assumere il ruolo di *landmark* riconoscibile dalla città come struttura integrata visivamente e funzionalmente al rilievo.

Incuneandosi nel declivio della montagna, il corpo di fabbrica a pianta rettangolare sviluppa circa 1000 metri quadri di sale espositive, uffici e spazi per la didattica distribuiti su due piani coperti, attraverso un percorso a spirale che conduce il visitatore dal Parco attrezzato verso l'interno del museo e ancora dall'interno verso l'esterno attraverso la copertura a verde. Il museo ha quindi due ingressi, uno al piano di spicco dell'edificio, che convoglia i flussi di visitatori dalla città, e uno a livello della copertura, che si collega al sistema di percorsi presenti nel Parco.

Uno degli elementi di maggiore criticità, che interessa la maggior parte dei



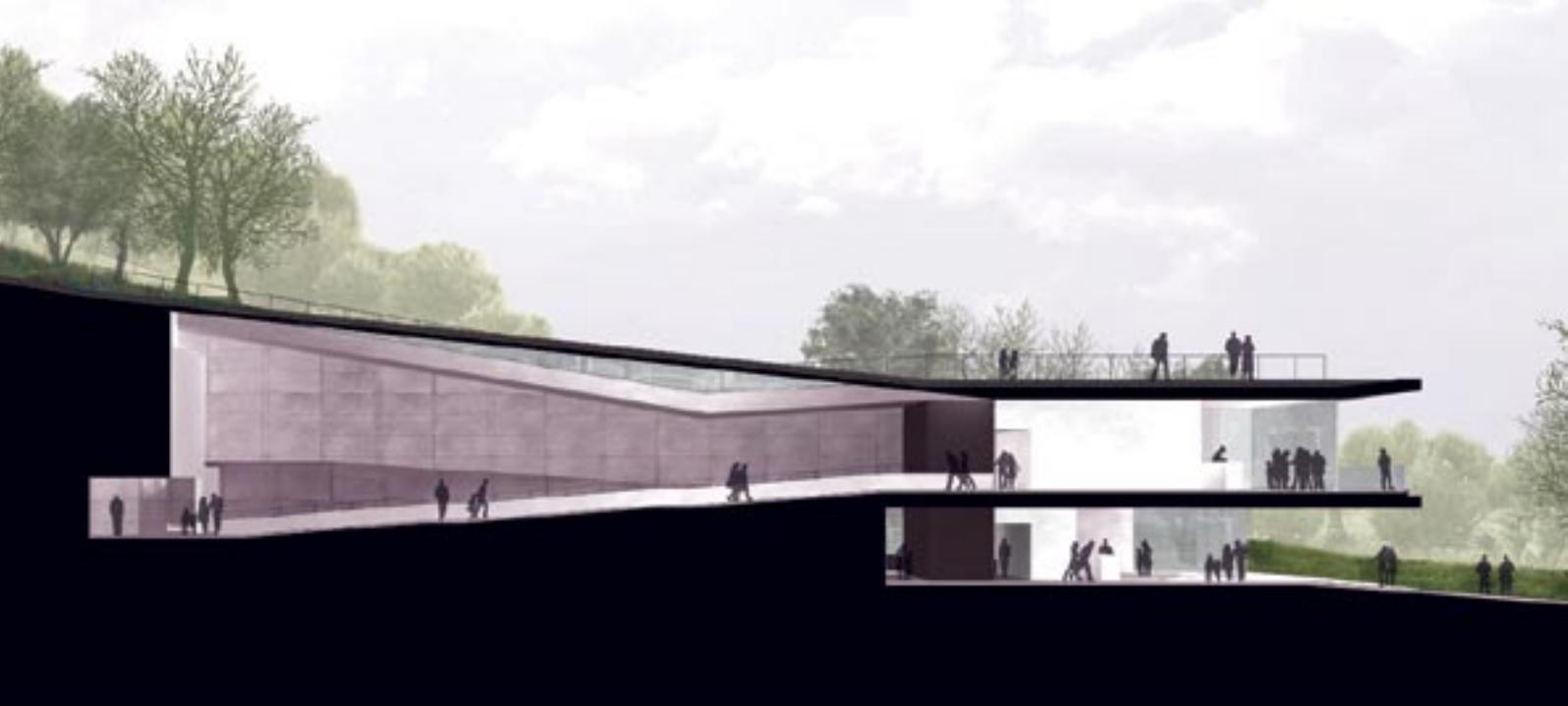
progetti che operano mediante una variazione di pendenza su versante, è il controllo delle acque provenienti dalle superfici più alte del pendio. In caso di forte precipitazione infatti la copertura a verde rischia di essere investita da una grande quantità di acqua che il terreno non è in grado di assorbire e di smaltire con sufficiente rapidità. Per questo motivo, oltre ai tradizionali accorgimenti necessari per una corretta impermeabilizzazione del sistema di chiusura superiore, è stato indispensabile studiare appropriate soluzioni tecnologiche e costruttive per smaltire l'acqua in eccesso, fra cui ampie caditoie in corrispondenza del punto di raccordo tra suolo artificiale e suolo naturale e canali di drenaggio interrati.

La copertura di questo progetto è il fulcro attorno a cui ruota il sistema di relazioni e di osservazione, in primo luogo fra il Parco del Monte Pignera e l'edificio, ma anche fra la città di Crotona, il mare e l'immediato entroterra chiuso visivamente dalla montagna. Questo è il caso in cui il progetto sfrutta l'ambivalente ruolo della copertura quale elemento di protezione e al contempo di transito, per "portare il paesaggio" all'interno del programma funzionale dell'edificio (in questo progetto fortemente unificato da un percorso espositivo interno al museo, che trova una continuità all'esterno fra l'itinerario tematico del Parco) e per divenire essa stessa parte di un progetto paesaggistico di scala territoriale.

Figura I.46: Vista della città di Crotona dalla copertura a verde del museo

La copertura del museo di Pitagora è posta in continuità con il versante del monte Pignera della città di Crotona: dalla copertura è possibile accedere al parco tematico, ugualmente dedicato al celebre matematico, e viceversa dal parco vi è un accesso al museo che attraversa parte della copertura. I percorsi fra interno ed esterno ruotano attorno al tema della fusione fra spazio costruito e spazio naturale attraverso l'impiego della copertura a verde, tecnologia ibrida fra artificio e natura.

Fonte: OBR - Open Building Research



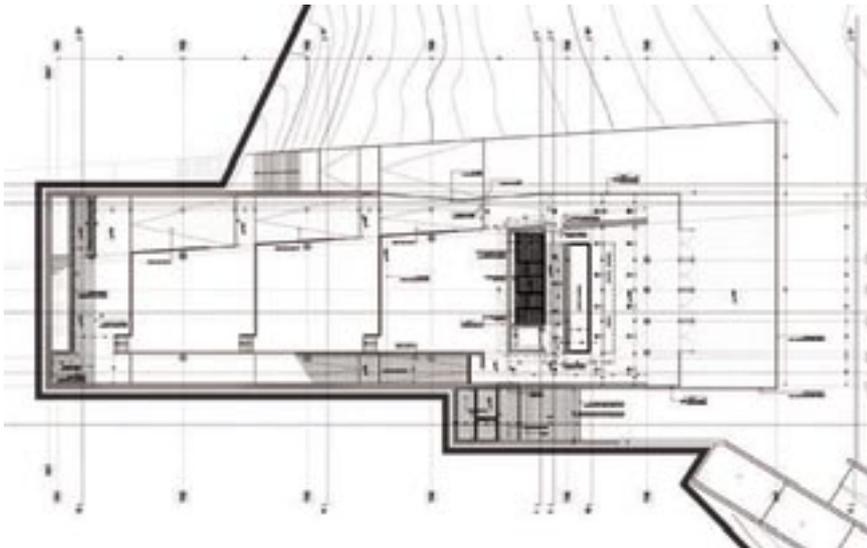


Figura I.47: Pianta piano terra

Fonte: OBR - Open Bulding Research

L'edificio è costituito di due soli piani, ciascuno dei quali è dotato di un ingresso. Al piano terra vi è l'accesso principale al museo da uno spiazzo prospiciente, e al primo piano si accede direttamente dalla copertura che è posta in continuità con il versante del monte.

Fonte: OBR - Open Bulding Research

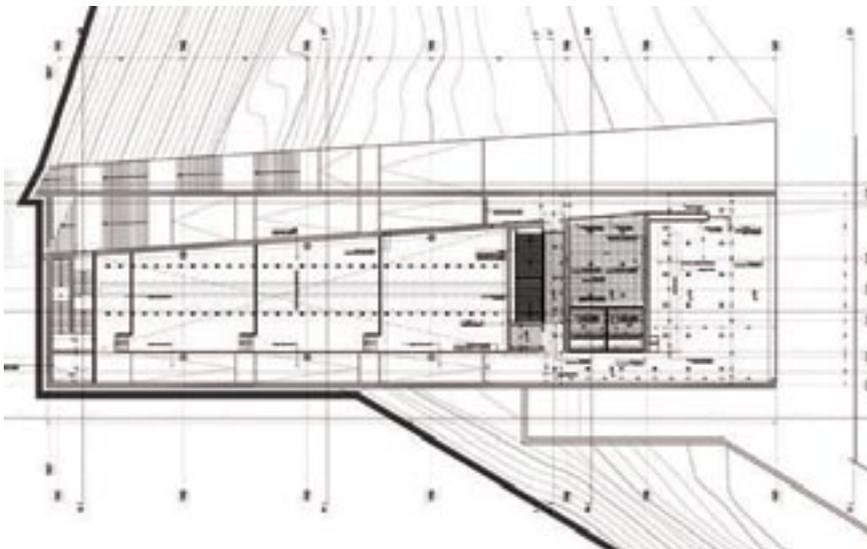


Figura I.48: Pianta primo piano

Fonte: OBR - Open Bulding Research

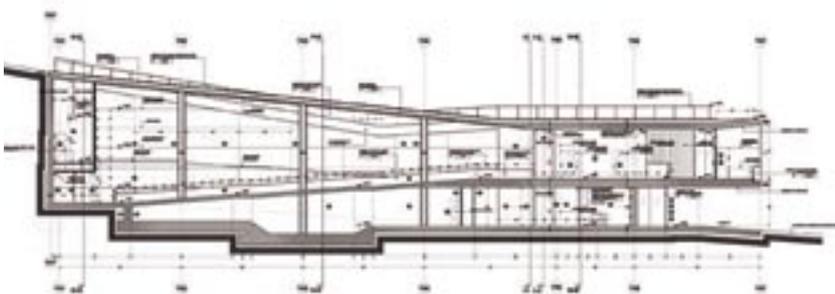


Figura I.49: Sezione verticale

Fonte: OBR - Open Bulding Research

Figura I.50 a fianco: Render della sezione verticale

Fonte: OBR - Open Bulding Research

Figura I.51 a fianco: Scavo dell'edificio

Fonte: OBR - Open Bulding Research

1.5 Il comportamento termico della copertura a verde: effetti sull'ambiente interno confinato

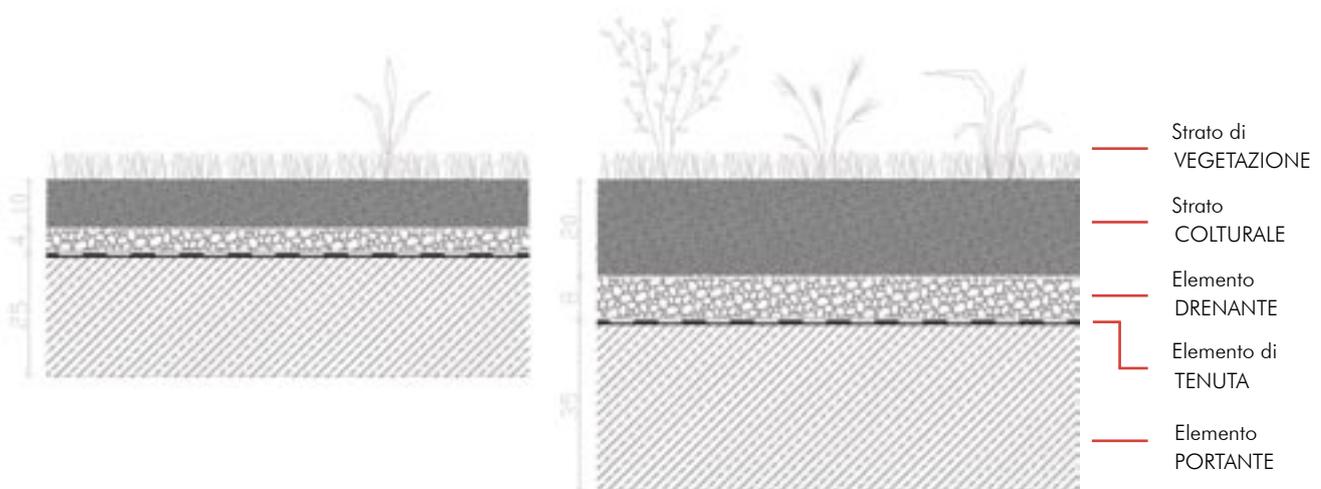
Le capacità termiche di una copertura a verde rappresentano un aspetto funzionale molto importante di questa tecnologia: come è stato analizzato nel paragrafo 1.2 *Il rapporto sinergico fra vegetazione e costruzione* la vegetazione si comporta al pari di un elemento schermante mobile riducendo così le temperature superficiali dei materiali sottostanti, e nello stesso tempo utilizza l'energia solare per svolgere una serie di attività fisiologiche (la fotosintesi clorofilliana e la traspirazione) diminuendo la temperatura media radiante dell'aria circostante.

La tecnologia della copertura a verde gode però, oltre che degli effetti microclimatici propri della vegetazione, anche della presenza di un substrato di coltivo di considerevole spessore che conferisce all'intero pacchetto tecnologico un comportamento virtuoso da un punto di vista termico.

La figura 1.52 mostra la stratigrafia tipica di una copertura a verde: lo spessore del substrato, pur variando in relazione alla tipologia dell'inverdimento (in linea generale maggiore è la dimensione delle piante, maggiore è lo

Figura 1.52: Stratigrafie di copertura a verde estensivo e semi-intensivo

Oltre agli effetti microclimatici propri della vegetazione, la copertura a verde gode dell'inerzia dello strato colturale, ossia del terriccio che ricopre l'intera falda di copertura con spessori variabili dai 10 centimetri fino a 1 metro.



MATERIALE	λ – CONDUTTIVITÀ TERMICA [W/mK]
TERRA ASCIUTTA*	~ 0,2
TERRA UMIDA*	~ 1,0 - 1,8
TERRA SATURA D'ACQUA*	~ 3,0
ACQUA DISTILLATA	0,6
ARIA	0,026
CALCESTRUZZO	2,3
LEGNO MINERALIZZATO	0,1
* Questi valori sono indicativi: il contenuto d'acqua e quindi la conduttività termica di un terriccio è estremamente variabile in dipendenza da molti fattori (granulometria delle particelle, contenuto di materiale organico, porosità...)	

spessore di substrato necessario per la loro sopravvivenza), è pari ad almeno 10 centimetri, ma, per coperture che vogliano ospitare erbacee o piccoli arbusti, questo valore dev'essere incrementato fino a 20-30 centimetri. Proprio il substrato di coltivo (che la normativa definisce *strato colturale*) rappresenta un elemento di considerevole spessore e distribuito uniformemente su tutta la superficie, pertanto capace di conferire inerzia termica all'elemento tecnico.

Una considerazione preliminare alla trattazione delle prestazioni termiche va fatta per inquadrare un argomento complesso, che per essere esplicitato non può giovare dei sistemi di calcolo della trasmittanza termica normalmente applicati allo studio dell'involucro poichè, come accennato nel paragrafo I.3 *Un sistema umido: la presenza dell'acqua nell'elemento tecnico copertura a verde*, una parte della stratigrafia di copertura presenta delle proprietà fisiche variabili in dipendenza dalla quantità d'acqua contenuta nel substrato. Per questo regime l'analisi deve quindi includere la trattazione di alcuni fenomeni legati al rapporto fra le piante, il substrato e l'ambiente, che generano trasferimento e uso di energia e di acqua. Il più importante di questi fenomeni è la così detta **evapotraspirazione**, grandezza fisica che misura la quantità d'acqua, riferita all'unità di tempo, che passa all'atmosfera per l'attività congiunta della traspirazione vegetale e dell'evaporazione dal suolo²⁰.

Da queste considerazioni è possibile dedurre che:

1. la trasmittanza termica del substrato è variabile: la tabella I.4 mostra che un substrato poroso asciutto può avere valori di trasmittanza prossimi a quelli di un materiale da isolamento termico (per esempio quello del legno mineralizzato), mentre un substrato bagnato presenta valori di trasmittanza superiori a quelli di un materiale denso come il calcestruzzo;
2. la quantità d'acqua contenuta nel substrato varia continuamente in dipendenza dall'estrazione operata dalle piante per le proprie attività fisiologiche, e dal processo di evaporazione dell'acqua dal suolo;
3. le variabili coinvolte nell'analisi delle prestazioni di una copertura a

Tabella I.4: Trasmittanza dei terreni caratterizzati da diversi valori di umidità

La trasmittanza di un terreno varia sensibilmente in relazione al suo contenuto d'acqua: un terreno asciutto presenta una trasmittanza simile a quella di un materiale isolante, contrariamente un terreno bagnato può avere valori di trasmittanza superiori a quelli di un materiale denso come il calcestruzzo. Da ciò deriva che il comportamento termico della copertura a verde varia costantemente, in relazione al livello di umidità del substrato.

EFFETTI DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE

²⁰ L'evapotraspirazione è una grandezza fisica utilizzata in agrometeorologia; si indica con la sigla ET e si misura in millimetri in unità di tempo (essendo l'evapotraspirazione un fenomeno climatico inverso a quello delle precipitazioni, per convenzione si usa il millimetro in modo da rendere tale grandezza direttamente comparabile con le precipitazioni).

Gli ambiti di applicazione prevalenti di questa misura riguardano i consumi idrici delle colture e la gestione dell'acqua irrigua dei bacini idrografici.

I fattori che influenzano l'evapotraspirazione sono la natura del terreno, il clima, la specie vegetale, la tecnica colturale: l'evapotraspirazione è la risultante complessa delle loro interrelazioni.

verde non riguardano solo le caratteristiche specifiche degli strati componenti del sistema, ma anche i fattori microclimatici e climatici dell'ambiente di inserimento: pioggia, andamento delle temperature, vento, umidità dell'aria.

Per le ragioni appena esposte il comportamento termico di una copertura a verde, quand'anche delineabile per sommi capi, non è uguale per zone climatiche che non presentino parametri meteorici assolutamente simili: le prestazioni della copertura a verde, in particolare quelle riguardanti il rendimento energetico per l'ambiente interno confinato, non sono "esportabili" a zone climatiche differenti.

La copertura a verde non può pertanto essere genericamente definita come un sistema termicamente isolato per la sola presenza della vegetazione e dello strato culturale. Attraverso questi due componenti la copertura a verde si dota infatti non solo, o non semplicemente, di un isolamento termico, ma piuttosto di un sistema di condizionamento termico, vale a dire di un sistema in grado di influire in modo inconstante sugli scambi termici fra interno ed esterno, in funzione soprattutto delle condizioni climatiche esterne.

La tabella I.5 illustra sinteticamente l'influenza dell'umidità del substrato sul comportamento della copertura a verde. In regime estivo un substrato asciutto funziona effettivamente come uno strato di isolamento termico, poiché è un materiale scarsamente denso²¹; inoltre, a seconda della massa di cui è dotato distribuita in uno spessore considerevole, è anche in grado di accumulare una certa quantità di calore contribuendo in parte allo sfasamento dell'onda termica dell'elemento tecnico di copertura. Invece un substrato umido si comporta diversamente: il calore assorbito viene dissipato per il processo di evaporazione dell'acqua contenuta, e tale calore proviene

²¹ La densità apparente di un substrato per copertura a verde varia da 350 a 1000 chilogrammi al metro cubo secondo prescrizione normativa (UNI 11235: 27). La sola variazione di questo parametro agli estremi dell'intervallo implica delle prestazioni termiche differenti: a parità di volume un substrato dotato di massa superiore presenta un'inerzia termica maggiore rispetto a un substrato di massa inferiore.

Tabella I.5: Capacità termiche della copertura a verde in relazione all'umidità dello strato culturale

Fra i vari parametri che influiscono sul comportamento termico della copertura a verde l'umidità del substrato è determinante.

REGIME STAGIONALE	ESTIVO	INVERNALE
UMIDITÀ DEL SUBSTRATO		
ASCIUTTO	IL SUBSTRATO FUNZIONA COME ISOLAMENTO TERMICO; INOLTRE, IN RELAZIONE ALLA SUA MASSA, CONTRIBUISCE ALLO SFASAMENTO DELL'ONDA TERMICA	IL SUBSTRATO FUNZIONA COME ISOLAMENTO TERMICO
BAGNATO	IL SUBSTRATO FUNZIONA COME ISOLAMENTO TERMICO; IN TALUNE CONDIZIONI ANCHE COME ESTRATTORE DI CALORE DALL'INTERNO	IL SUBSTRATO NON FUNZIONA COME ISOLAMENTO TERMICO

non solo dall'ambiente esterno, ma anche dagli strati sottostanti il substrato. Perciò, in condizioni di caldo estremo, il substrato umido può funzionare anche come dispositivo estrattore di calore dall'ambiente interno.

In regime invernale, invece, un substrato asciutto è capace di fungere da strato di isolamento termico, mentre un substrato umido svolge solo una debole funzione isolante: come per un qualsiasi altro materiale preposto a tale scopo, la presenza dell'acqua limita significativamente la capacità isolante alle basse temperature.

Alla luce di queste considerazioni appare evidente che le prestazioni estive della copertura a verde siano complessivamente migliori di quelle invernali: infatti il substrato, in qualsiasi condizione di umidità, apporta benefici termici all'ambiente interno confinato, funzionando come isolamento termico, come estrattore di calore oppure come una combinazione in continua variazione di queste due possibilità. Differentemente le prestazioni invernali risultano meno significative poichè, in relazione al contenuto d'acqua, la capacità di isolamento del substrato è inevitabilmente ridotta.

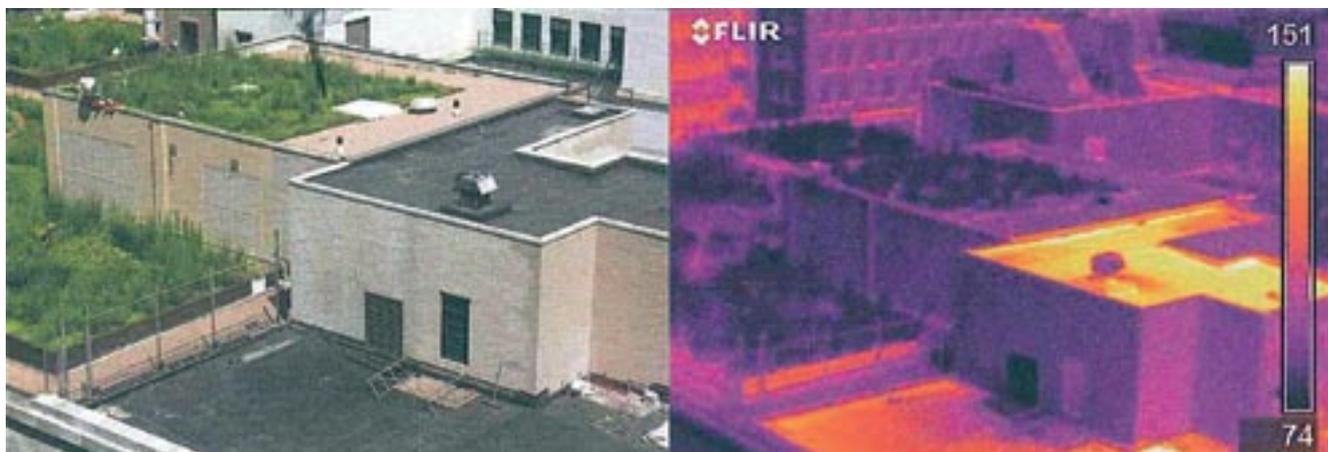
Alle prestazioni termiche del substrato devono essere sommate anche le prestazioni dello strato di vegetazione illustrate nel paragrafo I.2 *Il rapporto sinergico fra vegetazione e costruzioni*. Come si vede nella figura I.53, la temperatura superficiale dello strato di vegetazione assume un valore pari a quello delle temperatura dell'aria: dalla termografia risulta che la superficie ricoperta di piante abbia una temperatura di 74 gradi Fahrenheit (pari a 23 gradi Celsius), mentre la temperatura della membrana bituminosa di impermeabilizzazione, posta in contiguità all'altra metà della copertura ricoperta dal prato, oscilla fra i 130 e i 140 gradi Fahrenheit (54-60 gradi Celsius). Lo strato di vegetazione, anche se di spessore relativamente ridotto e aderente al suolo, è uno "strato freddo" rispetto tutte le altre superfici costruite.

La figura I.54 nella pagina successiva illustra gli esiti di un esperimento riguardante le prestazioni termiche di una copertura a verde estensivo, condotto da Chi Feng²². Il modello tridimensionale della copertura piana, in alto a sinistra, rappresenta le temperature di tutti gli strati più profondi della falda durante una giornata estiva: al di sotto delle piante, che come già descritto assumono all'incirca la temperatura dell'aria (29,5 gradi Celsius),

²² Chi Feng, Meng Qinglin, Zhan Yufeng, "Theoretical and experimental, analysis of the energy balance of extensive green roofs", *Energy and Buildings*, in corso di pubblicazione: 1-7.

Figura I.53: Termografia di una porzione della copertura della Chicago City Hall

Dalla stratigrafia emerge che il manto vegetale ha una temperatura molto più bassa rispetto a quella della membrana bituminosa: le piante presentano una temperatura di 74 gradi Fahrenheit (23 gradi centigradi) mentre il bitume raggiunge valore pari a 130-140 gradi Fahrenheit (54-60 gradi centigradi).
Fonte: Caroline M.Nolan, "Leading by examples", *Living Architecture Monitor*, 11 (2009): 12-15.15



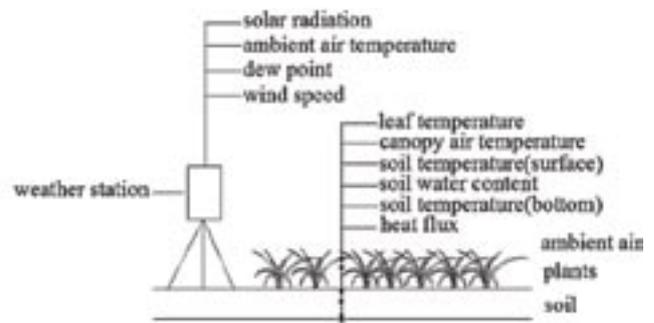
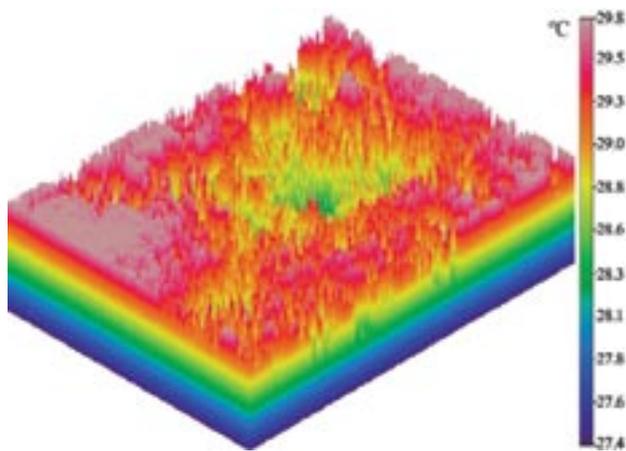
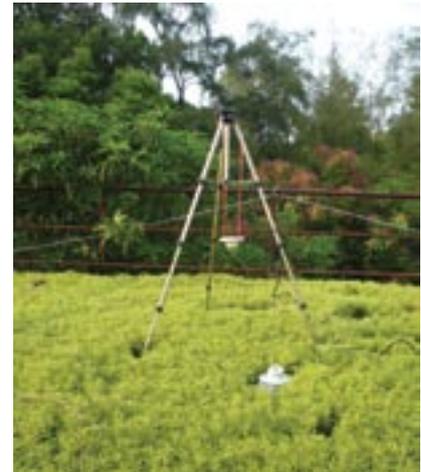


Figura I.54: Temperature dei vari strati componenti una copertura a verde estensivo

Fra i vari parametri che influiscono sul comportamento termico della copertura a verde l'umidità del substrato è determinante. In questo modello tridimensionale sono evidenziate le temperature di ciascuno strato della copertura a verde: ogni temperatura è stata misurata con un termocoppia (la figura a fianco mostra quella posta sullo strato di vegetazione).

Anche questo esperimento conferma che la vegetazione assume la temperatura dell'aria e che gli strati a essa sottostanti hanno una temperatura leggermente inferiore a quest'ultima.

Fonte: Feng, "Energy balance of extensive green roofs": 5.



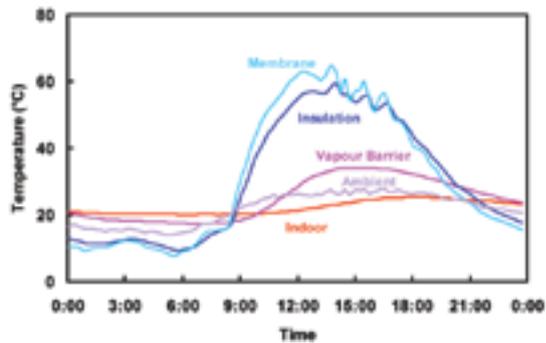
i vari componenti hanno una temperatura via via inferiore e la superficie d'intradosso della copertura ha una temperatura di 27,4 gradi cioè 2 gradi in meno rispetto a quella della vegetazione e dell'aria esterna. Questi valori sono stati acquisiti attraverso una serie di termocoppie posizionate a differenti profondità nella stratigrafia: la figura I.54 al centro in basso ne mostra una applicata alla vegetazione.

Questi risultati sono confermati da altre ricerche: Karen Liu²³ ha svolto un esperimento analogo al precedente confrontando le temperature di una stratigrafia di copertura a verde con una stratigrafia di un copertura continua tradizionale (impermeabilizzata con una membrana bituminosa) e la figura I.55 mostra gli esiti dell'esperimento. I grafici in alto rappresentano le temperature dei vari strati componenti: mentre le fluttuazioni delle temperature dei vari strati della copertura senza inverdimento sono molto elevate, in particolare dell'elemento di tenuta che durante le ore diurne supera i 60 gradi Celsius, le fluttuazioni dei componenti della copertura a verde sono minime. Il riscontro di questi fenomeni è riportato nei grafici sottostanti dove viene rappresentato il passaggio del flusso termico fra le due differenti coperture. Se nella copertura senza inverdimento il flusso termico entrante supera i 30 watt al metro quadro, e quello uscente supera i 10 watt, nella copertura a verde i guadagni e le perdite di calore attraverso la stratigrafia non superano i 3 watt. Appare particolarmente interessante notare che il flusso termico entrante è posticipato di circa 6 ore rispetto a quello della copertura senza inverdimento, per effetto della presenza del substrato

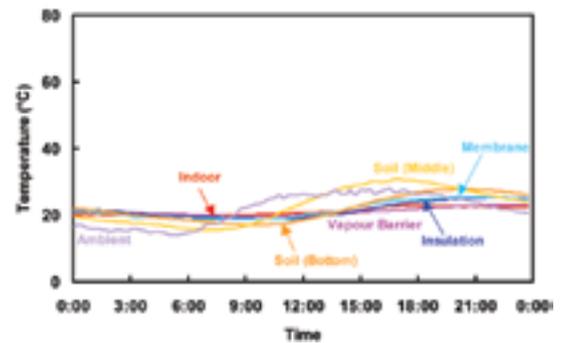
²³ Karen Liu e Bas Baskaran, "Thermal performance of green roofs through field evaluation", *Greening rooftops for sustainable communities*, Chicago, 2003: 1-10.

COPERTURA CONTINUA SENZA INVERDIMENTO

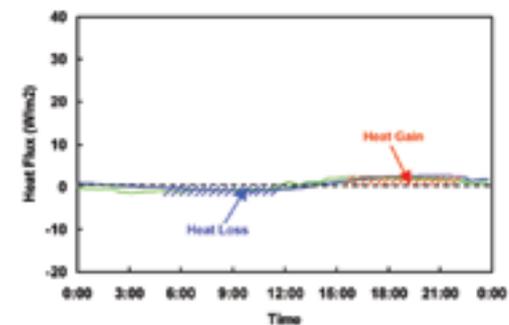
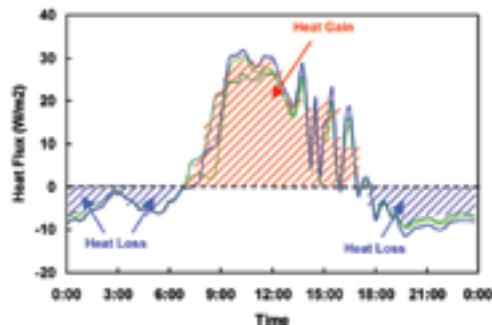
TEMPERATURE DEI VARI STRATI



COPERTURA A VERDE



FLUSSO TERMICO



che dota il sistema di una massa aggiuntiva e quindi di inerzia termica. Ciò che emerge dai vari esperimenti condotti sulle prestazioni termiche della copertura a verde è che le stratigrafie sottostanti al substrato non superano la temperatura dell'aria esterna per effetto dell'azione combinata della vegetazione (strato ombreggiante e freddo in quanto traspirante) e del substrato (dotato di notevole spessore e coinvolto nel processo di evaporazione e quindi freddo e/o isolante).

Oltre al contenimento delle temperature interne in regime estivo e a un certo isolamento termico in regime invernale, una conseguenza della stabilità termica dei vari strati della copertura a verde è che l'elemento di tenuta a membrana, non subendo oscillazioni di temperatura, aumenta significativamente il proprio ciclo di vita rispetto alle membrane esposte alle intemperie e al sole. La tabella I.6 della pagina seguente evidenzia specificatamente la temperatura dell'elemento di tenuta di una copertura a verde rispetto a quella di una copertura senza inverdimento: in 660 giorni di rilevazioni la membrana impermeabilizzante della copertura a verde raggiunge i 30 gradi Celsius solo in 18 giornate, e non raggiunge mai i 40-50-60 e 70 gradi. Nella terza colonna si legge che la temperatura dell'aria raggiunge i 30 gradi per 63 giorni e questo significa che la membrana ricoperta dall'inverdimento ha una temperatura mediamente più bassa della temperatura dell'aria. Al contrario, la membrana della copertura senza alcun inverdimento raggiunge temperature molto elevate con una certa frequenza e con temperature dell'aria non significativamente alte.

Figura I.55: Confronto fra temperature e flussi termici di una copertura a verde e di una copertura senza inverdimento

Le temperature dei vari strati di una copertura senza inverdimento (rivestita con una membrana bituminosa) sono messi a confronto con una copertura a verde collocata a fianco della precedente: le temperature e i flussi termici entrante e uscente mostrano come la copertura a verde sia complessivamente meglio isolata. È interessante notare lo sfasamento di 6 ore del pur minimo flusso termico entrante nella copertura a verde. Fonte: Liu, "Thermal performance of green roofs": 9-10.

Tabella I.6: Temperature massime raggiunte da una copertura a verde e da una copertura senza inverdimento

Nonostante la temperatura dell'aria superi i 30 gradi Celsius per 63 giorni in circa 2 anni, la membrana impermeabilizzante della copertura a verde raggiunge i 30 gradi per un numero di volte inferiore: 18 giorni. Differentemente la membrana impermeabilizzante della copertura senza inverdimento, pur con temperature dell'aria relativamente basse, raggiunge molto frequentemente i 30, 40, 50 e 60 gradi Celsius.

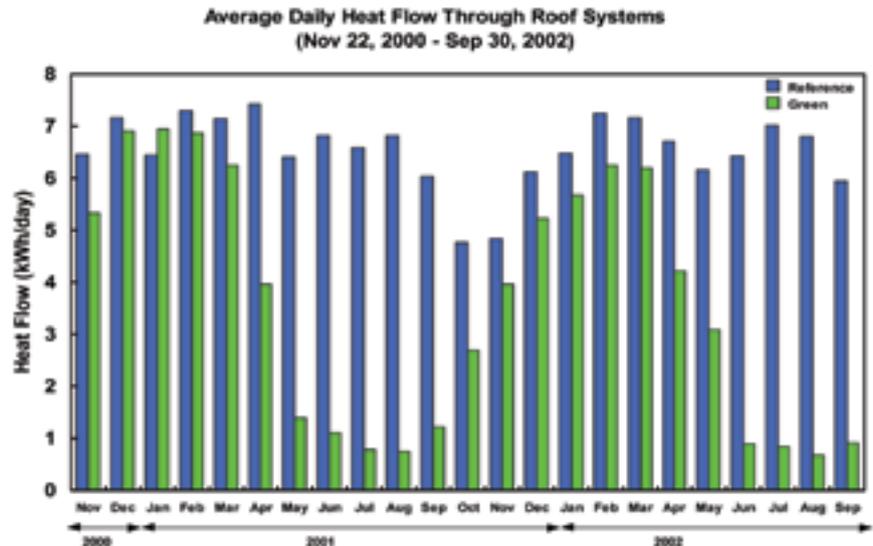
Fonte: Liu, "Thermal performance of green roofs": 7.

Temperature Greater Than:	Reference Roof		Green Roof		Ambient	
	No. of Days	% of Days	No. of Days	% of Days	No. of Days	% of Days
30°C (86°F)	342	52	18	3	63	10
40°C (104°F)	291	44	0	0	0	0
50°C (122°F)	219	33	0	0	0	0
60°C (140°F)	89	13	0	0	0	0
70°C (158°F)	2	0.3	0	0	0	0

Figura I.56: Flusso termico passante attraverso una copertura a verde e una copertura senza inverdimento da novembre 2000 a settembre 2002

Il grafico mostra che i rendimenti estivi sono significativamente migliori di quelli invernali, infatti il flusso termico passante attraverso la copertura a verde nei mesi caldi è fortemente ridotto rispetto al flusso termico della copertura senza inverdimento. Nei mesi freddi si verifica comunque una certa attenuazione delle dispersioni termiche attraverso la copertura a verde, ma di entità inferiori al regime estivo.

Fonte: Liu, "Thermal performance of green roofs": 10.



Il grafico in figura I.56 restituisce il comportamento termico della copertura a verde: in sintesi le colonne blu rappresentano il flusso termico passante attraverso la copertura senza inverdimento, le colonne verdi, invece, il flusso termico passante attraverso la copertura con inverdimento; l'arco di tempo preso in considerazione è di circa 2 anni. Confrontando i valori riferiti alle due tipologie di copertura si può notare che la vegetazione è in grado di ridurre drasticamente in regime estivo il flusso termico passante attraverso la stratigrafia; questo non corrisponde al regime invernale, proprio perché l'umidità del substrato inibisce l'azione termoisolante: ciononostante un certo isolamento si verifica anche durante la stagione invernale.

Il comportamento termico della copertura a verde è quindi conosciuto e pur non potendone descrivere precisamente le prestazioni, in quanto la quantità di umidità è un dato in continua variazione, le capacità termiche in regime estivo e invernale sono state esplicitate da molte sperimentazioni e documentate da una vasta letteratura scientifica.

Uno degli aspetti invece meno indagati riguardo alle caratteristiche termiche della copertura è legato alle differenze di prestazione in relazione agli spessori delle stratigrafie. È presumibile infatti che coperture aventi una vegetazione particolarmente folta abbiano un comportamento differente rispetto a coperture ricoperte solo da erbacee o da piccole piante succulente

come i *Sedum*; allo stesso modo spessori di substrato molto elevati dovrebbero garantire maggiore isolamento e maggiore inerzia termica al sistema di copertura rispetto a quella garantita da spessori di pochi centimetri.

Allo stato attuale tali differenze non sono ancora state esplicitate perchè la quasi totalità della sperimentazione è stata applicata alle coperture definite *extensive*, ossia a quelle caratterizzate da inverdimenti leggeri e spessori sottili. Un esperimento condotto da Theodore G.Theodosiou²⁴ ha tentato di inquadrare le variazioni dello scambio termico fra interno ed esterno al variare degli spessori dei diversi strati componenti di una copertura a verde.

Per quanto riguarda la vegetazione, ad esempio, Theodosiou ha simulato inverdimenti caratterizzati da diversi valori di “densità fogliare” e “altezza fogliare”.

Questi due parametri servono a identificare quanto fitto sia uno strato di vegetazione di una piantagione e precisamente l’altezza fogliare indica l’altezza vera e propria che caratterizza le piante, mentre l’indice di area fogliare

²⁴ Theodore G.Theodosiou, “Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique”, *Energy and buildings* 35, (2003).

Tabella I.7: La densità e l’altezza fogliare
I parametri utilizzati per descrivere un suolo occupato dalla vegetazione sono la densità fogliare e l’altezza fogliare.

PARAMETRO DESCRITTIVO DELLO STRATO DI VEGETAZIONE ESEMPIO DI RIFERIMENTO	LEAF AREA INDEX - LAI Indice di area fogliare o densità RAPPORTO FRA LA METÀ DELL’AREA DELLE FOGLIE DI UNA PIANTA PER UNITÀ DI SUPERFICIE: IN QUANTO RAPPORTO DI DUE AREE [m ² /m ²] È UN VALORE NUMERICO ADIMENSIONALE	FOLIAGE HIGH Altezza fogliare ALTEZZA VERA E PROPRIA CHE RAGGIUNGE LA VEGETAZIONE. MAGGIORE È L’ALTEZZA DELLA VEGETAZIONE MAGGIORE È IL CONDIZIONAMENTO DEI MOTI D’ARIA
FORESTA PLUVIALE 	LAI = 19 PER I BIOMI NATURALI TALE VALORE È COMPRESO FRA 3 E 19	h = 30 m
ALBERATURE D’ALTOFUOSTO 	LAI = 10	h = 15 m
PRATO 	LAI = 3 PER UNA COPERTURA A VERDE SI ASSUMONO VALORI COMPRESI FRA 1 E 6 : CIÒ SIGNIFICA CHE PER 1 m ² DI SUPERFICIE DI COPERTURA CI SONO DA 1 A 6 m ² DI SUPERFICIE FOGLIARE	h = 30-50 cm
SEDUM NON TAPPEZZANTE 	LAI < 1	h = 10 cm

Figura I.57: Variazioni del flusso termico entrante in relazione a diversi valori di densità fogliare

La densità fogliare LAI è un parametro particolarmente significativo per la variazione del flusso termico entrante o uscente attraverso una copertura a verde. La differenza fra il valore massimo (LAI uguale a 6) e minimo (LAI uguale a 1) è pari a 48 watt orari al metro quadro durante i periodi più caldi. Il flusso termico è positivo quando è diretto dall'edificio alla copertura a verde (raffrescamento) e negativo nel senso inverso (riscaldamento). Fonte: Theodosiou, "Summer period analysis": 912.

Variazioni del flusso termico in relazione a diversi valori di LAI - densità fogliare

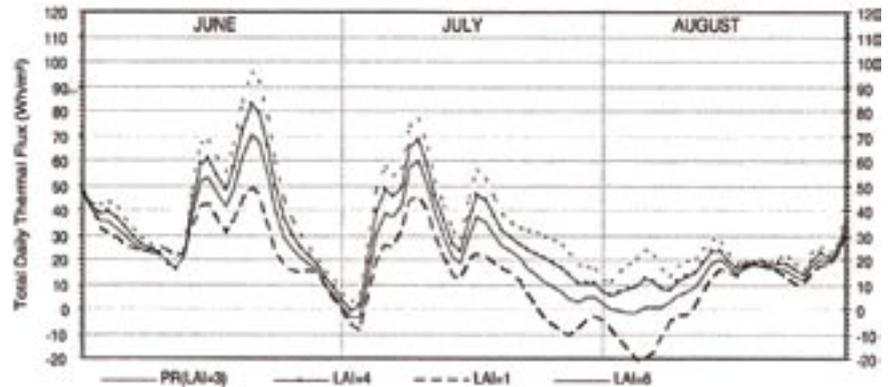


Figura I.58: Variazioni del flusso termico entrante in relazione a diversi valori di altezza fogliare

L'altezza fogliare è un parametro significativo per la variazione del flusso termico entrante o uscente attraverso una copertura a verde, ma incide meno rispetto alla densità fogliare. La differenza fra il valore massimo (altezza uguale a 50 centimetri) e minimo (altezza uguale a 5 centimetri) è pari a 23 watt orari al metro quadro durante i periodi più caldi. Fonte: Theodosiou, "Summer period analysis": 912.

Variazioni del flusso termico in relazione a diversi valori di ALTEZZA FOGLIARE

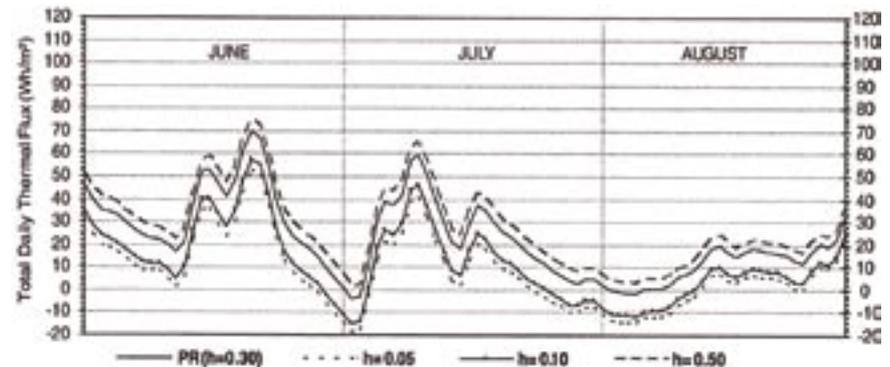
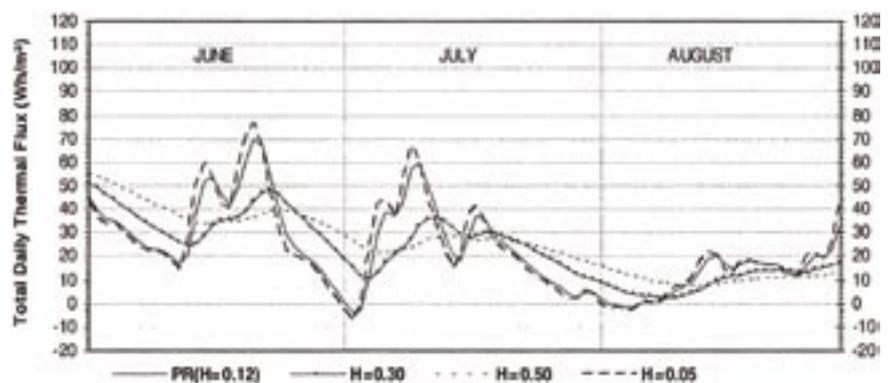


Figura I.59: Variazioni del flusso termico entrante in relazione a diversi valori di spessore del substrato

Lo spessore del substrato presenta un comportamento diverso rispetto alla vegetazione: pur essendo un parametro significativamente variabile in relazione ai differenti spessori che assume (nei periodi più caldi differenza fra il valore massimo, 50 centimetri, e il valore minimo, 5 centimetri, è pari a 38 watt orari al metro quadro), il substrato in questo modello funziona più come isolamento termico che come estrattore di calore. Ciò è determinato dall'inerzia di cui è dotato: infatti per spessori superiori le curve sono più basse, dimostrano cioè una certa capacità di isolamento termico anche dall'interno verso l'esterno. Fonte: Theodosiou, "Summer period analysis": 912.

Variazioni del flusso termico in relazione a diversi valori di SPESSORE DEL SUBSTRATO



(anche detto "densità fogliare") indica quanto fitte siano le chiome delle specie vegetali facenti parte di una piantagione. La tabella I.7 nella pagina precedente spiega il significato dei parametri descrittivi della morfologia di una pianta. La densità fogliare si esprime come rapporto tra la metà dell'area totale delle foglie per unità di superficie, pertanto una densità fogliare pari a 10 sta a significare che per ciascun metro quadro di suolo la vegetazione presenta 10 metri quadri di foglie (per gli ecosistemi naturali questo valore varia da 1 a 19, ma per una copertura a verde si assumono valori compresi

fra 1 e 6, dove 1 corrisponde a una vegetazione rada e bassa, e 6 corrisponde a un inverdimento intensivo).

L'altezza fogliare, invece, indica semplicemente l'altezza della pianta ed è significativa per la relazione che intercorre fra essa e l'aria intra-fogliare: quanto maggiore è l'altezza della pianta, tanto più facilitati sono gli spostamenti d'aria alla base delle piante e quindi l'allontanamento del calore.

Nel già citato esperimento di Theodosiou, condotto nella città di Salonicco, è indagata la capacità della copertura a verde di funzionare come un sistema di raffrescamento passivo durante la stagione estiva, ma ciò che interessa in questo contesto non è tanto la modalità di funzionamento della copertura a verde come estrattore di calore o come isolamento termico (caratteristica che dipende fortemente dalla regione climatica e dalla stratigrafia di copertura e che richiederebbe un'analisi *ad hoc* per ciascun singolo caso), ma quanto i parametri geometrici della vegetazione influiscano sullo spostamento del flusso termico.

Come si vede dal grafico della figura I.57 il valore di LAI uguale a 6 incrementa significativamente, in questo caso, la capacità di raffrescamento della copertura a verde, riuscendo a estrarre flusso di calore dall'interno per valori alti, fino a 97 watt orari per metro quadro (picco massimo registrato all'inizio della seconda metà di giugno); nelle stesse condizioni la stratigrafia avente un LAI uguale a 1 è in grado di estrarre 50 watt, ossia la metà del flusso di calore rispetto al LAI uguale a 6. L'andamento complessivo della curva conferma che all'aumento delle temperature dell'aria corrisponde una maggiore la capacità dello strato di vegetazione più denso di estrarre calore dall'interno, questo perché l'elevata temperatura, concomitante con valori di umidità dell'aria più bassi, favorisce l'effetto di traspirazione.

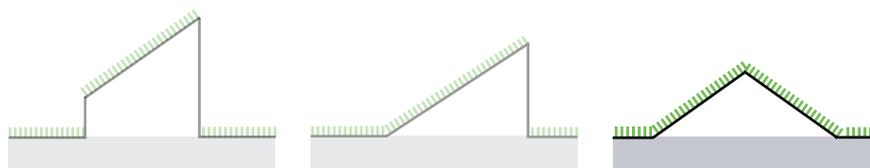
Nel grafico della figura I.58 è possibile rilevare la variazione del flusso termico in relazione a differenti valori di altezza fogliare. Le altezze fogliari analizzate sono quattro, di valori pari a 5, 10, 30 e 50 centimetri: la differenza di prestazioni di una copertura fra il massimo e il minimo dei valori di altezza fogliare, ossia 50 e 5 centimetri, è pari a circa 20 watt all'ora per metro quadro.

Infine nel grafico della figura I.59 si legge che la differenza fra il massimo e il minimo dei quattro valori di spessore del substrato (5, 12, 30 e 50 centimetri) è di circa 38 watt orari al metro quadro durante i picchi massimi di calore. Da quest'ultimo grafico appare evidente come il substrato, diversamente dagli altri due parametri descrittivi delle dimensioni delle piante, funzioni prevalentemente come isolamento termico dall'esterno.

Da questo esperimento emerge che la variazione delle dimensioni dello strato vegetale e la variazione dello spessore dello strato colturale alterano le capacità termiche della copertura a verde: maggiori sono i valori dimensionali che li caratterizzano, migliori sono le prestazioni del sistema.

Azienda vinicola Manincor

LUOGO	Caldaro (Bolzano)
PROGRAMMA.....	cantina vinicola
ARCHITETTO	Walter Angonese, Reiner Köberl e Silvia Boday
PAESAGGISTA.....	---
REALIZZAZIONE	2002-2004
USO DELLA COPERTURA	suolo agricolo, coltivazione della vite
PRATICABILITÀ.....	accessibile e carrabile
SUPERFICIE.....	3000 m ²
PENDENZA.....	variabile
VERDE	intensivo - coltivazione
SISTEMA.....	---



Date le caratteristiche termiche che lo strato colturale e la vegetazione di una copertura a verde riescono a garantire all'ambiente interno confinato, ossia un ottimo isolamento termico in particolare in regime estivo, tale tecnologia viene frequentemente utilizzata nella progettazione di spazi in cui vi sia la necessità di mantenere in un ambiente interno temperature costantemente basse. In questi casi l'intervento è frequentemente ipogeo proprio per conseguire una stabilità termica difficilmente raggiungibili dagli edifici fuori terra. È questo per esempio il caso del progetto per l'ampimento dell'Azienda vinicola Manincor, recente opera degli architetti Walter Angonese, Reiner Köberl e Silvia Boday, dove la stabilità termoigrometrica viene garantita, oltre che da uno scavo profondo nelle viscere di un rilievo naturale, anche da uno spessore di terreno superiore al metro posto in copertura. In questo intervento le esigenze funzionali legate alla produzione vinicola trovano nella conformazione morfologica della fabbrica e nel suo rapporto con il suolo il principale elemento di regolazione ambientale. Nello stesso tempo la stretta continuità tra spazio costruito e spazio naturale si definisce attraverso l'estensione della coltivazione della vite alla copertura, avvalendosi dell'opportunità tecnologica di trasferire una funzione propria di un terreno agricolo a una superficie edificata. Il progetto del tetto verde risponde in questo caso a precisi requisiti funzionali, a un'accessibilità alle coltivazioni da parte degli operatori e delle macchine agricole, all'integrazione dell'impianto al sito e alle sue tipicità, facendosi carico della salvaguardia del suolo, delle sue risorse e della vegetazione da cui ha origine l'intero



processo produttivo. Una costruzione in elevazione avrebbe comportato non solo un forte impatto derivante dalle ingenti volumetrie necessarie allo stoccaggio dei vini, ma avrebbe anche richiesto un costante investimento energetico di esercizio per mantenere le condizioni termoigrometriche ottimali. Viceversa il progetto dell'edificio così concepito, in stretta relazione con il suolo circostante, realizza una convergenza tra forma e funzione, restituendo al paesaggio la sua continuità.

L'intera tenuta si trova al limitare del lago di Caldaro, a sud di Bolzano, e si estende per una superficie pari a 45 ettari. L'ampliamento, che affianca l'antico maso risalente ai primi anni del Seicento, si concentra dapprima sulla necessità di contenere la volumetria fuori terra, al fine di non pregiudicare il rapporto con l'insediamento preesistente e con il vigneto, e successivamente sullo sviluppo dell'estensione degli spazi destinati alla produzione richiesti dalla committenza: il programma funzionale impone un sostanziale incremento delle superfici per la lavorazione e lo stoccaggio dei vini e da ciò deriva una risposta progettuale capace di tradurre le esigenze operative non direttamente in vincoli, ma in occasioni per ripensare il rapporto tra macchina produttiva e vigneto.

La nuova cantina si sviluppa attraverso una struttura in larga parte ipogea di eccezionali dimensioni che accorda la richiesta volumetrica alle dinamiche della produzione. Di fatto l'onere derivante dall'interramento è compensato da una serie di vantaggi: innanzitutto lo scavo permette di ottimizzare il processo di produzione sfruttando la gravità per le lavorazioni che si svol-

Figura I.60: vista dell'ampliamento dell'Azienda vinicola Manincor dall'alto

La superficie coltivata a vite a destra del maso è la copertura dell'ampliamento: sebbene perfettamente integrata con il suolo circostante, grazie alla continuità della coltivazione della vite, si riconosce l'artificialità dell'intervento dalla presenza di alcuni elementi architettonici di servizio, come l'ingresso principale, l'ingresso delle macchine, un piccolo belvedere e la presenza di terminali impiantistici.

L'intervento rappresenta una ricostruzione paesaggistica di proporzioni molto estese.

Fonte: Anita Crepaz

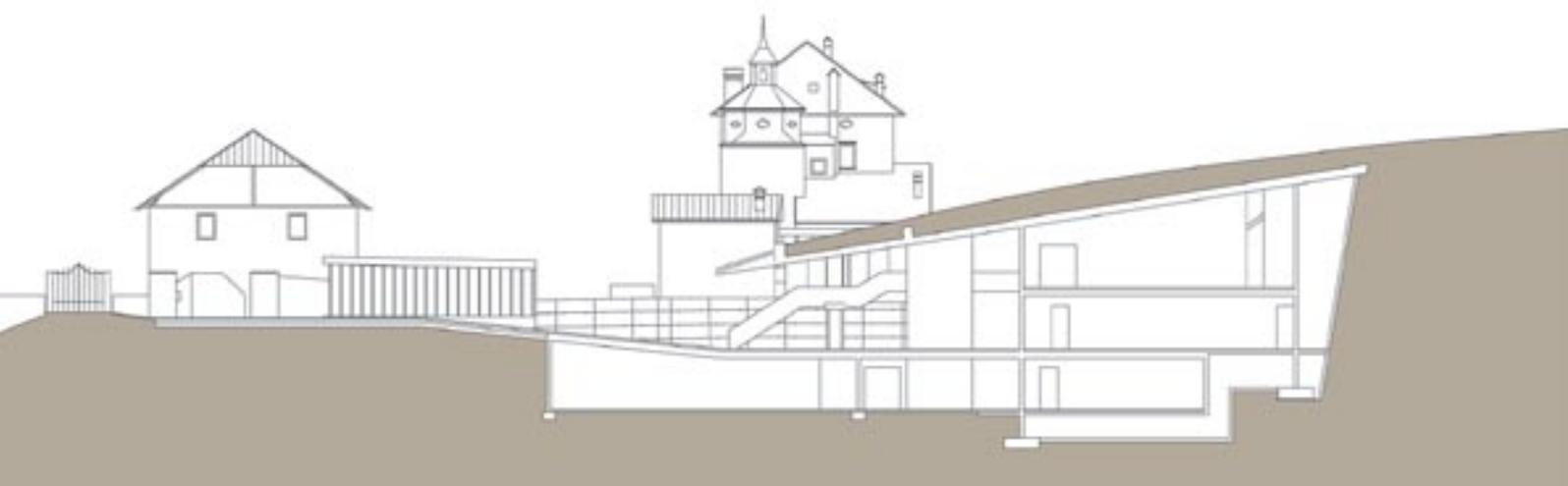
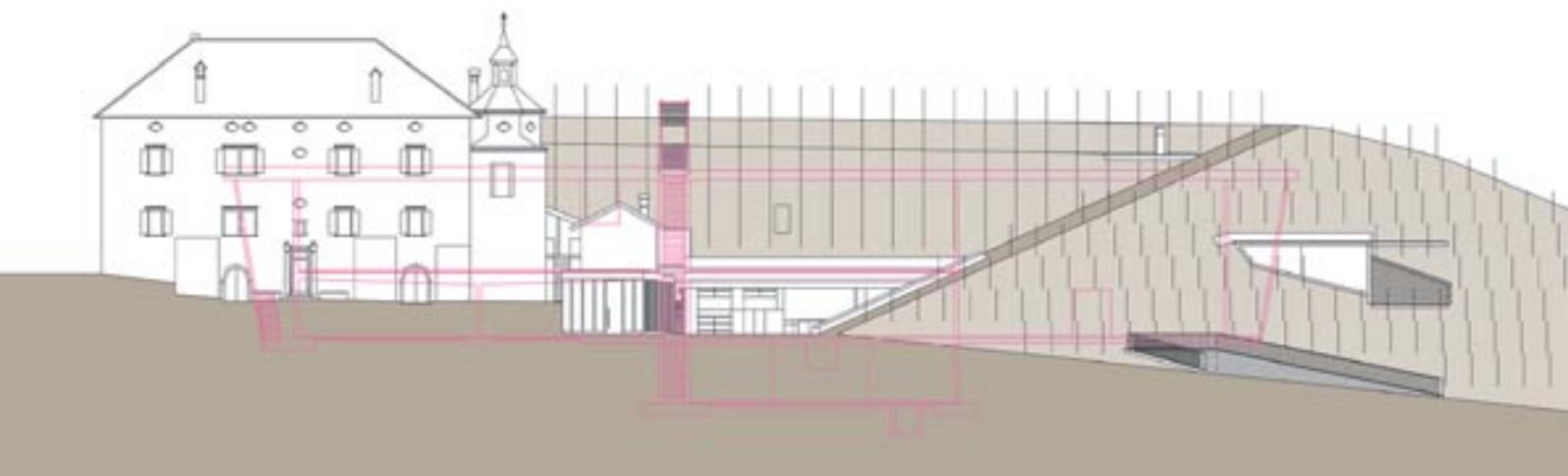


Figure I.61 e I.62: Prospetto e sezione verticale dell'ampliamento

L'edificio interrato è interamente nascosto dalla ricostruzione, in copertura, del suolo agricolo coltivato a vite.

Fonte: Martin Prinzhorn, *Manincor*, Schlegelbrügge Editor, Vienna 2005: 102-104.

gono nei piani interrati e, unitamente al ripristino della superficie agricola in copertura, viene garantita quella stabilità igrometrica indispensabile alla lavorazione, permettendo in tal modo di contenere i consumi energetici di esercizio.

La stratigrafia della copertura prevede necessariamente una robusta struttura primaria in calcestruzzo armato, impermeabilizzata da un doppio strato di membrana bituminosa, sopra la quale è gettata una soletta di calcestruzzo di spessore pari a 10 centimetri. A questi strati è appoggiato un sottile elemento di drenaggio e al di sopra il terreno di riporto per uno spessore variabile da 1 metro e 20 centimetri a 2 metri e 50 centimetri.

La distribuzione interna è risolta mediante un sistema di risalite verticali che mettono in comunicazione gli ambienti di stoccaggio con gli spazi destinati alla vendita, all'amministrazione e alla sala degustazione. Quest'ultima, a fornire un'ulteriore conferma dell'importanza assunta dal rapporto con il contesto in questo progetto, si apre come un piccolo belvedere sul versante

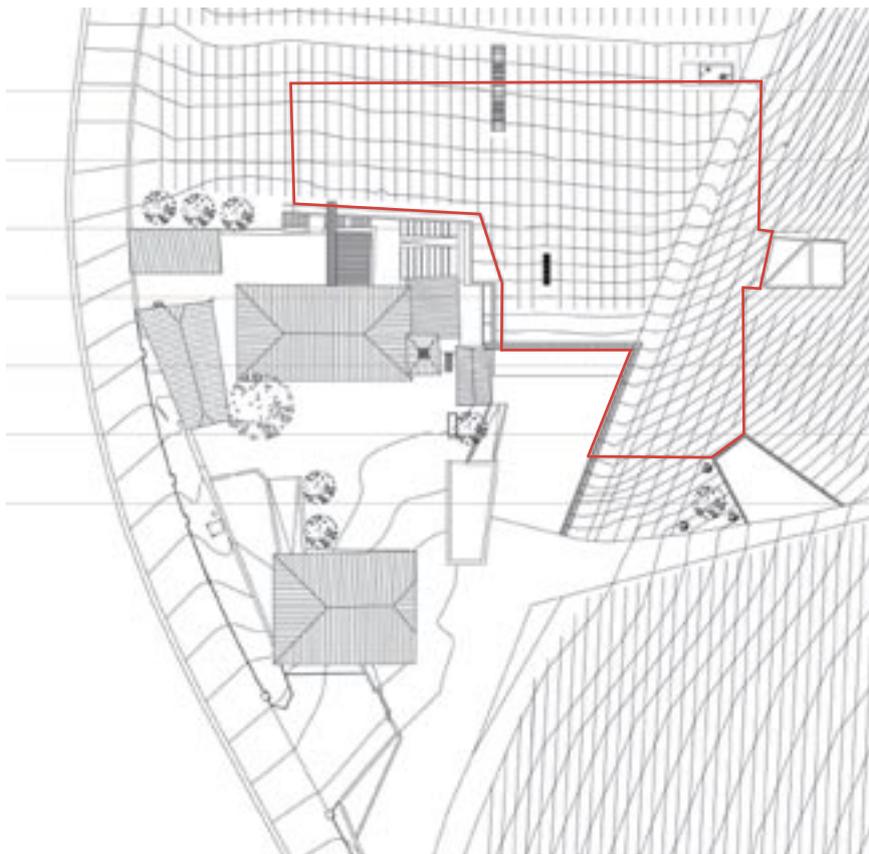


Figura I.63: Pianta delle coperture
 La porzione di suolo ricostruito, pari all'area delimitata dalle linee rosse, si estende per 3000 metri quadri.
 Fonte: Martin Prinzhorn, *Manincor*: 109.

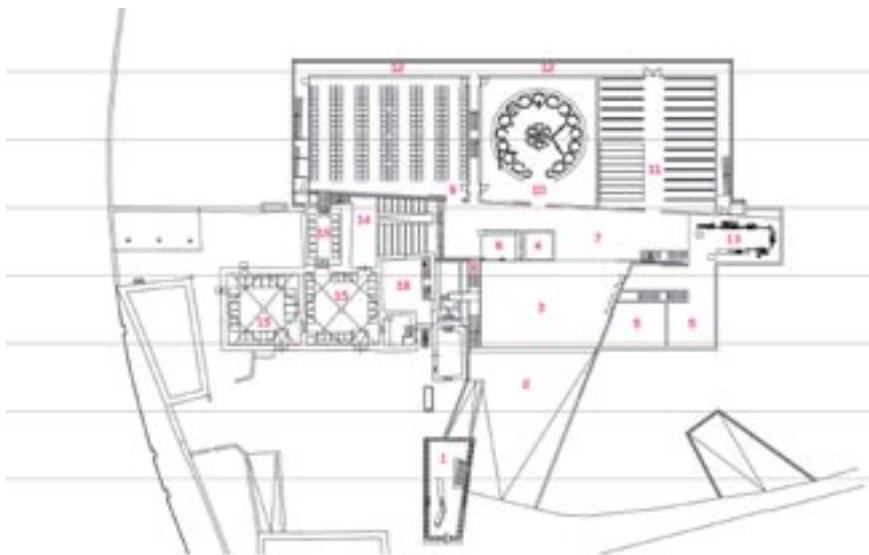


Figura I.64: Pianta piano terra
 L'edificio presenta tre livelli al di sotto della copertura. Il livello 0 è all'incirca collocato alla stessa altezza della corte dell'antico maso.
 Fonte: Martin Prinzhorn, *Manincor*: 107.

1	Wohnverlauf	scale vendita	wine shop
2	Rampenabfahrt	ramp d'accesso	ramp exit
3	Vormale offer	parte coperta dell'accesso	open lobby
4	Lastenaufzug	montacarichi	freight lift
5	Leergutlager	magazzino bottiglie vuote	empty wine
6	Foyer Zugang Keller	Foyer	foyer access to cellar
7	Quartale	hall	transverse hall
8	Treppe in den Weinberg	scale verso il vigneto	staircase leading under the vineyard
9	Barricade Keller	barricata	barricade cellar
10	Gärkeller	cantina di fermentazione	fermentation cellar
11	Hochregalager	magazzino alto	high rack storehouse
12	Klima- und Luftfeuchtigkeitsgang	corridoio di climatizzazione	climate conditioning and humidifying corridor
13	Ablfüllhalle	embottigliamento	filling hall
14	Patio	patio	patio
15	Historische Weinlager	cantina antica	historical wine cellar
18	Verwaltungsbüro	amministrazione	administrative office



Figura I.65: Vista dell'ingresso della cantina

Le piante di vite che crescono al di sopra del solaio di copertura sono uguali a quelle che crescono nella terra intorno al maso originario. Questo significa che il suolo ricostruito al di sopra della copertura, che è caratterizzato da uno spessore molto elevato, compreso fra 1 metro e 20 centimetri e 2 metri e 50, riproduce perfettamente le condizioni di un suolo naturale.

Fonte: Jacopo Gaspari

della collina, palesando solamente in minima parte l'artificio che sotto di essa si cela.

“La decisione di costruire il tutto come una cantina non significa, però, seguire superficialmente la tradizione centenaria di viticoltura, ma resta legata sino al dettaglio nella sua funzionalità: i depositi sono collocati nella parte più bassa, laddove la temperatura rimane stabile, mentre l'impianto stesso è circondato da un corridoio che funge da membrana provvedendo in tal modo che in tutte le stanze si diffonda il clima richiesto. Contemporaneamente queste misure “naturali” che garantiscono lo scambio necessario di temperatura e umidità sono predisposte di una tecnologia complessa, indicando così apertamente la fusione dei diversi aspetti. I materiali delle costruzioni moderne, acciaio e cemento, vengono usati in modo tale che si possano modificare ulteriormente e cioè offuscarsi, ma non per simulare l'estetica di una cantina tradizionale bensì per creare l'ambiente adatto ai microorganismi necessari e per garantire, dunque, una conservazione ottimale. Così come nel processo di fermentazione del vino vengono impiegati i batteri locali dai propri giardini al posto di quelli coltivati, anche l'architettura rinuncia a interventi tecnologici se luogo e tradizione ammettono delle soluzioni diverse e più dirette. Non si tratta quindi di decisioni ideologiche bensì di cogliere il concetto di continuità in senso pragmatico e allo stesso tempo in modo rispettoso. [...] Sulla punta del vigneto che contiene (o meglio: è) l'impianto, Erik Steinbrecher ha posto una pergola tradizionale che, essendo di metallo, mostra la sua artificialità



Figura I.66: Ingresso all'ampliamento della cantina

La parte nuova della cantina si riconosce per la presenza di alcuni elementi architettonici sulla superficie inverdita della copertura. L'ingresso principale all'ampliamento della cantina sembra una breccia nel terreno. Fonte: Jacopo Gaspari



Figura I.67: Presa d'aria della copertura

Sulla superficie di copertura si trovano svariati terminali impiantistici che denunciano l'artificialità del suolo da cui emergono. Fonte Jacopo Gaspari



Figura I.68: Uscita di sicurezza

Nel lato sud della copertura si trovano l'ingresso delle macchine agricole e un'ampia uscita di sicurezza. Le porte sono parzialmente rivestite di piante decombenti. Fonte: Jacopo Gaspari



Figure 1.69 e 1.70: Vista dello scavo dell'amplimento

Fonte: Martin Prinzhorn, *Manincor*: 3-4, 6-7.

solo in un secondo momento. Anche in questo passaggio viene rispecchiata la concezione dell'architettura attraverso mezzi artificiali. Ma c'è da chiedersi se il vecchio viene simulato e simboleggiato tramite il nuovo, e il naturale tramite l'artificiale, oppure viceversa. Non possiamo e non dobbiamo dare una spiegazione a questo, giacchè si tratta di processi aperti che possono indicare ogni direzione"²⁵.

²⁵ Fonte: Prinzhorn, *Manincor*: 18-19.



Figure-serie I.71: Viste della copertura conclusa, prima dell'impianto delle viti
Fonte: Martin Prinzhorn, *Manincor*: 21-24.

1.6 Il comportamento termico della copertura a verde: effetti sull'ambiente esterno immediato

Come illustrato in precedenza la traspirazione delle piante e l'evaporazione dal substrato rappresentano quei fenomeni in grado di garantire un comportamento termico virtuoso all'elemento tecnico di copertura: in particolare in regime estivo questi fenomeni, impiegando l'energia solare per trasformare l'acqua dallo stato liquido a quello gassoso, sono in grado di contenere le temperature dei materiali componenti della stratigrafia. Dai vari esperimenti condotti è possibile stabilire come la vegetazione e il substrato di coltivo assumano all'incirca la temperatura dell'aria.

L'evapotraspirazione, che a livello macroscopico è un segmento fondamentale del ciclo idrologico in quanto costituisce il fenomeno inverso delle precipitazioni, a livello microscopico, e nello specifico caso degli involucri invernati, rappresenta il processo termico più importante del sistema, in quanto responsabile della variazione del valore della trasmittanza del substrato e della diminuzione del calore latente. Il calore latente è quel calore necessario per far avvenire il passaggio di stato dell'acqua da liquido a gassoso e, per quanto riguarda le piante, l'ordine di grandezza del fenomeno è il seguente: alla pressione atmosferica sono necessari 2500 chilojoule per ogni chilogrammo di acqua evaporata dalla pianta e, considerando che un albero di grandi dimensioni in una giornata calda estiva può far evaporare 300-400 litri d'acqua, una pianta di tal tipo consuma 750-1000 megajoule per la sola attività di traspirazione.

Ciò che è interessante conoscere per il rendimento energetico della copertura a verde è che l'evapotraspirazione è un processo continuo che, per una copertura estensiva, può raggiungere i 2-3 millimetri al metro quadro in una giornata estiva (pari circa a 2-3 litri, con un impiego di circa 5000 chilojoule). E' necessario tenere in considerazione che lo scambio energetico latente tra lo strato superficiale del substrato e l'atmosfera è un valore molto significativo: svariate ricerche hanno dimostrato che l'energia che lascia il sistema per l'evapotraspirazione equivale circa all'energia solare entrante nelle coperture.

L'evapotraspirazione rappresenta quindi il "fenomeno chiave" che condi-

zione le prestazioni energetiche più importanti del sistema, le cui ricadute, però, influiscono positivamente non solo sulle prestazioni energetiche per l'ambiente interno confinato della copertura, ma anche per la riduzione dell'isola di calore.

In ambiente urbano, infatti, si registra un'anomalia di temperatura che prende il nome di *isola di calore urbana (Urban Heat Island)*. Tale fenomeno è responsabile di un aumento della temperatura di qualche grado rispetto all'ambiente rurale circostante e si apprezza durante tutte le ore del giorno, ma in particolare a partire dalla sera in quanto la città comincia a raffreddarsi "in ritardo" rispetto alle aree limitrofe, meno edificate, e più lentamente, a causa del calore accumulato dagli involucri degli edifici.

Appare evidente che una temperatura esterna anche solo di pochi gradi più alta implichi un uso di energia per il raffrescamento termico estivo superiore a quello che potrebbe essere necessario se l'effetto isola di calore fosse contenuto.

Le cause che provocano tale effetto sono molteplici e "possono essere riassunte nei seguenti processi:

- raffreddamento radiativo minore a causa della riduzione del fattore di vista del cielo (*Sky View Factor*) per la presenza di edifici alti;
- aumento dell'assorbimento della radiazione solare di un differente albedo, unito a riflessioni multiple nei canyon urbani;
- grande accumulo diurno di calore negli edifici e successiva cessione notturna;
- aumento del Rapporto di Bowen (*Bowen Ratio*) fra flusso di calore latente e sensibile, a causa della scarsa presenza di vegetazione e dell'elevata impermeabilità dei suoli;
- immissione diretta e indiretta di calore nei canyon urbani;
- riduzione del mescolamento atmosferico a causa della scarsa ventilazione provocata dalla presenza di edifici alti"²⁶.

Fra gli aspetti indicati come cause esplicite dell'aumento delle temperature in ambiente urbano ci sono da un lato la scarsità di vegetazione e dall'altro

²⁶ Chiara Lora et al. "Determinazione dell'effetto isola di calore urbana in una città alpina mediante utilizzo di reti di sensori a basso costo", XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - IDRA 2006: 1-16.

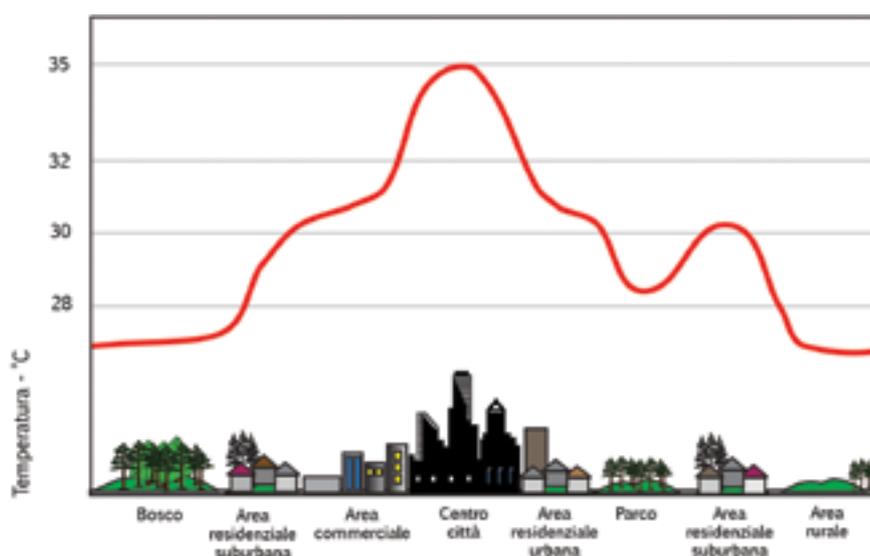


Figura I.72: Effetto isola di calore

In prossimità degli agglomerati urbani la temperatura dell'aria è normalmente superiore di qualche grado rispetto alla temperatura delle zone rurali. L'incremento della temperatura è determinato da un insieme di fattori fra cui la scarsità di vegetazione risulta essere uno dei più importanti. Il grafico mostra che la temperatura degli ambienti dove siano presenti le piante è più bassa di alcuni gradi rispetto ai centri urbani.

Fonte: www.globalchange.gov > publications > reports > scientific-assessments > us-impacts > full-report > climate-change-impacts-by-sector > human-health

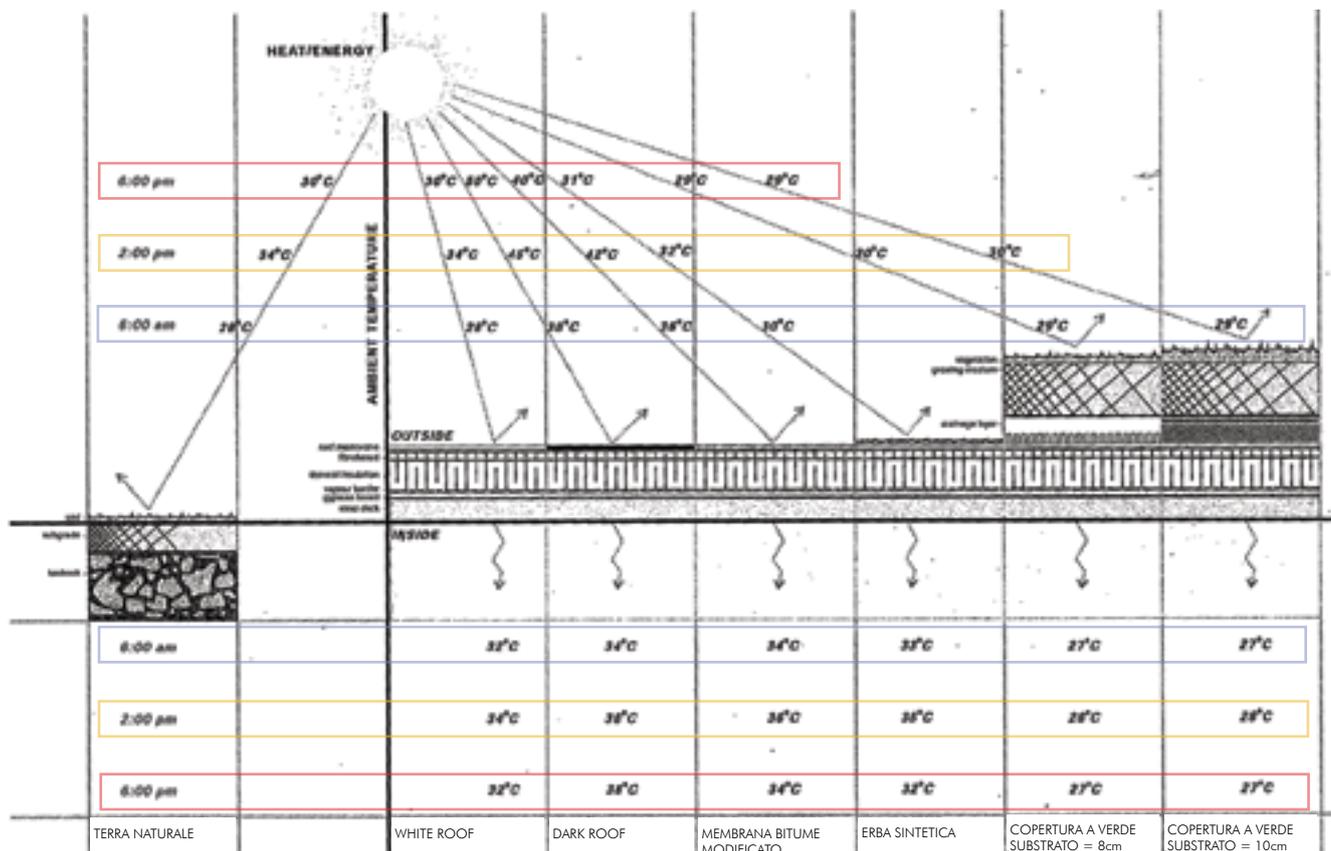


Figura I.73: Temperatura dell'aria in prossimità di diverse tipologie di copertura

Il grafico mette a confronto diverse tipologie di copertura e l'effetto che ciascuna di esse ha sulla temperatura dell'aria circostante: nell'intorno di una copertura a verde la temperatura dell'aria è circa uguale a quella di un suolo naturale. Al contrario nell'intorno di differenti superfici costruite la temperatura dell'aria è nettamente superiore.

Fonte: Katrin Scholz-Barth e Susan K. Weiler, *Green roof systems. A guide for planning, design and construction of landscapes over structures*, John Wiley & Sons, Hoboken, 2009: 313.

la densità di "superfici scure" quali quelle edilizie. Il fenomeno isola di calore appare quindi grave in quanto l'incremento delle temperature implica un consumo massiccio di energia per il raffrescamento degli ambienti interni, che nel caso del singolo edificio è apprezzabile a livello di semplice "spesa", ma analizzando il fenomeno a livello globale, ossia sommando l'impiego energetico per il raffrescamento di ciascuna unità abitativa di una città, si ottengono ingenti impieghi energetici, e che sono a loro volta responsabili di un aumento delle temperature dell'aria esterna, quindi di un ulteriore *discomfort* ambientale.

Come descritto nei paragrafi precedenti, la copertura a verde è una "superficie fredda", perché le piante sono corpi basso-emissivi e differentemente dai materiali edilizi non emettono calore sotto forma di radiazione a infrarosso. La figura I.73 riporta gli scambi di calore con l'atmosfera di diverse finiture superficiali di copertura: una copertura chiara (*white roof*) non irradia calore, infatti la temperatura dell'aria circostante a questo tipo di chiusura presenta valori pari a quelli registrati in ambiente aperto durante l'intera giornata (valori indicati nella colonna a sinistra della linea marcata che segna l'*ambient temperature*). Differentemente una copertura scura (*dark roof*) è capace di surriscaldare l'aria circostante per valori pari a 20 gradi Celsius (alle ore 18 la temperatura registrata in prossimità di questa copertura è di 50 gradi contro i 30 della temperatura dell'aria in ambiente aperto). Le coperture a verde (qui rappresentate con due stratigrafie leggermente diverse) non solo non registrano incrementi di temperatura, ma addirittura, durante il periodo di

irraggiamento più forte della giornata cioè alle ore 14 del pomeriggio, l'aria in prossimità ha una temperatura inferiore di 4 gradi rispetto alla temperatura dell'aria in ambiente aperto (30 gradi contro 34): presumibilmente questo effetto di riduzione della temperatura si verifica solo se l'umidità del substrato è sufficiente da consentire l'evaporazione che utilizza l'energia solare per il passaggio di fase dell'acqua da liquido a gassoso. Gli effetti del comportamento termico di una copertura a verde sull'ambiente esterno immediato sono quindi analoghi e/o migliori a quelli di un *white roof* (cioè non vale, però, per quanto riguarda la capacità di ridurre il flusso termico entrante: una copertura a verde garantisce all'ambiente interno confinato una temperatura inferiore a quella dell'aria esterna, in virtù soprattutto della massa del substrato, mentre un *white roof*, dotato di spessore e una massa inferiori, trasferisce calore sufficiente a far aumentare la temperatura dell'aria interna di 2-4 gradi rispetto a quella esterna).

In un esperimento condotto da Francesco Castellotti²⁷ è stata quantificata la differenza dell'adduzione (un processo di trasferimento del calore che avviene quando coesistono la convezione attraverso un fluido e l'irraggiamento attraverso onde elettromagnetiche) di una copertura tradizionale rispetto a una copertura a verde; l'adduzione della copertura a verde è stata poi calcolata per diverse condizioni di umidità del substrato (asciutto e umido). La figura I.74 illustra gli esiti dell'esperimento. Dal grafico di sinistra, che si riferisce alle condizioni climatiche in regime estivo, risulta evidente che l'adduzione esterna di un tetto tradizionale sia molto elevata, infatti la superficie rivolta verso l'atmosfera si riscalda notevolmente: 86 unità di energia su 100 (il flusso termico in questo caso si interrompe quasi completamente perché la stratigrafia dell'esperimento è dotata di uno strato di isolamento termico). Al contrario l'adduzione esterna della copertura a verde è molto bassa: 12 unità di energia solare incidente su 100 nel caso di un substrato asciutto, 25 unità su 100 nel caso di un substrato umido. In regime invernale il comportamento è analogo: il grafico di destra mette in rilievo che l'adduzione esterna di una copertura tradizionale è più di

²⁷ Francesco Castellotti, "Studio sperimentale degli effetti energetici di un green roof sugli edifici", Dottorato di ricerca in Fisica tecnica, 31 ottobre 2003, Università degli Studi di Padova.

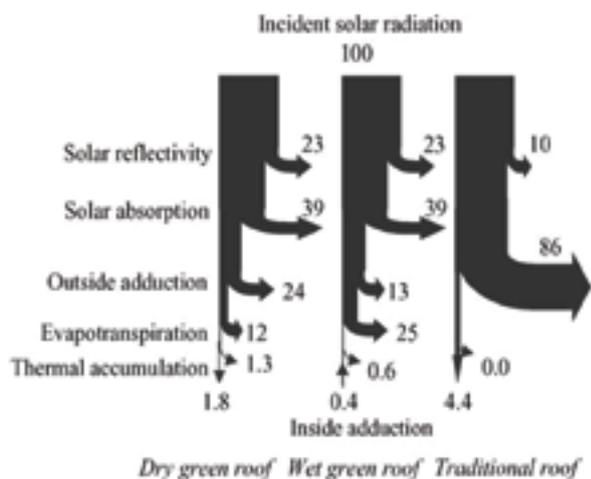
Figure I.74: Confronto fra gli scambi energetici di una copertura a verde e di una copertura tradizionale in regime estivo e invernale.

I valori di adduzione di una copertura tradizionale sono almeno tre volte superiori a quelli di una copertura a verde sia in regime invernale che in regime estivo.

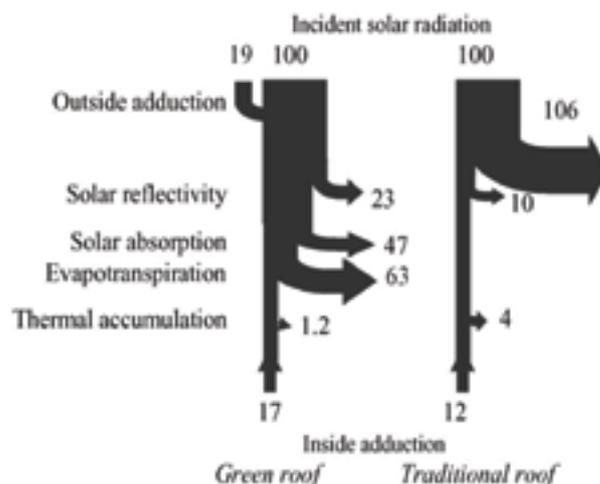
Dal grafico di sinistra emerge che l'adduzione di una copertura a verde asciutta è significativamente superiore a quella di una copertura a verde umida (rispettivamente 24 unità di energia contro 13). Ciò significa che la copertura a verde umida dissipa energia a causa dell'evaporazione.

Fonte: Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti e Filippo Busato, "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof", *Energy and Buildings*, ? (2005): 6-7.

REGIME ESTIVO



REGIME INVERNALE



4 volte superiore a quella di una copertura a verde (106 unità di energia solare incidente contro 23). Questo esperimento è utile a dimostrare che l'energia che per adduzione viene assorbita dai materiali più esterni della copertura viene re-irradiata sotto forma di calore nell'ambiente esterno e, come si evidenzia dal confronto dei dati, una copertura tradizionale assorbe una quantità di calore 4 volte superiore rispetto a quello di una copertura a verde; ciò significa che, di conseguenza, una copertura tradizionale contribuisce a incrementare l'effetto dell'isola di calore di un territorio costruito. La copertura a verde non fa quindi parte delle superfici scure, ossia di tutte le superfici costruite responsabili dell'incremento delle temperature. Tutt'ora risulta poco indagato l'eventuale abbattimento, in termini quantitativi veri e propri, dell'effetto isola di calore attraverso l'impiego diffuso di elementi di involucro inverditi.

L'ibridazione fra natura e artificio, che si deve risolvere in prima battuta proprio nella composizione stratigrafica della tecnologia, opera quindi una naturalizzazione dell'architettura. Non è la natura ad essere artificializzata nella tecnologia di copertura a verde, è invece vero il contrario: l'edificio viene naturalizzato tant'è che esso subisce una serie di guadagni energetici caratteristici del verde in generale impiegando una scarsissima quantità di energia e/o di risorsa idrica per il mantenimento dello strato vivo. Complessivamente quindi i benefici derivanti dall'impiego della copertura a verde presentano dei risvolti positivi non solo alla scala di progetto architettonico, ma anche alla scala urbana e territoriale. In quest'ultimo caso i benefici di un singolo elemento di chiusura sono scarsamente significativi in rapporto alla scala. Ciò nonostante la copertura a verde partecipa a quella rete ecologica che si instaura autonomamente negli spazi costruiti fra tutte le componenti vegetali presenti e che, se pur difficilmente incrementabile, reintroduce nell'ambiente urbano l'attività primaria vegetale. È noto che tanto più la vegetazione sia presente in un territorio, tanto meno in esso aumenti l'entropia complessiva: temperature, sostanze chimiche inquinanti, variazioni microclimatiche, ventilazione, polveri... tutti questi sono alcuni dei fattori controllati e mitigati in termini quantitativi dalla vegetazione, e le coperture, che nella maggior parte dei casi sono superfici di sacrificio da un punto di vista fruitivo, possono reintegrare il verde urbano contribuendo a ripristinare parzialmente gli scambi energetici, significativamente alterati, fra uomo e ambiente.



Figura 1.75: Il progetto “Groenjaar” di Rotterdam

Dal 2008 la città di Rotterdam offre sussidi ai cittadini che intendano applicare un inverdimento alla copertura di un edificio privato. Il 55% del costo per l'operazione di conversione è sovvenzionato dall'amministrazione comunale: il progetto si chiama “Groenjaar” e comprende svariate iniziative volte a migliorare la qualità microclimatica

dell'ambiente urbano. Molte altre amministrazioni hanno incluso la copertura a verde fra i punti strategici della pianificazione sostenibile dei propri territori: tra le prime quella di Tokio dove dal 2001 il 20% delle coperture di nuova costruzione o di recuperi edilizi deve essere inverdito.

Oltre a Tokio si citano New York, Toronto, Montreal e Vancouver.

In Italia le città che hanno introdotto benefici

fiscali per le applicazioni delle coperture a verde sono Bolzano, Torino e Udine.

Fonte: www.ecowiki.it/ > Bioedilizia ed ecodesign > Rotterdam

Secondo capitolo

Concezione e principi di funzionamento della copertura a verde

Da un punto di vista tecnologico la copertura a verde si può descrivere come un'associazione di due tipologie di componenti: i componenti inerti (tutti i tradizionali materiali edilizi) e i componenti organici (le piante e il substrato). L'accostamento in un unico sistema di due materialità così differenti da potersi definire "opposte" è la peculiarità tecnologica più importante poichè rappresenta una caratteristica originale e distintiva del sistema e al contempo il suo principale fattore di criticità. L'ibridazione fra natura e artificio che la copertura a verde attua è in primo luogo l'esito di una sovrapposizione fra due diverse organizzazioni funzionali.

La prima comprende la ciclicità dei processi vitali delle piante e di tutti gli strati preposti a garantirne la sopravvivenza; la seconda riguarda invece le funzionalità proprie di una copertura, ovvero l'impermeabilizzazione e la funzione portante oltre che tutte le altre funzioni caratteristiche di questo elemento tecnico.

L'associazione di questi due sistemi determina una stratigrafia tecnologicamente complessa da cui derivano opportunità e limiti di questa soluzione.

II.1 Riprodurre un ecosistema

Un qualsiasi elemento tecnico come un solaio, una parete di partizione, una fondazione, può essere definito un sistema tecnologico, ossia un'unità funzionale costituita da componenti che interagiscono fra loro per contribuire a una o più finalità (chiudere un ambiente, impermeabilizzare, sostenere i carichi, contenere le temperature e così via); allo stesso modo la copertura a verde può essere definita un **eco-sistema tecnologico**, vale a dire un sistema organizzato in varie componenti, una parte delle quali è dotata di vita, che perseguono una o più finalità comuni.

In ecologia un ecosistema è descritto come un'interazione tendente all'equilibrio fra una comunità vivente e l'ambiente fisico circostante; inoltre ogni ecosistema è un sistema aperto, caratterizzato da scambi di energia con l'ambiente e da circolazione di materia fra i componenti biotici (vivi) e i componenti abiotici (minerali). Da questa definizione emerge che la copertura a verde di fatto si possa intendere come un ecosistema vero e proprio, che, sebbene artificiale o ricostruito, risponde a quelle caratteristiche che definiscono un ecosistema naturale. La comunità vivente di una copertura a verde è costituita dalla vegetazione e dai micro-organismi presenti nel substrato, e il componente abiotico è costituito dai vari materiali inerti della copertura stessa; inoltre la copertura a verde è un sistema aperto (in quanto una parte della sua stratigrafia interagisce costantemente con l'ambiente esterno), è caratterizzata da scambi di energia (in particolare di energia solare) e i componenti biotici e abiotici scambiano materia fra loro (piante, substrato e acqua).

La copertura a verde è per meglio dire un **ecosistema artificiale**, poichè per sua stessa definizione accoglie i componenti-pianta ma nello stesso tempo la sua costituzione è progettata e costruita dall'uomo.

Nella figura II.1 sono riportati tutti i componenti che costituiscono un ecosistema naturale e il riquadro giallo individua quelli che concorrono a definire la copertura a verde e che sono coinvolti nel funzionamento della stessa: le piante (i produttori), l'acqua e i sali minerali (elementi sempre presenti nel substrato), gli organismi decompositori (colonizzatori spontanei del substra-

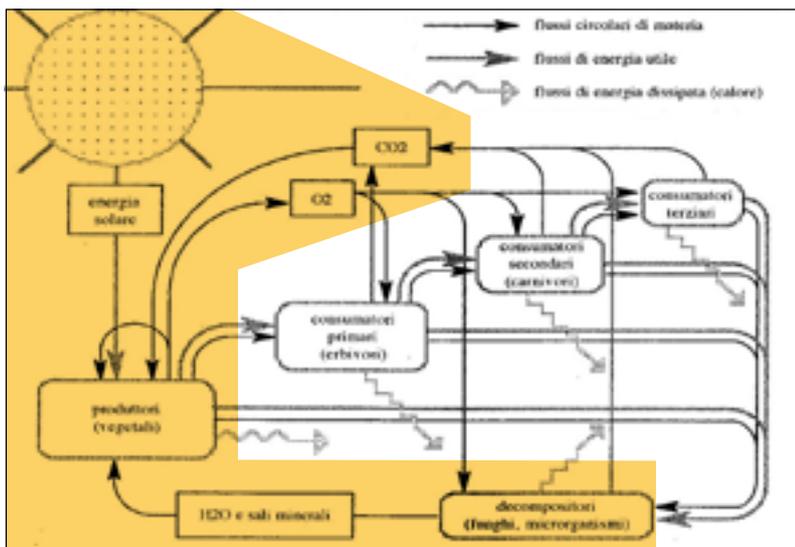


Figura II.1: Componenti dell'eco-sistema tecnologico copertura a verde

L'area evidenziata in giallo individua, tra tutti i componenti di un ecosistema naturale, quelli che concorrono a definire la copertura a verde e che sono coinvolti nel funzionamento della stessa: piante, acqua, sali minerali, organismi decompositori, energia solare, anidride carbonica e ossigeno.
 Fonte: <http://tbagarolo.blogspot.com/2009/08/note-al-saggio-di-podolinskij.html>

to) fanno parte della copertura a verde e la loro presenza è progettabile o programmabile solo in parte. Ciò nonostante, la mancanza di uno di questi componenti potrebbe generare delle disfunzioni al sistema di copertura e richiedere pertanto il reintegro di componenti mancanti e di conseguenza una maggiore attività manutentiva. Oltre ai componenti appena citati, altri possono definirsi indispensabili nel realizzare l'ecosistema tecnologico della copertura a verde: l'energia solare, l'anidride carbonica e l'ossigeno, sono rispettivamente il catalizzatore dei processi vitali vegetali e i prodotti di scambio dell'attività primaria vegetale con l'atmosfera. Osservando la figura II.2 si vede che, evidentemente esclusi tutti i consumatori della catena alimentare (cioè il regno animale), i componenti coinvolti nella progettazione della copertura a verde sono esattamente quelli che concorrono a generare un suolo naturale.

Per comprendere quale sia il livello di artificio che sta alla base del successo tecnologico di una copertura a verde è utile analizzare altre forme di ecosistemi artificiali, ricostruiti o comunque "influenzati" nel loro funzionamento dall'uomo.

La tabella II.1 mette a confronto diverse "tipologie di ecosistemi artificiali": nella prima riga sono posti ecosistemi che hanno come componente biotica i pesci; nella seconda riga, invece, sono posti ecosistemi che hanno come componente biotica le piante. Tutti gli esempi possono definirsi azioni progettuali, quindi artificiali, ibridi di processi spontanei e di processi indotti dall'uomo per addomesticare la natura attraverso l'impiego di una certa tecnologia.

La prima colonna individua un "ecosistema artificiale elementare": il pesce in una boccia, così come una pianta in un vaso, rappresentano una forma di ricostruzione delle condizioni vitali minime di un organismo vivente; al pesce è garantita la presenza dell'acqua e alla pianta la presenza della terra, ma in quantità strettamente essenziale. Questo tipo di ecosistema artificiale è caratterizzato dalle dimensioni estremamente ridotte dei suoi componenti abiotiche, dall'apertura alle condizioni climatiche in cui esso abbia colloca-

ECOSISTEMI ARTIFICIALI

zione, da un apparato tecnologico rudimentale e dall'assenza di impianti o di sistemi automatici di approvvigionamento idrico e nutritivo.

Queste condizioni fisiche impongono un'attività manutentiva costante da parte dell'uomo, poichè l'ecosistema artificiale elementare è altamente incompleto (non ospita altre forme di vita se non quella per cui è stato specificatamente ricostruito) e non è a contatto con alcun'altro ecosistema attraverso il quale scambiare materia organica e inorganica. Al contempo il consumo di energia per garantire il benessere degli organismi ospitati è molto basso.

Nell'ecosistema artificiale elementare la longevità degli organismi è garantita dalla qualità della manutenzione: tanto più costante e appropriata rispetto alle necessità della specie ospitata è l'azione correttiva dell'uomo, quanto più gli organismi riescono a vivere "in salute". È necessario sottolineare che questo tipo di ricostruzione è così dissimile da un ecosistema naturale che frequentemente le specie animali o vegetali qui "allevate" o "coltivate" sono appositamente selezionate: tali organismi in natura non sarebbero presenti oppure avrebbero scarse possibilità di sopravvivenza.

La seconda colonna rappresenta un "ecosistema artificiale intercluso": gli esempi sono un acquario e una serra. In questi due casi si ricostruiscono quanto più fedelmente le condizioni dell'ecosistema naturale di riferimento: temperatura dell'acqua e dell'aria, condizioni di luce, nutrimento e umidità relativa dell'aria sono riprodotte grazie a un consistente impiego di impianti. Rispetto al caso precedente le dimensioni di questo ecosistema possono essere sia ridotte (un acquario di piccole dimensioni ha un volume di 50 litri d'acqua e una serra può essere una "teca" condizionata) sia estremamente grandi (la vasca di un acquarium può avere volumi di molte centinaia di metri cubi d'acqua e una serra per coltivazioni essere estesa migliaia di metri quadri). Indipendente dalle dimensioni, sia l'acquario che la serra hanno un apparato tecnologico, cioè un involucro vero e proprio, piuttosto sofisticato e diffusamente integrato con quegli impianti necessari ad alterare le condizioni climatiche rispetto all'ambiente naturale di inserimento della struttura. Questa tipologia di ecosistema, infatti, è caratterizzata dalla chiusura quasi totale rispetto all'ambiente esterno, unica modalità che consenta l'allevamento o la coltivazione di specie inadatte al clima dove si collochi la struttura. Tali riproduzioni sono altamente energivore e la manutenzione operata dall'uomo, pur essendo variabile in relazione alle caratteristiche degli impianti, è in generale non elevata, ma, differentemente dal primo caso, altamente specializzata: la manutenzione ordinaria, infatti, è finalizzata in parte alla cura delle specie introdotte, ma soprattutto alla gestione dell'involucro e degli impianti.

Pur con opportune distinzioni, questi ecosistemi sono dotati di un'ampia autonomia in quanto all'interno di essi avviene il ciclo dell'azoto (o almeno alcuni segmenti di esso): anche questo ecosistema artificiale è incompleto e l'attività di controllo, più che la manutenzione vera e propria, è costante. La vita e la qualità della vita degli organismi è mediamente buona e, a seconda delle dimensioni dell'involucro, anche le specie animali possono riprodursi. Nel complesso la tecnologia in grado di attuare questo tipo di ecosistema

Ecosistema artificiale	ELEMENTARE	INTERCLUSO	PRODUTTIVO	INDIPENDENTE
PESCI	PESCE IN BOCCIA	ACQUARIO	ITTICOLTURA	FONTANA
				
PIANTE	PIANTA IN VASO	SERRA	AGRICOLTURA	COPERTURA A VERDE
				
RAPPORTO CON L'ESTERNO	(MOBILE) APERTO	CHIUSO	APERTO	APERTO
MANUTENZIONE	ELEVATA NON SPECIALIZZATA	ELEVATA SPECIALIZZATA	ELEVATA SPECIALIZZATA	NON ELEVATA NON SPECIALIZZATA
CONSUMO ENERGIA	SCARSO	ELEVATO	ELEVATO	SCARSO
INVOLUCRO	RUDIMENTALE	COMPLESSO (INTEGRAZIONE IMPIANTI)	ASSENTE	COMPLESSO

artificiale è caratterizzata, oltre che dall'impiego di un involucro sofisticato, dall'apporto costante di energia per il funzionamento di impianti. La terza colonna raggruppa gli "ecosistemi artificiali produttivi" e sono portati ad esempio l'itticoltura e l'agricoltura. Questi ecosistemi di fatto non riproducono interamente un ecosistema naturale, ma ne alterano significativamente uno esistente. Nei casi citati, pesci e piante vengono allevati e coltivati impiegando la componente abiotica presente, cioè un ambiente totalmente naturale (il mare o il suolo), e la componente biotica è propriamente allevata e coltivata per ottenere prodotti alimentari. Questi ecosistemi sono precisamente circoscritti, densamente popolati e di dimensioni estremamente variabili: nel caso dell'agricoltura essi concorrono alla modificazione paesaggistica del territorio. Poiché si tratta di sistemi aperti, le condizioni climatiche a cui gli organismi sono soggetti sono naturalmente quelle caratteristiche locali. Inoltre, occupando una porzione di territorio, non è prevista la costruzione di "un involucro", ma la predisposizione di una dotazione

Tabella II.1: Ecosistemi artificiali

L'addomesticamento di diverse forme di vita operato dall'uomo, siano esse vegetali o animali, impone l'uso o la riproduzione delle componenti abiotiche necessarie al sostentamento della vita. Questa ricostruzione ambientale prevede l'impiego di artifici, quindi di tecnologia, per garantire quanto più benessere possibile alle forme di vita che si vogliono addomesticare, allevare, coltivare.

impiantistica, piuttosto semplice, di dimensioni proporzionate all'estensione della coltura. Le specie piantate o allevate sono opportunamente selezionate o perfettamente adattate al clima e la possibilità di successo della vita degli organismi allevati o coltivati è alta, poichè trattandosi di prodotti alimentari (a cui è attribuito un valore economico) le lavorazioni che l'uomo compie sono finalizzate a garantire la maggior produzione possibile. Questi ecosistemi richiedono un elevato impiego di lavoro altamente specializzato e coadiuvato da macchinari capaci di ridurre il lavoro umano.

Infine nella quarta colonna rientrano gli "ecosistemi artificiali indipendenti" tra i quali si colloca la copertura a verde. Questi tipi di ecosistemi si differenziano dai primi due poichè sono totalmente aperti all'ambiente esterno, e quindi soggetti a tutti gli agenti atmosferici, e dal terzo in quanto risultano essere sistemi interamente ricostruiti.

Poichè aperti all'ambiente esterno, tali ecosistemi impongono l'inserimento di specie viventi adattate al clima, e nello stesso tempo particolarmente resistenti a condizioni climatiche estreme. Rispetto a un ecosistema naturale, infatti, gli organismi sono qui sottoposti a due diverse limitazioni. La prima riguarda la ridotta possibilità di spostamento o di crescita e la seconda riguarda la parziale incapacità del sistema di dissipare l'energia che riceve dall'atmosfera a causa delle dimensioni ridotte e dei confini predefiniti. In questi ambienti la dotazione impiantistica è normalmente scarsa, il contenitore è semi-aperto e la tecnologia non è sofisticata nella sua parte materiale, bensì nel modo di ricostruire e innescare i processi spontanei nel tentativo di compensare le problematiche legate alle dimensioni contenute.

La copertura a verde rappresenta quindi un vero e proprio ecosistema artificiale: la sua peculiarità è infatti la capacità di ospitare gran parte di quelle attività biologiche che avvengono in un suolo naturale attraverso una totale ricostruzione e una riproduzione quanto più fedele possibile dei processi spontanei del suolo. La figura II.2 illustra le principali funzionalità di una copertura a verde: le piante, elementi di coronamento della copertura, radicano in "un terreno" di una certa, ridotta, profondità (attività organiche)

Figura II.2: Funzionalità della stratigrafia di una copertura a verde

La copertura a verde presenta cinque funzionalità principali: le attività organiche (che comprendono le attività fisiologiche della vegetazione in rapporto con il substrato), le attività di gestione dell'acqua (in particolare l'accumulo idrico e il drenaggio), l'impermeabilizzazione, la funzione portante e, a protezione dell'elemento di tenuta, le funzioni di interfaccia.

ATTIVITÀ ORGANICHE

- Strato di vegetazione
- Strato colturale

TRATTAMENTO DELL'ACQUA

- Strato colturale
- Elemento filtrante
- Elemento drenante/accumulo idrico

INTERFACCIA

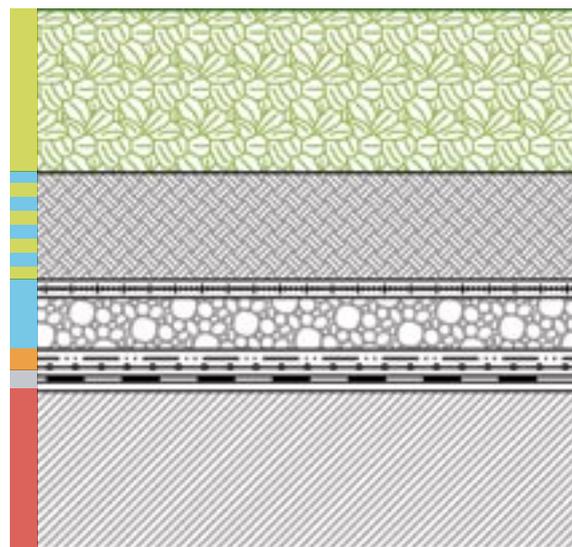
- Elemento di protezione meccanica
- Elemento di protezione dalle radici

IMPERMEABILIZZAZIONE

- Elemento di tenuta

FUNZIONE PORTANTE

- Elemento portante



che si poggia su una struttura solida e indeformabile costituita dal solaio di copertura (funzione portante); questo “terreno” è permeabile all’acqua piovana fino al punto in cui si trova una superficie impermeabile, l’elemento di tenuta (impermeabilizzazione), che interrompe l’infiltrazione verticale dell’acqua facendola scorrere orizzontalmente verso le gronde, secondo le linee di massima pendenza del piano di falda. Attraversando la stratigrafia, una parte dell’acqua viene assorbita dal substrato e immagazzinata nell’elemento di accumulo idrico, e il “troppo pieno” viene allontanato grazie al drenaggio (trattamento dell’acqua). Trovandosi in copertura le piante sviluppano i propri fusti e i propri apparati fogliari liberamente verso il cielo e le radici nel “terreno”; qui le radici trovano nutrizione e acqua per le proprie attività fisiologiche. Nella copertura a verde le piante sono soggette agli eventi atmosferici, ai venti, al sole, alle piogge in misura pari o addirittura superiore rispetto al suolo, in relazione alla distanza della copertura dalla linea di terra.

Dal confronto delle quattro tipologie di ecosistemi artificiali emerge che le modalità con cui l’uomo è in grado di “addomesticare” la natura variano strettamente in relazione agli obiettivi che egli vuole perseguire: in tutti i casi la manutenzione è prevista e la sua frequenza è legata all’autonomia che l’ecosistema artificiale è in grado di garantire attraverso i vari apparati tecnologici (componente abiotica, involucro e impianti) che lo compongono.

Naturalmente esistono una serie di condizioni intermedie fra le quattro tipologie proposte in precedenza, e opportune distinzioni andrebbero evidenziate in relazione alle differenti necessità tra organismi autotrofi ed eterotrofi. In ogni caso la progettazione di ambienti in cui siano presenti esseri viventi animali o vegetali prevede che la conoscenza dei processi vitali, delle necessità alimentari, dei comportamenti fisiologici degli organismi nei vari periodi dell’anno, siano non solo conosciuti, ma posti come obiettivi della tecnologia stessa.

Nel caso di un “ecosistema indipendente” normalmente è verificato che tanto più sia grande la riproduzione dell’eco-sistema tanto meno frequenti risultino essere le attività di manutenzione.

Una delle sfide spesso più difficili che derivano dalla riproduzione di un piccolo ecosistema è la capacità di dare autonomia agli organismi riuscendo a riprodurre le condizioni che rendano possibile il verificarsi dei processi vitali: la risoluzione di tale complessità è affidata alla tecnologia e alla capacità, intuiti i meccanismi e le specifiche necessità degli organismi viventi, che essa ha di compensare l’artificialità che deriva dall’addomesticamento in ambiente ricostruito con un’altra artificialità che migliora le condizioni di vita con opportune strategie di imitazione delle condizioni naturali.

II.2

L'elemento di confine fra il sistema organico e il sistema inerte

Una caratteristica distintiva della copertura a verde è la posizione della membrana impermeabilizzante al di sotto della vegetazione e del substrato di coltivo, quindi non a diretto contatto con l'esterno, bensì in una posizione intermedia all'interno del pacchetto tecnologico di copertura. Proprio per questa ragione, come descritto nel paragrafo I.4 *Un sistema umido: la presenza dell'acqua nell'elemento tecnico copertura a verde*, una parte della stratigrafia, precisamente quella posta al di sopra dell'elemento di tenuta, è soggetta all'azione degli agenti atmosferici e in particolare all'assimilazione dell'acqua meteorica. Differentemente dalle altre tecnologie di copertura, e di involucro più in generale, la funzione di impermeabilizzazione non è la "funzione limite" del sistema; nonostante ciò l'elemento di tenuta rappresenta un confine fondamentale della copertura a verde, in quanto tutti i materiali che giacciono al di sopra di esso sono interessati ai processi biologici dell'ecosistema artificiale della copertura, mentre tutti quelli che sono collocati al di sotto di esso rappresentano, riferendosi alla metafora organica tracciata nel paragrafo II.1 *Riprodurre un ecosistema*, la parte "minerale" dell'ecosistema. L'elemento di tenuta, inteso come confine mediano della stratigrafia, separa quindi ciò che è organico - vivo - da ciò che è inerte, i componenti umidi dai componenti asciutti, la tecnologia di copertura di un sistema edilizio dall'agrotecnologia vera e propria.

Per queste ragioni la copertura a verde si può intendere come una sovrapposizione di due sottosistemi, ciascuno dei quali dotato di una ampia autonomia funzionale:

1. il primo è il sottosistema di impermeabilizzazione vero e proprio, cioè l'elemento di chiusura orizzontale che svolge il compito primario di impermeabilizzare gli ambienti interni, oltre che di rispondere a tutti i normali requisiti propri delle coperture (resistenza meccanica, isolamento termico, controllo delle condense... e numerosissimi altri²⁸). Inteso quindi come il sistema di confinamento idrico, esso presenta due elementi primari, la struttura portante e l'elemento di tenuta, e in aggiunta a questi tutti gli strati funzionali integrativi individuati dalla

²⁸ Rispetto ad altri elementi tecnici, i requisiti delle coperture sono molti. Non esiste attualmente una normativa nazionale che individui la totalità dei requisiti riferibili alle coperture, tuttavia un elenco esaustivo, organizzato secondo le diverse classi esigenziali, si trova in: Giovanni Zannoni, *Manuale tecnico tegola italiana* (Quinto di Treviso: Europrint Industria Grafica, 1999): 24.

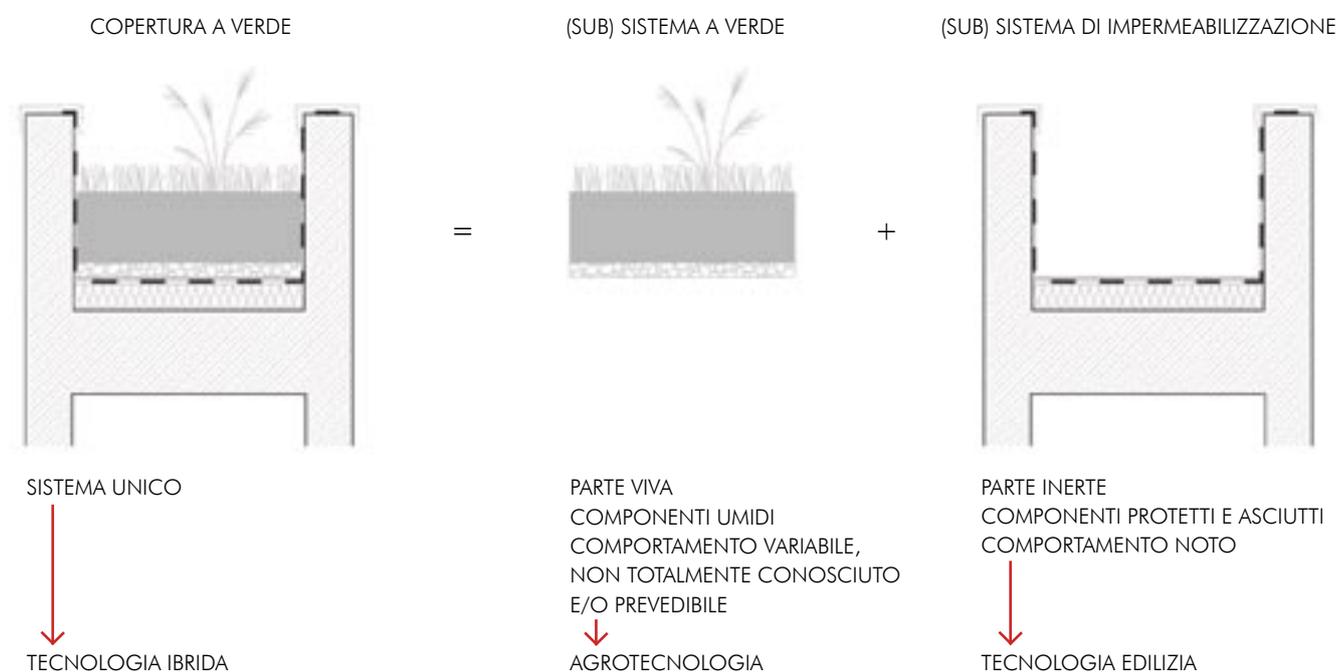
normativa UNI 8178 *Coperture. Analisi degli elementi e strati funzionali*;

- il secondo è il subsistema a verde, che comprende invece quegli strati e quei componenti che garantiscono la vita delle piante e che ne consentono l'applicazione in sicurezza al di sopra del sistema di impermeabilizzazione.

Questi due subsistemi svolgono funzioni indipendenti l'uno dall'altro: un subsistema di impermeabilizzazione, privo del subsistema a verde, di fatto è una tradizionale copertura continua; la stessa autonomia si rileva per quanto riguarda il subsistema a verde che è in grado di garantire fertilità e deflusso idrico indipendentemente dalla natura della superficie impermeabile o dalla struttura su cui giaccia. Nella figura II.3 è schematizzata la suddivisione dei due subsistemi così individuati di una copertura a verde. Nel prosieguo essi verranno designati "sistemi" e non "subsistemi". Per brevità, quindi, sistema di impermeabilizzazione e sistema a verde.

Figura II.3: La copertura a verde come sovrapposizione di due subsistemi

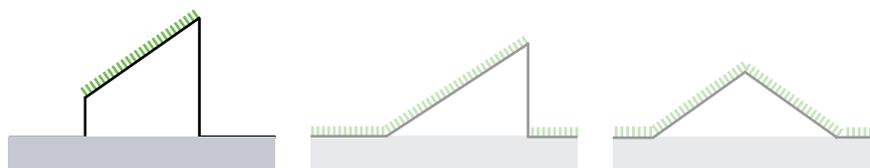
L'elemento di tenuta rappresenta il confine fra il (sub)sistema di impermeabilizzazione, cui appartiene, e il (sub)sistema a verde, ossia fra il sistema inerte e il sistema attivo della copertura.



Naturalmente la sovrapposizione dei due sistemi, di impermeabilizzazione e a verde, presenta delle ricadute tecnologiche specifiche: in particolare la superficie di contatto tra i due sistemi necessita di opportune interfacce tecnologiche atte a garantire la protezione dell'elemento di tenuta dalle azioni meccaniche e dagli agenti biologici e chimici, e un sistema di drenaggio capace di impedire la formazione di battenti idraulici dannosi per gli apparati radicali della vegetazione, oltre che per il funzionamento dell'intera copertura. Questi elementi sono approfonditi nel paragrafo III.1 *Funzioni, componenti e materiali della copertura a verde*.

Padiglione della Svizzera - Expo Shanghai

LUOGO	Shanghai
PROGRAMMA.....	padiglione espositivo
ARCHITETTO	Team: Andreas Bründler (architetto responsabile), Buchner Bründler, Andreas Hunkeler (scenografo)
PAESAGGISTA.....	---
REALIZZAZIONE	2009-2010
USO DELLA COPERTURA	ricostruzione paesaggistica
PRATICABILITÀ.....	non accessibile
SUPERFICIE.....	2400 m ²
PENDENZA.....	variabile
VERDE	semi-intensivo
SISTEMA	---



Il padiglione della Svizzera per l'Expo di Shanghai 2010 simboleggia la simbiosi fra natura e tecnologia che è alla base di un'idea innovativa e sostenibile di città contemporanea. All'esterno il padiglione si presenta con una facciata trasparente, sospesa all'altezza di 20 metri, costituita da una rete metallica su cui sono fissate 11000 *LED* che si accendono in dipendenza dalla quantità di luce ambientale proiettando sulla facciata retrostante di calcestruzzo colori e forme in continua variazione. Questa soluzione è particolarmente sofisticata e viene percepita come un carattere tecnologicamente avanzato: i *LED* infatti si accendono in quantità, configurazione e tempi variabili in relazione alla luce proveniente dall'ambiente circostante, sia di giorno che di notte.

Entrando nel padiglione, la percezione di artificialità, generata all'esterno dall'illuminazione dei *LED* e dalla proiezione della luce sulle pareti di calcestruzzo, cambia completamente poichè i visitatori accedono a una corte interna a pianta circolare, scoperta verso il cielo, interamente rivestita da una parete vegetale. Da qui inizia un percorso che porta i visitatori in copertura attraverso una seggiovia: anche la copertura, come la corte interna, è interamente inverdata e simboleggia il paesaggio alpino caratteristico della Svizzera.

Questo padiglione associa due linguaggi profondamente diversi: quello che si avvale di tecnologie interattive, in grado di generare una pelle luminosa e mutevole, con quello che all'interno impiega elementi vegetali con l'intento di riprodurre i paesaggi fertili e naturali della nazione rappresentata



dal padiglione stesso. Entrambi questi involucri sono in realtà altamente tecnologici, autonomi nelle loro funzionalità e capaci di stimolare sensorialmente l'osservatore. I mezzi che realizzano queste proprietà percettive sono però profondamente diversi: nel caso della facciata esterna si impiegano infatti tecnologie di illuminazione sofisticate e interattive, mentre nel caso della parete interna e della copertura si utilizzano delle agrotecnologie per l'edilizia.

Parete e copertura a verde inoltre sono realizzate impiegando diverse tecnologie: la parete con una tecnologia di prevegetazione²⁹ (in questo caso pannelli a base polimerica contenenti uno spessore minimo di substrato su cui radicano le piante), mentre la copertura è costituita di una stratigrafia a verde tradizionale che impiega materiali inerti disciolti. Come si vede dalle immagini nelle pagine seguenti, l'inverdimento è costituito da erbacee che dimostrano ottime condizioni di adattamento al sito.

Figura II.4: Vista del padiglione della Svizzera

Il padiglione della Svizzera è racchiuso da una doppia facciata: l'involucro più esterno è costituito da una rete metallica a cui sono appesi 11000 LED che proiettano sulla retrostante parete in calcestruzzo luci colorate a intermittenza.

Fonte: www.architectmagazine.com/international-projects/shanghai-surprise.aspx

²⁹ La prevegetazione è una tecnica che consente di installare le piante in ambienti dove spontaneamente esse faticherebbero ad attecchire. Le piante vengono coltivate in stabilimento (su differenti supporti di reti, pannelli, stuoie... a seconda della tecnologia), nutrite e portate a uno stato di sviluppo adulto, quindi più resistente, per poi essere trasportate e installate nella fabbrica. Questa tecnologia è frequentemente utilizzata per le pareti vegetate che non impiegano specie rampicanti; diversamente in copertura la prevegetazione viene impiegata solo in presenza di piani di falda molto inclinati oppure, in casi particolari, per ridurre al minimo i carichi permanenti di una copertura piana. Nei climi mediterranei l'impiego di componenti prevegetati richiede irrigazioni molto frequenti.

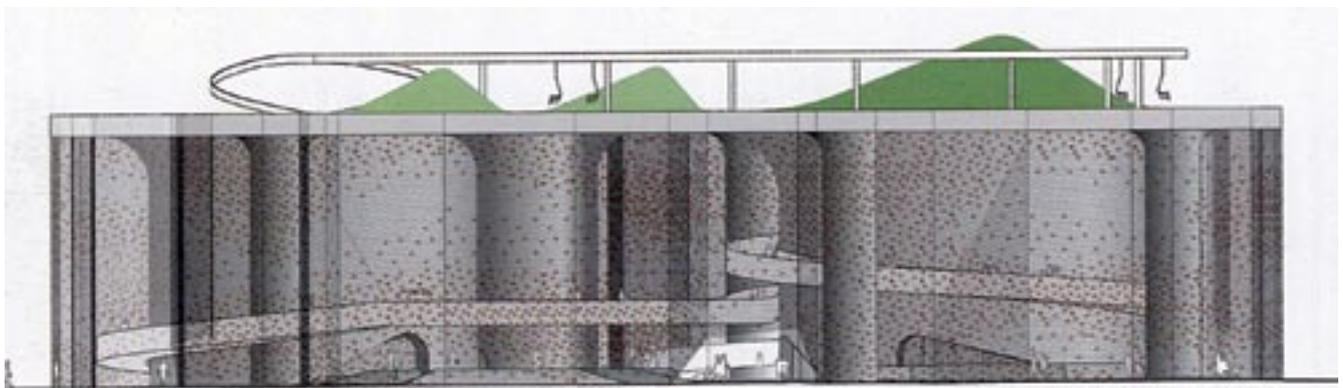
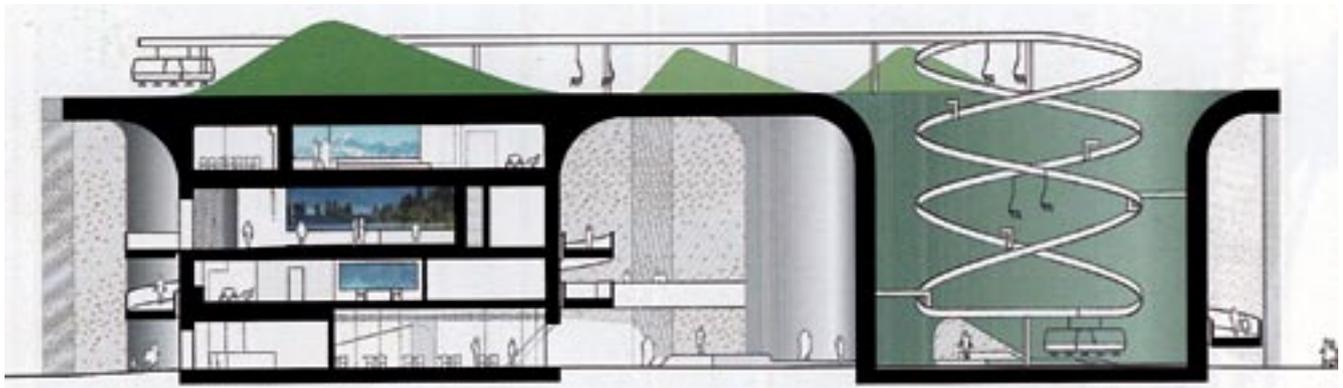
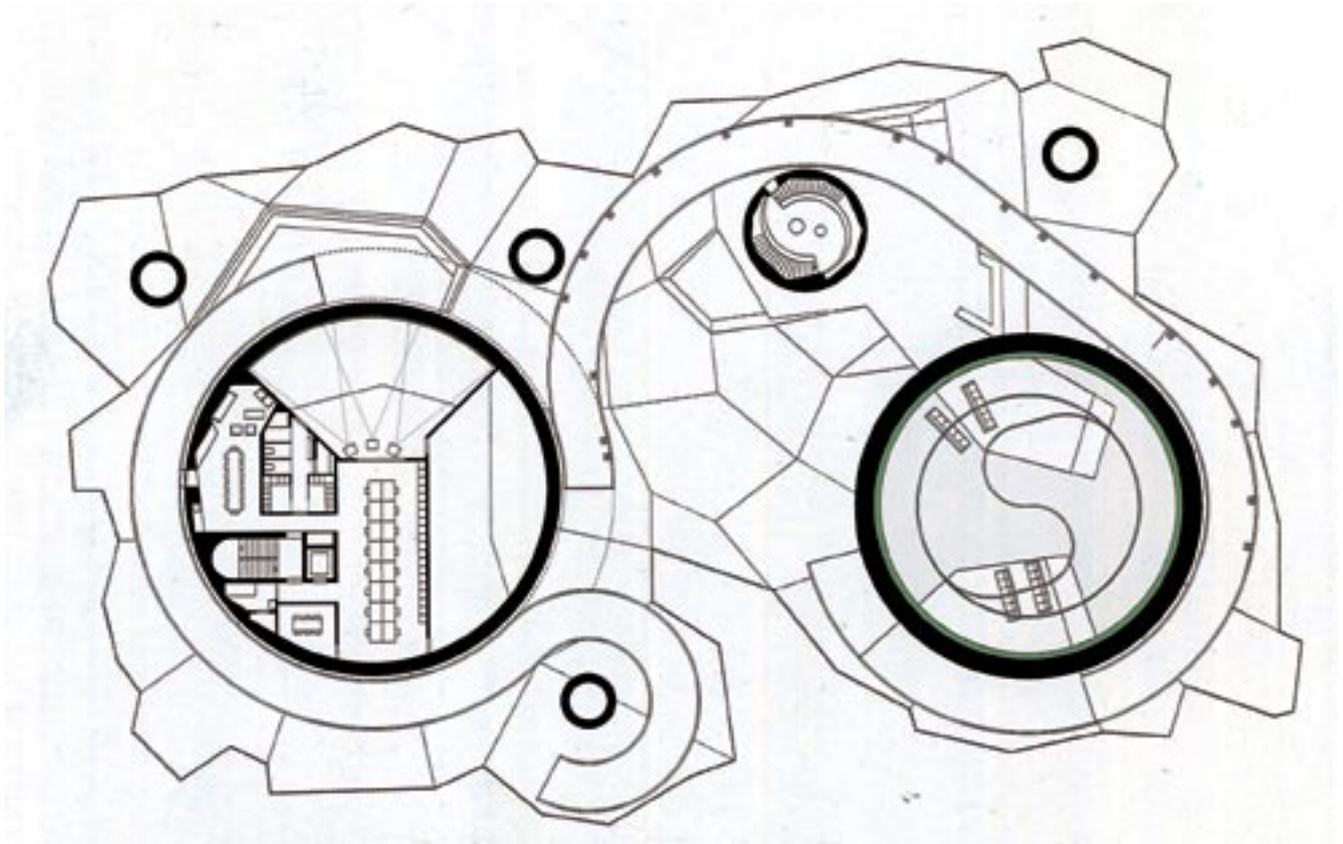




Figura II.7: Interruzione fra le due tecnologie a verde del padiglione

Le tecnologie di parete e di copertura del padiglione svizzero sono diverse, così come la vegetazione che vi cresce. La parete impiega pannelli prevegetati appesi, mentre la copertura è costituita da strati di materiali inerti sovrapposti.

Fonte: Giovanni Zannoni



Figura II.8: Vista dalla copertura a verde verso il PuXi Side di Shanghai

Durante il tragitto che i visitatori percorrono con la seggiovia è possibile osservare il paesaggio urbano circostante. La seggiovia sorvola la copertura a verde caratterizzata da lievi cambi di pendenza che simulano il paesaggio alpino della Svizzera.

Fonte: <http://yovohagrafie.wordpress.com>

Figura II.5 pagina a fianco: Pianta del padiglione della Svizzera

Il padiglione è caratterizzato dalla presenza di due corpi cilindrici principali, collegati da una serie di percorsi curvilinei esterni riparati dalla copertura a verde. Uno dei due corpi ospita l'esposizione, mentre l'altro la partenza del percorso in seggiovia
Fonte: Area, 110 (2010):120.

Figura II.6 pagina a fianco: Prospetto nord e sezione longitudinale

Le "chiusure nascoste" del padiglione, cioè la parete della corte interna e la copertura, sono interamente rivestite dalla vegetazione. Queste tecnologie contrastano dal punto di vista formale con l'involucro luminoso esterno. I due tipi di involucro hanno in comune la capacità di "interagire" con l'ambiente

e di stimolare sensorialmente l'osservatore, pur essendo costituiti da matericità opposte: fortemente artificiali per ciò che riguarda le chiusure verticali esterne, completamente naturali per ciò che riguarda la copertura e la chiusura verticale della corte.

Fonte: Area, 110 (2010):120.

Figura II.9: Percorso sopra la copertura a verde del padiglione della Svizzera

L'inverdimento della copertura appare omogeneo, completamente tappezzante e rigoglioso. La stratigrafia della copertura è pertanto sufficientemente spessa da garantire inerzia termica e idrica adeguate per le specie erbacee che vi crescono; infatti la presenza dei fiori è generata da processi spontanei di colonizzazione. Questo è un chiaro indizio che dimostra la qualità della stratigrafia impiegata in rapporto al clima: se la stratigrafia fosse troppo ridotta le piante non avrebbero sviluppato le infiorescenze.

Fonte: Giovanni Zannoni



Figura II.10: Uscita del padiglione sulla copertura

In alcuni punti della copertura si trovano elementi architettonici che interrompono la continuità del manto. Da un punto di vista tecnologico queste discontinuità non presentano particolari difficoltà: è necessario che l'elemento di tenuta sia opportunamente risvoltato e protetto e che la sequenza degli strati a esso soprastanti sia rispettata.

Fonte: Giovanni Zannoni



Figura II.11 pagina a fianco: Partenza del percorso della seggiovia

Fonte: www.expodatabase.com/aussteller/news/show.php?id=28089



II.3

L'influenza della configurazione geometrica della copertura sul sistema a verde

La configurazione geometrica dei piani di falda della copertura influisce significativamente sulla stratigrafia della tecnologia: se le falde orizzontali non presentano particolari difficoltà progettuali ed esecutive, altrettanto non si può dire per quanto riguarda le falde inclinate o curve. In questi casi, infatti, il sistema a verde, poggiandosi sopra l'elemento di tenuta ed essendo costituito per la gran parte del suo spessore dagli inerti che compongono il substrato, è soggetto allo scivolamento lungo i piani di falda per effetto della gravità: quanto più elevata è la pendenza della copertura, tanto maggiore è il rischio che i materiali aggregati scivolino verso il basso. Le coperture a verde piane e inclinate presentano quindi differenti stratigrafie.

COPERTURE PIANE

Le coperture orizzontali o sub-orizzontali possono essere costituite da spessori di substrato elevati, dando luogo a inverdimenti molto rigogliosi, in taluni casi prossimi a ricostruzioni paesaggistiche vere e proprie. Il sovradimensionamento del sistema a verde non altera la composizione della stratigrafia che vede la medesima sequenza degli elementi, pur variati nello spessore. L'unico fattore di criticità che si genera in questi casi riguarda l'incremento dei carichi permanenti che gravano sugli elementi portanti della copertura e dell'edificio.

COPERTURE INCLINATE

Differentemente le coperture inclinate necessitano di contrastare lo scivolamento dei materiali attraverso opportune variazioni della stratigrafia. Normalmente ciascun produttore propone soluzioni di copertura a verde inclinata attraverso l'impiego di una componentistica specificatamente progettata per la propria tipologia di sistema: la figura II.12 nella pagina a fianco mostra le soluzioni adottate da uno dei produttori leader di questa tecnologia, in relazione alla pendenza delle coperture e, come si vede, man mano che la pendenza aumenta è necessario adottare soluzioni diversificate e aumentare la componentistica.

Pur con alcune differenze legate ai vari marchi, le variazioni che si applicano nel caso della copertura a verde a falde sono fondamentalmente tre:

1. la riduzione dello spessore del substrato;
2. l'inserimento di elementi rompitratta;

3. Uso di strati antierosione.

Per quanto riguarda lo spessore dello strato colturale, né la normativa italiana né la normativa tedesca definiscono un limite massimo, ma, in generale, tale valore non supera i 15 centimetri per coperture di media inclinazione e, in caso di pendenze elevate, lo spessore dev'essere sensibilmente ridotto. Questo limite tecnologico ha come conseguenza fondamentale che anche lo strato vegetale della copertura debba essere abitato da specie di dimensioni ridotte: una copertura inclinata non può quindi ospitare piante legnose, ma limitarsi alle specie più piccole come i *Sedum* o varie erbacee. Questo vincolo nella maggior parte dei casi si genera spontaneamente, in quanto, in associazione a substrati di spessori ridotti, le piante superiori difficilmente attecchiscono³⁰.

Per inclinazioni via via superiori la riduzione dello spessore dello strato colturale non è sufficiente a evitare lo scivolamento del sistema a verde, pertanto è necessario adottare altre precauzioni che prevedono l'impiego di componenti aggiuntivi. Le figure nelle pagine seguenti mostrano una serie di soluzioni appositamente studiate da diversi produttori per gestire le pendenze di un sistema a verde.

³⁰ I substrati sono specificatamente miscelati per l'impiego in associazione a determinate specie vegetali. Per gli inverdimenti di spessori ridotti si usano substrati prevalentemente inorganici e molto drenanti. Questi inerti sono adatti a specie vegetali resistenti a stress idrici e termici come i noti *Sedum*.

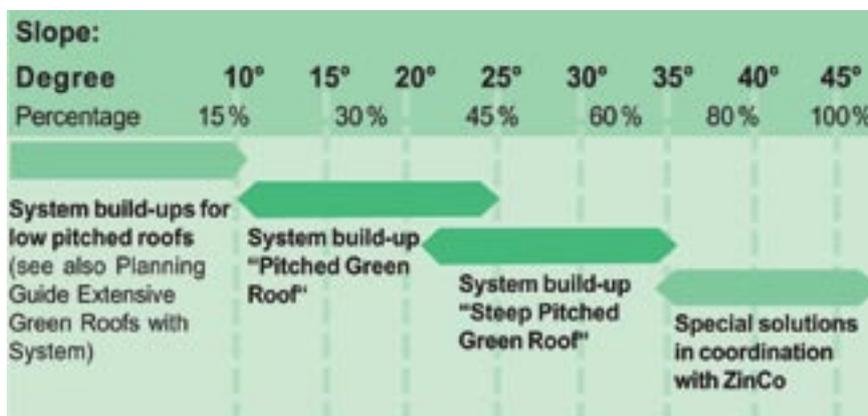
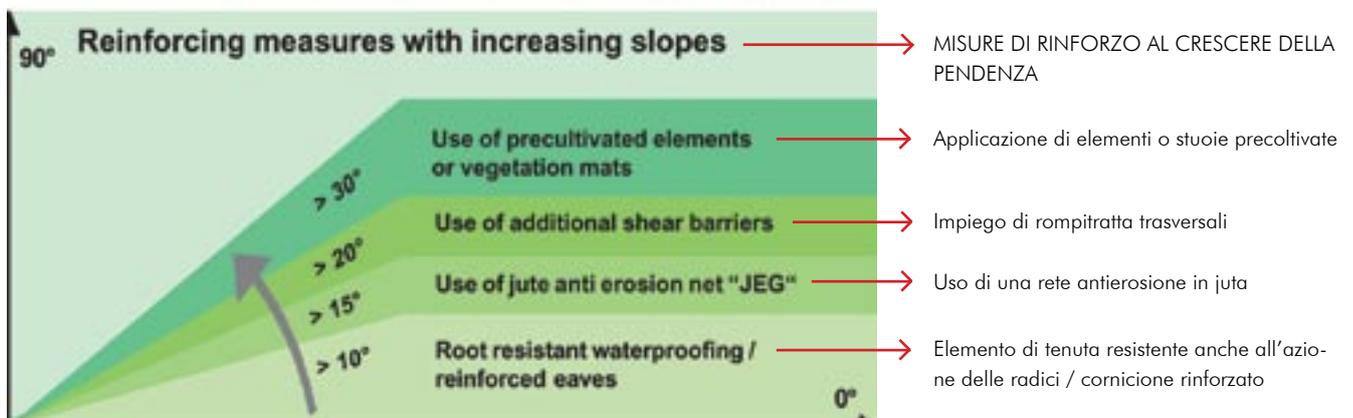


Figura II.12: Variazioni della stratigrafia in relazione alla pendenza della falda del sistema ZinCo

Le coperture a falda presentano nella maggior parte dei casi un manto di impermeabilizzazione discontinuo. L'inclinazione delle falde garantisce una rapida percolazione dell'acqua verso gli elementi di gronda e quindi verso gli impianti di raccolta delle acque reflue.

Fonte: ZinCo, "Planning guide - Pitched green roofs with system".



MISURE DI RINFORZO AL CRESCERE DELLA PENDENZA

Applicazione di elementi o stuoie precoltivate

Impiego di rompitratta trasversali

Uso di una rete antierosione in juta

Elemento di tenuta resistente anche all'azione delle radici / cornicione rinforzato

Figura II.13: Elementi antislittamento per falde inclinate

Questa stratigrafia mostra il più semplice dei sistemi di antislittamento utilizzato nelle coperture a verde: il piano di falda viene interrotto, a intervalli regolari, con traversi di legno inchiodati alla struttura sottostante. I traversi sono ricoperti dall'elemento di tenuta in modo da evitare pericolose infiltrazioni d'acqua verso l'elemento portante e l'interno.

Fonte: Optima Giardini Pensili

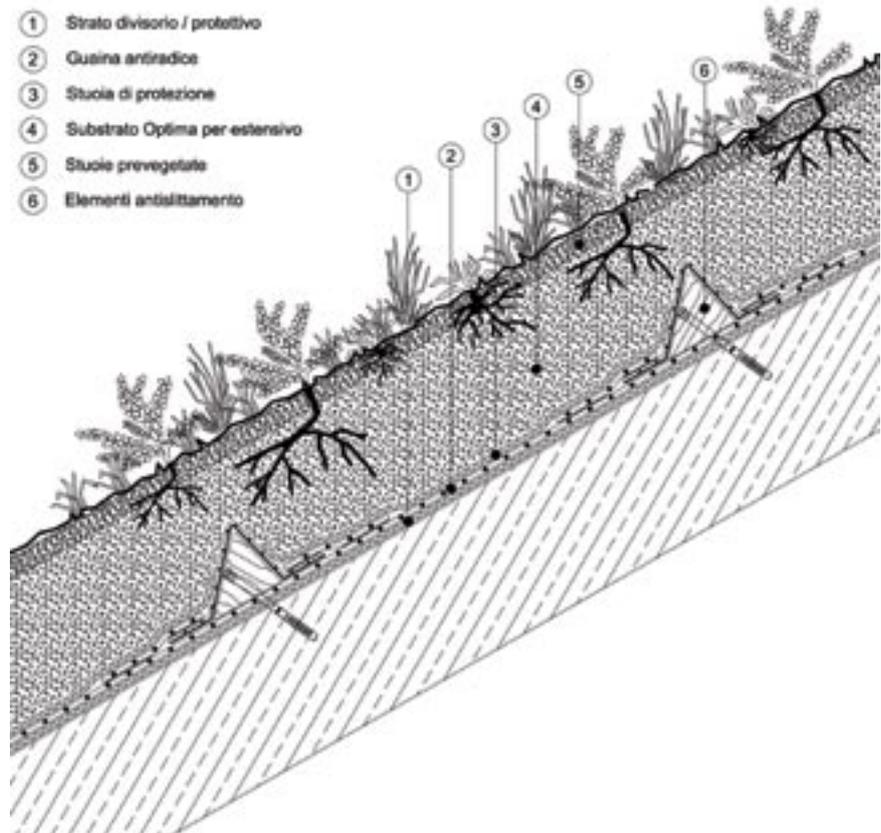
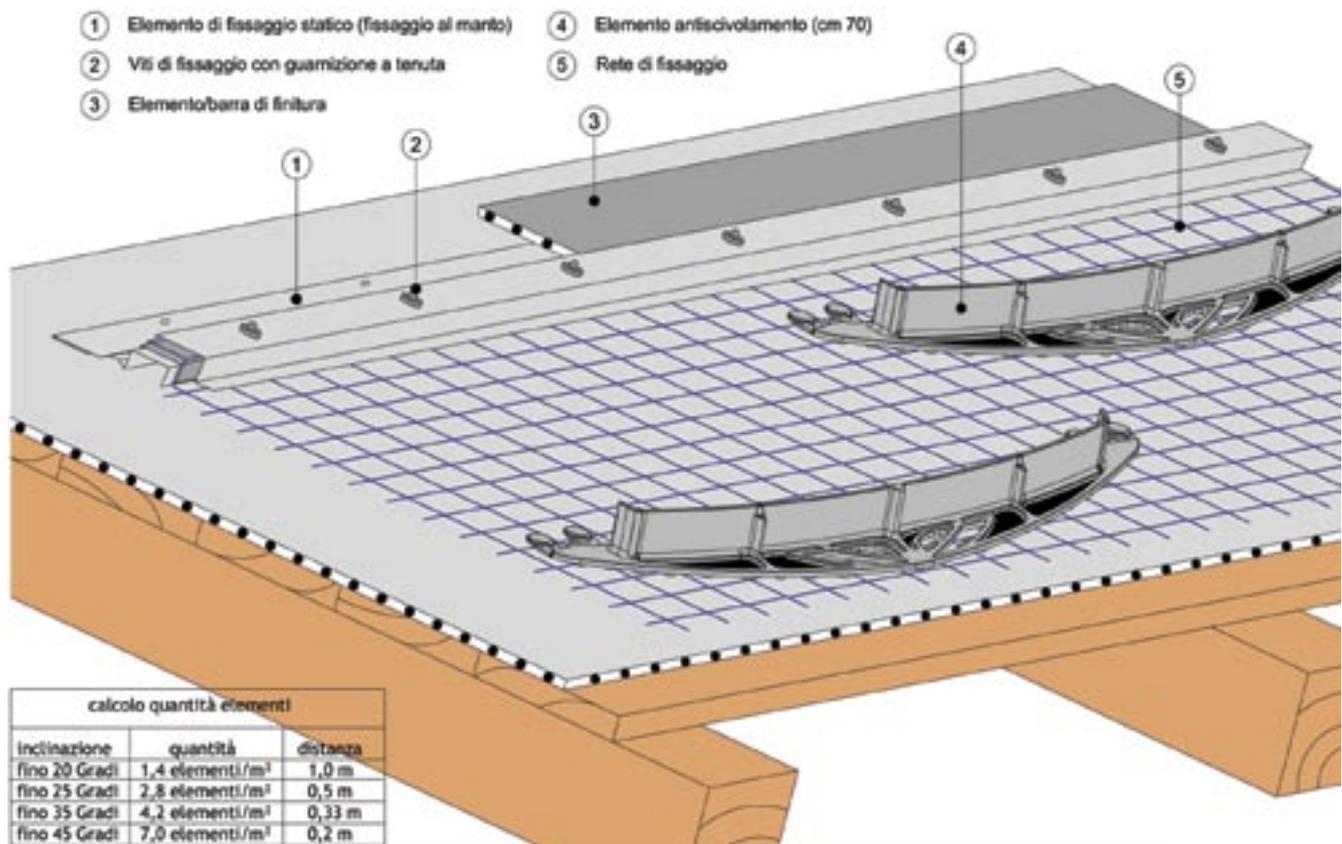


Figura II.14: Elementi antislittamento per falde inclinate

Ogni produttore propone una propria componentistica per le coperture a verde inclinate. Tuttavia tutti i sistemi hanno in comune la riduzione dello spessore dei materiali granulari che compongono il substrato e, nella maggior parte dei casi, l'inserimento di elementi trasversali di diverse forme e materiali.

Fonte: Optima Giardini Pensili



calcolo quantità elementi		
Inclinazione	quantità	distanza
fino 20 Gradi	1,4 elementi/m ²	1,0 m
fino 25 Gradi	2,8 elementi/m ²	0,5 m
fino 35 Gradi	4,2 elementi/m ²	0,33 m
fino 45 Gradi	7,0 elementi/m ²	0,2 m

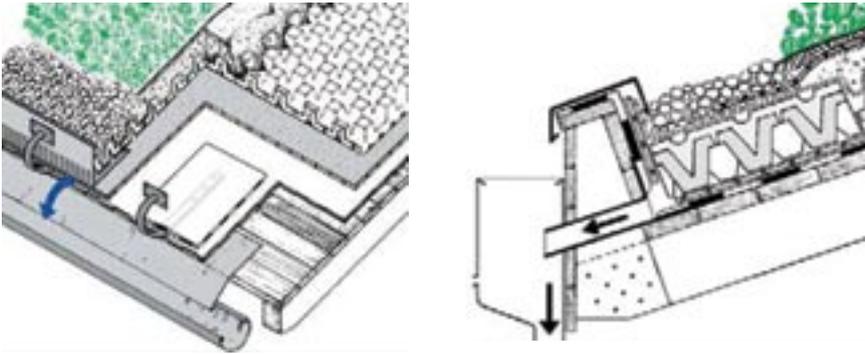


Figura II.15: Elementi antislittamento in prossimità della gronda

Anche in prossimità della gronda si predispongono misure cautelative per contrastare la spinta verso il basso dei materiali inerti. Qui sono rappresentati diversi sistemi in grado di consentire i deflussi d'acqua in eccesso verso le gronde. Queste tre soluzioni sono accomunate dall'aver sia l'ordito che l'impalcato del solaio di copertura in legno.

Fonte: ZinCo

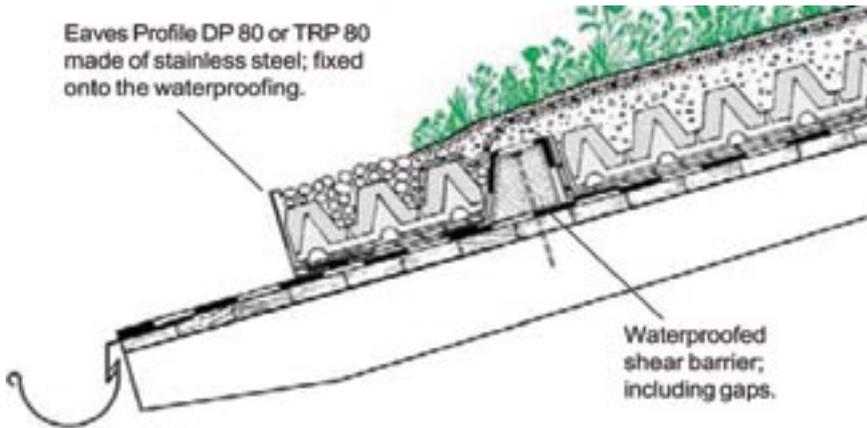


Figura II.16: Elementi antislittamento in prossimità della gronda

Il sistema qui riportato, che si avvale di numerose componenti aggiuntive rispetto a una copertura piana, è in grado di trattenere strati culturali di considerevole spessore. Anche le radici delle piante, una volta cresciute, collaborano nella capacità di trattenimento dei materiali disciolti del substrato.

Fonte: ZinCo





Figure-serie II.17: Il Vulcano Buono a Nola

Il grande complesso del Vulcano Buono, progettato da Renzo Piano, è interamente rivestito da una vastissima copertura a verde inclinata.

Pur non avendo un'elevata pendenza, lo strato culturale della copertura è ricoperto e fissato attraverso un robusto tessuto in polipropilene unitamente a un agugliato dalla trama non fitta.

La copertura è popolata da piante di rosmarino prostrato (*Rosmarinus Repens*), specie vegetale appartenente alle *Lamiaceae* ampiamente utilizzata per il verde pensile perché rustica, sempreverde e particolarmente adattabile a terreni leggeri e ben drenati come quelli che si impiegano frequentemente per le coperture a verde.

La parte della copertura in corrispondenza dell'anello del cratere centrale è totalmente priva di vegetazione: in questo settore la composizione della stratigrafia non è la medesima che nel resto della copertura, perché l'inclinazione è superiore. In questa porzione di involucro, fortemente inclinata e priva di irrigazione automatica, nessuna specie vegetale è in grado di attecchire spontaneamente.





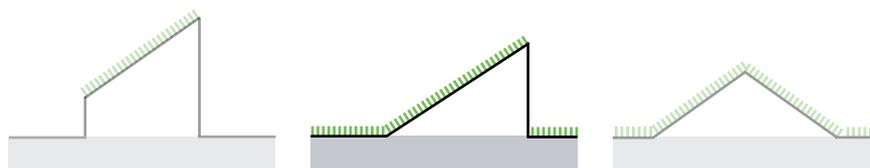
Figure-serie II.18: Manutenzione straordinaria della biblioteca dell'Università tecnica di Delft

Le immagini illustrano l'attività di manutenzione straordinaria operata sulla copertura dell'Università tecnica di Delft. Questa falda è paragonabile per inclinazione, lunghezza e spessore della stratigrafia a quella del Vulcano Buono di Nola (documentato nella pagina a fianco), tuttavia alcune differenze risultano evidenti: nel progetto della biblioteca il substrato è una miscela di sabbia, laterizi macinati e materiale organico, mentre nel Vulcano Buono è costituito prevalentemente da lapillo e pomice. La differente consistenza dei due substrati implica l'impiego di inverdimenti diversi. In questo caso è stato applicato un tappeto erboso "a prato inglese", funzionale alla praticabilità da parte del pubblico: come si vede (grazie allo smantellamento dello strato di vegetazione) il substrato non è trattenuto da alcun tipo di tessuto, consentendo così una fruizione agevole, quanto più simile a quella di un giardino vero e proprio. Nel progetto del Vulcano Buono il rosmarino prostrato, diffuso su tutta la superficie di copertura, non consente alcuna accessibilità sull'estradosso della falda.



Complesso commerciale Meydan

LUOGO	Istanbul
PROGRAMMA.....	complesso commerciale
ARCHITETTO	FOA - Foreign Office Architects: Farshid Moussavi e Alejandro Zaera-Polo
PAESAGGISTA.....	---
REALIZZAZIONE.....	2007
USO DELLA COPERTURA	parco pubblico
PRATICABILITÀ.....	accessibile
SUPERFICIE.....	2000 m ²
PENDENZA.....	variabile
VERDE	intensivo
SISTEMA.....	---



Il ricorso a specifici accorgimenti tecnologici finalizzati ad evitare lo slittamento dello strato colturale è alla base della geometria variabile della copertura a verde del nuovo Complesso Meydan, progettato da FOA - Foreign Office Architects, un'estesa superficie commerciale in un'area di espansione suburbana della città di Istanbul. Il progetto si distingue per le soluzioni architettoniche tipologicamente non convenzionali rispetto ai tradizionali grandi centri commerciali: l'insediamento pone al centro dell'area edificata una piazza scoperta, circondata dai vari edifici. La piazza è raggiungibile da rampe e scalinate che, solcando il suolo, la connettono con il centro commerciale e il quartiere: i percorsi pedonali si adattano al tessuto stradale esistente e generano, a loro volta, spazi caratterizzati da un andamento orografico variabile (la piazza centrale è infatti a una quota più bassa rispetto alle aree circostanti).

Dai percorsi di ingresso, inoltre, è possibile accedere direttamente alle coperture che si impostano alla quota del terreno: uno dei punti di forza del progetto del nuovo complesso commerciale Meydan è infatti quello di aver rivestito le coperture di vegetazione rendendole fruibili dal pubblico. I percorsi modellati a terra e le coperture accessibili, poste in continuità con il suolo, generano una topografia artificiale, un vero e proprio paesaggio urbano dove i visitatori si muovono godendo di un contatto visivo continuo con le aree verdi delle coperture, rimanendo così sempre in relazione con lo spazio esterno al complesso verso la città.

Le coperture a verde, oltre a garantire spazi verdi fruibili dal pubblico, sono



funzionali all'isolamento termico degli ambienti interni del complesso. Inoltre le coperture, essendo forate da una serie di lucernari di grandi dimensioni, integrano le funzioni di illuminazione e ventilazione naturale per i negozi e consentono un contatto visivo continuo dall'interno con le aree verdi esterne.

La continuità fisica fra coperture e percorsi pedonali è resa possibile anche dalla collocazione dei parcheggi nel livello interrato: liberando tutta la superficie calpestabile dai veicoli l'area garantisce una fruizione privilegiata da parte del pubblico della quota zero dell'area. Questo progetto, altamente funzionale, si configura così come una ricostruzione urbana che integra spazi commerciali a superfici verdi.

Figura II.19: Vista delle coperture a verde del complesso commerciale Meydan

Alcune delle coperture a verde del complesso commerciale Meydan sono accessibili ai visitatori, e, al pari di un giardino vero e proprio, attrezzate con arredi urbani.

Fonte: www.architects24.com > project > shopping-square-meydan-turkey

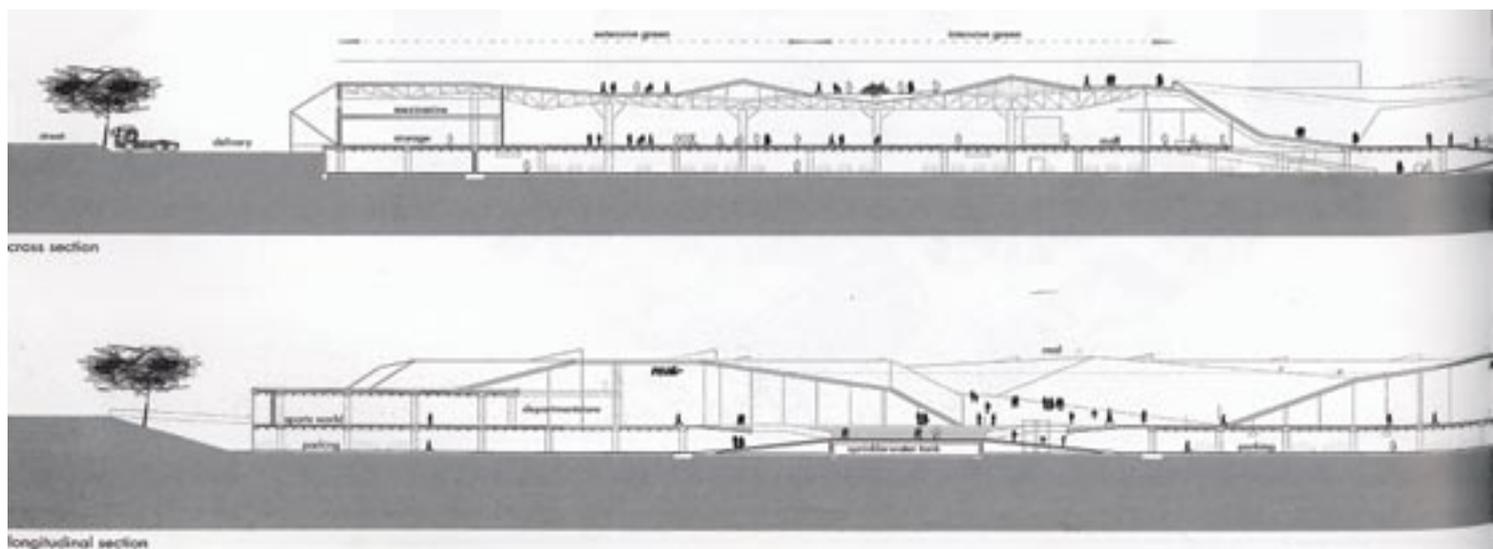


Figure II.20 e II.21: Inquadramento e piante del complesso

Il complesso Meydan non è semplicemente un edificio commerciale, ma un vero e proprio centro urbano: avendo i parcheggi trovata collocazione nel piano interrato, l'area in superficie è stata interamente destinata all'accessibilità pedonale. Al centro del grande lotto, infatti, si trova una piazza scoperta. L'integrazione fra edifici, suolo e quartiere è resa possibile anche dalle coperture a verde accessibili che, poste in continuità con i percorsi pedonali, si trasformano in aree verde fruibili dalla cittadinanza.

Fonte: www.archdaily.com/3338/meydan-umraniye-retail-complex-multiplex-foa/



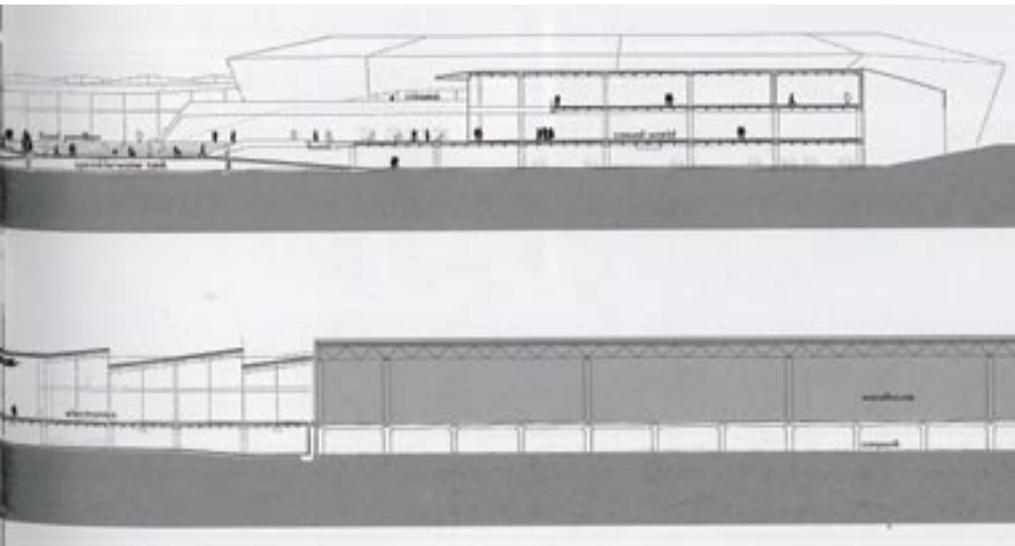


Figura II.22: Sezioni verticali del complesso Meydan

Gli edifici del complesso commerciale sono alti tre piani, di cui due fuori terra e uno, il parcheggio, interrato. Le coperture sono modellate con una geometria irregolare, e l'alternarsi delle lievi pendenze dei piani di falda segue un andamento irregolare così come il piano di campagna che, rispetto alla quota del terreno delle aree circostanti, "scende" verso la piazza centrale del Complesso.

Fonte: Area, n°105 (2009): 50-51.

Figura II.23: Piazza centrale circondata dalle coperture a verde

Fonte: www.duesseldorf-realestate.de/fileadmin/media/projektfotos/expo_2010/metro_1.jpg



II.4

Il sistema di classificazione: inverdimento estensivo e intensivo

Uno dei principali elementi di ambiguità nel settore delle coperture a verde riguarda il sistema di classificazione.

La più importante delle classificazioni delle coperture a verde riguarda i livelli di manutenzione di cui esse necessitano in fase di esercizio: le coperture che richiedano bassa manutenzione, circa due o tre interventi all'anno, corrispondono al cosiddetto **inverdimento estensivo** mentre le coperture che invece richiedano media e alta manutenzione, vale a dire da quattro a dieci/dodici interventi all'anno, sono definite **inverdimento intensivo**. Questa classificazione, pur non identificando una particolare tipologia di specie vegetali o di aspetto complessivo della copertura, è di fondamentale importanza in quanto definisce le rispettive possibilità e modalità d'uso della superficie a verde di una copertura i cui rispettivi ambiti di applicazione sono differenti.

In linea teorica, quindi, la classificazione dell'inverdimento estensivo o intensivo che distingue le coperture a seconda della manutenzione richiesta, “non è direttamente legata agli spessori della stratificazione o alla dimensione della vegetazione. Il prato o tappeto erboso, per esempio, in conseguenza della manutenzione necessaria, è un inverdimento intensivo (e non estensivo) anche se, rispetto ad altre associazioni vegetali, si sviluppa su spessori minori e raggiunge altezze di pochi centimetri. Al contrario, un cosiddetto prato naturale o selvatico, non soggetto a interventi di rasatura e con minori esigenze nutrizionali e di cura, che raggiunge periodicamente altezze anche di 40 o 50 centimetri, è da comprendere nella categoria degli estensivi.

Volendo applicare un concetto più elaborato, ma sicuramente più preciso, la differenza fra estensivo e intensivo può essere riferita a un bilancio globale di energia consumata³¹ per il mantenimento in stato di buona salute della vegetazione piantata, intendendo per “energia consumata” tutti gli apporti di materia e di lavoro per le attività agrotecniche, gli apporti idrici e le fertilizzazioni. In generale, si presenta frequentemente una correlazione fra il livello di manutenzione, lo spessore dello strato colturale e le specie vegetali: una copertura a verde che presenti uno strato colturale di spessore ridotto,

³¹ Abram, “Giardini pensili”: 90.

per esempio di 8 centimetri, non potrà che ospitare specie vegetali rustiche e di piccole dimensioni; mentre una copertura con uno strato colturale di elevato spessore, per esempio 40 centimetri, potrà ospitare piante legnose e alberi di piccole dimensioni, oltre che erbacee e arbusti. Nel primo caso la manutenzione necessaria sarà molto bassa, poichè la vegetazione presente è caratterizzata da uno sviluppo ridotto. Nel secondo caso, invece, la copertura a verde richiederà un'attività manutentiva circa pari a quella di un giardino tradizionale, essendo necessarie lavorazioni quali gli sfalci, le potature, l'eventuale raccolta delle foglie caduche e naturalmente le irrigazioni più frequenti.

Questi concetti sono espressi dalla figura II.24: il grafico riporta nell'asse delle ascisse i costi di manutenzione e nell'asse delle ordinate lo spessore del substrato (spessore che è proporzionale ai costi di realizzazione). "Muovendosi verso destra in ascissa le tipologie di verde passano gradualmente dall'estensivo all'intensivo. In basso a sinistra del grafico (punto E) è collocata

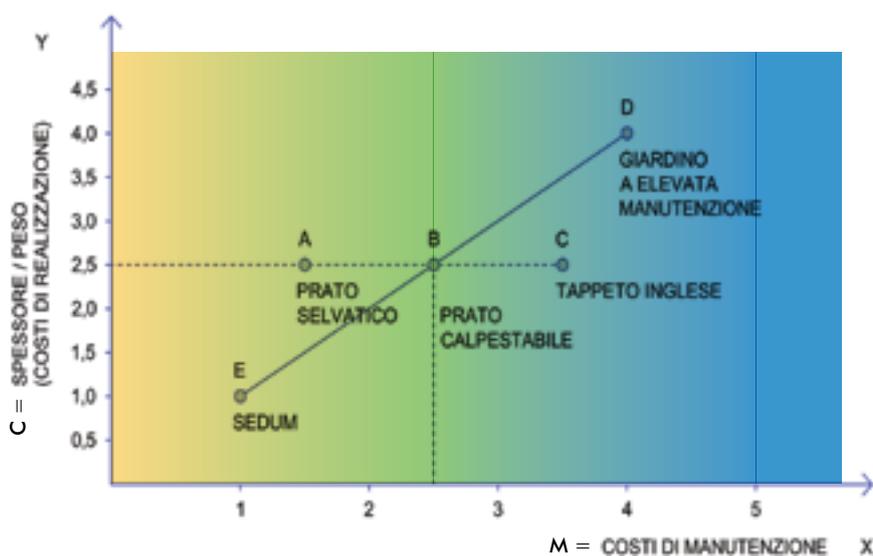


Figura II.24: Tipologie di inverdimento estensivo e intensivo

La principale classificazione delle coperture a verde si basa sul rapporto fra i costi di costruzione e i costi di manutenzione del sistema a verde. Pur non essendo di immediata comprensione, tale classificazione fornisce in realtà molte informazioni riguardanti le caratteristiche agrotecniche della stratigrafia del sistema a verde e di conseguenza riguardanti anche le caratteristiche strutturali dell'elemento portante della copertura. Ad esempio, un'inverdimento estensivo è caratterizzato sia da bassi costi di costruzione e di realizzazione, e tale combinazione informa circa il limitato numero di associazioni possibili in termini di proprietà dei singoli strati. Costi di costruzione bassi implicano uno spessore ridotto di substrato, quindi un impiego di specie vegetali molto resistenti agli stress termici e idrici (poichè un substrato sottile ha poca inerzia complessiva) che di conseguenza avranno anch'esse dimensioni limitate. Un sistema a verde di questo tipo implica un peso ridotto e ciò comporta che l'elemento strutturale non debba essere particolarmente robusto, e che la manutenzione ordinaria e l'irrigazione per il suo mantenimento siano sporadiche.

CLASSI	IRRIGAZIONE	MANUTENZIONE	M/C
	m ³ /m ²	Mdo h/m ² /anno	%
1 = bassa manutenzione ESTENSIVO	solo di soccorso	< 0,02	< 1
2 = media manutenzione INTENSIVO LEGGERO	prevista	0,02 - 0,06	1 - 5
3 = alta manutenzione INTENSIVO	prevista	> 0,06	> 5

M = costo totale annuo della manutenzione ordinaria
C = costo di costruzione della copertura a verde (al netto delle spese logistiche e di messa in quota dei materiali)
Mdo = manodopera



Figura II.25: Copertura a verde estensivo dell'Educatorium a Utrecht

Una porzione della copertura piana dell'Educatorium progettato da Rem Koolhaas è ricoperta da un'inverdimento estensivo. Questa copertura non è accessibile dal pubblico e la sua funzione è prettamente di isolamento termico.

Figura II.26: Copertura a verde intensivo della Scuola d'arte e design a Singapore

Progettato dallo studio CPG Consultants, la nuova Scuola d'Arte di Singapore è un edificio a pianta organica, interamente rivestito da una copertura a verde accessibile dagli studenti. L'inverdimento, costituito da un prato mantenuto costantemente a raso, è da considerarsi di tipo intensivo, sia per la frequenza della manutenzione necessaria, sia per il tipo di fruibilità.

Fonte: www.panoramio.com/photo/2757831



la vegetazione a *Sedum*, in assoluto il sistema più estensivo, mentre in alto a destra (punto D) è collocato un parco a elevata manutenzione, quindi un sistema intensivo.

Interessante, per meglio comprendere il concetto è osservare il grafico in corrispondenza degli elementi prato selvatico, prato calpestabile e prato all'inglese (punti A, B e C). Le tre diverse tipologie sono collocate sulla retta orizzontale in quanto vegetano su un identico spessore di substrato, presentano lo stesso peso e hanno costi di realizzazione pressochè uguali. La manutenzione a regime richiesta dalle tre tipologie è, invece, marcatamente diversa, minore per il prato selvatico, media per il prato calpestabile, sensibilmente elevata per il tappeto inglese³².

L'inverdimento estensivo ha uno spessore di substrato che indicativamente varia da 8 a 15 centimetri e il suo peso ha un valore di circa 150 chilogrammi al metro quadro. L'inverdimento intensivo invece presenta un substrato di spessore superiore a 15 centimetri (normalmente attorno ai 20-30 centi-

³² Abram, "Giardini pensili": 90.

metri, ma anche maggiore per piante di dimensioni superiori).

In sintesi una copertura a verde estensivo richiede un basso livello di manutenzione, e di conseguenza la stratigrafia della copertura è caratterizzata da:

- spessore ridotto della strato colturale;
- vegetazione a *Sedum* o erbacee di dimensioni ridotte;

e di conseguenza:

- costi di costruzione contenuti;
- costi di manutenzione contenuti.

Invece una copertura a verde intensivo richiede un livello di manutenzione medio o elevato e la stratigrafia è caratterizzata da:

- spessore elevato dello strato colturale;
- vegetazione varia, simile a quella dei giardini al suolo, cioè erbacee, erbacee perenni, arbusti, cespugli, alberi;

di conseguenza:

- costi di costruzione elevati;
- costi di manutenzione consistenti.

Viste le differenze che caratterizzano le varie tipologie di inverdimento si intuisce che le applicazioni a verde estensivo risultino particolarmente favorevoli per le estese superfici di copertura dove la funzione del verde non sia quella della fruibilità propria di un giardino; invece le applicazioni a verde semi-intensivo o intensivo sono generalmente applicate per funzionalità strettamente connesse all'accessibilità da parte del pubblico.

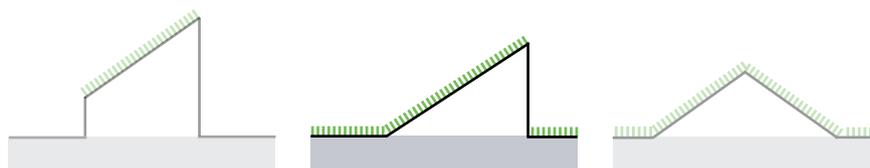
L'estensivo viene normalmente applicato per ottenere rendimenti energetici favorevoli all'ambiente interno confinato, per scopi di mitigazione e compensazione ambientale o per attenuare l'impatto del costruito da un punto di vista paesaggistico. Per i costi ridotti di manutenzione ma anche di costruzione di questa tecnologia essa risulta particolarmente adatta alle coperture di edifici commerciali o industriali, di parcheggi o edifici di grandi dimensioni.

La copertura a verde intensivo si presta, invece, a svariate funzioni, poichè essa si progetta come un giardino vero e proprio, adatto a ospitare non solo diverse associazioni vegetali, ma anche a integrare pavimentazioni ed elementi di arredo.

In questo caso la copertura diventa un vero e proprio solaio per funzionalità e attività diverse: parchi, percorsi, parcheggi, coltivazioni sono alcuni dei più frequenti usi di un sistema a verde in copertura. L'inverdimento intensivo consente quindi di declinare una serie di possibilità d'uso alla superficie di copertura che possano rientrare a pieno titolo all'interno del programma funzionale del progetto.

Campus universitario femminile Ewha

LUOGO	Seoul
PROGRAMMA.....	Campus universitario
ARCHITETTO	Dominique Perrault Architecture
PAESAGGISTA.....	CnK Associates
REALIZZAZIONE	2004-2008
USO DELLA COPERTURA	parco pubblico
PRATICABILITÀ.....	accessibile
SUPERFICIE.....	10000 m ²
PENDENZA.....	piana
VERDE	intensivo
SISTEMA.....	- - -



Il campus universitario femminile di Ewha progettato da Dominique Perrault rappresenta un eccezionale esempio di verde intensivo che si traduce in *landscape architecture* in area urbana. Il progetto del campus include spazi per lo studio e lo sport destinati a ospitare 20.000 studenti nel distretto urbano Sinchon di Seoul. Il progetto realizza un taglio profondo rettilineo nel suolo, una sorta di valle artificiale incuneata nella terra ai cui lati si elevano le due facciate vetrate che racchiudono gli spazi del campus. Due bracci che costituiscono l'edificio vero e proprio, collocati interamente nel sottosuolo, sono messi in relazione attraverso il percorso che congiunge l'ingresso al quartiere universitario con le strutture sportive circostanti. Il percorso è costituito da una lunga rampa nel lato ovest dell'intervento che scende fino alla quota di -15 metri, per poi risalire in direzione opposta con un'ampia scalinata che riporta il visitatore alla quota del suolo naturale. Il campus risulta così completamente nascosto dall'esterno e questo effetto è ulteriormente enfatizzato grazie all'impiego di coperture inverdite che danno continuità materica fra il suolo circostante, un parco urbano, e il suolo ricostruito della copertura dei due bracci dell'intervento. Oltre al vantaggio di recuperare una porzione di suolo altrimenti persa, la copertura a verde si inserisce in un progetto tecnologico complesso: le facciate vetrate dell'edificio interrato sono infatti in grado di garantire un'adeguato bilanciamento della luce naturale sia all'interno, negli spazi dedicati allo studio, sia all'esterno, nel grande viale centrale che divide il campus in due. "Negli spazi esterni le ombre portate, che per la natura ipogea del-



L'edificio avrebbero potuto essere molto invasive e creare un luogo poco accogliente, sono mitigate dalla finitura lucida con cui sono state trattate le strutture d'acciaio delle facciate: le ombre vengono "illuminate" dai riflessi degli stessi elementi che le proiettano, che si comportano da enormi specchi. All'interno, la luce naturale riesce a permeare ogni piano dell'edificio grazie al giusto dimensionamento del vuoto esterno, che consente alle due parti in cui è suddiviso il complesso di non adombrarsi mai l'una con l'altra e che permette ai raggi solari di raggiungere senza ostacoli la profondità necessaria, anche con l'aiuto degli stessi riflessi delle strutture in acciaio dei prospetti. Il sistema di distribuzione orizzontale, sotto forma di ballatoi, è arretrato rispetto alle facciate, creando uno spazio a tutta altezza che favorisce ulteriormente l'illuminazione naturale degli ambienti interni. Le aule, che affacciano su tali ballatoi, sono delimitate da pareti interamente vetrate (dotate di tende semi-trasparenti per consentirne l'eventuale oscuramento) e riescono quindi ad essere pervase dalla luce diurna, anche se non ad essere ventilate naturalmente³³.

Anche le coperture a verde contribuiscono significativamente ad attuare una strategia sostenibile dell'intervento. Oltre al recupero di uno spazio verde in un'area cittadina, la copertura offre tutti quei vantaggi termoigrometrici che le sono propri: innanzitutto il contenimento dell'effetto isola di calore per l'ambiente esterno immediato, ma anche il contenimento delle temperature interne superficiali in regime estivo e l'isolamento termico in regime invernale.

Figura II.27: Ingresso nord al Campus universitario Ewha

Gli edifici del Campus universitario Ewha si sviluppano per 6 piani sotterranei, per preservare l'ampio spazio verde dell'area di inserimento del progetto. Le coperture, che si trovano a raso rispetto al suolo circostante, ripristinano anch'esse la vegetazione, dando continuità al parco urbano.

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul

³³ Manuela Pattarini, www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul



Figura II.28: Pianta delle coperture del campus

Fonte: Area, n°104 (2009): 64

Figura II.29: Pianta del primo e secondo livello

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul

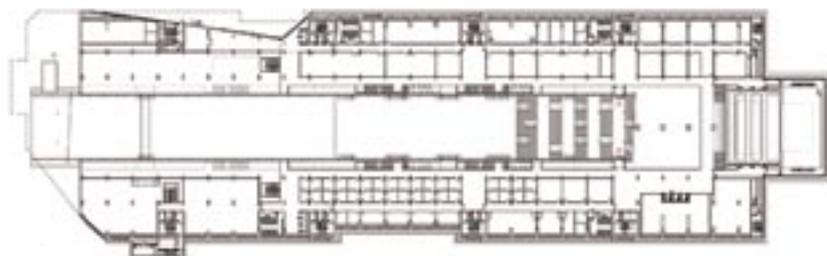
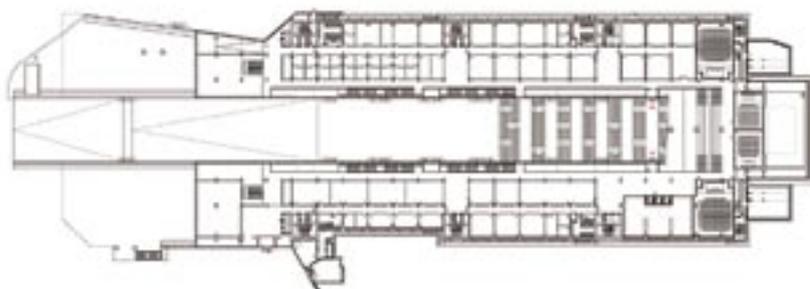


Figura II.30: Sezione verticale longitudinale verso ovest

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul





Figura II.31: Vista del campus

L'accesso principale al Campus è una lunga rampa che solca il suolo e che conduce gli utenti dalla quota zero alla quota -4. Ai lati del percorso si trovano le pareti vetrate che chiudono i due bracci dell'edificio del Campus. Le coperture poste a coronamento di questi bracci sono dei giardini pensili veri e propri, ossia copertura a verde intensivo, dove specie erbacee convivono con piante destinate a divenire ad alto fusto: per questa ragione la stratigrafia delle due coperture presenta spessori particolarmente consistenti. Fonte: www.e-architect.co.uk/korea/ewha_womans_university.htm André Morin / DPA / ADAGP



Figura II.32: Vista del braccio est dal giardino pensile del braccio opposto

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul

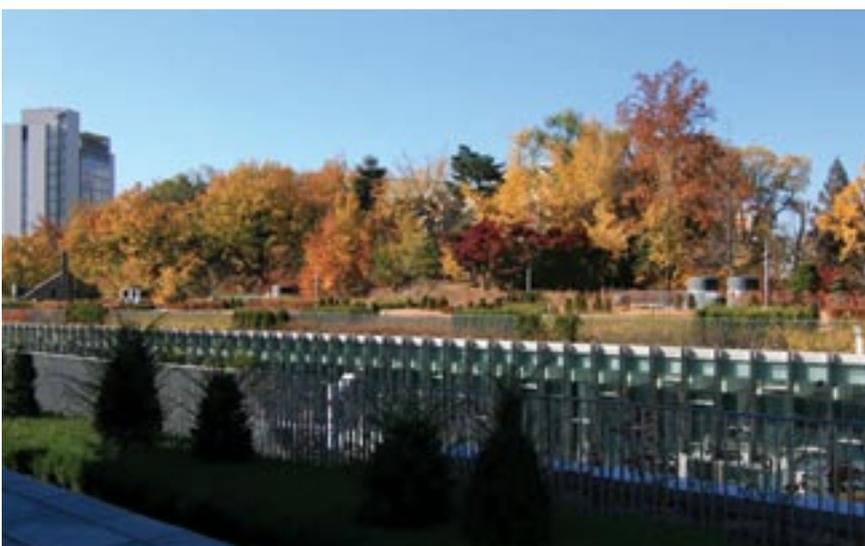


Figura II.33: Vista del braccio ovest dal giardino pensile del braccio opposto

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul



Figure II.34 e II.35: Giardino pensile del braccio orientale

Il giardino pensile di tipo intensivo è posto in continuità con il parco circostante. Sulla sua superficie si snodano percorsi fra specie vegetali diverse fra cui piccoli arbusti sempreverdi, piante legnose che nel tempo raggiungeranno dimensioni considerevoli e piante fiorite. Fra i percorsi sono presenti elementi di arredo urbano che facilitano la sosta dei passanti e che incrementano le modalità fruibili della copertura.

Fonte: www.vg-hortus.it > Il Campus della Ewha University a Seoul



Figura II.36 a fianco: Ingresso sud

Fonte: <http://restorrun.blogspot.com/2010/11/ewha-womans-university-campus.html>



II.5

L'importanza dei fattori di carico nella definizione del pacchetto tecnologico

Una caratteristica della tecnologia della copertura a verde che può essere definita limitante rispetto ad alcune possibilità applicazione in particolari contesti progettuali è il peso della stratigrafia, ovvero il carico permanente che il sistema a verde aggiunge al sistema di impermeabilizzazione. Come è stato accennato nel paragrafo II.3 *L'influenza della configurazione geometrica della copertura sul sistema a verde* il peso di una copertura a verde è particolarmente consistente in quanto il sistema a verde rappresenta non solo un'incremento della quantità di materiali posti al di sopra dell'impermeabilizzazione, ma anche una parte che, esposta agli agenti atmosferici, trattiene una quantità d'acqua il cui peso grava sull'intera struttura portante. Da questa caratteristica deriva che il solaio di copertura più frequentemente utilizzato sia in calcestruzzo armato, in quanto, a parità di spessore, offre sia prestazioni strutturali più elevate rispetto ad altri materiali, sia una superficie adatta alla posa di qualsiasi tipo di membrana impermeabilizzante. Il peso di una copertura a verde dev'essere quindi stimato sulla base dei valori del sistema in saturazione idrica sommando anche il peso previsto delle piante in massimo sviluppo. Questo dato, che nel caso di nuove costruzioni influisce semplicemente sul dimensionamento dell'elemento portante, nell'ambito del recupero edilizio rappresenta invece un limite significativo: infatti nel caso delle conversioni, e quindi dell'impiego di strutture preesistenti, il peso può essere un ostacolo significativo all'applicazione del sistema a verde. La tabella II.2 sintetizza i valori di carico delle diverse tipologie di inverdimento e dello strato vegetale e colturale.

SISTEMA A VERDE	PESO TOTALE Kg/m ²	TIPO DI VEGETAZIONE	PESO DELLA VEGETAZIONE Kg/m ²	SPESSORE DEL SUBSTRATO cm	PESO DEL SUBSTRATO = DENSITÀ APPARENTE Kg/m ² (650 kg/m ³)
INVERDIMENTO ESTENSIVO	80 - 150	Sedum	10	8 - 15	52 - 97,5 + peso acqua
		Erbacee perenni a ridotto sviluppo	10		
INVERDIMENTO SEMI-INTENSIVO	150 - 300	Grandi erbacee	15	15 - 25	97,5 - 162,5 + peso acqua
		Arbusti di piccola taglia	20		
INVERDIMENTO INTENSIVO	150	Prato	5-10	25	162,5 + peso acqua
	400	Arbusti di grande taglia e piccoli alberi	40	25 - 40	162,5 - 260 + peso acqua
	> 600 (carichi di punta)	Alberi di III grandezza (altezza a completo sviluppo 4-10 metri)	tabella dendrometrica	> 60	390 + peso acqua
	> 600 (carichi di punta)	Alberi di II grandezza (altezza a completo sviluppo 10-16 metri)	tabella dendrometrica	> 60	390 + peso acqua

Tabella II.2: Peso dei sistemi a verde estensivo e intensivo

I valori dei carichi permanenti generati dal sistema a verde devono essere valutati in condizione di massima saturazione idrica, ossia presupponendo che tutti gli spazi vuoti dei materiali inerti dello strato colturale e del drenaggio siano completamente imbibiti

d'acqua. Tale condizione, nella realtà irraggiungibile, incrementa notevolmente il valore dei carichi per cui la struttura portante viene dimensionata.

L'elemento che più influisce sulla variazione del peso della copertura è il substrato, la cui densità apparente può variare da 350 a 1000 chilogrammi al metro cubo.

Figura II.37: Giardino pensile di Villa Oddo a Pescara

Gli arbusti di grandi dimensioni e gli alberi rappresentano carichi puntiformi e per questo vengono frequentemente collocati in corrispondenza delle strutture verticali dell'edificio.

Fonte: Optima Giardini Pensili



Terzo capitolo

Scelte tecnologiche ed efficienza del sistema di copertura a verde

Il sistema tecnologico di copertura a verde è stato oggetto di una radicale revisione e sistematizzazione nell'ultimo ventennio del secolo scorso. Dalle modalità costruttive tradizionali, che nei Paesi mediterranei prevedevano l'impiego di un solaio massivo e di ingente spessore, si è passati a una tecnologia dal peso più contenuto grazie alla messa a punto di un'articolata stratigrafia multistrato, dove le funzioni tecnologiche e agrotecniche dei diversi componenti sono chiaramente distinte e definite. In particolare le tecnologie attuali di copertura a verde risolvono il principale elemento di criticità legato al verificarsi delle infiltrazioni d'acqua attraverso l'elemento di tenuta grazie all'impiego di opportune interfacce. In passato, infatti, una delle problematiche più significative, riscontrabile nelle applicazioni di questa tipologia di copertura (e che ne ha inibito a lungo la diffusione), era determinata dai difetti di posa della membrana impermeabilizzante, che causavano infiltrazioni e quindi danni significativi ai materiali edilizi costituenti la copertura stessa. Anche l'attuale tecnologia non è ovviamente immune dalle eventuali imperfezioni della posa in opera, ma i rischi dell'insorgere dei guasti legati alla gestione dell'acqua sono ridotti grazie alla produzione a livello industriale dell'intero pacchetto del sistema a verde che è ormai normato e progettato attraverso un maturo "stato dell'arte", e capace di garantire un'efficiente gestione dell'acqua all'interno della stratigrafia.

III.1

Funzioni, componenti e materiali della copertura a verde

La normativa italiana individua nella copertura a verde nove funzioni primarie (obbligatorie) all'interno della stratigrafia al fine di garantirne il corretto funzionamento. Le nove funzioni primarie sono svolte da altrettanti strati o elementi, ciascuno dei quali può essere costituito di materiali e forme eterogenei l'uno dall'altro. Questi nove elementi, in relazione allo spessore della stratigrafia o al materiale di cui sono composti, possono assolvere contemporaneamente a più di una funzione primaria: frequentemente l'accumulo idrico e il drenaggio sono inglobati in un unico elemento, così come l'impermeabilizzazione e la protezione dalle radici. In taluni casi, meno frequenti, anche altre funzioni sono accorpate: ad esempio nelle coperture ultraleggere (poco o per nulla diffuse in Italia) il drenaggio e l'accumulo idrico, funzioni inevitabilmente sottodimensionate, sono svolte dal substrato di coltivo. Analogamente, ma con esiti opposti, nelle coperture a verde di consistente spessore le caratteristiche idriche dello strato colturale garantiscono contestualmente anche l'accumulo idrico e il drenaggio.

Escludendo i casi appena citati, poco diffusi e che rappresentano le possibilità limite della tecnologia, la maggior parte delle coperture a verde oggi impiegate presentano una sequenza stratigrafica analoga a quella indicata nella quarta colonna della tabella III.1 nella pagina a fianco, dove a ciascuna funzione corrisponde un componente, a eccezione delle funzioni di drenaggio e accumulo e di impermeabilizzazione e protezione dalle radici. La normativa italiana UNI 11235 fornisce una completa descrizione delle caratteristiche che deve avere ciascun materiale e/o componente della stratigrafia, ne fornisce i requisiti necessari e istruisce circa il ruolo e la frequenza della attività manutentive.

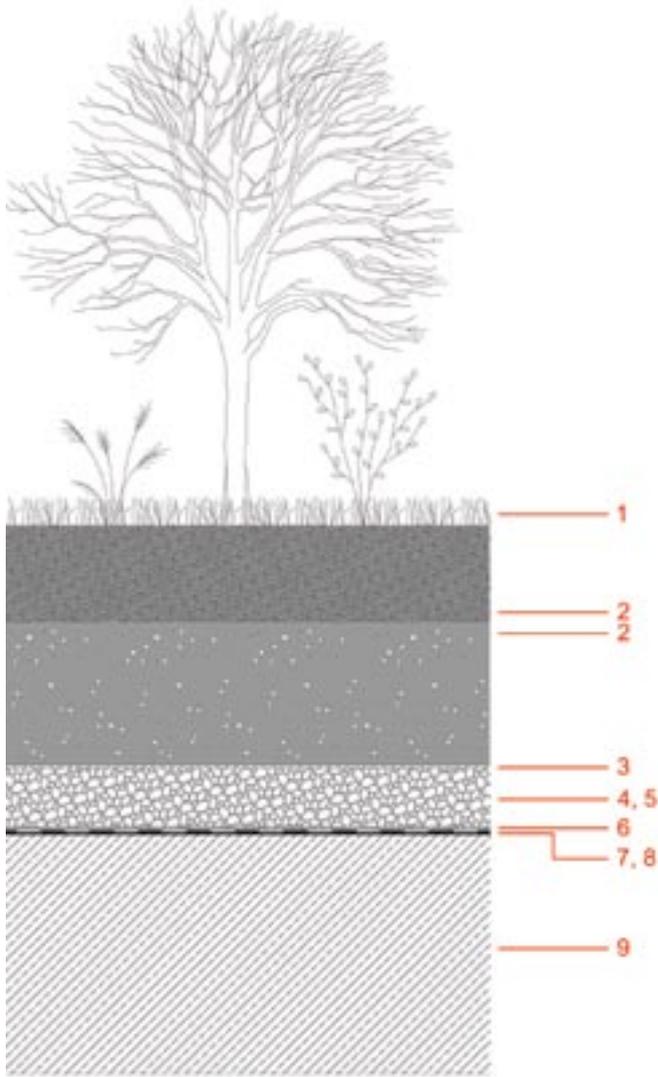


Figura III.1: Stratigrafia della copertura a verde

La stratigrafia rappresenta una copertura a verde intensivo, ma le funzioni primarie qui individuate sono le medesime per qualsiasi tipologia di inverdimento: nel caso di coperture estensive gli spessori sono ridotti e, talvolta, alcune funzioni vengono "accorpate" in un unico elemento. Ciò nonostante nella stratigrafia tutte le funzionalità primarie devono essere presenti.

Tabella III.1: Funzioni e componenti della copertura a verde

La tabella si riferisce alla sezione rappresentata nella figura III.1 ed elenca le funzioni e i componenti primari della copertura a verde.

FUNZIONE PRIMARIA	LEGENDA	SISTEMA	COMPONENTE	PARTICOLARITÀ
Inverdimento	1	Sistema a verde	Strato di vegetazione	- - -
Substrato di coltivo	2		Strato colturale	- - -
Filtraggio	3		Elemento filtrante	- - -
Accumulo idrico	4		Elemento di accumulo idrico	Funzioni frequentemente integrate in un unico elemento
Drenaggio	5		Elemento drenante	
Protezione meccanica	6	Elementi di interfaccia	Elemento di protezione meccanica	Può fungere anche da elemento di accumulo idrico
Protezione dall'azione delle radici	7		Elemento di protezione dell'azione delle radici	Funzioni frequentemente integrate in un unico elemento
Impermeabilizzazione	8	Sistema di impermeabilizzazione	Elemento di tenuta	
Funzione strutturale	9		Elemento portante	- - -

L'inverdimento

BORRACINA BIANCA - *Sedum Album*
Inverdimento estensivo



PRATO SPONTANEO - *Setaria Viridis*
Inverdimento semi-intensivo e intensivo



LENTISCO - *Pistacia Lentiscus*
Inverdimento intensivo



FUNZIONE

La funzione della vegetazione è di ricoprire la superficie dello strato colturale; quindi la vita sana e longeva delle piante che compongono lo strato di vegetazione è in sé la funzionalità richiesta a tale strato (come descritto nel paragrafo I.1 *Lo strato di vegetazione: le attività organiche come funzioni tecnologiche*). Una copertura a verde che non riesca a inverdirsi, secondo gli intenti definiti dal progetto, non può quindi essere effettivamente definita tale, ossia “a verde”, pur essendo in grado di impermeabilizzare l'ambiente interno di un edificio e di garantire determinate prestazioni termiche per la presenza dello strato colturale.

MATERIALE

La caratteristica fondamentale dello strato vegetale è che la materia di cui è costituito, le piante, è materia organica viva: quindi nel tempo essa cresce e aumenta la propria massa.

Le piante si distinguono per la specie di appartenenza e per la loro dimensione, e tutte le proprietà che le caratterizzano sono l'esito della storia evolutiva della specie a cui appartengono. La specie infatti individua una serie di caratteristiche e particolarità fra cui:

- aspetto: portamento, forma e colore delle foglie, rugosità del fusto, dimensioni delle parti;
- funzionalità, fisiologia: caducità delle foglie, velocità di crescita;
- preferenze climatiche: andamento e valori delle temperature, dell'umidità dell'aria, della piovosità;
- preferenze di esposizione: pieno sole, mezz'ombra, ombra;
- preferenze pedologiche: substrati acidi, sabbiosi, drenanti, organici ecc.

La dimensione della pianta e delle sue parti, dato importante nella valutazione del progetto, è determinata dalla specie (che prevede un andamento caratteristico della crescita) e quindi dall'età della pianta.

La progettazione dello strato vegetale di una copertura a verde deve indicare specie, collocazione e densità delle piante scelte, tenendo presente quale tipologia di copertura, estensiva o intensiva, si voglia attuare e in ragione di ciò considerare contestualmente le differenze di peso delle stratigrafie e le differenze di costi per l'installazione e per l'attività di manutenzione durante il ciclo di vita del sistema.

Una ricerca preliminare, raccomandata per la scelta della vegetazione da impiegare in copertura, riguarda le specie presenti nel contesto territoriale del progetto, poichè di norma tutte le piante che riescono a popolare una certa area dimostrano di essere in grado di autosostenersi nel contesto climatico locale. Questo approccio, pur corretto in prima battuta, non basta tuttavia ad assicurare una selezione adeguata delle specie più adatte a un impianto in copertura, dal momento che il suolo artificiale, che costituisce il sistema a verde, non presenta le stesse caratteristiche di un suolo naturale. Per questa ragione, soprattutto per quanto concerne le coperture a verde di spessore ridotto (estensive o semi-intensive), conviene orientare la scelta verso specie rustiche che dimostrino resistenza all'affaticamento idrico e alle temperature estreme calde e fredde.

Inoltre non solo il clima ma anche la posizione della falda di copertura influenzano la scelta delle piante e la loro collocazione: l'orientamento, l'inclinazione e la presenza di corpi di fabbrica nelle immediate vicinanze possono ombreggiare la vegetazione e quindi influire sulla loro più corretta disposizione.

Il dimensionamento dello strato di vegetazione è quindi direttamente dipendente dalla scelta della specie, anche se alcune delle lavorazioni agrotecniche previste (attività manutentiva ordinaria) comprendono la regolarizzazione delle dimensioni delle piante. La previsione di crescita delle piante è illustrata nella tabella III.2.

TIPO DI VEGETAZIONE	DIMENSIONI DELLA PIANTA A COMPLETO SVILUPPO
Sedum	~ 6 - 10 centimetri
Erbacee perenni	~ 20 - 25 cm (sfalciate pochi centimetri)
Grandi erbacee perenni e piccoli arbusti	~ 40 - 50 cm
Tappeti erbosi	~ 5 - 15 cm
Arbusti di piccola taglia	~ 60 cm
Arbusti di grande taglia	~ 1 - 2 metri
Alberi di III grandezza	~ 4 - 10 m
Alberi di II grandezza	~ 10 - 16 m
Alberi di I grandezza	> 16 m

PROGETTAZIONE

DIMENSIONAMENTO

Tabella III.2: Dimensioni indicative di diverse tipologie di vegetazione

La normativa italiana non fornisce alcun requisito per lo strato di vegetazione, ma raccomanda per le coperture estensive l'impiego di specie vegetali "particolarmente frugali e resistenti, con caratteristiche di resistenza agli stress termici e idrici" (UNI 11235: 29).

Per le coperture intensive invece le specie vegetali utilizzabili sono del tutto simili a quelle normalmente impiegate nei giardini tradizionali, ma, dato lo spessore ridotto del substrato di coltivo di una copertura, le piante normalmente non raggiungono uno sviluppo pari a quello che avrebbero se collocate a terra

Fonte: varie.

Il substrato di coltivo

LAPILLO VULCANICO

Densità apparente = 350 - 600 Kg/m³

Porosità = 82 - 84 %



PERLITE

Densità apparente = 40 - 150 Kg/m³

Porosità = 94 - 98 %



TORBA

Densità apparente = 47 - 290 Kg/m³

Porosità = 81 - 97 %



FUNZIONE

Il substrato di una copertura a verde deve sostenere la vita e lo sviluppo delle piante. Esso assolve tre principali funzioni:

- **ancoraggio:** il substrato ospita gli apparati radicali delle piante;
- **nutrimento:** il substrato contiene gli elementi nutritivi e l'aria necessari al nutrimento delle piante;
- **riserva idrica:** il substrato costituisce la principale riserva idrica attraverso cui le piante assorbono l'acqua.

MATERIALE

Lo strato colturale di una copertura a verde è costituito da una miscela di diversi materiali inorganici (il lapillo vulcanico, la perlite, l'argilla espansa...) e organici (la torba, la fibra di cocco, la fibra di legno).

I materiali inorganici attribuiscono al substrato capacità drenante, aerazione e leggerezza, mentre i materiali organici conferiscono fertilità.

La percentuale di materiale organico varia a seconda della tipologia di inverdimento: la normativa ne indica i valori minimi che devono essere, a seconda della densità apparente della miscela, superiori al 6% o al 12%.

Le caratteristiche da tenere in considerazione nella scelta di un substrato di coltivo sono di fatto definite dai requisiti imposti dalla normativa; fra le principali caratteristiche si citano:

1. **la densità apparente:** cioè la massa in unità di volume compresi tutti gli spazi vuoti che il materiale aggregato genera. Si distingue dalla *densità reale* che invece considera solo il volume della parte solida del materiale. La densità apparente definisce quindi il peso della miscela utilizzata e nel caso del verde pensile deve avere valori possibilmente

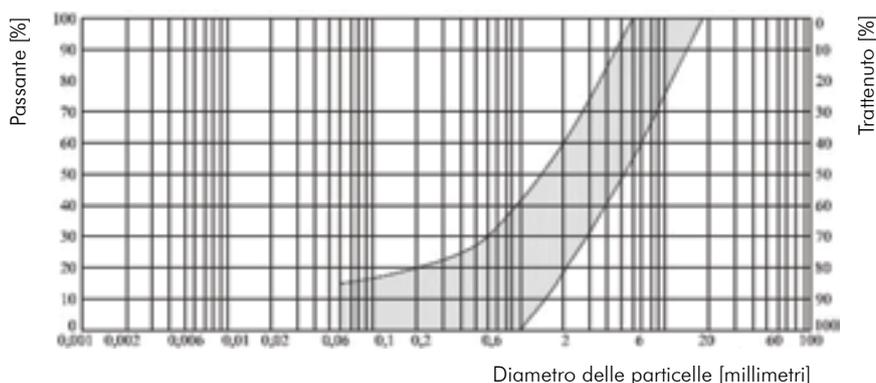
bassi, a cui corrispondono ridotti carichi permanenti. La normativa indica che la densità apparente debba essere compresa fra 350 e 1000 grammi al litro ossia, fra 350 e 1000 chilogrammi al metro cubo;

2. **la distribuzione granulometrica:** la dimensione dei grani che costituiscono il substrato è fondamentale per le applicazioni al verde pensile; in particolare devono essere evitate le granulometrie fini perché possono andare a occupare gli strati sottostanti del sistema a verde per effetto del dilavamento, compromettendo la funzionalità di drenaggio.

Come si vede nella figura III.2, la normativa fornisce i fusi granulometrici rispettivamente per gli inverdimenti estensivi e intensivi;

3. **la porosità:** cioè il rapporto fra il volume dei vuoti (dei pori) e il volume totale del materiale. Questa caratteristica, unitamente alla distribuzione granulometrica, è fondamentale nel definire la capacità di accumulo idrico del substrato.

INVERDIMENTO ESTENSIVO



INVERDIMENTO INTENSIVO

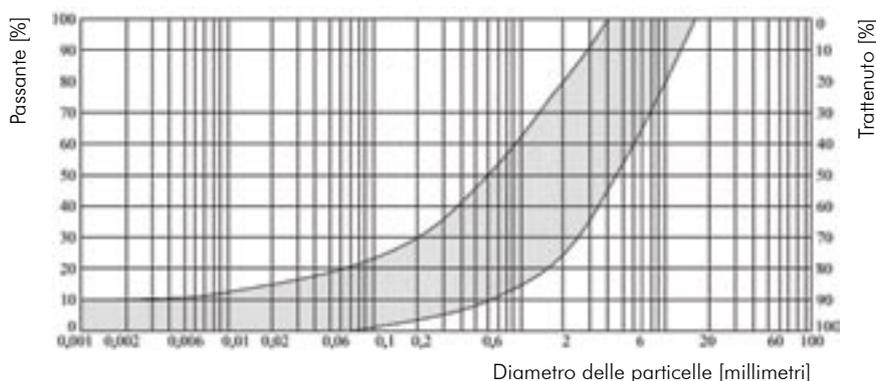


Figura III.2: Curve granulometriche dei substrati per inverdimenti estensivi e intensivi

I grafici mostrano la tessitura che i materiali inerti del substrato devono avere per le applicazioni a coperture estensive e intensive. E' necessario premettere che le prove granulometriche di un qualsiasi suolo si effettuano a mezzo di setacci caratterizzati da maglie di varie dimensioni, da più larghe a più strette, che, vibrando, fanno passare le particelle dal setaccio più largo al setaccio più stretto: le curve granulometriche si costruiscono sulla base di quanto materiale rimane nei diversi setacci.

In ascissa si trova il diametro delle particelle espresso in millimetri; in ordinata a sinistra il materiale passante, e a destra il materiale trattenuto (espresso in percentuale).

In questi casi i fusi sono caratterizzati, ciascuno, da una curva granulometrica che indica i valori minimi (curva di sinistra) e una che indica i valori massimi (curva di destra): le particelle del substrato devono essere comprese fra le due curve che delimitano l'area grigia.

Per un verde estensivo il diametro delle particelle non può essere inferiore a 0,06 millimetri e il substrato non ne può contenere più del 15%. Il fuso di un verde intensivo è diverso e ammette una percentuale massima pari al 10% di granulometrie inferiori a 0,06 millimetri.

Fonte: UNI 11235: 27-28.

ORGANICO/INORGANICO	MATERIALE	DESCRIZIONE
MATERIALI MINERALI	Lapillo	Materiale poroso originato dalle eruzioni vulcaniche esplosive contenenti elementi minerali quali il ferro, potassio, sodio, calcio. Ha una buona capacità di scambio cationico e un pH acido/neutro
	Pomice	Presenta le stesse caratteristiche del lapillo. La pomice è però una pietra geliva, quindi inadatta agli ambiente particolarmente rigidi d'inverno
	Laterizi macinati	Buona capacità di ritenzione idrica, densità reale elevata
	Perlite	Ottenuta dal riscaldamento dell'alluminio silicato; materiale molto leggero, presenta bassa capacità di ritenzione idrica ma un'elevata capacità drenante
	Argilla espansa	Prodotta dal riscaldamento dell'argilla, buone capacità drenanti, pH neutro/basico
	Sabbia	Bassa ritenzione idrica e basso contenuto d'aria, alta densità reale. Si miscela per ridurre la porosità
	Vermiculite	Silicato di alluminio, ferro e manganese, si ottiene attraverso un rapido riscaldamento della roccia che espande così il suo volume. Buona capacità drenante, ma si disgrega nel tempo
	Zeolite	Pietra di origine vulcanica, ha elevata capacità di scambio cationico, pH neutro e buona capacità drenante
MATERIALI ORGANICI	Torba	Presenta caratteristiche diverse a seconda della torbiera. Ottimo materiale, ricco di nutrienti, pH acido, ottima capacità di ritenzione idrica
	Fibra di cocco	Materiale di scarto proveniente dalla lavorazione della noce, contiene molti elementi minerali solubili come il potassio e il sodio. Capacità di ritenzione idrica eccellente
	Fibra di legno	Ottenuto dalla sfibratura ed essiccazione di materiali di scarto dell'industria del legno. Elevata porosità, elevato contenuto d'aria, basso volume d'acqua disponibile
	Ammendante composto	Conosciuto come compost, le caratteristiche dipendono dalle miscele utilizzate in partenza. Presenta salinità medio-alta, contenuto di materia organica più basso che nella torba. Buona capacità di ritenzione idrica

PROGETTAZIONE

Tabella III.3: Materiali organici e inorganici impiegati per la preparazione dei substrati

Un substrato per coperture a verde è costituito da una miscela di materiali minerali e organici che vengono specificatamente mescolati in relazione alle specie vegetali che si vogliono piantare in copertura. In generale le specie più frugali prediligono substrati minerali e ben drenanti, mentre le piante superiori necessitano di substrati organici, più fertili.

La scelta della miscela avviene considerando le specie vegetali che si vogliono installare sulla copertura e la tecnica irrigua scelta. In linea di massima un substrato destinato a inverdimenti estensivi presenta una parte organica del 30% circa, mentre un substrato destinato a inverdimenti intensivi presenta una parte organica, pari al 40-50%.

Ciò che un progettista deve tenere in considerazione rispetto alla scelta di un substrato è che esso non può assolutamente essere un suolo generico, come ad esempio la terra di scavo, in quanto le sue proprietà chimico-fisiche difficilmente rientrerebbero all'interno dei valori prefissati dalla normativa: un suolo naturale comprende normalmente granulometrie finissime (che compromettono le funzioni di drenaggio), densità troppo elevate (che ne incrementano il peso), porosità insufficiente (che non garantisce adeguata aerazione alle radici).

Un suolo artificiale: il ruolo dell'acqua nella progettazione della copertura a verde
Implicazioni tecnologiche e verifica sperimentale

Per quanto riguarda lo spessore del substrato in relazione al tipo di vegetazione, i valori di riferimento vengono forniti dalla normativa. Come si vede nella tabella III.4 per le specie vegetali appartenenti al genere *Sedum* lo spessore minimo di riferimento è pari a 8 centimetri. Considerando piante via via più alte lo spessore aumenta di conseguenza. È importante tenere presente che gli spessori indicati nella normativa corrispondono ai valori minimi: ciò significa che tali valori, se necessario, possano (o debbano) essere incrementati.

Tabella III.4: Spessori minimi dello strato colturale secondo la normativa UNI 11235

Fonte: UNI 11235: 15.

TIPO DI VEGETAZIONE	SPESSORE DELLO STRATO COLTURALE [cm]							
	8	10	15	20	30	50	80	100
Sedum								
Erbacee perenni								
Grandi erbacee perenni e piccoli arbusti								
Tappeti erbosi								
Arbusti di piccola taglia								
Arbusti di grande taglia								
Alberi di III grandezza								
Alberi di II grandezza								
Alberi di I grandezza								

Il substrato viene trasportato in cantiere già miscelato, pronto per essere steso sulla copertura, normalmente contenuto in grandi sacchi di volume pari a 1 metro cubo. Nel momento della posa il materiale viene versato lentamente sopra lo strato filtrante (quindi sopra l'elemento di accumulo idrico e di drenaggio) e successivamente distribuito uniformemente sulla superficie di copertura. Successivamente viene costipato per ottenere un volume compatto di spessore costante, definito dal progetto in relazione alla tipologia di inverdimento.

Oltre alla densità apparente, alla distribuzione granulometrica e alla porosità, vi sono svariate altre caratteristiche che concorrono a garantire la corretta funzionalità dello strato colturale. La tabella III.5 nella pagina seguente elenca tutti i requisiti previsti, con i rispettivi riferimenti normativi.

APPLICAZIONE

REQUISITI

REQUISITI	NORME DI RIFERIMENTO
Densità apparente	UNI EN 13041
Distribuzione granulometrica secondo i fusi	Grafici della figura III.2
Grado di riduzione del volume a compressione	DIN 18035
Volume commerciale	UNI EN 12580
Permeabilità Coperture estensive >0,3 millimetri/minuto Coperture intensive >0,6 millimetri/minuto	DIN 18035
Porosità totale Coperture estensive >48% Coperture intensive >58%	UNI EN 13041
Capacità di ritenzione idrica	
Volume d'aria a 10 centimetri di colonna d'acqua $\geq 18\%$	
Volume d'acqua a 10 centimetri di colonna d'acqua Coperture estensive >40% Coperture intensive >30%	
Conducibilità elettrica <50mS/m	UNI EN 13038
Contenuto di macroelementi	UNI EN 13652
Valori di pH Piante acidofile $4 \leq \text{pH} \leq 5,5$ Coperture estensive e piante non acidofile $5,5 \leq \text{pH} \leq 8,0$ Coperture intensive e piante non acidofile $6,5 \leq \text{pH} \leq 8,0$	UNI EN 13037
Fitotossicità	Regione Lombardia, Deliberazione Giunta Regionale 16 aprile 2003 n°7/12764 "Linee guida relative alla costruzione e all'esercizio degli impianti di produzione dei compost – Revoca della d.g.r. 16 luglio 1999 n°44263 – Allegato B – Test di Fitotossicità"
Sostanza organica Per coperture estensive: Substrati con densità $\leq 0,8\text{g/cm}^3$: $\leq 8\%$ Substrati con densità $> 0,8\text{g/cm}^3$: $\leq 6\%$ Per coperture intensive: Substrati con densità $\leq 0,8\text{g/cm}^3$: $\leq 12\%$ Substrati con densità $> 0,8\text{g/cm}^3$: $\leq 6\%$	UNI EN 13039
Capacità di scambio cationico Coperture estensive $> 8\text{meq}/100\text{g}$ Coperture intensive $> 12\text{meq}/100\text{g}$	D.M. 13 settembre 1999 – Ministero delle politiche agricole e forestali "Approvazione metodo ufficiale analisi chimica dei suoli"

Tabella III.5: Requisiti caratteristici dello strato colturale secondo la normativa UNI 11235

Fonte: UNI 11235: 28-29.



Figura III.3: Deposito di substrati

Un substrato di coltivo per coperture a verde è normalmente una miscela di vari materiali che comprendono una parte più voluminosa di inorganici (come il lapillo, la pietra pomice, la perlite, i laterizi macinati...) e una parte meno consistente di materiali organici (torba, compost, fibra di cocco).



Figura III.4: Macchina miscelatrice di materiali granulari

I vari materiali inerti e organici che compongono il substrato sono premiscelati in cava.



Figura III.5: Applicazione del substrato

Il substrato di coltivo viene trasportato in cantiere contenuto in sacchi di 1 metro cubo che vengono movimentati fino alla quota della copertura. Il materiale granulare viene poi steso, livellato e costipato accuratamente su tutta la superficie di copertura.

Fonte: Optima Giardini Pensili

Il filtraggio

LAPILLO VULCANICO



GEOTESSUTO IN POLIPROPILENE



BOBINE DI GEOTESSUTO
IN POLIPROPILENE



FUNZIONE

Il filtraggio è quella funzione che impedisce il passaggio di particelle sottili, contenute nello strato colturale, verso gli elementi di accumulo idrico e di drenaggio. Questa funzione è molto importante poichè blocca il dilavamento delle particelle che andrebbero a occupare gli spazi vuoti dell'elemento sottostante preposto a garantire il drenaggio, compromettendone la funzionalità.

MATERIALE

I materiali normalmente utilizzati sono:

1. gli aggregati granulari di varia natura: lapillo, argilla espansa, perlite espansa, ecc.;
2. i geotessuti.

Per il buon funzionamento, l'elemento filtrante deve avere una permeabilità all'acqua di almeno dieci volte superiore rispetto a quella dello strato colturale. Per questo lo strato filtrante in aggregati granulari, che è costituito dagli stessi materiali dei componenti inorganici di un substrato, ha una grammatura molto consistente.

POSA

Quando costituito da materiali inerti, l'elemento filtrante viene semplicemente steso, al pari del substrato; diversamente, nel caso del geotessuto esso viene collocato sopra agli elementi di accumulo e drenaggio avendo particolare cura di svoltare il tessuto lungo i bordi di eventuali elementi verticali, in modo che il substrato non possa trovare vie di accesso verso il basso. La maggior parte dei produttori utilizza materiale in geotessuto.

I requisiti riportati dalla normativa sono differenti a seconda del materiale scelto: per quanto riguarda gli aggregati granulari i requisiti fanno riferimento alla granulometria, mentre per i geosintetici a una serie di prestazioni meccaniche, chimiche e alle dimensioni delle particelle che sono in grado di trattenere.

REQUISITI

Tabella III.6: Requisiti caratteristici dell'elemento filtrante secondo la normativa UNI 11235

Fonte: UNI 11235: 26.

MATERIALI	REQUISITI	NORME DI RIFERIMENTO
AGGREGATI GRANULARI	Curva granulometrica AB 0/8 – AB 0/16 millimetri	Fuso secondo DIN 1045-1
	Regola dei filtri STDS 15/STV85 \leq 5 STDS 15/STV15 \geq 5 STDS 50/STV50 \leq 25 STD 15/STDS85 \leq 5 STD 15/STDS15 \geq 5 STD 50/STDS50 \leq 25 STDS = strato dinamico D-15 della frazione granulometrica al 15% della massa STV = strato vegetale D-85 della frazione granulometrica all'85% in massa STD = strato drenante D-50 della frazione granulometrica al 50% in massa	
GEOSINTETICI	Resistenza al punzonamento statico $>1,1$ kN	UNI EN ISO 12236
	Resistenza alla trazione longitudinale $>7,0$ kN/m	UNI EN ISO 10319
	Resistenza alla trazione trasversale $>7,0$ kN/m	
	Deformazione al carico di esercizio longitudinale $<35\%$	
	Deformazione al carico di esercizio trasversale $<35\%$	
	Apertura caratteristica dei pori $\varnothing 90$ 0,10 mm – 0,20 mm	UNI EN ISO 12956
	Resistenza all'ossidazione $<80\%$	UNI EN ISO 13438
	Resistenza agli agenti microbiologici $>80\%$	UNI EN ISO 12225

L'accumulo idrico e il drenaggio

LAPILLO VULCANICO



PANNELLO IN POLIPROPILENE



PANNELLO IN POLIESTERE



FUNZIONE DI ACCUMULO IDRICO

Un sistema a verde deve avere una certa capacità di accumulare acqua al fine di garantire l'approvvigionamento idrico per la vegetazione nel medio e lungo termine. Tale funzione è svolta innanzitutto e prevalentemente dal substrato di coltivo stesso, infatti uno dei suoi requisiti è proprio la porosità, a cui corrisponde una certa capacità di ritenzione idrica. Per garantire un'inerzia idrica maggiore, però, la normativa indica un elemento primario aggiuntivo specificatamente dedicato a raccogliere acqua: questo elemento si trova sotto lo strato colturale e sotto l'elemento filtrante. Qui l'acqua immagazzinata si rende disponibile alle piante, per capillarità o per diffusione man mano che l'acqua contenuta nel substrato si esaurisce a seguito dell'evaporazione o dell'assorbimento da parte delle piante. L'elemento di accumulo idrico è nella quasi totalità dei casi integrato all'elemento che svolge la funzione di drenaggio.

FUNZIONE DI DRENAGGIO

Il drenaggio è una funzione che consiste nello smaltimento dell'acqua in eccesso dagli strati sub-superficiali del sistema a verde. Tale funzione, di fatto antitetica a quella dell'accumulo idrico, è necessaria per evitare sia il deterioramento degli apparati radicali delle piante, che costantemente a contatto con un substrato imbibito d'acqua andrebbero incontro a marcescenza, sia per evitare la formazione di un battente idraulico persistente al di sopra dell'elemento di tenuta. Distanziando lo strato colturale dall'elemento di tenuta della copertura, l'elemento di drenaggio crea uno spazio vuoto, un volume d'aria libero che consente all'acqua in eccesso, meteorica o d'irrigazione, di scorrere velocemente lungo il piano di falda e verso i canali di

gronda. Questo elemento (o strato, a seconda del materiale scelto), facilitando l'allontanamento dell'acqua al di sopra dell'impermeabilizzazione, evita da un lato che il livello dell'acqua contenuta nei vari strati del sistema a verde aumenti eccessivamente durante eventi meteorici prolungati e intensi, dall'altro che essa sia costantemente a contatto con l'impermeabilizzazione.

I materiali che si impiegano per l'accumulo dell'acqua sono di due tipi:

1. aggregati granulari di varia natura: lapillo, argilla espansa, perlite espansa;
2. pannelli preformati di vari materiali: polietilene, polistirene, ecc.

Gli aggregati di fatto sono gli stessi che si usano normalmente per la miscelazione delle parti inorganiche del substrato di coltivo: essendo porosi consentono da un lato di trattenere l'acqua all'interno delle loro cavità, dall'altro di garantire uno spazio vuoto per il drenaggio. In questo caso la capacità di drenare o accumulare l'acqua dipende dalla porosità e dalla granulometria del materiale.

I materiali preformati invece sono pannelli di materiale plastico che presentano delle cavità atte a contenere acqua. Tali elementi, oltre ad avere capacità di accumulo, devono garantire l'aerazione allo strato colturale: ciò avviene grazie a un'opportuna sagomatura che consente la presenza di una lama d'aria fra il pelo libero delle cavità e l'elemento filtrante che è a diretto contatto con il substrato.

I pannelli preformati si applicano frequentemente per le superfici di copertura molto estese, dove sarebbe altrimenti complicato stendere un primo strato inerte drenante e poi, al di sopra di questo, un secondo strato inerte per la funzione colturale. A parità di superficie, inoltre, i pannelli preformati hanno un costo inferiore rispetto ai materiali granulari. Per contro i materiali granulari contengono sostanze nutritive per le piante e quindi rappresentano una sorta di "estensione" dello strato colturale della copertura (pur non contenendo sostanza organica) favorevole al radicamento e allo sviluppo della vegetazione.

La quantità d'acqua che dev'essere accumulata in una copertura a verde non ha un limite superiore o inferiore, ma dipende strettamente dalla zona climatica di inserimento e dal tipo di vegetazione che si voglia applicare.

Normalmente le coperture estensive, che sono caratterizzate da spessori di substrato di circa 10 centimetri, presentano un elemento di accumulo idrico e di drenaggio di circa 4-5 centimetri. Per stratigrafie semi-intensive o intensive questo spessore aumenta, ma non proporzionalmente: in particolare negli inverdimenti intensivi la funzione di accumulo idrico viene ampiamente assolta dallo strato colturale che, di ingente spessore, è capace di trattenere grandi quantità d'acqua disponibili per la vegetazione. In questi casi quindi l'elemento drenante è comunque presente, ma normalmente non assolve la funzione integrata di accumulo.

Le attuali tecnologie si distinguono da quelle applicate in passato proprio per aver incluso queste due funzioni primarie nella stratigrafia.

Qualsiasi materiale si scelga per questa funzione, il drenaggio dev'essere posto in tutta la sezione corrente della falda: questo significa che lo strato drenante ha una superficie pari a quella dell'intera copertura.

Inoltre è opportuno inserire materiali drenanti aggiuntivi, normalmente ghiaia, dove possano avere luogo carichi idrici maggiori, come ad esempio lungo i bordi perimetrali della copertura o attorno ad elementi emergenti dal piano di falda come infissi, camini o elementi di arredo.

Il grafico della figura III.6 definisce lo spessore dell'elemento (strato in questo caso) di accumulo idrico e di drenaggio nel caso in cui sia impiegato materiale granulare. Lo spessore è determinato dalle curve empiriche rappresentate.

Figura III.6: Diagramma pendenza copertura/lunghezza del drenaggio

Il grafico illustra le curve attraverso le quali viene stabilito lo spessore dello strato drenante in materiale granulare: incrociando il valore della pendenza della falda (indicata nelle ascisse) e della lunghezza della falda (indicata nelle ordinate) si incrocia una delle tre curve che indica uno di tre diversi spessori: A=10 centimetri, B=20 centimetri e C=30 centimetri.

Supponendo di avere un piano di falda di pendenza pari a 1,5% e di lunghezza pari a 12 metri si ottiene un valore di spessore del drenaggio di circa 20 centimetri, in quanto i valori di ingresso incrociano la curva B.

Fonte: UNI 11235: 12.

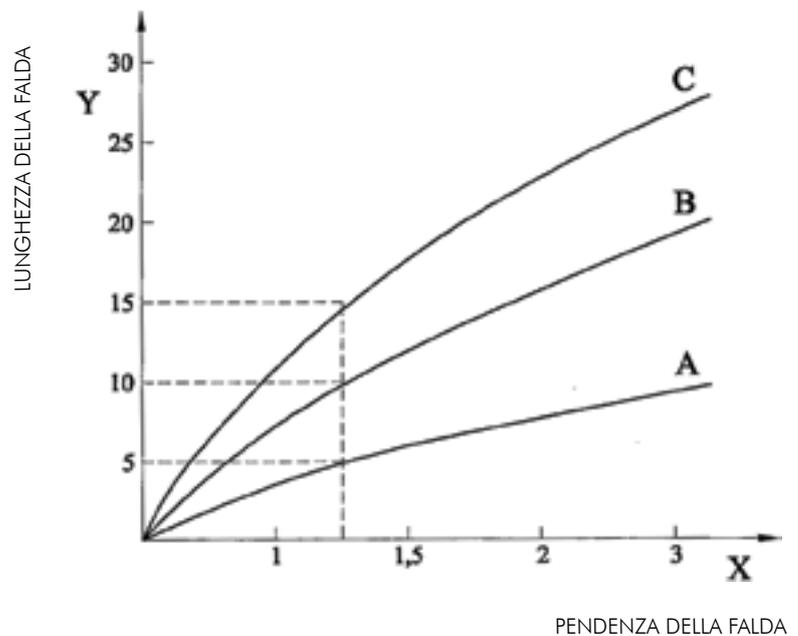


Tabella III.7: Granulometria dell'elemento drenante in relazione al suo spessore

La granulometria del materiale disciolto, che assolve alla funzione drenante, dipende dallo spessore dello strato stesso. La tabella sintetizza i valori di riferimento forniti dalla normativa UNI 11235.

Fonte: UNI 11235:12.

SPESSORE DEL MATERIALE DRENANTE - S [cm]	GRANULOMETRIA - G [mm]
$S < 10$	$2/8 < G < 8/12$
$10 < S < 20$	$4/8 < G < 8/16$
$S > 20$	$4/8 < G < 12/20$
La frazione granulometrica $\varnothing < 0,063\text{mm}$ non deve superare il 7% in massa	

REQUISITI

Nell'impiego di materiali granulari i requisiti dello strato drenante sono determinati dalla granulometria stessa. Come illustrato nella tabella III.7 mano a mano che lo spessore del materiale drenante aumenta, deve crescere anche la dimensione degli inerti.

Nel caso dei pannelli preformati, invece, è necessario che, oltre ai requisiti indicati dalla normativa e riportati nella tabella III.8, essi risultino indeformabili sotto carico al fine di non ridurre la capacità drenante.

MATERIALI	REQUISITI	NORME DI RIFERIMENTO
AGGREGATI GRANULARI	Permeabilità	DIN 18035
	Resistenza al gelo	UNI EN 1367-1
	Resistenza a compressione dello strato aggregato	UNI EN 13055-1
	Valore di pH	UNI EN 13037 Estensivi pH 6,5-8,0 Intensivi pH 5,5-8,0
	Conducibilità elettrica	UNI EN 13038 Estensivi <50 mS/m Intensivi <40 mS/m
Pannelli preformati	Capacità drenante sotto i carichi di esercizio	UNI EN ISO 12958 Campo di applicazione UNI EN 13252
	Comportamento sotto carico nel tempo	UNI EN 1897
Materiali geosintetici (definiti da normativa UNI EN ISO 10318)	Resistenza a trazione longitudinale	UNI EN ISO 10319
	Deformazioni a 20kN	UNI EN ISO 9863
	Capacità drenante longitudinale a 20kPa ($i=1$) $q_{20/1}$	UNI EN ISO 12958
	Capacità drenante longitudinale a 20kPa ($i=0,01$) $q_{20/0,01}$	
	$i=$ gradiente idraulico (pendenza pelo libero dell'acqua=pendenza sistema drenante) $i=1$ geosintetico in opera in verticale $i=0,01$ geosintetico in opera pendenza 1%	
	Resistenza agli agenti microbiologici	UNI EN 12225

Tabella III.8: Requisiti caratteristici dell'elemento drenante secondo la normativa UNI 11235

Fonte: UNI 11235: 24-25.



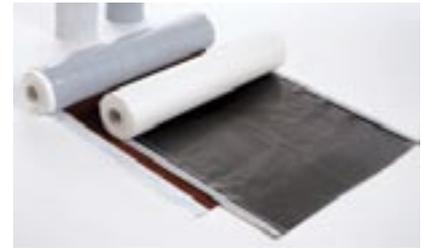
Figura III.7: Combinazione di due elementi di accumulo idrico

Per gli inverdimenti intensivi è possibile associare ai pannelli preformati i materiali inerti disciolti. Questa soluzione garantisce sia un sicuro drenaggio (grazie alla presenza del pannello) sia un eccellente accumulo d'acqua (grazie all'impiego dei materiali disciolti). La stratigrafia concepita come unione di due componenti diversi per le funzioni di accumulo e di drenaggio è molto più performante rispetto alla condizione di impiego di uno solo dei due componenti.

Fonte: ZinCo.

L'impermeabilizzazione e la protezione dalle radici

MEMBRANA IN BITUME-POLIMERO



MEMBRANA SINTETICA
(IN PVC O A BASE DI POLIOLEFINE)



POSA DI UNA MEMBRANA SINTETICA



FUNZIONE DI IMPERMEABILIZZAZIONE

FUNZIONE DI PROTEZIONE DALL'AZIONE DELLE RADICI

MATERIALE

L'impermeabilizzazione è la funzione fondamentale di ogni copertura e consiste nell'impedire la trasmigrazione dell'acqua dall'ambiente esterno all'ambiente interno.

La protezione dalle radici invece è una funzione caratteristica della copertura a verde, necessaria perchè le radici di quasi tutte le specie vegetali hanno una grande capacità di penetrazione dei materiali in generale e delle membrane bituminose in particolare: per questa ragione è necessario proteggere l'elemento di tenuta dalla loro azione.

Questa funzione, quando si impiegano membrane sintetiche in polivinilcloruro o in poliolefine, è integrata a quella dell'impermeabilizzazione, mentre non lo è quando si impiegano membrane in bitume-polimero.

Nel caso delle coperture continue l'elemento di tenuta è costituito dalle membrane impermeabilizzanti, la cui caratteristica funzionale fondamentale è la capacità di impermeabilizzare in modo continuo indipendentemente dalla pendenza e dalla geometria della falda.

La protezione dall'azione delle radici è svolta dalle membrane che superino la prova di resistenza all'azione perforante delle radici indicata dalla normativa.

I materiali che costituiscono l'elemento di tenuta e l'elemento di protezione dall'azione delle radici sono le membrane in bitume-polimero e le membrane sintetiche (in polivinilcloruro o a base di poliolefine).

Le membrane in bitume polimero (MBP) sono composte di una massa impermeabilizzante, detta *compound*, e di un'armatura. I materiali con cui

si realizza il *compound* sono di due tipi: il polipropilene atattico (APP) e lo stirene-butadiene-stirene (SBS). Questi due materiali presentano caratteristiche differenti: dal polipropilene atattico si ottengono membrane così dette plastomeriche, il cui comportamento è paragonabile a quello di un materiale plastico. Tali membrane presentano stabilità alle temperature elevate, flessibilità a freddo e leggere deformazioni a trazione.

Dal butadiene-stirene-butadiene, invece, si ottengono membrane elastomeriche, il cui comportamento è paragonabile a quello di un materiale elastico, per cui capaci di elevate deformazioni a trazione e flessibilità a freddo; per contro queste membrane si danneggiano se esposte ai raggi ultravioletti e sottoposte alle alte temperature.

Alcune delle membrane in bitume-polimero presenti nel mercato derivano dall'unione di queste due tipologie, per cui si ha un foglio sovrastante in APP, che resiste bene al calore, e un foglio sottostante in SBS, che resiste alle lacerazioni.

Per migliorare le proprietà meccaniche di una membrana in bitume-polimero si inserisce al suo interno un'armatura che è normalmente composta di poliestere stabilizzato con fibra di vetro.

Le membrane sintetiche sono di due tipi: in polivinilcloruro (PVC) e a base di poliolefine (TPO o FPA). Esse derivano dalla raffinazione delle benzine.

Le membrane sintetiche, a differenza delle membrane in bitume-polimero, possono essere armate o meno.

Tabella III.9: Caratteristiche tecnologiche dei materiali per membrane impermeabilizzanti

Le membrane impermeabilizzanti sono costituite da due differenti tipologie di materiali: il bitume (polipropilene atattico e stirene-butadiene-stirene) e i materiali sintetici (polivinilcloruro e poliolefine). Ciascuna di queste due famiglie di materiali dà origine a tipi di membrane dalle proprietà tecnologiche diverse: nelle coperture a verde le prime vengono stese in doppio strato (uno funge da elemento di tenuta e l'altro da elemento di protezione dall'azione delle radici) mentre le seconde vengono stese in strato singolo (che assume entrambe le funzioni di impermeabilizzazione e protezione dall'azione delle radici).

		CARATTERISTICHE DEL COMPOUND	ARMATURA	FINITURA SUPERFICIALE	POSA
MEMBRANE IN BITUME-POLIMERO	Polipropilene Atattico - APP	Stabilità alle temperature elevate Flessibilità a freddo Basse deformazioni a trazione	In tessuto non tessuto da filo di poliestere In filo di vetro stabilizzate, cioè miste in filo di poliestere e filo di vetro	Inferiore: film termodistruttibile (in fase di posa) per evitare l'incollaggio durante lo stoccaggio Superiore: pellicole di protezione (in scaglie di ardesia o alluminio) dai raggi del sole	In adesione In semi-indipendenza In indipendenza Con fissaggio meccanico
	Stire-Butadiene-Stirene SBS	Elevate deformazioni a trazione Flessibilità a freddo Non resistenti ai raggi Ultra-Violetti Non resistenti alle temperature elevate			
MEMBRANE SINTETICHE	Polivinilcloruro PVC		Non necessaria, ma frequente	Assenti	In indipendenza Con fissaggio meccanico
	Poliolefine TPO - FPA		Non necessaria e non frequente	Assenti	

Nelle coperture a verde le membrane in bitume polimero si posano in doppio strato, mentre le membrane sintetiche in un unico strato. La scelta dell'elemento di tenuta è legata fundamentalmente allo strato sul quale tale elemento vada posato: su massetti di calcestruzzo si posano normalmente le membrane in bitume-polimero (in doppio strato) secondo le modalità più tradizionali, invece al di sopra di impalcati legnei vengono applicate membrane sintetiche in polivinilcloruro o a base di poliolefine perchè la loro posa può avvenire in completa indipendenza, evitando così la sfiammatura.

Pur essendo la progettazione dell'elemento di tenuta di una copertura a verde del tutto simile a quello delle tradizionali coperture continue, la normativa pone in evidenza alcune specificità:

1. i risvolti verticali della membrana devono superare di 15 centimetri la quota dello strato colturale;
2. in ambienti dove le precipitazioni nevose siano abbondanti tale misura dev'essere opportunamente incrementata;
3. nei casi in cui non sia possibile risvoltare la membrana su un supporto verticale è necessario predisporre elementi di drenaggio addizionali;
4. i risvolti verticali devono essere opportunamente protetti.

La posa dell'elemento di tenuta ha un'importanza fondamentale ai fini del corretto funzionamento della copertura.

Le membrane in bitume-polimero si posano in quattro modi differenti:

- in completa adesione: modalità che in caso di guasto, evita il movimento dell'acqua in zone che non siano immediate al guasto stesso;
- in semi-indipendenza: modalità che vincola la membrana;
- in indipendenza totale: modalità che svincola la membrana dal supporto e da eventuali movimenti dello stesso;
- con fissaggio meccanico: la membrana è vincolata per punti o per linee, quindi risulta limitatamente vincolata al supporto.

Esistono inoltre membrane autoadesive che consentono una posa in totale aderenza senza fiamma, applicabili quindi su elementi di supporto in polistirene o poliuretano.

Le membrane sintetiche invece si posano:

- in indipendenza totale;
- con fissaggio meccanico.

La precisione della posa dell'elemento di tenuta è fondamentale per evitare danni derivati dalle infiltrazioni dell'acqua. L'elemento di protezione dall'azione delle radici è predisposto proprio per garantire un'ulteriore sicurezza rispetto alla fessurazione dello strato di impermeabilizzazione.

I requisiti richiesti alle membrane impermeabilizzanti, così come agli elementi di protezione dall'azione delle radici, sono molteplici e fundamentalmente identici a quelli degli elementi di tenuta delle coperture continue. L'elemento di tenuta di una copertura a verde deve essere resistente anche agli attacchi biologici, in quanto evidentemente esposto ai micro-organismi che proliferano negli strati umidi del sistema.

MATERIALI	REQUISITI	NORME DI RIFERIMENTO
MEMBRANE IN BITUME-POLIMERO IN POLIVINILCLORURO A BASE DI POLIOLEFINE	Stabilità dimensionale	UNI EN 1107-1; UNI EN 1107-2
	Resistenza al carico statico	UNI EN 12730
	Determinazione della piegabilità alle basse temperature	UNI EN 495-5; EN 1109
	Tenuta dell'acqua	UNI EN 1928
	Resistenza alla penetrazione delle radici	UNI EN 13948; UNI EN 8202-24
	Invecchiamento artificiale tramite esposizione a lungo termine ad elevate temperature	UNI EN 1296
	Resistenza ai micro-organismi	UNI EN ISO 846



Figure III.8 e III.9: Elementi metallici di ancoraggio

Tutti gli elementi che perforano l'elemento di tenuta, per andare a fissarsi alla struttura portante o all'impalcato della copertura, devono essere protetti da fazzoletti di membrana opportunamente sagomati e sigillati all'elemento di tenuta sottostante.

Tabella III.10: Requisiti delle membrane impermeabilizzanti e norme di riferimento

Fonte: UNI 11235: 22.



La protezione meccanica

GEOTESSILE IN POLIESTERE



PANNELLI IN POLISTIRENE



SOLETTA IN CALCESTRUZZO



FUNZIONE

L'elemento di protezione meccanica ha la funzione di proteggere la membrana impermeabilizzante da tutti i carichi statici e dinamici sovrastanti, sia durante la cantierizzazione della copertura, in cui il deterioramento meccanico può essere causato da urti, uso improprio di attrezzature oppure da opere provvisorie, sia durante la vita utile della copertura. Per queste ragioni il posizionamento dell'elemento di protezione meccanica deve avvenire immediatamente dopo la posa dell'elemento di tenuta.

MATERIALE

I materiali che vengono normalmente utilizzati per l'elemento di protezione meccanica sono tre:

1. geocomposti e geotessili;
2. polistirene;
3. calcestruzzo.

PROGETTAZIONE

Con maggiore frequenza vengono impiegati materiali geocomposti e geotessili, che vengono stesi immediatamente sopra l'elemento di tenuta e l'elemento di protezione dall'azione delle radici.

Il polistirene, oltre a fungere da protezione meccanica, conferisce una certa capacità di isolamento termico; i pannelli possono inoltre essere conformati per l'accumulo idrico, assolvendo così tre funzioni nello stesso tempo: la protezione meccanica, il drenaggio e l'accumulo idrico.

Il calcestruzzo, soluzione impiegata normalmente in passato nella realizzazione di giardini pensili, non è più utilizzato frequentemente, poiché comporta un elevato carico e, in caso di guasto alla membrana impermeabilizzante, ne impedisce la riparazione a meno della sua demolizione totale. Il

calcestruzzo come elemento di protezione meccanica viene ancora impiegate nella costruzione di inverdimenti di elevato spessore.

I geotessili o geocompositi vengono distribuiti dai produttori in grandi bobine che vengono semplicemente srotolate e posate sopra la membrana impermeabilizzante, prestando attenzione a far combaciare perfettamente i lembi (le bobine sono larghe da 1 a 2 metri) fra un pezzo e quello affiancato e non risvoltando il materiale in corrispondenza di elementi verticali.

I pannelli di polistirene vengono semplicemente appoggiati, mentre il calcestruzzo viene gettato per uno spessore di 10 centimetri, non direttamente sulla membrana impermeabilizzante ma su uno strato di separazione precedentemente steso sopra la membrana.

COSTRUZIONE

MATERIALI	REQUISITI	NORME DI RIFERIMENTO
GEOCOMPOSITI E GEOTESSILI	Resistenza all'azione dei carichi statici e dinamici	---
CALCESTRUZZO		
POLISTIRENE		
	Spessore minimo di 3 centimetri, resistenza a compressione > 150kPa, al 10% di deformazione massimo	UNI EN 826



Tabella III.11: Requisiti degli elementi di protezione meccanica

I componenti che costituiscono l'elemento di protezione meccanica appartengono a tre tipologie. La prima e più diffusa è costituita da materassini di geotessuti. La seconda è invece costituita dai più tradizionali massetti in calcestruzzo (che al giorno d'oggi non viene quasi mai utilizzato, poichè incrementa significativamente il carico permanente della copertura). Infine la terza tipologia è rappresentata dai pannelli di polistirene che, oltre a svolgere la funzione di protezione meccanica, fungono anche da elementi di isolamento termico (se di polistirene a celle chiuse, cioè incapace di assorbire acqua).

Fonte: UNI 11235: 24.

Figura III.10: Materiali alternativi

Molte aziende stanno testando nuovi materiali per ottenere capacità di accumulo idrico anche da elementi della stratigrafia preposti ad altre funzioni. In questo caso una stuoia in tessuto polimerico di spessore e densità consistenti è in grado sia di proteggere meccanicamente l'elemento di tenuta, sia di assorbire elevati volumi d'acqua.

La funzione strutturale

SOLAIO IN LATERO-CEMENTO



SOLAIO IN LEGNO E METALLO



SOLAIO IN LEGNO



FUNZIONE

L'elemento portante ha la funzione di sopportare i carichi permanenti e i sovraccarichi della copertura previsti dal progetto.

Gli strati funzionali che costituiscono il sistema a verde (il substrato di coltivo, gli elementi di accumulo idrico e le piante stesse), incrementando in modo significativo il peso proprio della copertura, influiscono sul dimensionamento della struttura portante. Fra tutte le tipologie di copertura, il tetto verde è una delle più pesanti e questa caratteristica comporta delle ricadute significative non solo sulla dimensione delle strutture resistenti, ma anche sulla scelta stessa dei materiali e delle tipologie strutturali che vanno a costituire gli elementi portanti. Infatti i sistemi invernati, in particolare quelli intensivi, vengono applicati preferenzialmente su strutture in calcestruzzo armato: ciò accade in primo luogo per la resistenza del materiale alle sollecitazioni ai carichi in rapporto al suo spessore, e in secondo luogo per la caratteristica di indeformabilità dei solai in calcestruzzo rispetto ad altri materiali, importantissima per coperture continue, come nel caso delle coperture a verde.

Sebbene la tipologia strutturale del calcestruzzo armato sia preferibile in quanto indeformabile e capace di supportare ogni tipo di membrana impermeabilizzante, i sistemi a verde possono essere applicati anche su coperture costituite da un elemento portante in legno o in metallo opportunamente dimensionati. Tali soluzioni vengono peraltro adottate frequentemente nelle coperture inclinate o curve.

Per il dimensionamento delle strutture l'analisi dei carichi è un passaggio fondamentale non solo perché se ne determinano le dimensioni, ma anche perché eventuali incrementi determinati dal peso del sistema a verde possono influenzare la scelta di uno piuttosto che un altro sistema strutturale. Come descritto nel paragrafo II.5 *L'importanza dei fattori di carico nella definizione del pacchetto tecnologico*, il primo fattore che si deve tenere in considerazione nella progettazione dell'elemento portante è che il sistema a verde presenta un peso diverso in relazione alla quantità d'acqua che contiene. Sia lo strato colturale, in misura prevalente, sia eventuali elementi specificatamente predisposti per accumulare acqua nelle proprie cavità, si imbibono d'acqua determinando ovvie conseguenze dal punto di vista statico. La normativa italiana impone che il carico permanente venga calcolato, a favore della sicurezza, impiegando valori di massa volumica in *totale saturazione idrica*.

Il secondo fattore da tenere in considerazione nell'analisi dei carichi di una copertura a verde riguarda la valutazione del peso delle piante. Le piante sono prevalentemente composte di lunghe cellule fibrose e di acqua e il loro peso, pur di non immediata determinazione, dev'essere valutato in base alla dimensione prevista raggiungibile in massimo sviluppo.

Il *Sedum*, le erbacee perenni e gli arbusti sono assimilabili ad un carico uniformemente distribuito. Diversamente vale per gli alberi che rappresentano dei carichi concentrati.

ANALISI DEI CARICHI

Tabella III.12: Peso dei sistemi a verde estensivo e intensivo

I valori dei carichi permanenti generati dal sistema a verde devono essere valutati in condizione di massima saturazione idrica, ossia presupponendo che tutti gli spazi vuoti dei materiali inerti dello strato colturale e del drenaggio siano completamente riempiti d'acqua. Tale condizione, nella realtà irraggiungibile, incrementa notevolmente il valore dei carichi per cui la struttura portante viene dimensionata.

La tabella riporta i valori di carico indicativi delle differenti tipologie di sistema a verde; tali valori sono normalmente forniti dai produttori stessi. L'elemento che più influisce sulla variazione del peso della copertura è il substrato, la cui densità apparente (ossia il peso vero e proprio del materiale, compresi tutti gli spazi vuoti che racchiude) può variare da 350 a 1000 chilogrammi al metro cubo. Inoltre, in relazione alle sue capacità idriche, il suo peso varia ulteriormente quando bagnato, in modo diseguale da miscela a miscela.

SISTEMA A VERDE	PESO TOTALE Kg/m ²	TIPO DI VEGETAZIONE	PESO DELLA VEGETAZIONE Kg/m ²	SPESSORE DEL SUBSTRATO cm	PESO DEL SUBSTRATO = DENSITÀ APPARENTE Kg/m ² (650 kg/m ³)
INVERDIMENTO ESTENSIVO	80 - 150	Sedum	10	8 - 15	52 - 97,5 + peso acqua
		Erbacee perenni a ridotto sviluppo	10		
INVERDIMENTO SEMI-INTENSIVO	150 - 300	Grandi erbacee	15	15 - 25	97,5 - 162,5 + peso acqua
		Arbusti di piccola taglia	20		
INVERDIMENTO INTENSIVO	150	Prato	5-10	25	162,5 + peso acqua
	400	Arbusti di grande taglia e piccoli alberi	40	25 - 40	162,5 - 260 + peso acqua
	> 600 (carichi di punta)	Alberi di III grandezza (altezza a completo sviluppo 4-10 metri)	tabella dendrometrica	> 60	390 + peso acqua
	> 600 (carichi di punta)	Alberi di II grandezza (altezza a completo sviluppo 10-16 metri)	tabella dendrometrica	> 60	390 + peso acqua

L'isolamento termico

TETTO DRITTO



TETTO ROVESCIO



FUNZIONE

La funzione dell'elemento termoisolante è quella di portare la resistenza termica globale della copertura al valore richiesto dal progetto; una funzione che, sebbene in realtà assolta da più elementi, viene di norma considerata caratteristica di uno strato specificatamente predisposto. Come è stato descritto nel primo capitolo, il sistema a verde presenta proprietà termoisolanti per la massa di cui è dotato: lo strato colturale, prevalentemente, ma anche la vegetazione e gli elementi di drenaggio e accumulo idrico, aggiungono spessore e inerzia al sistema di impermeabilizzazione migliorando complessivamente le prestazioni termiche dell'intera copertura. Questa proprietà, pur variabile a seconda dell'altezza della sezione, presenta la caratteristica di non agire in maniera costante a causa della sua permeabilità all'acqua: il substrato asciutto, infatti, ha valori di trasmittanza termica prossimi a quelli di un materiale isolante, mentre il substrato bagnato ha valori di trasmittanza più elevati e quindi non è in grado di esercitare tale funzione. Per questa ragione è opportuno predisporre uno strato termoisolante all'interno della stratigrafia della copertura.

MATERIALE

I materiali che costituiscono lo strato termoisolante possono essere svariati: legno, polistirene, lana di roccia, ecc. La scelta del materiale più appropriato è influenzata dalla posizione che assume lo strato all'interno del pacchetto della copertura a verde.

PROGETTAZIONE

Nell'inserimento di uno strato termoisolante, si rende quindi necessario determinare il materiale, la sua posizione all'interno della stratigrafia e il suo spessore.

In relazione alla posizione dell'elemento di isolamento termico si hanno quattro tipologie differenti di copertura:

1. tetto freddo: in questa sequenza lo strato termoisolante non esiste o è collocato nell'intradosso del solaio di copertura (pertanto eventualmente svincolato dal requisito di resistenza ai carichi);
2. tetto caldo: questa tipologia prevede che lo strato termoisolante si trovi fra l'elemento di tenuta e il solaio di copertura. La scelta del materiale è in questo caso vincolata alla resistenza a compressione: la normativa specifica che la resistenza a compressione dev'essere superiore a 150 chilopascal e che i sovraccarichi di progetto non devono trasferire allo strato termoisolante carichi superiori al 70% del valore della resistenza a compressione del prodotto. Un'insufficiente resistenza a compressione comporterebbe una diminuzione dello spessore dello strato con una conseguente riduzione della capacità termoisolante del materiale; pertanto sono esclusi nella scelta del materiale tutti quegli elementi composti da fibre soffici. Soddisfatto il primo requisito è necessario inoltre considerare le incompatibilità meccaniche e chimiche che possano intercorrere fra l'elemento termoisolante e l'elemento di tenuta e in modo particolare è necessario valutare le modalità di posa della membrana impermeabilizzante. L'inserimento dello strato termoisolante sotto l'elemento di tenuta impone l'applicazione di altri strati funzionali:
 - la barriera a vapore, in aderenza alla parte calda dell'isolamento termico, al fine di evitare la formazione di condensa che pregiudicherebbe la funzione isolante dello strato appositamente predisposto;
 - lo strato di separazione meccanica per ovviare all'eventuale incompatibilità chimica o meccanica fra l'elemento termoisolante e l'elemento di tenuta;
3. tetto rovescio: in questo caso l'elemento termoisolante è sovrapposto all'elemento di tenuta. Questo implica che il componente facente parte del sistema a verde e non del sistema di impermeabilizzazione possa essere bagnato dall'acqua. Come per il tetto caldo anche in questo caso la resistenza a compressione dev'essere valutata in relazione al peso delle stratigrafie sovrastanti in condizione di saturazione idrica.

Lo strato termoisolante di un tetto rovescio, nel caso delle coperture a verde, di fatto funge anche da elemento di protezione meccanica e, se opportunamente modellato, da elemento di drenaggio e accumulo idrico.
4. tetto a *sandwich*: questo è il caso in cui l'isolamento termico si trova sia sotto l'elemento di tenuta, che sopra di esso, unendo così le due precedenti soluzioni.

III.2

Il rapporto fra le scelte tecnologiche e il contesto climatico di riferimento

Uno dei principali elementi di difficoltà nella diffusione delle coperture a verde è rappresentato dall'impossibilità di una sua applicazione indifferenziata rispetto al contesto climatico di inserimento. Non solo la vegetazione cambia da zona a zona, ma anche il funzionamento complessivo del sistema a verde si deve adattare alle variazioni dei fattori climatici: il rapporto "specie vegetali/substrato/clima" può dar luogo a stratigrafie radicalmente differenti a seconda dell'inserimento in una piuttosto che un'altra zona climatica.

Le figure III.11, III.12 e III.13 documentano una copertura estensiva di una palestra collocata ad Amsterdam, in cui una porzione del sistema a verde è scivolata esponendo la sua stratigrafia. Appare evidente dall'immagine III.11 che lo spessore complessivo del sistema sia estremamente ridotto, non superiore a 3 centimetri. La stratigrafia sopra l'elemento di tenuta (che in questo caso è una membrana impermeabilizzante in bitume-polimero) è così composta: lo strato vegetale, costituito da varie specie di *Sedum* tappezzante al 100%, radica in un substrato di circa 2-3 centimetri di inerti a grana fine, probabilmente miscelati con una fibra organica; il substrato è trattenuto da un tappetino dotato di una superficie scabrosa che funge da strato di separazione fra la membrana e il sistema a verde e garantisce la protezione meccanica e la protezione dall'azione delle radici per l'elemento di tenuta. Le funzioni di accumulo idrico e di drenaggio sono pressochè assenti: un certo accumulo è garantito dai 2-3 centimetri di substrato e il drenaggio non è necessario perchè la stratigrafia è estremamente ridotta. Dalle immagini appare evidente che il sistema a verde, pur minimale e privo di impianto di irrigazione, è perfettamente in grado di tenere in vita la vegetazione in buone condizioni. Questo tipo di stratigrafia, molto diffusa nel centro-nord Europa, non avrebbe alcuna possibilità di resistere in nessuno dei climi mediterranei, a meno di un continuo apporto d'acqua.

Le figure della serie III.14 nella pagina seguente riportano le temperature massime registrate un giorno estivo medio (qui il 14 giugno 2009), in Italia, Germania, Austria e Repubblica Ceca. In alcune regioni d'Italia,



Figure III.11 e III.12: Stratigrafia di una copertura a verde estensivo collocata ad Amsterdam

Questo inverdimento è caratterizzato da una stratigrafia estremamente ridotta, pari a circa 2-3 centimetri. La vegetazione che vi cresce è un'insieme di diverse specie di *Sedum* e il tappezzamento della copertura è al 100%. Questa stratigrafia così sottile, qui priva anche di un sistema di irrigazione, è in grado di garantire la vita alla vegetazione solo nei climi microtermici, quindi al di là dell'arco alpino, nel centro-nord Europa in generale. La media delle temperature massime e l'escursione termica notte-giorno di questi climi favorisce la formazione di umidità nel substrato.



Figura III.13: Vista complessiva dell'edificio

Questa fotografia ritrae la falda opposta (rivolta verso est) della stratigrafia rappresentata nelle due figure precedenti: la vegetazione assume qui di una colorazione verde (a eccezione di due fasce poste agli estremi della falda, in prossimità del primo lucernario di sinistra e dell'attacco alla chiusura verticale a destra), mentre nel versante ovest, come si vede dalle figura III.7 e III.8, presenta una colorazione rossastra. Il colore rosso è caratteristica del *Sedum Album* nel momento in cui comincia a soffrire di siccità: ciò significa che l'orientamento a ovest implica soleggiamento ed evapotraspirazione maggiori e quindi una certa sofferenza idrica. Quando il colore del *Sedum Album* vira verso il rosso è opportuno irrigare.

in particolare in Lombardia e in Toscana, le temperature massime raggiunte variano dai 30 ai 34 gradi Celsius, mentre nell'Europa centrale sono sensibilmente inferiori, stentano infatti a raggiungere i 30 gradi in Austria e nel sud della Germania e i 25 gradi nel nord della Germania e in Repubblica Ceca: "a sud della barriera alpina, in area mediterranea, caldo elevato, massime quasi sempre contenute o addirittura tiepide. Le Alpi sono una barriera invalicabile fra due climi molto diversi: quello mediterraneo e quello centro-europeo. [...] In estate le differenze termiche fra le pianure poste sui due versanti alpini, nell'area mediterranea la Pianura Padana e in quella centro-europea la pianura renana-danubiana, si accentuano ancor di più. [...] È sufficiente guardare le differenze termiche estive delle temperature (medie massime e minime mensili) di sei grandi città che sorgono in questi due versanti: tre nell'area mediterranea (Milano, Torino, Bologna) e tre nel centro Europa (Vienna, Mannheim e Praga). Come si vede dalla tabella III.13 a sud delle Alpi l'Europa mediterranea risente, anche nelle zone più settentrionali, dell'influenza dell'Africa e di una maggiore insolazione, mentre a nord della catena montuosa è presente una minore incidenza dei raggi solari, ma soprattutto una minore influenza dei venti caldi africani unita a una maggiore ventilazione atlantica e nordica"³⁴. Questa differenza climatica fra Europa centrale e mediterranea influisce in primo luogo sulle specie vegetali che popolano il territorio: nell'Europa centrale sono diffuse le piante definite in fitogeologia *microtermiche*, cioè quelle piante adattatesi a climi molto freddi che però si spingono fino a regioni climatiche sensibilmente più calde

³⁴ Fonte: Luca Palermo > <http://meteoweb.it/viewtopic.php?f=1&t=21889>

Figure-serie III.14: Temperature massime registrate il 14 giugno 2009

Le temperature massime registrate in Italia sono messe a confronto con quelle registrate in Germania, Austria e Repubblica Ceca. Mentre in Italia si raggiungono i 34 gradi Celsius nelle regioni della Lombardia e della Toscana, e le restanti regioni si attestano attorno ai 30 gradi, negli altri Paesi i valori sono sensibilmente più bassi, secondo un gradiente proporzionale alla latitudine: a sud della Germania e in Austria a stento si raggiungono i 30 gradi, e a nord della Germania e in Repubblica Ceca arrivano con difficoltà ai 25 gradi.

La catena alpina separa due regioni climatiche molto differenti: nelle regioni cisalpine settentrionali si ha un clima caratterizzato da estati molto calde, mentre nelle regioni transalpine il clima si fa più tiepido d'estate e molto più freddo d'inverno.

Queste caratteristiche termiche influiscono significativamente sulle tecnologie di copertura a verde: rispetto al centro-nord Europa, in Italia il sistema a verde deve raggiungere inerzia termica e idrica superiori attraverso l'incremento del suo spessore.

Fonte: Palermoluca > <http://forum.meteoweb.it/viewtopic.php?f=1&t=21889>



POSIZIONE RISPETTO ALL'ARCO ALPINO	CITTÀ	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO
		Temperature medie massime e minime mensili - [° Celsius]		
SUD DELL'ARCO ALPINO MEDITERRANEO	TORINO	25-16	28-19	27-18
	MILANO	27-17	30-19	29-19
	BOLOGNA	26-18	29-20	29-20
NORD DELL'ARCO ALPINO CENTRO-EUROPA	VIENNA	23-14	26-15	25-15
	MANNHEIM	22-13	25-15	25-15
	PRAGA	21-11	23-12	23-12

Tabella III.13: Temperature medie massime e minime mensili di alcune città europee

Le temperature medie mensili massime e minime di alcune città del nord Italia sono superiori di circa 4 gradi rispetto a quelle registrate nelle città del centro Europa. Ciò è determinato dall'influenza dei venti caldi africani che si spingono fino alla barriera dell'arco alpino.

Fonte: Palermo > <http://meteoweb.it/viewtopic.php?f=1&t=21889>

rispetto a quelli di origine.

In Italia queste piante non si trovano, perchè le temperature sono troppo elevate; è invece diffusa anche nelle regioni del nord Italia la vegetazione *mesotermica*, che comprende tutte quelle specie arboree dei climi temperati caldi, di cui fanno parte anche i climi italiani, ma che non si spingono oltre la catena alpina.

Il rapporto fra vegetazione e clima è così stretto che la determinazione stessa delle diverse zone climatiche si basa sull'osservazione della distribuzione della vegetazione. In altre parole, la capacità di popolare spontaneamente un certo territorio da parte di alcune specie di vegetazione, implica che il territorio presenti necessariamente determinate condizioni climatiche, ossia un certo andamento delle temperature, della piovosità stagionale, dei venti e così via. La stessa carta dei climi di Köppen, rappresentata nella figura III.15 nella pagina seguente, si basa sull'analisi della diffusione delle specie vegetali: per esempio la Germania occidentale è rappresentata con il verde "Cfb", mentre la Pianura Padana è rappresentata con il verde "Cfa". La lettera "C", presente in entrambe le regioni, indica *climi temperati delle medie latitudini*; la lettera "f", anch'essa comune ai due casi, indica *assenza di una stagione secca*; la lettera "b", assegnata alla Germania, definisce un *clima con estate calda - media termica estiva inferiore a 22° Celsius*, mentre la lettera "a" indica per la regione padana e per buona parte del versante adriatico *clima con estate molto calda - media termica estiva superiore a 22° Celsius*. Il limite termico dei 22 gradi è fondamentale per lo sviluppo di una grande numero di specie vegetali e distingue due regioni climatiche popolate da piante spontanee provenienti da climi opposti: in Germania occidentale è infatti possibile trovare piante microtermiche, mentre nel centro-nord Italia sono diffuse le piante mesotermiche³⁵.

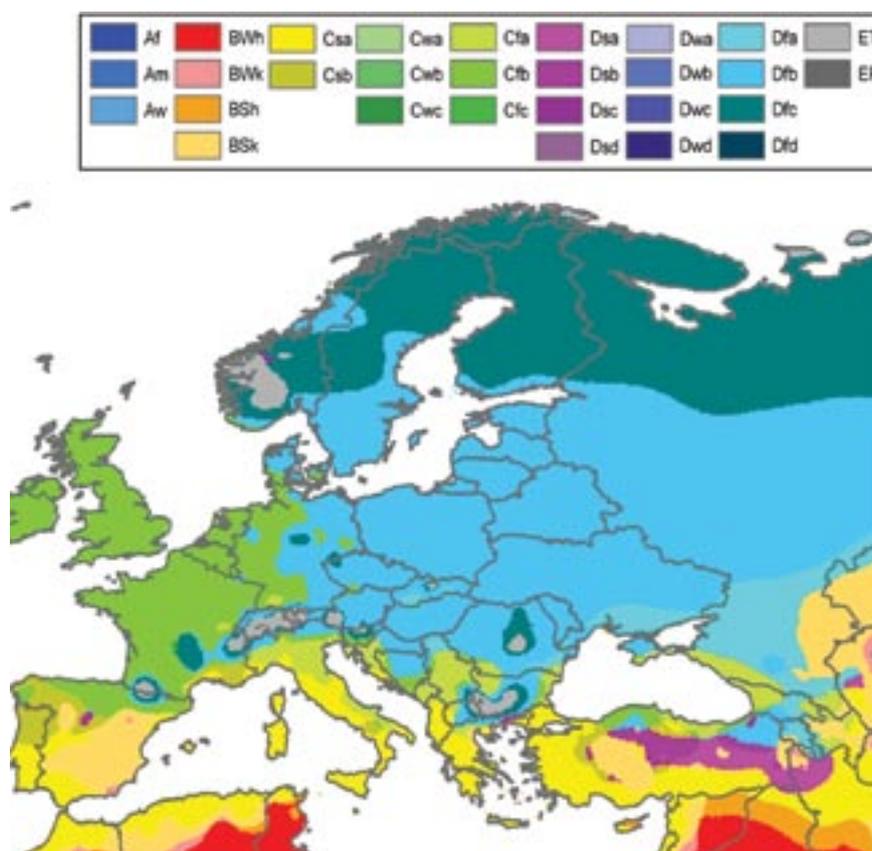
Un attento esame delle differenze climatiche consente di spiegare alcune ricadute sulla stratigrafia del sistema a verde: innanzitutto gli inverdimenti ultra-sottili, come quello illustrato nelle figure III.11, III.12 e III.13 a pagina 149, non trovano un clima favorevole in Italia, così come in nessun'altra regione mediterranea. Proprio per questo la normativa italiana impone che lo spessore minimo della stratigrafia di una copertura estensiva sia

³⁵ Fonte: Palermo > <http://meteoweb.it/viewtopic.php?f=1&t=21889>

Figura III.15: Carta dei climi di Köppen riferita all'Europa

La carta dei climi di Köppen è stata redatta basandosi sulla distribuzione spontanea delle piante nei diversi territori. Le specie vegetali infatti si insediano in base alle caratteristiche climatiche, alle temperature e alla piovosità presenti in una determinata zona.

Fonte: www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/hess-11-1633-2007.html



pari ad almeno 8 centimetri. Spessori al di sotto di questo valore non sono ammessi proprio perché, anche se collocati nelle zone climatiche italiane più a nord, diventerebbero “sterili”: nei climi italiani, un substrato sottile non solo non trattiene acqua per effetto di una rapida evapotraspirazione, ma si scalda anche molto rapidamente inibendo le funzioni radicali delle piante; inoltre l’escursione termica notte-giorno non è sufficientemente elevata da ripristinare adeguati valori di temperatura per l’intero sistema a verde. L’influenza del clima mediterraneo su questa tecnologia implica che il sistema debba garantire un’adeguata capacità termica e idrica per la vegetazione, che si traduce sostanzialmente in due proprietà della stratigrafia:

1. lo spessore dello strato colturale dev’essere sufficientemente consistente: come riportato nella tabella III.4 *Spessori minimi dello strato colturale secondo la normativa UNI 11235*, deve essere tale da costituire un bacino di raccolta d’acqua adeguato al clima di riferimento e da diminuire la conduzione del calore;
2. il sistema dev’essere preventivamente dotato di impianti di irrigazione da impiegare nel caso di prolungata siccità e calibrato in relazione alle specie vegetali piantate.

In linea di massima queste considerazioni valgono per tutti i climi presenti nel territorio nazionale, anche se opportune differenze devono essere evidenziate rispetto alle zone climatiche del nord e del sud Italia. La figura III.16 illustra le caratteristiche dei diversi climi italiani: il territorio nazionale è caratterizzato da nove differenti zone climatiche che, nel loro complesso,

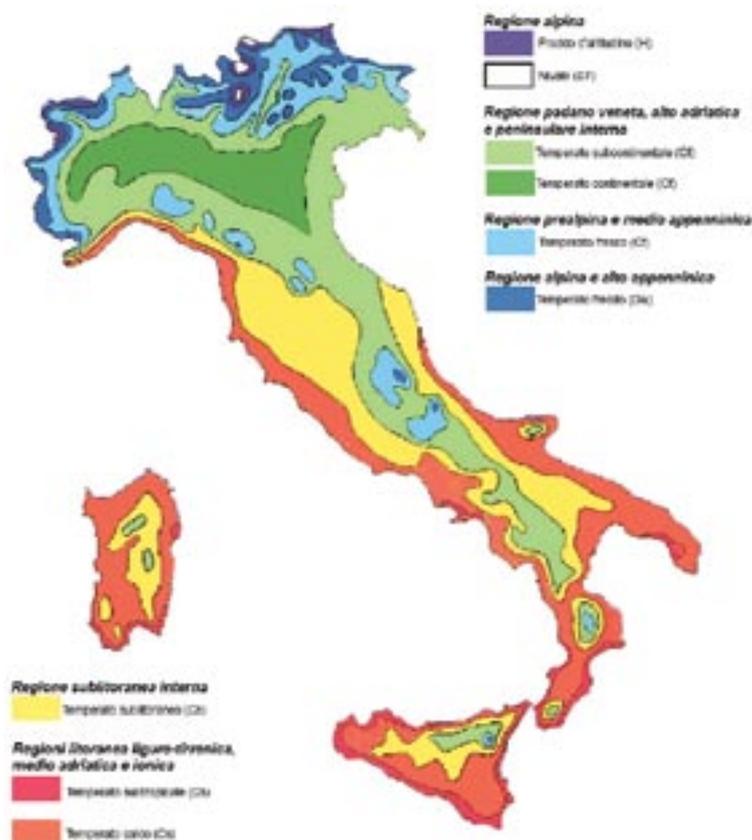


Figura III.16: Carta dei climi di Köppen riferita all'Italia

In Italia ci sono nove distinte zone climatiche. Dalle più fredde, caratteristiche dell'arco alpino, alle più calde, caratteristiche della Sicilia, si rilevano notevoli differenze. Tutti i climi italiani sono temperati, caratterizzati da estati molto calde, ma non tutti dalla presenza di una stagione secca

Fonte: www.ilpolline.it/clima-italia

sono significativamente differenti. Escludendo il clima nivale e il freddo d'altitudine (zone non popolate), si passa infatti dal temperato fresco presente in alcune zone dell'arco alpino, dell'Umbria e dell'Abruzzo, al clima temperato sub-tropicale delle coste della Calabria, della Sicilia e del sud della Sardegna. Per la tecnologia delle coperture a verde queste differenze implicano fundamentalmente l'impiego di specie vegetali diverse. In secondo luogo, nei climi del centro-sud Italia, pur potendo applicare specie vegetali autoctone e quindi adattate al tipo di clima caldo e asciutto, gli inverdimenti estensivi a *Sedum* presentano frequentemente difficoltà di adattamento. La possibilità di ottenere manti "verdi" e tappezzanti di tipo estensivo non è ancora allo stato dell'arte: infatti uno degli ambiti ancora poco indagati è proprio quello che riguarda i sistemi vegetati leggeri a basso apporto idrico per le regioni italiane del sud. Differentemente le coperture intensive, per le quali non solo è prevista una stratigrafia di consistente spessore, ma anche livelli di manutenzione e apporti idrici elevati, non presentano alcuna problematica in relazione ai climi temperati caldi del sud Italia.

Nella figura III.17 della pagina seguente si distinguono in giallo i territori dove si applicano gli inverdimenti estensivi a *Sedum* senza particolari rischi per le piante, e in arancione i territori dove l'inverdimento estensivo deve impiegare specie vegetali non convenzionali.

Figura III.17: Caratteristiche della tecnologia in relazione alle due principali aree climatiche italiane

Le coperture a verde intensivo, con opportune selezioni rispetto alle specie vegetali, non presentano problemi di capacità agronomica in relazione alle zone climatiche di tutto il territorio italiano. Differentemente gli inverdimenti estensivi, che impiegano le specie vegetali *Sedum*, trovano difficoltà ad adattarsi nelle regioni tirreniche e del sud Italia (area arancione) perché inadatte a temperature così elevate. Nei territori marcati in giallo invece gli estensivi tradizionali possono essere applicati con esito positivo.

Fonte: Seic > www.harpo-group.com/verde-pensile/index.asp



Figura III.18: Verifica del comportamento di alcune specie vegetali ai sistemi di inverdimento estensivo

Queste specie vegetali provenienti dalla Sicilia sono sottoposte a osservazione e sperimentazioni per verificare come reagiscano ai differenti substrati per coperture a verde estensivo e a prolungati periodi di siccità.



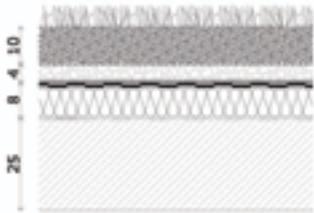
	COPERTURA A VERDE ESTENSIVO	COPERTURA A VERDE INTENSIVO
SEZIONE PASSANTE		
LIVELLO DI MANUTENZIONE	Basso - 2/3 interventi all'anno È consigliabile installare un impianto di irrigazione da considerarsi di soccorso	Medio/Alto - 4/12 interventi all'anno È consigliabile installare un impianto di irrigazione da impiegare in relazione alle specie vegetali impiegate
SPESSORE DELLO STRATO CULTURALE	8 - 12 centimetri	a partire da 15 - 20 centimetri
PESO DELLA COPERTURA	~ 150 kg/m ²	~ 300 kg/m ²
	Da calcolare in saturazione idrica	
APPLICABILITÀ ALLE ZONE CLIMATICHE	Applicabile al centro-nord Italia. Ridotta la scelta di specie vegetali per le applicazioni nelle regioni meridionali. Nel centro-sud inoltre è necessario incrementare gli spessori della stratigrafia.	Garanzia di successo in tutto il territorio italiano, prevedendo per le regioni centro-meridionali un maggiore investimento di risorsa idrica o l'applicazione di specie vegetali non tappezzanti.
COMPORTEMENTO ENERGETICO	Ottimo in regime estivo, discreto in regime invernale. Cautelativamente è bene prevedere comunque l'inserimento di uno strato termo-isolante nel pacchetto di copertura.	Eccellente in regime estivo, buono in regime invernale. È utile valutare il comportamento inerziale complessivo, comunque è possibile ridurre lo spessore dello strato termo-isolante del pacchetto di copertura o escluderlo.

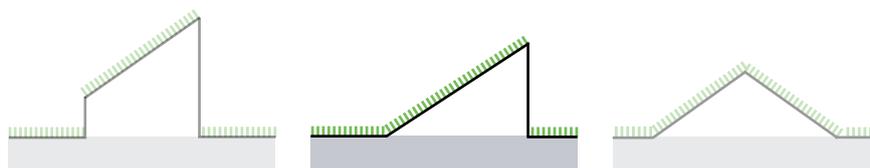
Tabella III.14: Sintesi delle caratteristiche degli inverdimenti estensivi e intensivi nel nord e nel sud Italia

Fonte: Edoardo Bit ed Elena Giacomello, "L'integrazione fra sistemi di involucro e componenti vegetali per la mitigazione ambientale nel clima Mediterraneo", in Maria Luisa Germanà (a cura di), *Permanenze e Innovazioni nell'architettura del Mediterraneo*, Materiali del VI Seminario OSDOTTA: 2011 (in fase di pubblicazione).

Villa Aloni

LUOGO	Isola di Antiparos (Cicliadi) - Grecia
PROGRAMMA.....	residenza
ARCHITETTO	Deca Architecture
PAESAGGISTA.....	Oikosteges - Andrew Michael Clements
REALIZZAZIONE.....	2008

USO DELLA COPERTURA	mimetizzazione nel paesaggio, isolamento termico
PRATICABILITÀ.....	accessibile
SUPERFICIE.....	240 m ²
PENDENZA.....	piana
VERDE	semi-intensivo
SISTEMA.....	---



La copertura a verde della villa Aloni, progettata dallo studio Deca Architecture, è un esempio di inverdimento semi-intensivo in clima mediterraneo: si trova nell'isola di Antiparos nelle Cicliadi, dove il clima è caratterizzato da temperature medie estive molto elevate e da scarsa piovosità. La villa Aloni è un'abitazione per vacanze di 240 metri quadri distribuiti in un unico piano e si trova su un territorio collinare non costruito, dove il suolo brullo impedisce la crescita di alcun tipo di vegetazione durante la stagione calda. La villa si inserisce in questo territorio occupando un avvallamento naturale che consente di nascondere il volume fuori terra della fabbrica ponendo la copertura a verde in continuità, lungo due lati del suo perimetro, con il suolo circostante. La villa, così incuneata nel movimento naturale del terreno, è completamente mimetizzata nel paesaggio: complice di ciò sono non solo la posizione in una conca naturale e il contenimento complessivo del volume, ma anche la copertura a verde che garantisce la continuità con il suolo circostante. L'impiego di un materiale lapideo locale per le due chiusure verticali visibili dalla valle è caratterizzato da cromatismi del tutto simili a quelli del terreno.

Così concepita la struttura non risulta nascosta nel paesaggio, bensì risonante con esso grazie a un accurato disegno del volume edilizio in continuità con la topografia e all'impiego di materiali, sia in facciata che in copertura, affini a quelli presenti nell'intorno naturale.

La copertura a verde è caratterizzata da specie vegetali frugali e basse; ciò nonostante il sistema è dotato di un impianto di irrigazione, indispensabile



per garantire possibilità di vita in un clima così caldo e asciutto.

La copertura a verde è in questo caso particolarmente funzionale all'isolamento termico dalle alte temperature: grazie a un pur moderato ombreggiamento operato dalle piante e all'elevata massa termica dello strato colturale, la copertura è in grado di garantire ottimi livelli di *comfort* termico al suo interno, in un ambiente così fortemente riscaldato dal sole mediterraneo. Inoltre, la mancanza di connessione fra l'ambiente interno della residenza e la copertura sottolinea come l'impiego dell'inverdimento non abbia alcuno scopo fruitivo. La continuità della copertura con il territorio è invece funzionale all'idea di integrazione fra costruito e paesaggio che è alla base di questo progetto.

Figura III.19: Copertura della villa Aloni

La residenza è situata sull'Isola di Antiparos nel cuore del Mediterraneo. Il territorio circostante alla villa è collinoso, caratterizzato da un suolo sassoso, drenante e molto arido.

Fonte: Deca Architecture

Figura III.20: Vista dall'alto della copertura della villa Aloni

La copertura della Villa Aloni è posta in continuità con il suolo circostante lungo i due lati corti della pianta: da qui è possibile accedere liberamente alla sua superficie, dove si trova un inverdimento costituito da specie vegetali tipicamente mediterranee, molto resistenti al clima siccitoso dell'isola.



Figura III.21: Pianta della villa

Il cuore della villa è un ampio salone che comprende una zona-cucina e che si affaccia all'esterno su quattro lati: i due lati maggiori risultano da un arretramento del filo facciata che ritaglia la sagoma perimetrale, mentre i due lati corti corrispondono a due chiostrine ricavate nella direzione dei versanti. Attorno alla zona-giorno centrale sono disposte cinque camere da letto con altrettanti nuclei di servizio.

Fonte: www.inhabitat.com > Aloni_house



Figura III.22: Sezione della villa

La villa occupa un naturale avvallamento del territorio e la continuità tra la copertura piana e il suolo circostante è ottenuta mediante due terrapieni che chiudono i lati minori della pianta.

Fonte: www.inhabitat.com > Aloni_house

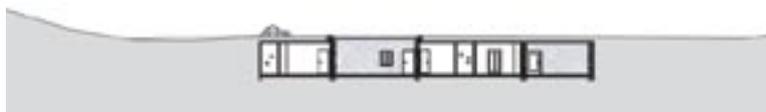


Figura III.23: Pianta della copertura

Nella copertura a verde sono ritagliate quattro aperture che portano luce all'interno della zona-giorno centrale.

Fonte: www.inhabitat.com > Aloni_house

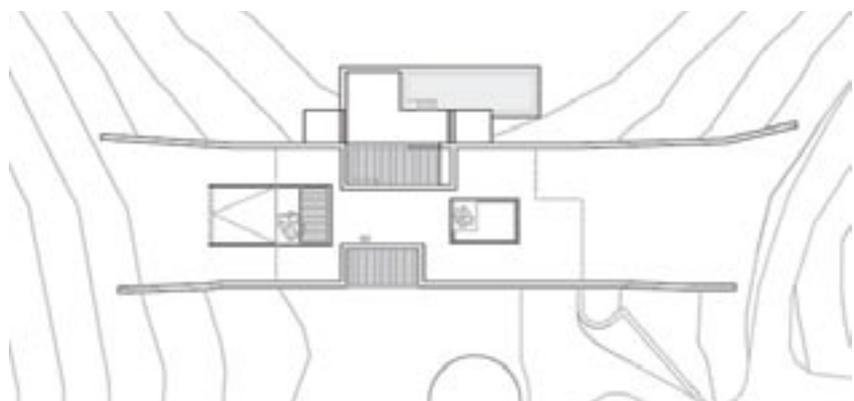




Figura III.24: Vista della chiostra dalla copertura

La chiostra ritagliata sulla superficie di copertura è un giardino intercluso su cui si affaccia la camera da letto matrimoniale.

La copertura a verde è fornita di un sistema di irrigazione superficiale, assolutamente necessario in questo clima per irrigare la vegetazione durante i periodi di prolungata siccità estiva.

Fonte: www.inhabitat.com > Aloni_house



Figura III.25: Vista verso il giardino esterno

Sul lato corto orientale la villa si offre all'esterno grazie a un'altra chiostra aperta nella direzione del versante. La pendenza è piantumata e irrigata con le stesse specie vegetali impiegate in copertura.

Fonte: www.inhabitat.com > Aloni_house



Figura III.26: Vista della villa verso il fronte sud.

Fonte: Deca Architecture

III.3

Criticità costruttive

Le criticità costruttive di una copertura a verde riguardano quasi esclusivamente l'elemento di tenuta e la sua corretta applicazione nelle sezioni correnti e in prossimità dei risvolti verticali e laterali in corrispondenza di elementi emergenti.

Come è stato accennato in precedenza, l'elemento di tenuta di una copertura a verde è sottoposto non solo alle aggressione chimiche, dovute alla natura dei materiali sovrastanti, ma anche al contatto costante con gli elementi umidi del sistema a verde e con le radici delle piante. Per questa ragione l'elemento di tenuta, che rappresenta il confine fra il sistema di impermeabilizzazione e il sistema a verde, è protetto da due elementi di interfaccia in grado di garantire la protezione meccanica e la protezione dall'azione degli apparati radicali. Quest'ultima funzione è di fatto assolta da una seconda membrana bituminosa, oppure, nel caso dell'impiego di un elemento di tenuta in polivinilcloruro o a base di poliolefine, tale funzione risulta essere integrata all'elemento di tenuta stesso (steso quindi in monostrato).

Rispetto ad altri strati la membrana impermeabilizzante richiede quindi adeguate misure di protezione e al contempo una perfetta posa sul solaio di copertura. Il solaio di una copertura a verde deve risultare completamente stagno, e proprio dove sono presenti delle discontinuità del piano di posa, elementi emergenti, forature del solaio o chiusure verticali, la membrana impermeabilizzante deve sempre risvoltare in modo continuo ed essere perfettamente sigillata.

Tutti i dettagli ove la membrana richieda lavorazioni ad hoc sono particolarmente delicati: normalmente in prossimità di questi punti si verificano le più significative problematiche costruttive.

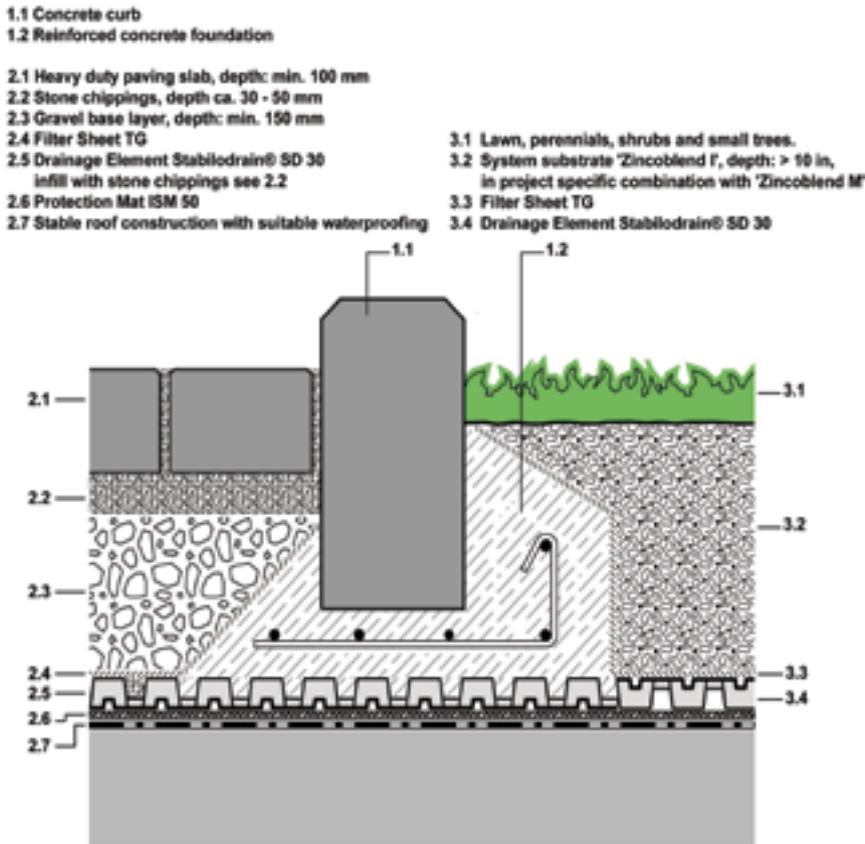


Figura III.27: Solaio di copertura a verde e carrabile

Gli elementi drenanti in pannelli preformati possono fungere da supporto per elementi in calcestruzzo (un cordolo in questo caso) e pavimentazioni carrabili. Alcune stratigrafie a verde sono appositamente studiate per poter alternare diversi tipi di finiture superficiali, senza per questo generare delle discontinuità dell'elemento di tenuta.

Fonte: ZinCo

Figura III.28: Risvolto verticale dell'elemento di tenuta

La posa a regola d'arte dell'elemento di tenuta è fondamentale per prevenire le infiltrazioni d'acqua all'interno della copertura. Non solo i vari fogli della membrana devono essere perfettamente sigillati, ma anche tutti gli elementi verticali vanno protetti dall'impermeabilizzazione e dall'elemento di

protezione dall'azione delle radici. Questa sezione rappresenta un inverdimento estensivo di una falda piana sulla quale si riversa l'acqua proveniente da un'altra falda posta a un livello superiore. La gronda della seconda copertura porta l'acqua al livello dell'elemento di protezione meccanica. Nel punto di scolo il substrato e la vegetazione sono interrotti e, al loro posto, è stata inserita

una pavimentazione galleggiante rialzata che consente un allontanamento più rapido dell'acqua.

Fonte: ZinCo

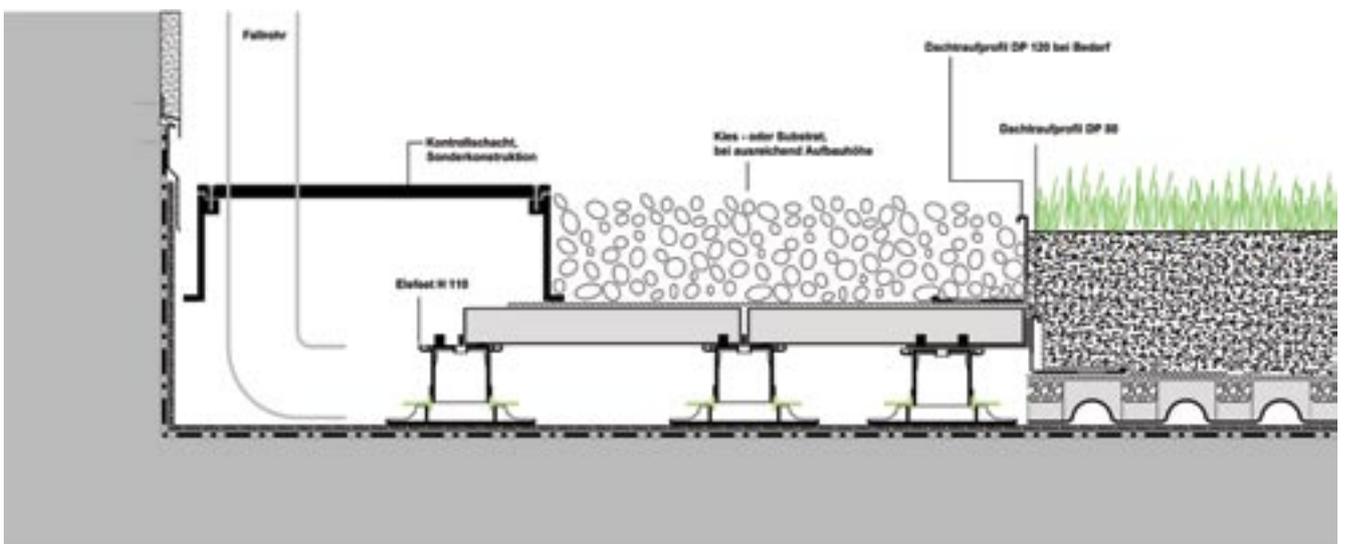


Figura III.29: Terminale di ventilazione una copertura piana

Anche nel caso dei terminali di ventilazione la membrana impermeabilizzante deve risvoltare in verticale fino a 15 centimetri al di sopra dello strato colturale. I lembi terminali della membrana sono accuratamente protetti da un collarino di guarnizione specificamente progettato che esclude la possibilità d'infiltrazione dell'acqua fra gli interstizi della superficie dell'elemento cilindrico e la membrana.

Fonte: Optima Giardini Pensili

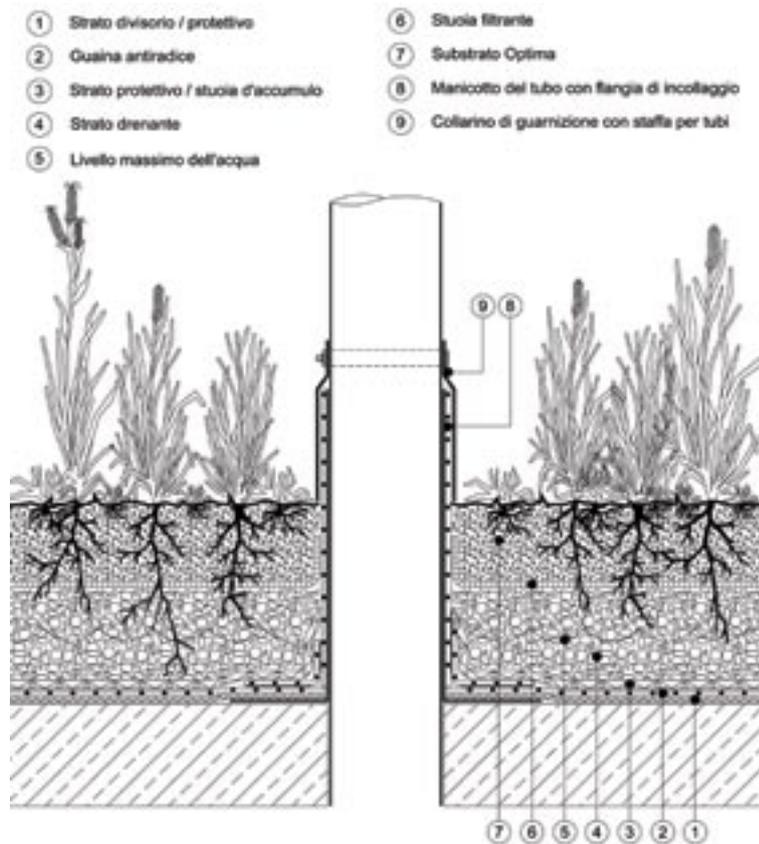
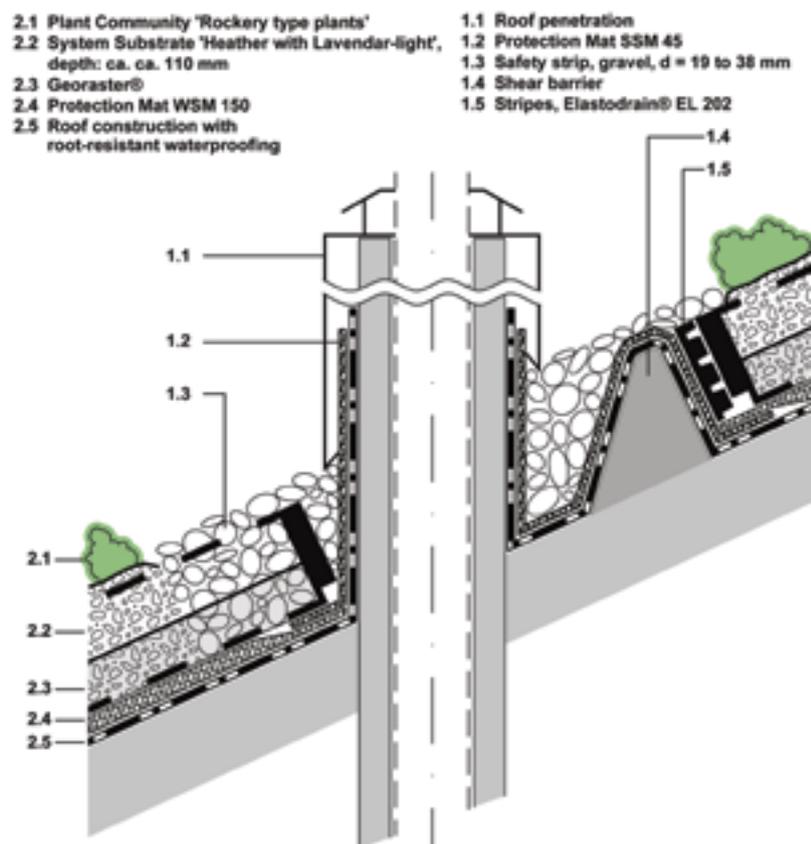


Figura III.30: Terminale di ventilazione una copertura inclinata

La stessa condizione rappresentata nella figura III.20 può verificarsi nelle coperture inclinate: anche in questo caso l'elemento di tenuta e l'elemento di protezione meccanica risvoltano verticalmente sulla superficie del terminale e sono protette da una scossalina metallica.

In prossimità del terminale è stato inserito, verso il colmo, un traverso in legno antiscivolo per annullare eventuali spinte del sistema a verde sulla sezione del tubo. Attorno al risvolto della membrana, inoltre, è stato predisposto un drenaggio aggiuntivo composto di ghiaio di grossa granulometria per agevolare l'allontamento dell'acqua.

Fonte: ZinCo



Un suolo artificiale: il ruolo dell'acqua nella progettazione della copertura a verde
Implicazioni tecnologiche e verifica sperimentale

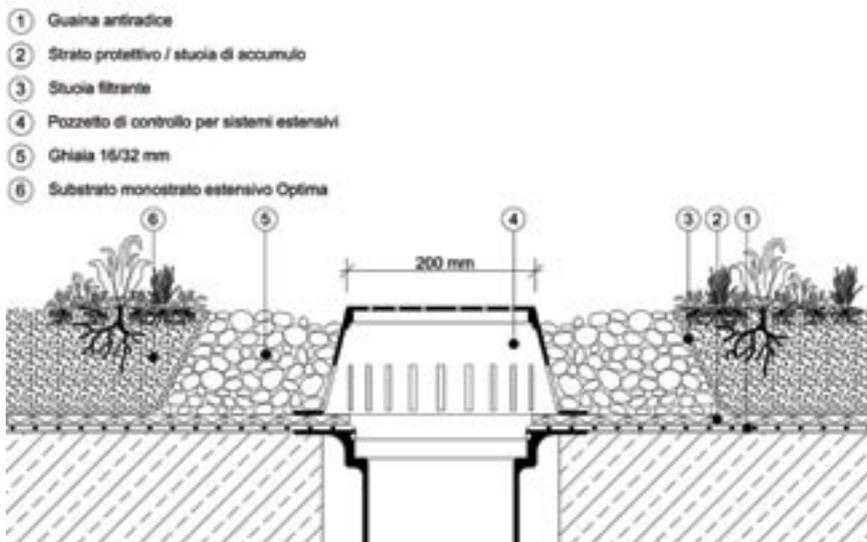


Figura III.31: Pozzetto di controllo

In prossimità degli scoli è necessario predisporre dei pozzetti di controllo per consentire l'ispezione dei tubi di gronda. Come accade in altre circostanze, in cui l'elemento di tenuta deve essere interrotto, anche in questo caso è predisposto un drenaggio in ghiaia attorno al pozzetto.

Fonte: Optima Giardini Pensili

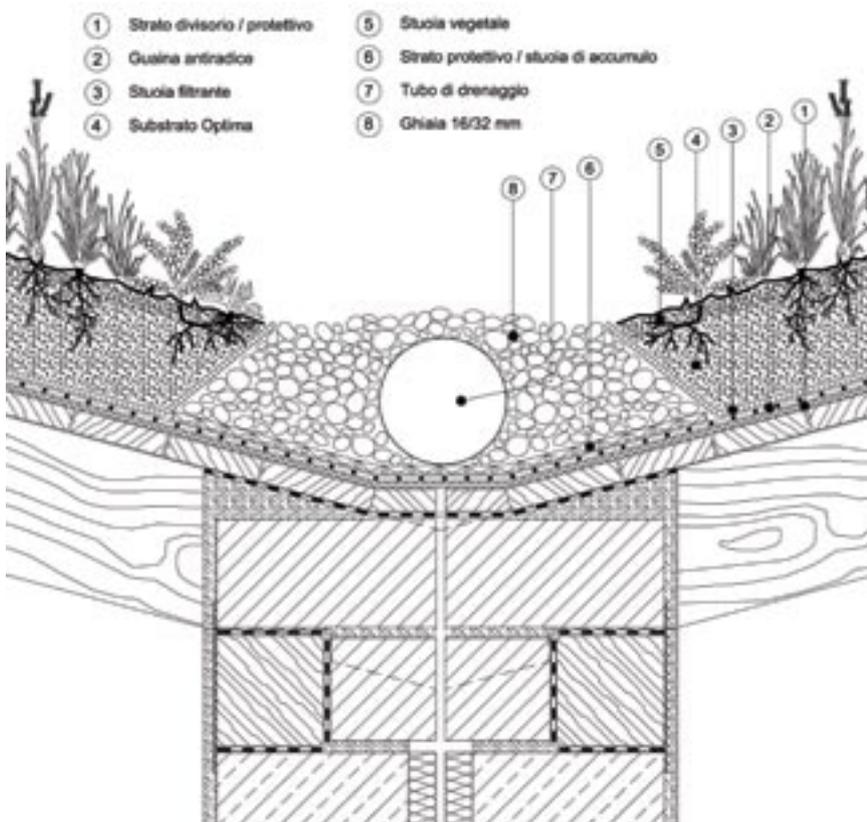


Figura III.32: Compluvio

Durante gli eventi meteorici piovosi, in un compluvio si verificano battenti idrici persistenti. Pertanto, oltre al drenaggio in ghiaia, si predispose un tubo che raccoglie e allontana l'acqua più rapidamente.

In questa stratigrafia l'impalcato di copertura è un tavolato in legno, pertanto la membrana impermeabilizzante è posata indipendentemente dall'elemento portante.

Fonte: Optima Giardini Pensili



Figure-serie III.33: Impermeabilizzazione di un elemento anticaduta in calcestruzzo e metallo

L'elemento anticaduta è costituito da un robusto montante metallico che tende un cavo a cui è possibile agganciare un'imbragatura. Il montante ha come base una piastra metallica, fissata da quattro lunghe viti annegate in un elemento parallelepipedo di calcestruzzo armato posto in continuità al solaio di copertura. La sequenza mostra

l'impermeabilizzazione dell'elemento di calcestruzzo e la sigillatura delle viti: dopo aver gettato il basamento di calcestruzzo e aver predisposto le viti, esso viene accuratamente impermeabilizzato. Sulla sua superficie superiore viene steso un doppio strato di membrana impermeabilizzante e vengono sigillati i fori per le viti con una colla siliconica. Successivamente si stende un terzo strato di impermeabilizzazione e poi la piastra metallica che costituisce la base del montante.

Fonte: Optima Giardini Pensili

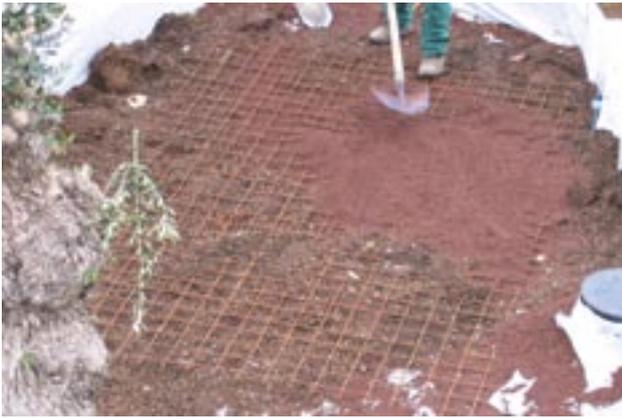


Figure-serie III.34: Ancoraggio di una pianta ad alto fusto

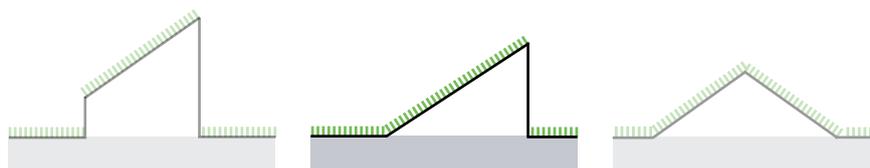
Frequentemente gli alberi posti in copertura devono essere ancorati per non rischiare lo sradicamento per effetto del vento. In questa sequenza la pianta, trasportata in zolla, viene ancorata attraverso cavi metallici a una rete elettrosaldata appoggiata sopra lo strato filtrante (quindi sopra l'elemento di accumulo idrico e di drenaggio). I cavi cingono il tronco della pianta e la zolla stessa, e si legano

alla rete elettrosaldata attraverso moschettoni fissati alle estremità. Dopo il completamento della stratigrafia con la stesura dello strato culturale, la rete si mantiene stabile sia grazie al peso del substrato che grava sopra ad essa, sia grazie ad alcuni elementi in laterizio pieno che vengono utilizzati come zavorre.

Fonte: Optima Giardini Pensili

PAV - Padiglione d'Arte Vivente

LUOGO	Torino
PROGRAMMA.....	museo e parco tematico
ARCHITETTO	Gianluca Cosmacini e Alessandro Fassi
PAESAGGISTA.....	- - -
REALIZZAZIONE.....	2008
USO DELLA COPERTURA	belvedere, zona di sosta, tribuna
PRATICABILITÀ.....	accessibile
SUPERFICIE.....	530 m ²
PENDENZA.....	piana
VERDE	semi-intensivo
SISTEMA.....	Seic



Il Parco d'Arte Vivente di Torino è un centro per l'arte contemporanea che accoglie al suo interno un'area espositiva, occupata da un'installazione permanente, e alcuni ambienti dedicati a laboratori, aule per la didattica e spazi di lavoro per gli artisti. Questa struttura, che appare un'altura verde integrata con il terreno circostante, sorge nel quartiere Lingotto di Torino occupando un'area precedentemente destinata ad attività industriali (prima del recupero il sito era di proprietà della Framtec, industria che fino all'inizio degli anni Novanta produceva componenti per automobili).

La particolarità dell'edificio è di configurarsi come un'altura del terreno, completamente inverdita al pari del prato circostante. Questo effetto è generato dall'impiego combinato di due agrotecnologie: la prima è la copertura a verde vera e propria che chiude superiormente il museo; la seconda è una terra armata inverdita che si modella attorno all'edificio costituendosi come una serie di versanti inclinati che dal livello zero raggiungono il livello del tetto. La combinazione di due tecnologie che impiegano la vegetazione fa apparire il museo come un volume ritagliato in un dosso naturale, ma in realtà è l'intero museo a essere completamente ricostruito, comprese le pendenze inverdite che sono terre armate opportunamente sagomate per ottenere un rilievo artificiale.

La pianta del PAV è una corona ottagonale con una corte centrale scoperta: gli ambienti interni dell'edificio sono distribuiti lungo un percorso circolare che ha inizio in una "serra di ingresso", collegamento principale tra la piazza pedonale antistante l'accesso e la corte interna.



La cellula ottagonale genera particolari relazioni spaziali con l'area esterna attraverso quattro varchi ritagliati sui fianchi della collina, che sembrano portare a un "sottosuolo": diversa percezione di un luogo che in realtà non è affatto ipogeo, ma contenuto, delimitato, da sponde verdi artificiali.

La struttura portante del tetto è costituita da un solaio in legno realizzato con travi di abete a vista affiancate in totale aderenza, e completato da un getto in calcestruzzo su cui si impostano i successivi strati del pacchetto di chiusura. L'elemento di tenuta è costituito da una membrana in poliolefine che associa la funzione di impermeabilizzazione a quella di protezione dalle radici. In questo progetto la copertura a verde assume svariati ruoli: oltre alle prestazioni termiche, che si integrano perfettamente con un solaio ligneo ben isolato, la copertura a verde rappresenta una sorta di tribuna sopraelevata da cui è possibile non solo godere della vista a 360 gradi dell'area circostante, ma anche osservare le *performance* artistiche che abbiano luogo nella corte interna del museo.

La copertura rappresenta un'estensione dello spazio pubblico in quanto accessibile dai versanti ricostruiti che rivestono le pareti del museo.

Figura III.35: Vista dall'alto del PAV

Il PAV si trova nell'ex area Framtec di Torino e confina a est con la ferrovia. Il museo appare come un'altura naturale, un sottosuolo in cui è stato ritagliato uno spazio per le attività artistiche.

Fonte: Gianluca Cosmacini

Figure III.36: Pianta del piano terra del PAV

La pianta del museo è un'anello ottagonale che ritaglia un corte scoperto all'interno. Una parte dell'edificio è riservata ad attività espositive, una parte ad aule per la didattica e attività laboratoriali e infine un'ultima parte a uffici.

L'ingresso è marcato da un'ampia serra che mette in immediata connessione visiva l'esterno con la corte interna scoperta.

Fonte: Gianluca Cosmacini



Figure III.37: Pianta della copertura

La copertura a verde vera e propria ricalca perfettamente la pianta dell'edificio. La copertura a falde della serra d'ingresso non è posta in continuità con la copertura a verde, ma si eleva di circa due metri al di sopra di essa.

Fonte: Gianluca Cosmacini



Figura III.38: Sezione del PAV

I pendii che mettono in comunicazione la copertura con il suolo sono dei volumi molto consistenti di terra armata, addossati alle chiusure verticali del museo.

Fonte: Gianluca Cosmacini



Figura III.39 nella pagina a fianco: Sezione della copertura nel punto di continuità con il terrapieno

Il sistema a verde semi-intensivo è posato sopra a un solaio in legno di abete, pertanto l'elemento di tenuta è costituito da una membrana in polivinilcloruro, che facilita la posa in totale indipendenza. La discontinuità fra copertura a verde e versante artificiale è

garantita da un elemento continuo di pietra che ha il compito di contenere il substrato di coltivo della copertura che, a seguito del dilavamento o della semplice fruizione, potrebbe riversarsi sul versante artificiale affiancato.

Fonte: Gianluca Cosmacini

Figura III.40 nella pagina a fianco: Sezione della copertura a livello del parapetto

Poichè la copertura è liberamente accessibile, dove non è presente il terrapieno è stato predisposto un parapetto in muratura.

Fonte: Gianluca Cosmacini

Figura III.41: Vista del cantiere

Per la realizzazione dei versanti artificiali sono stati movimentati centinaia di metri cubi di terra armata. A fianco del PAV si trova Trèfle, un percorso scoperto molto suggestivo ritagliato nel sottosuolo, che disegna a terra un quadrifoglio concepito dall'artista Dominique Gonzalez-Foerster.

Fonte: Gianluca Cosmacini



Figura III.42: Vista del PAV a lavori ultimati

L'area verde circostante il PAV si estende per 23.500 metri quadri. Nel parco sono organizzate frequentemente attività didattiche e allestite mostre temporanee di *land-art*.

Fonte: Gianluca Cosmacini



Figura III.43: Vista dell'ingresso di servizio

Lungo l'anello ottagonale che costituisce la pianta dell'edificio, i versanti artificiali sono interrotti dagli ingressi secondari al museo. In questo progetto le terre armate dei versanti sono più fertili della copertura a verde, infatti crescono abbondantemente erbacee di grandi dimensioni.

Figura III.44: Vista della superficie di copertura

Sulla copertura a verde sono segnati dei percorsi e delle aree verdi trattate ad aiuole di *Sedum*. I lucernari in copertura sono opportunamente protetti da drenaggi aggiuntivi.





III.4

Il ruolo della manutenzione

Nel caso di una copertura a verde la manutenzione assume due diversi significati. Da un lato essa va intesa nel modo classico come quelle attività di controllo, riparazione, sostituzione ecc. volte alla conservazione nell'intento di mantenere inalterate nel tempo l'aspetto, l'efficienza e la consistenza dell'elemento tecnico. Dall'altro la manutenzione di una copertura a verde si configura come una vera e propria azione di progetto che persiste anche dopo la costruzione del manufatto, in quanto è orientata al mantenimento di determinate caratteristiche, ma anche all'accompagnamento delle metamorfosi degli strati organici che, come è stato esplicitato nel paragrafo I.1, si possono definire "strati dinamici" proprio in virtù della loro rapida capacità di mutamento e di reazione. Una copertura a verde è di fatto un elemento tecnico ibrido che implica, oltre alla cura dei materiali edilizi, una forma di coltivazione le cui lavorazioni sono incluse all'interno delle attività di manutenzione.

L'attività manutentiva è così significativa per la copertura a verde che la sua quantificazione è alla base della classificazione principale della tecnologia, come descritto nel paragrafo II.4 *Il sistema di classificazione: inverdimento estensivo e intensivo*. In linea di massima una copertura estensiva si definisce tale quando necessita di circa due interventi all'anno di manutenzione ordinaria (prevalentemente rivolti al controllo), mentre una copertura si dice intensiva quando si rende necessario intervenire sei o più volte, comprendendo lavorazioni di sfalcio, potature e cure di vario tipo, ma anche re-impianti ed eventuali sostituzioni.

La necessità di manutenzione costante rappresenta di fatto un limite della tecnologia, poichè essa implica costi derivanti dalle diverse lavorazioni agrotecniche che, nella migliore delle ipotesi, e cioè nel caso delle coperture estensive, hanno una frequenza almeno semestrale. È questa la ragione per cui le coperture di dimensioni molto estese vengono normalmente trattate a estensivo, mentre è proporzionalmente meno dispendioso inverdire con piante superiori porzioni di coperture caratterizzate da estensioni contenute.

La manutenzione ordinaria, quindi, è:

1. la base dell'attuale principale sistema classificatorio;
2. l'insieme delle lavorazioni agrotecniche che hanno luogo dal momento stesso in cui il sistema a verde viene applicato;
3. le irrigazioni;
4. le attività specialistiche che si devono avviare nel caso in cui si verificassero problemi o malattie;
5. le attività di controllo del sistema drenante e del sistema di scarico delle acque.

Per quanto riguarda la manutenzione dell'inverdimento, la normativa definisce quattro tipologie³⁴, che corrispondono a diverse fasi di vita del verde:

1. la manutenzione di avviamento al controllo comprende molte lavorazioni che devono avere luogo durante l'installazione della vegetazione e immediatamente dopo: esse comprendono il controllo dello strato colturale, delle piante e delle parti impiantistiche oltre che le lavorazioni agronomiche ordinarie qualora fossero necessarie;
2. la manutenzione di avviamento a regime è finalizzata a portare la vegetazione a uno stadio di manutenzione ordinaria. Le attività che vengono svolte sono solitamente le stesse previste per la manutenzione di avviamento al controllo, ma con una frequenza e un'intensità differenti;
3. la manutenzione ordinaria comprende tutte le lavorazioni necessarie a garantire nel tempo le funzionalità della tipologia di inverdimento prevista, per cui irrigazione, concimazioni, allontanamento di specie infestanti, rasature, potature ed eventuali trattamenti fitosanitari;
4. la manutenzione straordinaria del verde avviene qualora si manifestassero danneggiamenti importanti della vegetazione a seguito di eventi meteorologici violenti, insorgenze straordinarie di fitopatologie o altro.

Oltre alla vegetazione è necessario monitorare, per quanto possibile, anche gli strati e componenti subsuperficiali ispezionabili, cioè l'elemento di drenaggio e di accumulo idrico e il sistema di smaltimento delle acque. Il controllo di questi strati avviene a mezzo di opportuni elementi di ispezione posizionati normalmente in prossimità degli scarichi delle acque o dove vi sia un elemento emergente di irrigazione automatica.

Una copertura a verde presenta quindi una necessità di manutenzione diversa da qualsiasi altro tipo di elemento tecnico, sia per frequenza, sia per tipologia di lavorazioni. Si deve però sottolineare un aspetto importante: proprio l'altissima frequenza dei controlli ordinari, unitamente alla protezione dell'elemento di tenuta operata dal sistema a verde, rende queste coperture estremamente durevoli. Se da un lato quindi la manutenzione è un'attività molto frequente, dall'altro la durabilità è garantita proprio dalla presenza del sistema a verde.

³⁴ Fonte: UNI 11235: 34-36.

Quarto capitolo

La copertura a verde come strumento di gestione dell'acqua in ambiente antropico

La concezione della copertura a verde risponde, come si è avuto modo di approfondire nei capitoli precedenti, a molteplici requisiti che possono essere raggruppati non solo in relazione agli aspetti funzionali a cui è chiamata a rispondere, ma anche a un ordine di scala. Essi infatti sono strettamente connessi alla natura e alla prestazione dei vari componenti e, al contempo, fortemente legati alla configurazione del sistema e al suo rapporto con il contesto di riferimento. Per quanto la progettazione della copertura a verde sia essenzialmente vincolata alle condizioni geografiche e climatiche essa non può trascurare di considerare la natura del tessuto edilizio in cui opera l'intervento poiché, proprio in relazione a esso, può dare luogo a interessanti ricadute non ancora del tutto indagate. Se le prestazioni alla scala edilizia sono state oggetto di studi che hanno messo in luce i benefici e i limiti, in particolare di carattere termoigrometrico, il contributo offerto dall'impiego di coperture a verde a livello urbano rappresenta ancora un tema da approfondire alla luce di diversi spunti. Il principale motivo di interesse deriva proprio dalla concezione stessa della copertura a verde che tende a riprodurre in modo artificiale un suolo naturale, risultando tuttavia limitata per estensione e possibilità di interazione giacché confinata dalla dimensione e dalla geometria del sistema di chiusura superiore.

L'analisi dei principali componenti della stratigrafia proposta nel precedente capitolo ha messo in luce come ogni materiale ed ogni elemento siano coinvolti direttamente o indirettamente nella "gestione dell'acqua" presente sulla copertura. Ciò ha dato evidenza al fatto che l'acqua è - a differenza di quanto avviene per qualunque altro tipo di tetto - un "componente aggiuntivo" della copertura, sempre presente, a cui è attribuito un ruolo attivo e complesso. Quello che in tutte le altre soluzioni è considerato un elemento da allontanare il più rapidamente possibile per evitare il rischio di infiltrazioni, degradi, ecc., nella copertura a verde diviene l'invisibile protagonista dei principali benefici derivanti dall'adozione di questa tecnologia oltre che l'indispensabile attore che permette l'effettiva

riproduzione, seppur artificiale, di un suolo naturale. La principale differenza tra natura e artificio risiede, tuttavia, proprio nella scala e nelle condizioni al contorno con cui i fenomeni legati alla presenza dell'acqua avvengono secondo una sequenza ciclica indispensabile all'equilibrio del sistema.

Questo capitolo approfondisce il ruolo che la copertura a verde può assumere quale strategia di controllo e gestione della risorsa idrica a livello urbano e, al contempo, tenta di mettere in luce le molte potenzialità che derivano dalla sua applicazione.

Il fondamento da cui muove l'intera riflessione è che, allo stesso modo in cui il sistema edilizio dev'essere messo in rapporto con l'ambiente costruito di appartenenza, la copertura a verde - in quanto riproduzione del suolo - possa essere posta in relazione alla superficie costruita del suo intorno. O, in altri termini, che possa essere oggetto di una riflessione che partendo dalle condizioni e dalle caratteristiche del tessuto urbano, in particolare quello connettivo, miri a trasformare la superficie delle coperture in elemento di controllo delle precipitazioni e, al tempo stesso, in *buffer* termoigrometrico finalizzato alla riduzione dell'effetto isola di calore.

Questa strategia, che assume consistenza se inserita in un più ampio programma di definizione e pianificazione dell'uso del suolo urbano, trova nel rapporto tra acqua e superficie orizzontale (naturale o artificiale) il suo fulcro non solo concettuale, ma anche funzionale.

Per comprendere pienamente le implicazioni connesse e l'effettivo ruolo della copertura verde nella gestione della risorsa idrica è tuttavia necessario assumere come punto di partenza il fatto che, allo stato attuale, la conformazione del suolo urbano è tale da alterare significativamente il naturale ciclo dell'acqua.

IV.1

L'alterazione del ciclo dell'acqua nelle città: cause ed effetti

In un territorio urbanizzato l'acqua rappresenta al contempo una risorsa e un'insidia: è indispensabile per tutte le attività antropiche, ma può essere causa delle peggiori catastrofi. L'acqua utilizzata nelle aree urbane viene prelevata dal sottosuolo e gestita attraverso la rete idrica degli acquedotti che la distribuiscono, "potabile", per tutti gli usi civili: domestici, industriali, agricoli, ecc. Per tutte queste funzioni l'acqua è deviata dai suoi percorsi spontanei, raccolta e trattata, trasferita e sfruttata, quindi inquinata, allontanata, e infine depurata e reimpressa nei corsi che raggiungono il mare. Nei territori antropizzati è necessario anche proteggersi dall'acqua meteorica, e per attuare quest'azione di difesa l'uomo "chiude" le proprie costruzioni attraverso superfici impermeabili.

Sia l'uso dell'acqua che la difesa da essa generano una serie di processi che ne alterano significativamente la naturale circolazione dall'atmosfera al suolo e, viceversa, dal suolo all'atmosfera. Questa circolazione è definita come ciclo idrologico e, a scala planetaria, è regolata da un'equazione di bilancio (figura IV.1 nella pagina successiva). Il ciclo idrologico descrive i continui scambi di massa idrica fra la terra, l'atmosfera, le acque superficiali, le acque sotterranee e gli organismi, comprendendo tutti i passaggi di fase dell'acqua.

Come è noto i processi principali che regolano la circolazione dell'acqua sono due, inversi fra loro: l'evaporazione e la condensazione.

L'evaporazione è il trasferimento dell'acqua dai corpi idrici superficiali (oceani, mari, fiumi, laghi, ecc.) all'atmosfera, spostamento che implica il passaggio di stato dalla fase liquida a quella gassosa. La condensazione è il trasferimento dell'acqua dall'atmosfera al suolo o agli oceani per effetto delle precipitazioni. Il passaggio di fase da gassoso a liquido avviene nelle nubi (che sono delle masse di goccioline d'acqua in sospensione nell'atmosfera) e la precipitazione avviene sotto forma di pioggia, grandine, neve o nebbia. Nel momento in cui l'acqua raggiunge il suolo essa partecipa ad altri processi che sono fondamentalmente determinati dalla morfologia dei territori e dalle caratteristiche fisiche e chimiche dei terreni.

La figura IV.2 illustra i percorsi che intraprende l'acqua dolce precipitata:

IL CICLO IDROLOGICO

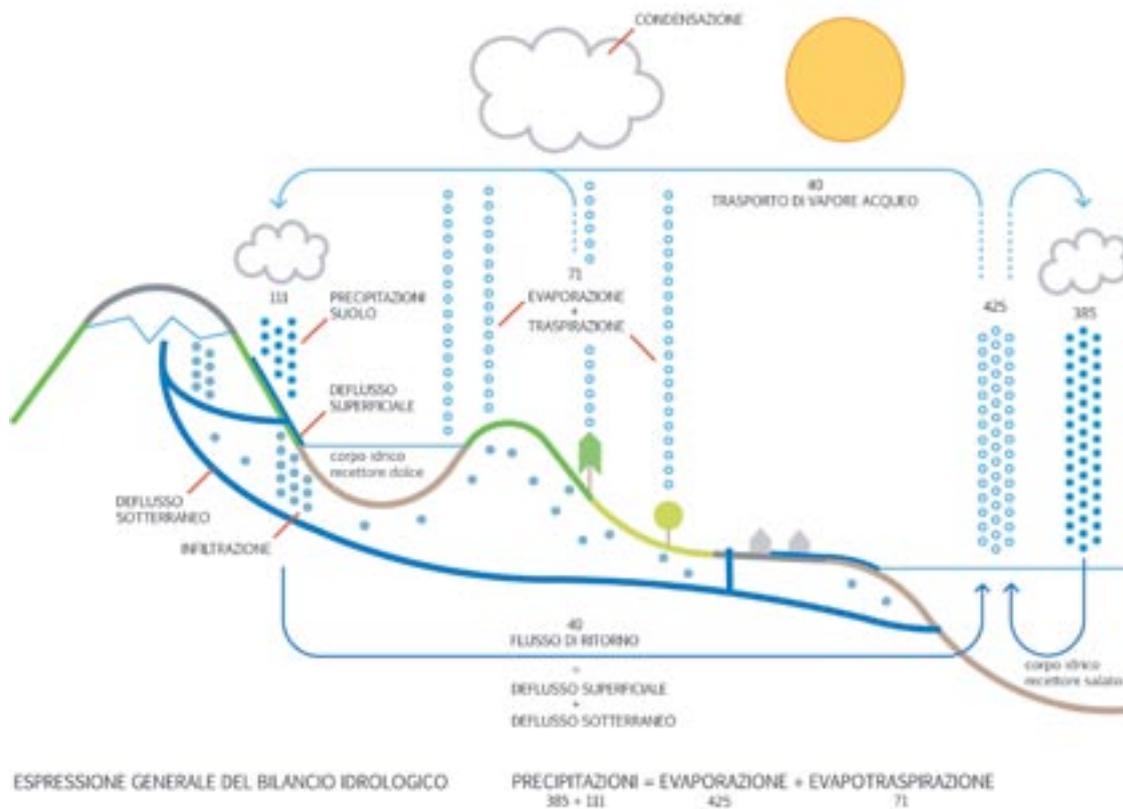


Figura IV.1: Il ciclo idrologico

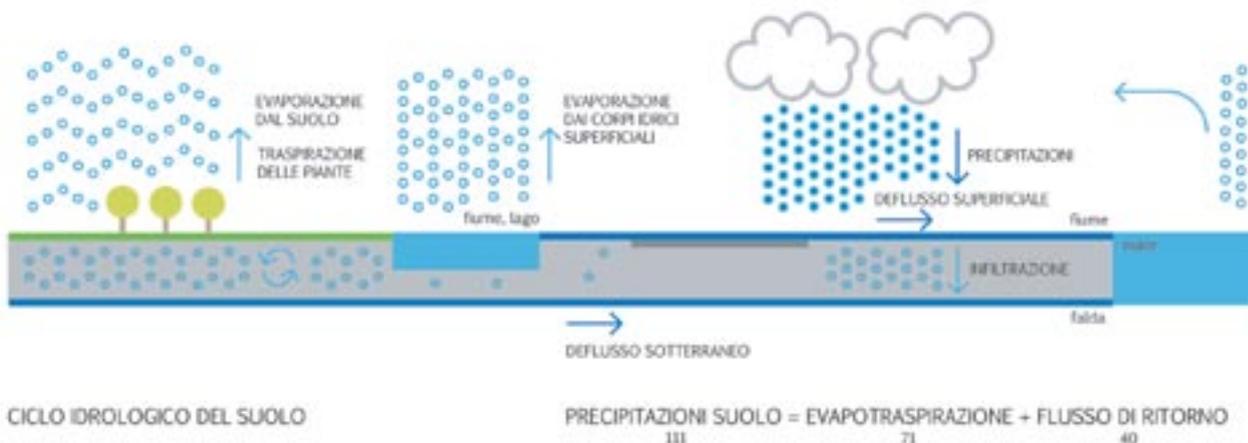
L'acqua è l'unica risorsa del pianeta che non si esaurisce a seguito del suo sfruttamento: infatti la sua massa totale (distribuita allo stato liquido nei corpi idrici superficiali e profondi, nei mari e negli oceani, allo stato solido nei ghiacciai e allo stato gassoso nell'atmosfera) non varia a seguito dell'estrazione e dell'uso da parte del suolo. Il ciclo idrologico, che descrive gli spostamenti dell'acqua all'interno dell'idrosfera terrestre, è regolato dai fenomeni in equilibrio fra loro

che includono i passaggi di fase. Complessivamente tutta l'acqua che precipita sul suolo e sugli oceani è pari a tutta l'acqua che evapora dal suolo e dagli oceani. I numeri citati nel grafico si riferiscono a volumi d'acqua e sono espressi nell'unità di misura 10^3 chilometri all'anno.

Figura IV.2: Segmento del ciclo idrologico che riguarda il suolo

L'uso dell'acqua da parte dell'uomo avviene nel segmento del ciclo idrologico compreso

fra il deflusso superficiale o sotterraneo, a seguito delle precipitazioni sulla terra, e l'affluenza dei corpi idrici recettori al mare. All'interno di questo tratto del ciclo l'acqua segue svariati percorsi spontanei e qui si rende disponibile all'estrazione per usi civili. Nel momento in cui percorre questo tratto l'acqua è di elevata qualità in quanto ha attraversato lo strato biologicamente attivo del suolo (cioè il primo metro di spessore del suolo) che attua un processo di depurazione chimica e di filtrazione meccanica.



raggiunta la superficie del suolo, l'acqua può percorrere tre vie: percolare sulla sua superficie (deflusso), in parte penetrare nel terreno (infiltrazione) e in parte ritornare nell'atmosfera sotto forma di vapore (evapotraspirazione nel caso in cui si sia infiltrata nei terreni ricoperti da vegetazione).

Il deflusso superficiale (o scorrimento) include tutte le modalità con cui l'acqua si muove sulla superficie del suolo in pendenza verso il mare; torrenti, fiumi, laghi sono i corpi idrici recettori superficiali in cui l'acqua scorre per un certo intervallo di tempo: una certa parte del deflusso raggiunge il mare, ma la maggior parte evapora lungo il tragitto (come si legge dall'equazione del ciclo idrologico del suolo riportato nella figura IV.1 della pagina a fianco).

L'infiltrazione è l'assorbimento d'acqua operato dal terreno e l'aliquota di infiltrazione dipende fondamentalmente dalla permeabilità del suolo o della roccia. L'infiltrazione può essere superficiale o profonda: quella superficiale favorisce l'approvvigionamento idrico alla vegetazione e l'evaporazione diretta dal suolo, mentre l'infiltrazione profonda alimenta le falde e partecipa al deflusso sotterraneo delle acque ed è alla base della disponibilità idrica agli usi civili.

Infine l'evaporazione e la traspirazione trasferiscono all'atmosfera l'acqua trattenuta dagli strati superficiali del suolo, quella assorbita dalle piante e l'acqua dei corpi idrici superficiali, in quantità direttamente proporzionali alle temperature dell'aria, all'umidità relativa e alla forza del vento.

In ciascuno di questi segmenti del ciclo idrologico l'acqua può permanere per intervalli di tempo differenti e queste variazioni presentano delle ricadute precise per l'assetto dei territori e per la capacità di autodepurazione dell'acqua stessa.

Dalla conoscenza dei movimenti spontanei dell'acqua al suolo è possibile comprendere le problematiche generate a carico del ciclo idrologico negli ambienti antropizzati. L'urbanizzazione di un territorio è per molti versi un processo strettamente legato all'artificializzazione del suolo la cui principale ricaduta è l'impermeabilizzazione della sua superficie; nelle aree costruite, infatti, la maggior parte delle superfici orizzontali risulta per lo più compartimentata, incapace cioè di scambiare acqua e aria con l'atmosfera. Non solo il tessuto connettivo, che comprende le strade, le aree di parcheggio, i percorsi pedonali, le zone di sosta, ecc., ma anche le coperture, che rappresentano l'impronta del suolo trasferita in quota, sono superfici realizzate con materiali fondamentalmente sigillanti come l'asfalto, la pietra, il calcestruzzo e il laterizio. La chiusura del suolo è un'operazione costruttiva che presenta quindi una serie di effetti negativi ad ampia scala e che coinvolgono in prima battuta proprio le vie dell'acqua. La figura IV.3 nella pagina seguente mostra la variazione del bilancio idrico annuale di un territorio in dipendenza dal livello di urbanizzazione del suolo: in un'area naturale (icona in alto a sinistra) il 50% dell'acqua meteorica precipitata penetra nel suolo, di questa porzione il 25% è trattenuto dagli strati superficiali del terreno e un'eguale quantità si infiltra negli strati più profondi andando ad alimentare le falde; il 40% subisce il passaggio di fase allo stato gassoso per effetto dell'evapotraspirazione e solo il 10% defluisce direttamente verso un corpo

LE ALTERAZIONI DEL CICLO IDROLOGICO

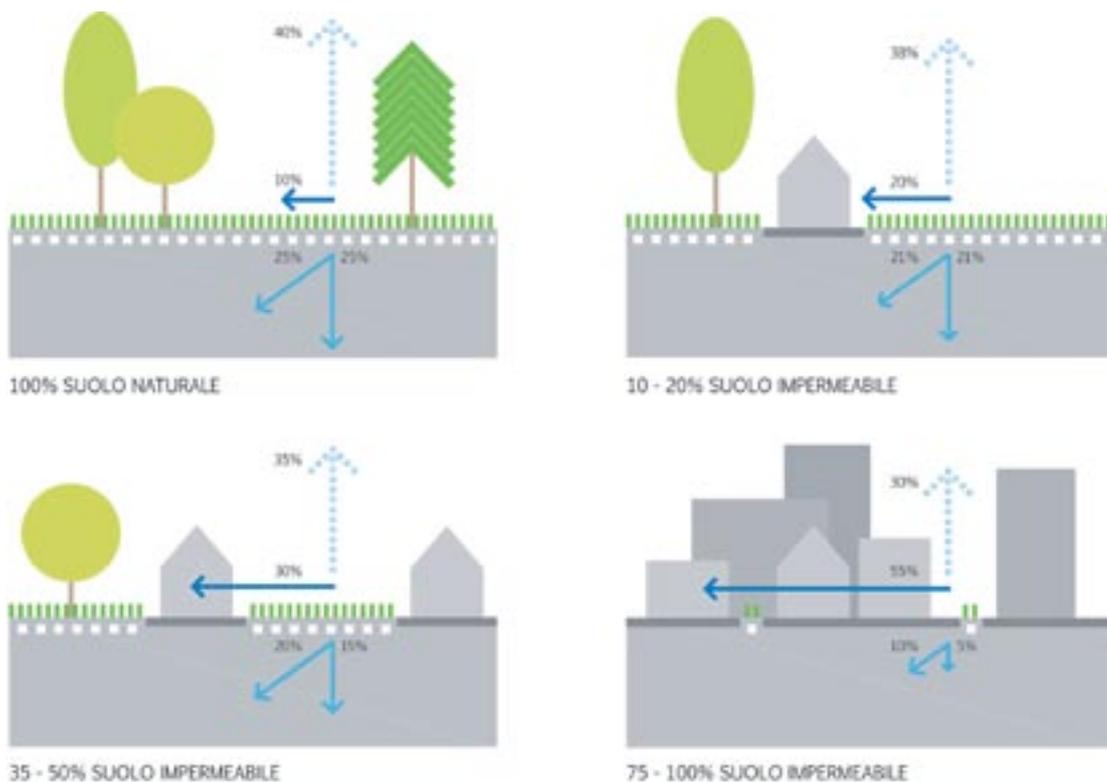


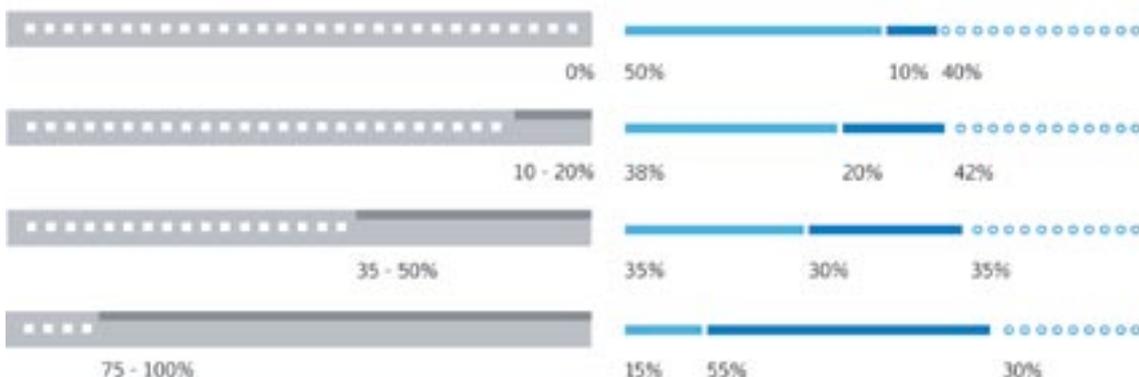
Figure-serie IV.3: Variazione del bilancio idrico in relazione all'impermeabilizzazione del suolo

Man mano che la percentuale di impermeabilizzazione del suolo cresce il bilancio idrologico varia: alla crescita del deflusso superficiale corrisponde una diminuzione dell'evaporazione e dell'infiltrazione. Nelle condizioni di impermeabilità superiori al 75% (condizioni comuni alla maggior parte delle città) l'infiltrazione si riduce al 15% rispetto al 50% di un suolo naturale.

Il bilancio idrologico negli ambienti antropizzati è caratterizzato da una significativa riduzione dell'infiltrazione che corrisponde in larga parte al crescere dei deflussi superficia-

li, ma anche alla riduzione dell'evaporazione, processo che garantisce il contenimento delle temperature. Le alterazioni del ciclo idrologico generate dall'attività antropica innescano una serie di danneggiamenti in primo luogo alla risorsa idrica globale, e secondariamente, ma non per importanza, al suolo, al microclima e alla biosfera in generale.

Fonte: AA.VV. *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*, Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG, 15° Federal agencies of the U.S.)



idrico recettore. Man mano che le superfici orizzontali di un'area vengono costruite e pavimentate (icone in alto a destra e al centro a sinistra) il bilancio idrico si modifica, i volumi di deflusso aumentano mentre l'infiltrazione complessiva e l'evapotraspirazione diminuiscono. Considerando le zone urbane densamente edificate (icona al centro a destra), in cui il suolo è costituito quasi totalmente da superfici impermeabili, l'infiltrazione si riduce al 15% del volume d'acqua precipitata, l'evapotraspirazione al 30%, laddove il deflusso rappresenta il 55%. Questi dati dimostrano la diretta correlazione tra la riduzione dell'infiltrazione e dell'evapotraspirazione e l'incremento del deflusso superficiale generato dall'urbanizzazione.

L'icona in basso della figura IV.3 offre una sintesi dei dati: i volumi di deflusso di un'area urbana, le cui superfici costruite o pavimentate rappresentano più del 75% della superficie orizzontale totale, sono cinque volte superiori ai volumi di deflusso di un'area vegetata. A tale alterazione corrisponde una diminuzione dell'infiltrazione di $\frac{2}{3}$, soprattutto dell'infiltrazione profonda, e una riduzione dell'evapotraspirazione di $\frac{1}{4}$, non pari, quindi, alla quota di riduzione dell'infiltrazione.

Questo significa che l'impermeabilizzazione del suolo altera in modo maggiormente significativo l'infiltrazione rispetto all'evaporazione, dato che trova conferma nell'osservazione del ciclo idrologico naturale (figura IV.1 a pagina 178) da cui si evince che una consistente parte di acqua dei corpi idrici superficiali, associabili al deflusso superficiale urbano per posizione rispetto al suolo, evapora prima di raggiungere il mare (piovono sul suolo 111·103 chilometri cubi ed evapo-traspirano 71·103 chilometri cubi). Gli effetti negativi dell'impermeabilizzazione del suolo, quindi, riguardano prevalentemente la drastica riduzione dei fenomeni generati dall'infiltrazione del suolo.

Tutti questi fenomeni, di cui si conosce perfettamente l'origine, non sono però descrivibili attraverso valori uniformi, in quanto ciascuna città e ciascun territorio presentano peculiarità idrogeologiche, condizioni climatiche e sfruttamento della risorsa idrica caratteristici, né possono essere ricondotti a una scala di appartenenza dai confini precisamente delimitabili, sia perché l'acqua presenta ciclicità e percorsi di estensioni differenti, sia perché il degrado del ciclo idrologico è determinato da un insieme di cause ed effetti strettamente interdipendenti che, sommandosi fra loro, si manifestano con intensità e gravità via via superiore in comparti territoriali più o meno lontani dal luogo di origine del problema. Tuttavia gli effetti dell'impermeabilizzazione possono essere raggruppati e definiti secondo le note problematiche riguardanti il dissesto idrogeologico, che proprio dall'edificazione e dallo sfruttamento del suolo traggono la loro origine.

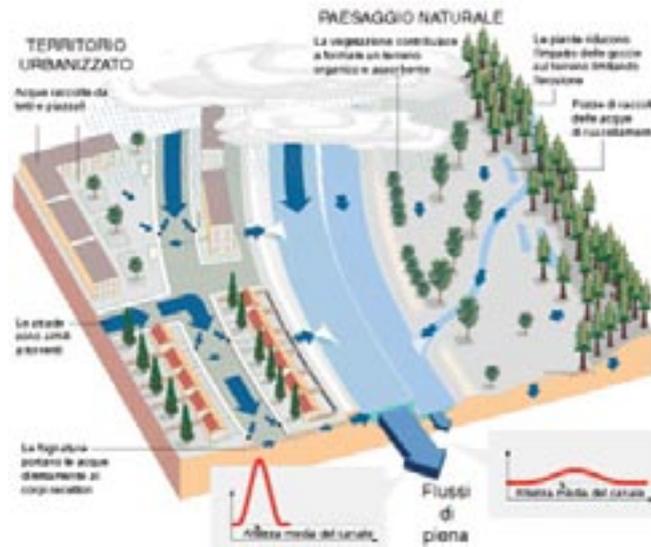
La figura IV.4 nella pagina seguente sintetizza tali effetti: innanzitutto la riduzione dell'infiltrazione inibisce l'azione di filtrazione operata dal suolo: infatti il primo metro di terreno a contatto con l'atmosfera è uno strato di materiale terroso e poroso, microbiologicamente attivo, capace di trattenere meccanicamente particelle e assimilare sostanze inquinanti e nutrienti contenute nell'acqua piovana, che di tali sostanze si arricchisce già nel suo percorso di caduta dall'atmosfera al suolo. Nell'acqua che ha solcato i suoli urbani

Figura IV.4: Gli effetti dell'urbanizzazione sul bilancio idrologico

La riduzione dell'infiltrazione causata dall'impermeabilizzazione del suolo è responsabile dell'incremento dei flussi di piena dei corpi idrici recettori e di conseguenza di fenomeni erosivi.

La mancata infiltrazione nel suolo favorisce inoltre la circolazione di acque inquinate e un carico idrico eccessivo per le reti di drenaggio urbano.

Fonte: www.infosardegna.com



“si riscontra prevalentemente la presenza di cloruri, solfati, sodio, potassio, ammoniaca, calcio e magnesio [...]. L'acqua piovana contiene anche piombo, zinco e IPA”³⁷. Oltre a queste sostanze se ne aggiungono altre nel momento in cui l'acqua viene a contatto con le pavimentazioni e con le coperture, in particolar modo negli ambienti urbani dove alle superfici edilizie aderiscono particelle di sostanze inquinanti generate dalle emissioni degli edifici e dei mezzi di trasporto.

La tabella IV.1 offre una sintesi della qualità chimica delle acque provenienti da superfici diverse: in linea di massima le acque urbane che hanno percorso le strade sono molto più degradate rispetto a quelle provenienti dalle coperture, in particolare per quanto riguarda i parametri che comprendono le sostanze sospese e i COD³⁸. L'acqua che scorre sulle superfici costruite raccoglie queste e varie altre sostanze inquinanti e le convoglia nelle reti di drenaggio che frequentemente scaricano direttamente nei corpi fluviali

Tabella IV.1: Inquinanti contenuti nell'acqua piovana in relazione alle superfici di contatto

L'acqua che scorre lungo le strade è fortemente inquinata in quanto nel suo percorso porta via con sé sostanze rilasciate dai fumi dei gas di scarico e depositate sulle differenti pavimentazioni urbane. Differentemente l'acqua proveniente dalle coperture è meno inquinata, anche se presenta concentrazioni di sostanze inquinanti, come il piombo, che necessiterebbero di filtraggio prima di raggiungere i corpi fluviali.

Fonte: Abram, “Giardini pensili”: 28.

³⁷ Abram, “Giardini pensili”: 28

³⁸ Acronimo di *Chemical Oxygen Demand* (letteralmente “domanda chimica di ossigeno”) descrive il grado di inquinamento da parte di sostanze ossidabili.

PARAMETRO INQUINANTE [mg/l]	COPERTURE	STRADE	FOGNATURE MISTE
Conducibilità [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	95	130	-
Sostanze sospese	60	900	350
COD	70	250	250
Fosforo	-	3	7
Ammoniaca	-	-	4 - 8
Piombo	0,7	0,9	0,1
IPA	0,001	0,005	10
Caratterizzazione	poco inquinata	inquinata	molto inquinata

TIPO DI UTILIZZO DEL SUOLO	Deflusso in periodo di MORBIDA [l•Km ² /s]	Deflusso in periodo di MAGRA [l•Km ² /s]
Bosco	200	120
Improduttivo	300	80
Area urbanizzata	700	40

Tabella IV.2: Portate di piena e di magra di differenti tipi di suoli

La differenza fra le portate di piena e di magra dei suoli urbani è estremamente accentuata rispetto ai suoli inverditi. Questo significa che in città si alternano condizioni di scorrimento superficiale troppo veloci e violente a condizioni di siccità elevata. L'esito di questo fenomeno è che negli ambienti urbani l'acqua permane, in tutte le sue forme, per poco tempo.

Fonte: Abram, "Giardini pensili": 24.

senza interventi di filtrazione; l'inquinamento dell'acqua è quindi uno degli effetti principali generati dall'impermeabilizzazione del suolo. Secondariamente, come si vede nella figura IV.4, i deflussi superficiali urbani incrementano repentinamente le portate e la velocità di scorrimento dei corpi idrici recettori, sia a livello di singolo corpo fluviale, sia a livello di bacino idrografico, effetto che genera erosione del suolo e delle sponde dei fiumi, di conseguenza trasporto di materia e quindi un complessivo dissesto geologico. La tabella IV.2 sintetizza le differenze fra le portate di piena e di magra di differenti suoli antropizzati: nei periodi di morbida (ossia di ricchezza d'acqua) i deflussi di un'area boschiva sono meno di 1/3 dei deflussi di una città (200 litri per chilometro quadrato al secondo contro 700 litri). Al contrario nei periodi di magra (di scarsità d'acqua) le proporzioni si invertono: i deflussi da un'area boschiva sono 3 volte superiori dei deflussi da un'area urbana: rispettivamente 120 litri per chilometro quadrato al secondo contro 40 litri. In un suolo in prevalenza vegetato la presenza dell'acqua è complessivamente più equilibrata: se la differenza fra il deflusso nei periodi di morbida e di magra dei territori densamente piantumati non appare così significativa (da 200 a 120 litri per chilometro quadrato al secondo), nelle aree urbanizzate, invece, tale intervallo risulta molto ampio (da 700 a 40 litri per chilometro quadrato al secondo), e ciò dimostra sia che i deflussi superficiali nelle città sono molto più abbondanti, sia che nei periodi di scarsità di piogge il suolo urbano evapora la poca acqua che contiene molto rapidamente, favorendo di conseguenza l'arsura e la carenza idrica dei corpi fluviali superficiali.

A queste due problematiche, sintetizzate dalla figura IV.4, se ne aggiunge una terza molto importante che riguarda l'alimentazione delle falde sotterranee: come illustrato in precedenza dalla figura IV.3 il deflusso sotterraneo dei suoli edificati, deflusso estremamente scarso, porta a una riduzione critica dei volumi dei corpi idrici profondi (caratterizzati da un'acqua di elevata qualità in quanto filtrata), a fronte di una crescente attività di estrazione d'acqua per l'impiego nei diversi settori civili.

Ai fattori elencati si deve aggiungere che alla scala strettamente urbana l'impermeabilizzazione influisce in modo molto significativo anche sull'effetto isola di calore. Le superfici impermeabili, infatti, non possono dissipare energia solare attraverso l'evaporazione perché respingono l'acqua e pertanto trasferiscono all'atmosfera una buona parte del calore che ricevono sotto forma di radiazione infrarossa (cioè radiazione termica, calore).

**Figure-serie IV.5 nella pagina a fianco:
Mappe dell'impermeabilizzazione del
suolo di alcune città italiane**

Il colore nero utilizzato nelle mappe indica valori di impermeabilizzazione del suolo superiori al 70%. Per le città rappresentate (Brescia, Aosta, Torino, Milano, Napoli, Reggio Calabria, Cagliari e Venezia/Mestre) è la porzione prevalente del territorio. A queste superfici corrispondono valori di deflusso, evapotraspirazione e infiltrazione citati nella figura IV.3 che, per ampie estensioni quali possono essere i territori comunali di queste città, implicano alterazioni significative del ciclo idrologico le cui ricadute influenzano negativamente la qualità microclimatica ambientale.

Fonte: Ines Marinosci et al., "Analisi del processo di urbanizzazione delle città", ISPRA - Dipartimento di Stato dell'Ambiente e Metrologia Ambientale > www.areeurbane.apat.it/site/_contentfiles/00037700/37757_suolo

La quantità di superficie impermeabile del territorio è un dato strettamente monitorato sia a livello nazionale, sia a livello europeo, in quanto la sua crescita o la sua diminuzione pone in immediata correlazione causa-effetto molti dei processi negativi determinanti il degrado ambientale. In Italia per le aree metropolitane più estese i valori di impermeabilizzazione dei suoli sono censiti: dai dati recentemente pubblicati dall'Ispra³⁹ emerge che delle ventisei aree metropolitane prese in esame la superficie impermeabile presenta un valor medio del 28%: più di 1/4 delle superfici orizzontali che comprendono la città e le sue conurbazioni. Tale valore implica che nelle aree urbane centrali, dove la densità edilizia è normalmente più alta delle aree periferiche, la percentuale d'uso del suolo sia significativamente elevata; questo emerge dalle figure della serie IV.5 che mettono in rilievo i valori di uso del suolo di alcune fra le città più grandi d'Italia: le superfici nere corrispondono a una impermeabilizzazione superiore al 70% e rappresentano il colore prevalente dei territori considerati.

Un dato negativo è evidenziato nelle figure IV.6 e IV.7 della pagina seguente: in un arco di tempo di 10 anni, dal 1998 al 2007, tutte le aree metropolitane più estese d'Italia hanno registrato un aumento procapite delle superfici classificate "impermeabili", aumento probabilmente non bilanciato da opportuni interventi di gestione dell'acqua meteorica e di ripristino dei corridoi verdi urbani. Nei dieci anni il processo di crescita dell'uso del suolo si è manifestato con una media di 2 metri quadri all'anno per ciascun abitante e con punte di valori superiori a 4 metri quadri (a Parma, Venezia, Potenza e Foggia).

In sintesi l'alterazione del segmento del ciclo idrologico compreso fra le precipitazioni al suolo e il mare accelera il percorso dell'acqua e "il deflusso superficiale generato dalle superfici delle aree edificate, considerato il processo dominante nella formazione dei picchi di flusso a seguito degli eventi meteorici"⁴⁰, causa alterazioni negative non solo e non semplicemente all'ambiente costruito, direttamente responsabile dell'innalzamento dei volumi di deflusso, ma anche al territorio, procurando un complessivo dissesto idrogeologico, e alla risorsa idrica.

³⁹ L'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) è un istituto che coordina l'operatività dell'Agenzia per la protezione dell'ambiente, è vigilato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ed è stato istituito con la legge 133 del 2008, sostituendosi l'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi tecnici).

⁴⁰ AA.VV., "Introduction to the special issue on urban hydrology", *Journal of Hydrology*, 299 (2004): 163.

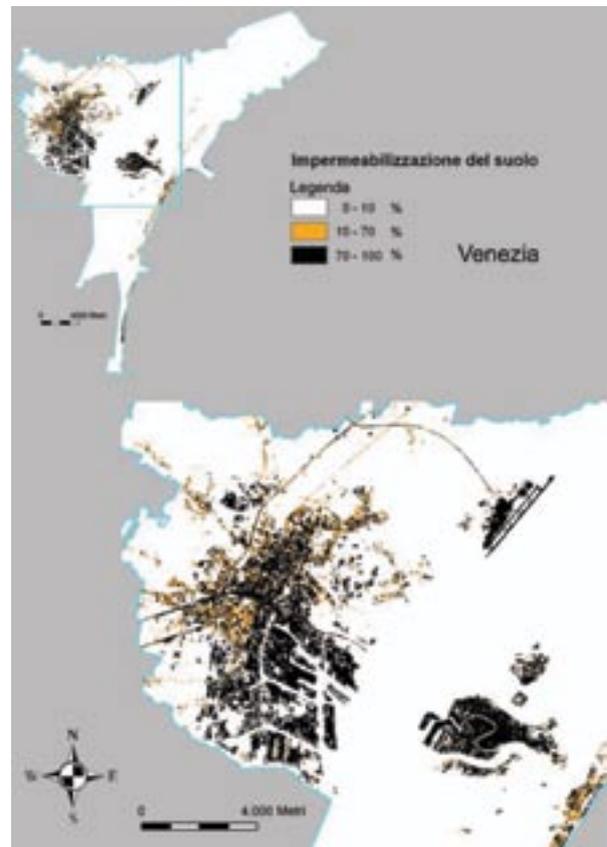
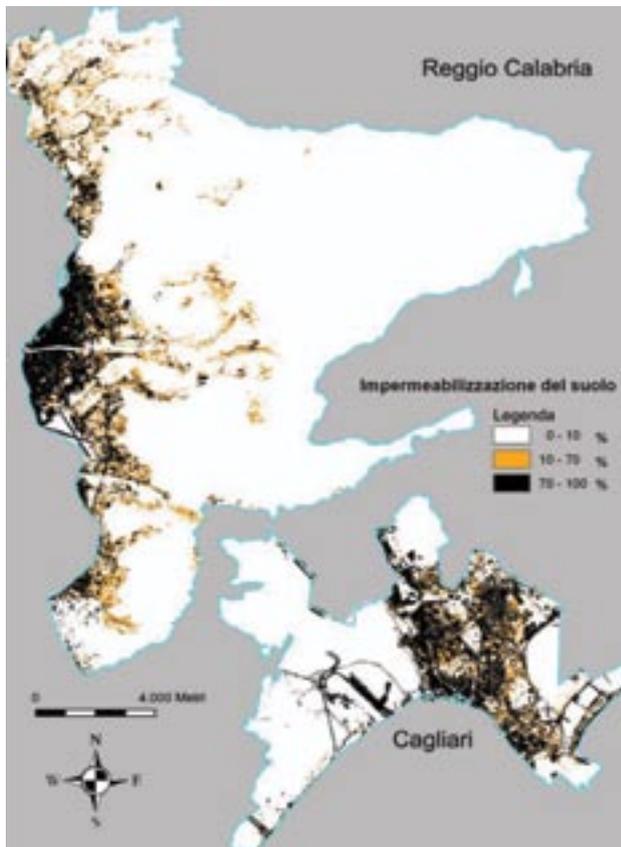
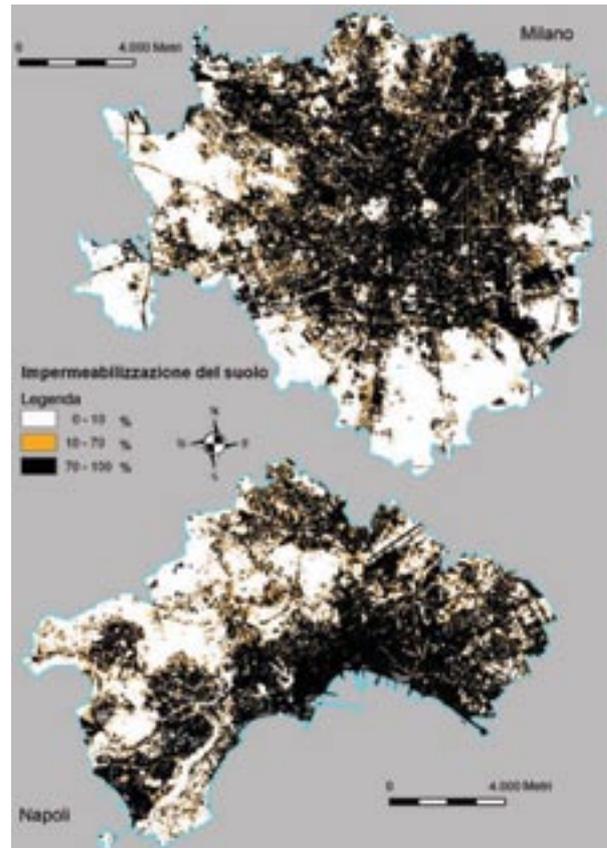
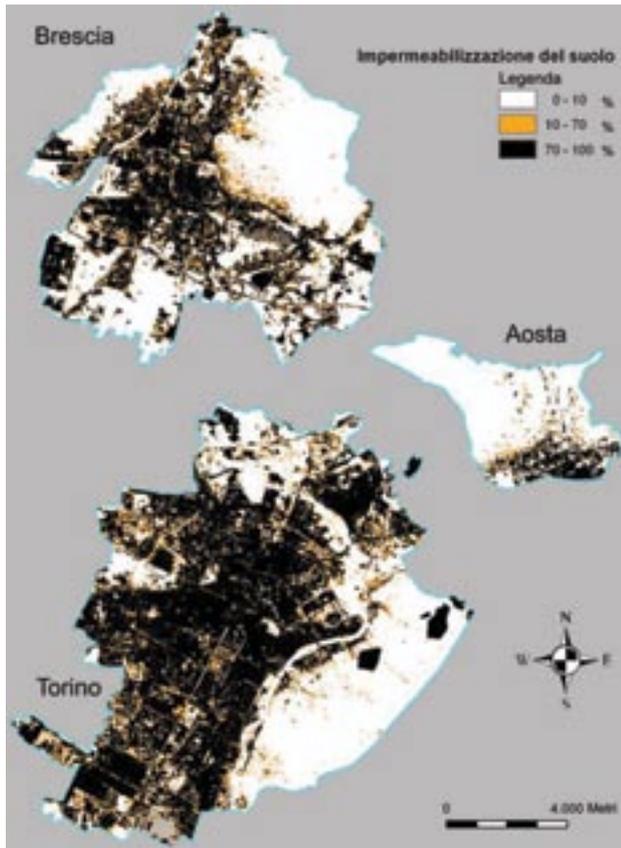


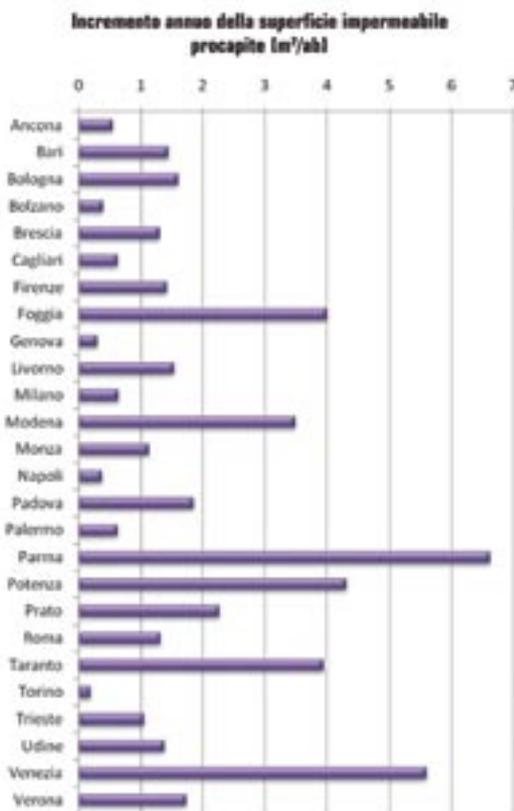
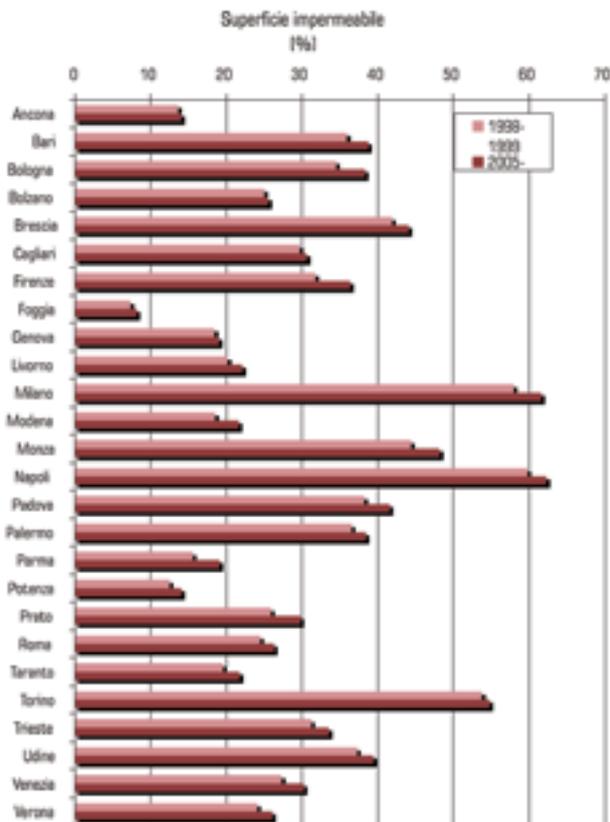
Figure IV.6 e IV.7: Aumento percentuale e pro-capite della superficie impermeabile delle aree metropolitane italiane

L'impermeabilizzazione del suolo è un valore in crescita in tutte le ventisei aree metropolitane interessate da questa statistica. Dal 1998 al 2007 la media dell'aumento del suolo impermeabile è stata del 2,1%, con punte del 4,5% a Firenze, del 3,8% a Monza, del 3,95% a Prato.

Confrontando le barre rosse del grafico con i valori riportati nell'asse delle ascisse emerge che le aree metropolitane di Milano, Napoli e Torino presentano un territorio impermeabilizzato complessivamente superiore al 50% (Milano 61,6%, Napoli 62,3%, Torino 54,7%); ciò significa che, all'interno dell'area metropolitana, nel centro storico e nella prima periferia, sottratte le superfici dei corpi fluviali, dei rilievi e di qualche parco urbano, le superfici orizzontali sono completamente sigillate.

Inoltre la tendenza ad accrescere i territori edificati delle aree metropolitane è in aumento: l'incremento annuo di superficie impermeabile procapite registra punte superiori ai 5 metri quadri a Parma e a Venezia/Mestre. Dal 1998 al 2007 l'aumento medio annuo di superficie impermeabile procapite è stato di 2 metri quadri: questo significa, ad esempio, che un'area metropolitana come quella di Padova, popolata da 450.000 persone, ha incrementato il suo suolo impermeabile di 9 chilometri quadrati in 10 anni, valore che corrisponde al 10% dell'estensione del territorio comunale (pari a 92,85 chilometri quadrati).

Fonte: ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, "VI Rapporto sulla Qualità dell'Ambiente Urbano", 2009: 27.



IV.2

L'importanza di regimentare l'acqua negli ambienti urbani: le opportunità della copertura a verde

Dato il carattere di sostanziale irreversibilità dell'urbanizzazione le possibilità di salvaguardia della risorsa idrica e di difesa da essa presentano molte limitazioni: l'efficienza dell'infrastruttura dell'acqua, ossia delle reti e delle fognature, che pur rappresenta un'azione importante per non vanificare l'energia spesa nei processi estrattivi e per ridurre la contaminazione da inquinanti dei corpi fluviali, non può essere considerata l'unica soluzione alle problematiche inerenti alla disponibilità d'acqua. Altre strategie progettuali e gestionali, da cui dipendono anche la difesa del territorio e la qualità ambientale delle città, devono essere messe in campo per salvaguardare la ciclicità dell'acqua.

L'Agenzia Europea dell'Ambiente⁴¹ ha recentemente pubblicato un'analisi dettagliata dello stato in cui versano le risorse idriche dei vari Paesi membri della Comunità Europea, fornendo contestualmente linee guida alle politiche di salvaguardia e ripristino del ciclo idrologico. La figura IV.8 nella pagina seguente mostra la sintesi della relazione.

Lo schema si basa sulla valutazione di una struttura DPSIR (*Driving Force* → *Pressure* → *State* → *Impact* → *Response*⁴²): questo tipo di modello è stato elaborato proprio dall'AEA al fine di approcciare lo studio delle diverse problematiche ambientali tenendo in considerazione quei fattori legati alle attività umane difficilmente quantificabili come gli andamenti economici, le influenze culturali, le specificità dei settori produttivi, ecc. che incidono indirettamente ma in modo rilevante nel determinare la qualità ambientale di un territorio o di una nazione. Il modello descritto nella figura IV.8 impiega degli indicatori, identificati dai rettangoli contenenti una stringa al loro interno, per descrivere lo stato di una risorsa: l'indicatore è un parametro o un valore derivato da parametri, avente una stretta relazione con un dato fenomeno, in grado di fornire informazioni sulle caratteristiche dell'evento nella sua globalità.

Gli indicatori di Determinanti (*Driving Force*) descrivono gli sviluppi sociali, demografici ed economici nella società e i corrispondenti cambiamenti negli stili di vita, nei livelli di consumo e di produzione complessivi. I Determi-

⁴¹ L'AEA è un'agenzia istituita dall'Unione europea nel 1993 il cui mandato consiste in: "1. aiutare la Comunità e i Paesi membri a prendere decisioni fondate in merito al miglioramento dell'ambiente, integrando considerazioni di carattere ambientale nelle politiche economiche e progredendo verso la sostenibilità; 2. coordinare la rete europea di informazione ed osservazione ambientale". Fonte: www.eea.europa.eu/it/about-us/who

⁴² La traduzione è: Determinanti → Pressioni → Stato → Impatti → Risposte

Figura IV.8: Struttura DPSIR della risorsa idrica

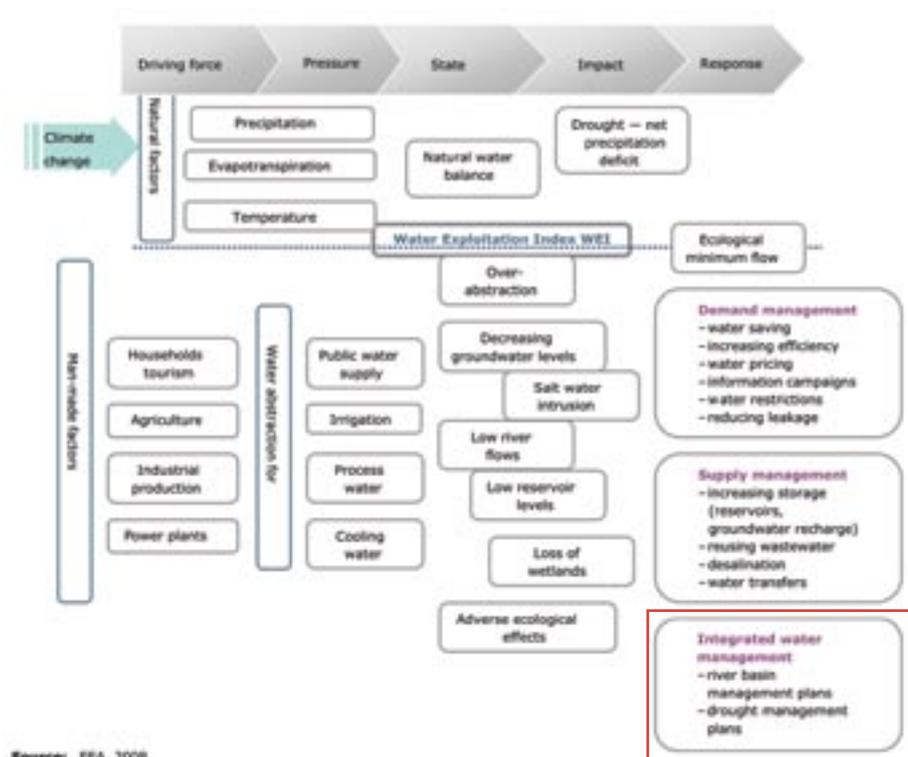
La struttura DPSIR, formalizzata dall'European Environment Agency, è in grado di descrivere la qualità di una certa risorsa ambientale sulla base di indicatori che quantificano lo stato complessivo della risorsa e le cause e gli effetti dell'impiego della stessa da parte dell'uomo, fornendo risposte utili a pianificare interventi territoriali di salvaguardia.

Per quanto riguarda la risorsa idrica, è stata compilata una struttura DPSIR che ha messo in evidenza una serie di interventi necessari (colonna di destra, titoli evidenziati in violetto: "demand management", "supply management", "integrated water management"). All'interno dell'ultima voce "integrated water management" (riquadro rosso) sono compresi i sistemi integrati di gestione dell'acqua:

1. piani di gestione dei bacini fluviali;
2. piani di gestione della siccità.

Entrambi i piani di gestione includono l'impiego di superfici edilizie orizzontali permeabili: le coperture a verde, che appartengono a questa categoria, sono fra le più efficaci in quanto replicano prestazioni simili a quelle di un suolo naturale.

Fonte: European Environment Agency Report, "Water resources across Europe - confronting water scarcity and drought", EEA Report 2, 2009 > www.eea.europa.eu > water > press room



Source: EEA, 2008.

nanti sono la crescita della popolazione, i fabbisogni e le attività degli individui. Escludendo i Determinanti naturali (precipitazione, evapotraspirazione e temperature) che generano la sequenza conosciuta del ciclo idrologico, e di cui è segnalato un deficit idrico a causa dei supposti cambiamenti climatici, i Determinanti antropici citati, cioè i fattori influenti sulla disponibilità e la qualità della risorsa idrica sono l'agricoltura, i consumi d'acqua, la produzione industriale e la produzione di energia.

Gli indicatori di Pressione descrivono in generale l'uso di una risorsa e per quanto riguarda l'acqua sono citati gli usi dei corrispettivi Determinanti, vale a dire il rifornimento idrico per gli usi civili, l'irrigazione, l'acqua dei processi produttivi e l'acqua per il raffreddamento dei motori industriali in generale.

Gli indicatori di Stato forniscono una descrizione quantitativa e qualitativa dei fenomeni fisici e chimici causati dagli indicatori di Pressione: l'eccessiva estrazione, la riduzione di volume dei serbatoi sotterranei, i livelli scarsi delle portate dei fiumi, gli effetti ecologici avversi (come l'effetto isola di calore o l'erosione) e la riduzione delle aree verdi (aree umide). In questo diagramma gli indicatori di Stato corrispondono agli indicatori di Impatto che descrivono i cambiamenti dell'ambiente a causa delle Pressioni.

Infine gli indicatori di Risposta hanno il compito di fornire le modalità con cui è possibile compensare, mitigare o adattarsi ai cambiamenti nello stato dell'ambiente. Alcune risposte pongono come obiettivo quello di migliorare l'efficienza dei processi o la qualità dei prodotti attraverso l'impiego e lo sviluppo di tecnologie pulite. In questo caso le Risposte sono un insieme eterogeneo di interventi di salvaguardia della risorsa organizzati come segue:

il primo gruppo riguarda il controllo della domanda d'acqua (che include il risparmio idrico, l'aumento dell'efficienza, i controlli dell'erogazione) il secondo la fornitura (aumento della capacità di riserva degli impianti, la desalinizzazione, l'uso di acque reflue) e il terzo l'attuazione di sistemi integrati di gestione idrica (qui citati i piani di gestione alla scala di bacino idrografico e piani di gestione della siccità). Proprio in quest'ultima posizione, indicata dal riquadro rosso, sono collocate tutte le tecnologie atte a contrastare gli effetti dell'impermeabilizzazione del suolo nei territori urbani, con l'effetto di rallentare ed attenuare i deflussi superficiali e di infiltrare le acque meteoriche nel sottosuolo.

Alcuni di questi interventi, definiti nel mondo anglosassone *Storm Water Management Practices*⁴³, presentano la peculiarità di essere delocalizzati nel territorio antropizzato e per lo più autonomi rispetto alle reti di drenaggio e alle fognature. Per tali ragioni essi rappresentano una forma di gestione del ciclo idrologico urbano svincolata dalla pianificazione di interventi infrastrutturali alle reti drenanti, agli acquedotti o ai corpi fluviali, che richiedono investimenti economici ingenti da parte di enti pubblici.

La loro efficacia è effettiva ed è tanto più significativa, in termini quantitativi, quanto maggiore è la loro diffusione: fra le più comuni pratiche di gestione dei deflussi urbani si annoverano le pavimentazioni permeabili, i bacini di infiltrazione, i drenaggi superficiali, i pozzi perdenti, le zone umide, e, proprio all'interno di questo gruppo, rientrano le coperture a verde in quanto costituiscono dei "bacini sopraelevati" di raccolta dell'acqua piovana.

La figura IV.9 mostra nel dettaglio come si comporta una copertura a verde rispetto a una copertura tradizionale durante una giornata piovosa. L'asse delle ascisse riporta la sequenza temporale (in questo caso è stato considerato un intervallo di 24 ore) mentre l'asse delle ordinate riporta la quantità d'acqua via via accumulata, espressa in millimetri: la curva qui

PRATICHE DI GESTIONE DELL'ACQUA METEORICA

⁴³ tradotto letteralmente "pratiche di gestione delle acque piovane".

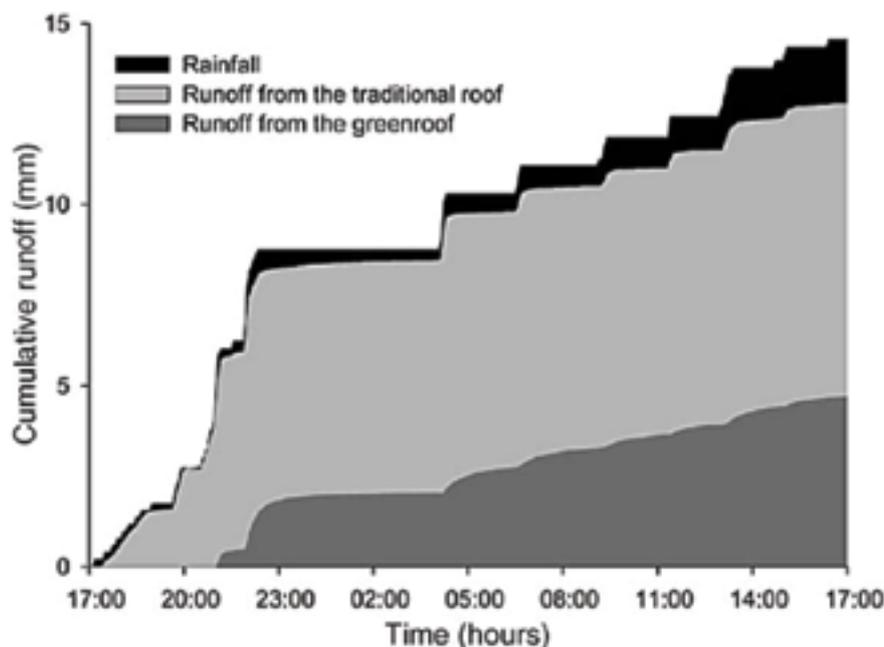


Figura IV.9: Curva della massa (cumulata) di differenti tipologie di copertura

Le curve descrivono la quantità d'acqua di deflusso da una copertura in coppi e da una copertura a verde (rispettivamente area grigio chiara e area grigio scura) in relazione all'acqua captata per effetto della serie di eventi meteorici rappresentati dall'area nera. Alla fine delle 24 ore il deflusso della copertura in coppi è quasi pari alla quantità d'acqua captata, mentre il deflusso da una copertura a verde è pari a circa un terzo dell'acqua captata.

Fonte: Jeroen Menten, Dirk Raes, Martin Hermy, "Green roof as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century" *Landscape and Urban Planning*, 77 (2006): 218.

rappresentata per ciascuna tipologia di copertura è “curva della massa”, o “cumulata”, in quanto descrive l’ammontare degli incrementi di pioggia registrati in successivi intervalli di tempo.

La curva che delimita l’area nera rappresenta la pioggia, cioè l’acqua captata dalle superfici: i tratti verticali della curva indicano il verificarsi degli eventi meteorici, mentre i tratti orizzontali indicano le interruzioni fra un evento e il successivo. La curva che delimita l’area grigio chiaro rappresenta l’acqua defluita da un tetto in coppi e, come si vede, il suo valore è di poco inferiore all’acqua precipitata; alla fine delle 24 ore infatti l’acqua rilasciata dal tetto in coppi è pari a 13 millimetri, 2 millimetri in meno rispetto all’acqua captata (15 millimetri). La curva che delimita l’area grigio scuro rappresenta l’acqua defluita da una copertura a verde, che invece è sensibilmente inferiore all’acqua captata: dopo 24 ore l’acqua rilasciata dal sistema a verde è pari solo a 5 millimetri, $\frac{1}{3}$ quindi dell’acqua precipitata.

Per avere un riscontro concreto di questi valori si possono calcolare i volumi d’acqua captati e rilasciati di un’ipotetica superficie di copertura: avendo come riferimento una superficie la cui proiezione orizzontale sia pari a 1000 metri quadri, a seguito dell’evento meteorico rappresentato nella figura IV.9, essa riceve nell’arco delle 24 ore 0,15 decimetri cubi d’acqua per ciascun metro quadro (pari a 0,15 litri d’acqua al metro quadro ovvero 150 litri per l’intera superficie). Di questa quota un tetto in coppi rilascerebbe 130 litri, evaporandone quindi 20, mentre la copertura a verde ne rilascerebbe 50, trattenendone 100.

Dei 100 litri di acqua piovana trattenuti dalla copertura a verde durante l’evento meteorico, una parte viene assorbita dalle piante per produrre e nutrire i tessuti vegetali e per la respirazione, e una parte evapora direttamente dal terreno. Il risultato è che tutta la quota di acqua trattenuta, dopo un certo periodo di persistenza nel sistema a verde, viene trasferita in atmosfera

Tabella IV.3: Coefficiente di deflusso di diverse tipologie di superfici

Il coefficiente di deflusso è il rapporto fra l’acqua rilasciata e l’acqua intercettata da una superficie, pertanto è un valore compreso fra 0 e 1. Quando il valore del coefficiente è prossimo a 1, il deflusso è maggiore, al contrario quando è prossimo a 0 il deflusso è minore: i suoli naturali inverditi hanno coefficienti di deflusso molto buoni, compresi fra 0,1 e 0,2.

Fonte: Abram, “Giardini pensili”: 27.

TIPO DI SUPERFICIE	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - ψ
Asfalto o piastre con fuga sigillata	0,85 - 0,90
Porfido con fuga sigillata	0,75 - 0,85
Porfido con fuga non sigillata	0,30 - 0,70
Impianti sportivi in materiale sintetico	0,60
Copertura inclinazione > 3°	0,90 - 1
Copertura inclinazione < 3°	0,80
Copertura con zavoratura in ghiaia	0,70
Copertura piana a verde semi-intensivo con strato culturale = 15 - 25 cm	0,30
Terra, cortile	0,10 - 0,20
Giardino, orto, area verde	0 - 0,10

Deflussi da una copertura in coppi e una copertura a verde	Pioggia = acqua intercettata [l/giorno]	Deflusso tetto in coppi [l/giorno]	Deflusso copertura a verde [l/giorno]
Deflusso	150	130	50
Coefficiente di deflusso Ψ	- - -	130/150 = 0,86	50/150 = 0,33

per evaporazione e traspirazione. Questo volume d'acqua, i 100 litri sottratti al deflusso superficiale dal substrato, è chiamato "volume di ritenzione" e per intervalli di tempo sufficientemente prolungati, ossia a scala stagionale o annuale, tale volume presenta un valore costante.

La capacità di trattenere l'acqua di una superficie si definisce "capacità di ritenzione idrica" e si esprime attraverso un valore numerico chiamato coefficiente di deflusso ψ (psi), che indica il rapporto fra la quantità d'acqua rilasciata (deflusso) e la quantità d'acqua captata dalla superficie stessa (pioggia); esso è un numero compreso fra 0 e 1 e più il coefficiente si avvicina a valori prossimi a 1 più la superficie è impermeabile, al contrario più si avvicina a un valore prossimo a 0 più la superficie è permeabile. Nella tabella IV.3 si riportano una serie di coefficienti di deflusso di diverse tipologie di superfici edilizie.

La tabella IV.4 elenca invece i coefficienti di deflusso di una copertura in coppi con inclinazione maggiore a 3° ($\psi=0,9$), e di una copertura a verde semi-intensivo ($\psi=0,3$): valori che confermano i dati forniti dalla tabella IV.3.

Il meccanismo di ritenzione idrica di una copertura a verde è dunque virtuoso perché:

1. diminuisce i volumi totali di deflusso idrico: se il suo coefficiente di deflusso è pari, ad esempio, a 0,3 la copertura rilascerà il 30% dell'acqua totale precipitata da essa captata;
2. consente la filtrazione dell'acqua: la quantità d'acqua che rilascia viene filtrata dallo strato colturale, in quanto substrato micro-biologicamente attivo al pari degli strati superficiali di suolo;
3. restituisce acqua all'atmosfera sotto forma di vapore: sempre in relazione al suo coefficiente di deflusso, l'acqua trattenuta subisce il passaggio di fase da liquido a gassoso per effetto dell'evapotraspirazione.

Rispetto agli altri interventi di infiltrazione dell'acqua inseribili in un'area urbana la copertura a verde garantisce alcuni benefici idrici e nello stesso tempo si inserisce nel segmento del ciclo idrologico dell'evaporazione e quindi partecipa indirettamente al contenimento dell'effetto dell'isola di calore. Al pari di un'area verde essa rappresenta una superficie edilizia fredda, e quindi non è responsabile della generazione dell'isola di calore.

La copertura a verde, però, opera un'ulteriore attività di controllo dell'acqua meteorica, che si evince dalla figura IV.10 a pagina 193: il grafico rappresenta la distribuzione della pioggia come un accostamento di singo-

Tabella IV.4: Calcolo del coefficiente di deflusso

Confrontando i coefficienti di deflusso di una copertura con pendenza della falda maggiore al 3° e di una copertura a verde semi-intensivo della tabella IV.3, con i valori rappresentati dalle cumulate della figura IV.9 si vede che i coefficienti corrispondono ai coefficienti corrispondono ai valori riportati nel grafico dell'esperimento di Mentès (Fonte: Mentès, "Green roof as a tool").

I VANTAGGI DELLA RITENZIONE IDRICA DI UNA COPERTURA A VERDE

li volumi di pioggia registrati a intervalli regolari. Questa curva si chiama “curva dell’intensità”, in quanto fornisce i valori della portata della pioggia nei singoli intervalli di tempo in sequenza (intervalli, in questo caso, pari a 5 minuti). La curva dell’intensità rappresenta lo stesso evento meteorico rappresentato nel rettangolo rosso del grafico in alto a destra (e della figura IV.9 spiegata in precedenza).

Attraverso questo grafico si possono formulare ulteriori considerazioni. La curva blu posta nella metà superiore rappresenta l’acqua piovuta e ciascuna colonna riporta precisamente i valori di intensità misurati ogni 5 minuti: come si vede dal grafico in questa curva essi non vengono sommati, ma considerati come singoli eventi meteorici della durata di 5 minuti e affiancati l’uno all’altro in successione temporale. La curva arancione, nella metà in basso del grafico, descrive l’intensità dei deflussi dalla copertura in laterizio, mentre la curva verde traccia l’intensità del deflusso della copertura a verde. La copertura in laterizio rilascia l’acqua intercettata circa dopo un minuto dall’inizio dell’evento meteorico e il suo valore massimo di deflusso (picco di intensità) è di poco inferiore a quello che caratterizza la pioggia (6,5 millimetri di pioggia contro 5,5 millimetri di deflusso dalla copertura in coppi). La copertura a verde, invece, reagisce in modo completamente differente: mentre la curva di deflusso dalla copertura in coppi è pressoché speculare alla curva della pioggia, la curva della copertura a verde è spostata verso destra lungo l’asse delle ascisse e questo significa che il rilascio dell’acqua avviene in ritardo rispetto al verificarsi dell’evento meteorico, precisamente dopo 15 minuti. Questo ritardo è causato dalla capacità di accumulo idrico del sistema a verde. La condizione di completa imbibizione, precedente al rilascio dell’acqua in eccesso, viene raggiunta in un arco di tempo relativamente lungo: tale fenomeno si definisce “ritardo del conferimento” e in un contesto costruito, dove la maggior parte delle superfici orizzontali allontanano rapidamente ingenti volumi d’acqua, produce il vantaggio di immettere l’acqua piovana in modo differito nei sistemi di drenaggio urbano. Un’altra proprietà che emerge dalla lettura del grafico è la così detta “riduzione dell’altezza del picco”. Confrontando le due colonne più alte della curva arancione e di quella verde, rispettivamente da 10 a 15 minuti e da 30 a 35 minuti, appare evidente che il picco della copertura a verde non solo viene conferito in ritardo, ma assume anche un valore significativamente più basso rispetto a quello della copertura in coppi: 1,5 contro 5,5 millimetri. Risulta perciò evidente che la copertura a verde non partecipa alla generazione dei picchi di deflusso delle reti di drenaggio urbano durante il verificarsi degli eventi meteorici.

Infine un’ultima proprietà che emerge dalla lettura del grafico è rappresentata dalla riduzione complessiva dei volumi d’acqua conferiti: la somma totale dei millimetri d’acqua che generano le curve di deflusso (in altre parole l’integrale delle due curve) è significativamente diverso. La copertura in coppi conferisce 16,6 millimetri d’acqua, mentre la copertura a verde 4,9 millimetri.

Queste tre proprietà (il ritardo del conferimento del picco, la riduzione dell’altezza del picco e la riduzione dei volumi di deflusso) rese evidenti dal

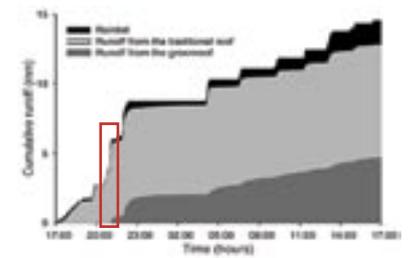
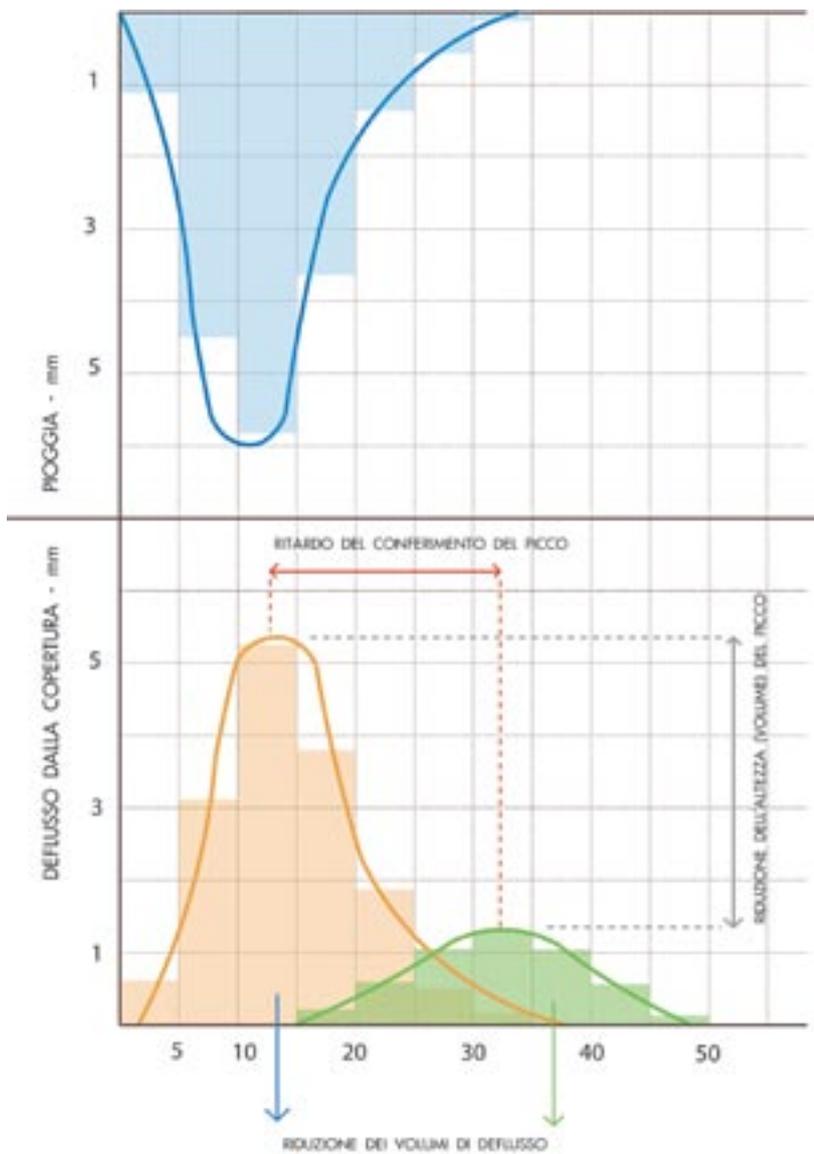


Figura IV.10: Curva dell'intensità di differenti tipologie di copertura

Le colonne azzurre (che per interpolazione danno origine a una curva) rappresentano l'intensità dell'evento meteorico, la curva arancione l'intensità del deflusso dalla copertura in coppi e la curva verde l'intensità del deflusso dalla copertura a verde. Queste curve rappresentano lo stesso evento meteorico della figura IV.9, qui riportata a destra in alto.

La curva della copertura a verde rispetto a quella della copertura in coppi e a quella dell'evento meteorico è caratterizzata dalla riduzione del valore del picco (valore indicato dalla freccia grigia) e da un certo ritardo del conferimento (valore indicato dalla freccia rossa).

confronto delle curve di intensità delle due differenti tipologie di copertura, definiscono insieme la "detenzione idrica". A livello di scala urbana i benefici della detenzione idrica delle superfici si traducono nell'attenuazione dei picchi di portata alle reti di drenaggio e nel ritardo della risposta idrologica.

Se la capacità di assorbire acqua di una copertura a verde fornisce alla scala temporale stagionale o annuale i volumi sottratti al deflusso superficiale e reimmessi quindi in atmosfera per effetto dell'evapotraspirazione, la sua analisi alla scala temporale dell'evento meteorico descrive il rallentamento con cui l'acqua piovuta raggiunge i corpi idrici recettori. La tabella IV.5 nella pagina successiva sintetizza le peculiarità appena citate.

Svariati esperimenti sono stati condotti per quantificare i volumi di ritenzione di diverse tipologie di coperture a verde. La figura IV.11 nella pagina seguente confronta una serie di dati sperimentali riguardanti la ritenzione idrica delle coperture a verde: come si vede i valori della ritenzione sono mediamente superiori al 60%. Questo significa che nell'arco

	RITENZIONE IDRICA	DETEZIONE IDRICA
SCALA TEMPORALE DI INFLUENZA	STAGIONALE - ANNUALE	DURATA DEL SINGOLO EVENTO METEORICO
EFFETTI	RIDUZIONE COMPLESSIVA DEI VOLUMI DI DEFLUSSO	- RIDUZIONE DEI VOLUMI DI DEFLUSSO - RIDUZIONE DELL'ALTEZZA DEL PICCO - RITARDO DEL CONFERIMENTO DEL PICCO
FATTORI INFLUENTI	- EVAPOTRASPIRAZIONE - STRATIGRAFIA DEL SISTEMA A VERDE	- CONTENUTO INIZIALE DI UMIDITÀ DEL SUBSTRATO - STRATIGRAFIA DEL SISTEMA A VERDE

Tabella IV.5: Differenze fra ritenzione e detenzione idrica

La capacità di regimazione idrica della copertura a verde si traduce in due differenti prestazioni. La prima è la ritenzione idrica che rappresenta l'attitudine a trattenere l'acqua, sottraendola al deflusso superficiale, nel medio/lungo termine. La seconda è la detenzione idrica che invece descrive la capacità di trattenere l'acqua nel breve termine i cui effetti sono, oltre alla riduzione dei deflussi, anche la riduzione dell'altezza dei picchi e il ritardo del loro conferimento.

di un anno il 60% dell'acqua precipitata su una copertura a verde evapora e quindi il restante 40% rappresenta il volume di deflusso, ossia la quantità d'acqua che raggiunge gli impianti di scarico. Il valore della ritenzione dipende da numerosi fattori fra cui principalmente lo spessore e la composizione della stratigrafia del sistema a verde, la pendenza della copertura, ma anche l'andamento annuale delle precipitazioni in rapporto ai fattori climatici complessivi: l'evapotraspirazione, pur dipendente dalla disponibilità di risorsa idrica, è infatti molto più intensa nelle stagioni calde. I fattori appena elencati possono variare significativamente le prestazioni idrologiche del sistema: nella figura IV.11 si rilevano valori eterogenei, ma, escludendo il caso definito "US8", tali valori documentano una capacità di ritenzione idrica di oltre il 55% dei volumi totali, con punte pari a 75-80%.

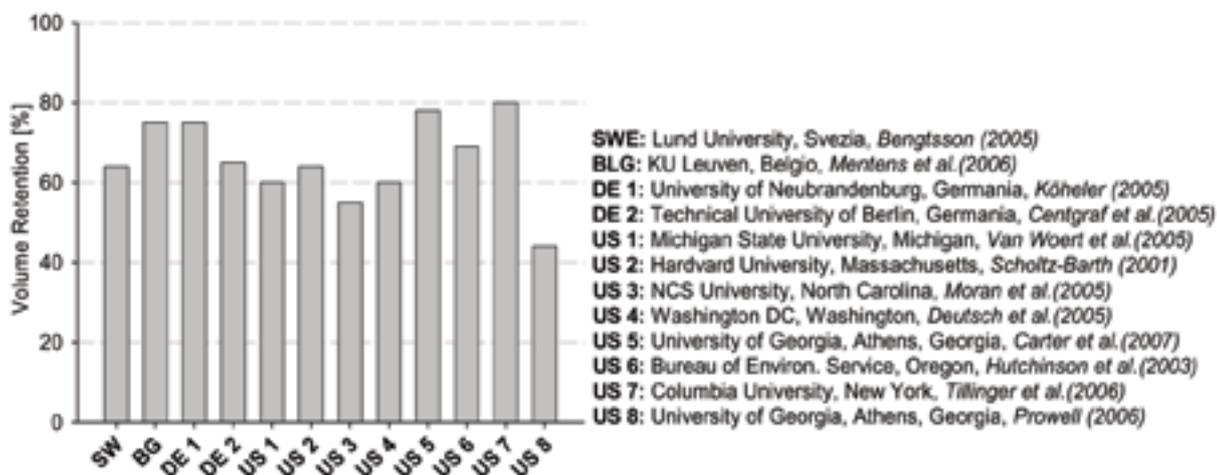


Figura IV.11: Valori di ritenzione idrica a confronto

La ritenzione idrica di una copertura a verde dipende fondamentalmente dalla stratigrafia del sistema a verde: quanto maggiore è lo spessore che la caratterizza, tanto superiori

sono le prestazioni di ritenzione idrica. I valori di ritenzione che si trovano nella letteratura scientifica sono mediamente eterogenei proprio perché si riferiscono a sistemi a verde diversi.

Fonte: Anna Palla, "Unsaturated flow in

engineered media for Hydrologic restoration", Ricerca di dottorato in fluidodinamica e processi dell'ingegneria ambientale, XXI ciclo, DICAT Università di Genova, 2009.



Figura IV.12: San Paolo del Brasile

IV.3

La permeabilità della copertura a verde: il ruolo chiave dello strato di coltivo

Per comprendere come l'impiego di differenti substrati sia influente sulle prestazioni idriche complessive della copertura a verde, è necessario descrivere alcune proprietà fisiche che caratterizzano i materiali impiegati per lo strato colturale.

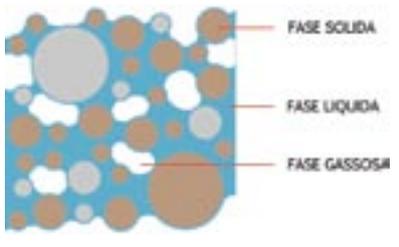
Innanzitutto un substrato, al pari di qualsiasi terreno, si definisce come un sistema trifasico, intendendo con il termine “fase” lo stato di aggregazione della materia, quindi solido, liquido e gassoso. Ciò che comunemente si intende per suolo, terra o substrato è in realtà la fase solida di questi composti, ossia l'insieme di particelle terrose inorganiche e organiche che identificano il materiale vero e proprio. Ma nella realtà un qualsiasi terreno comprende sempre nel suo volume una frazione d'acqua (fase liquida) e una frazione d'aria (fase gassosa) e precisamente la fase liquida è costituita dalla soluzione circolante, ossia dall'acqua e da tutti i sali disciolti in essa, mentre la fase gassosa è costituita dall'atmosfera del terreno, ovvero dall'aria interclusa tra le particelle terrose.

La compresenza delle tre fasi del terreno è una condizione indispensabile per la vita delle piante, infatti:

1. la fase solida assicura l'ancoraggio degli apparati radicali e contiene alcune delle sostanze inorganiche di cui le piante si alimentano;
2. la fase liquida fornisce l'approvvigionamento nutritivo e idrico (le radici delle piante assorbono i minerali solo in soluzione);
3. la fase gassosa garantisce la respirazione radicale e la vita agli organismi degradatori e ai batteri che partecipano al ciclo dell'azoto.

Se la fase solida rappresenta la componente stabile del substrato, la fase liquida è invece soggetta ad ampie fluttuazioni in relazione alla dinamica e alla portata delle acque meteoriche e all'evapotraspirazione, mentre la fase gassosa è complementare alla fase liquida, dal momento che nei pori della fase solida l'aria occupa gli spazi lasciati liberi dall'acqua.

Sulla base della definizione di substrato come sistema trifasico si evince che il rapporto equilibrato delle tre fasi è responsabile del successo della tecnologia, sia in termini di capacità agronomica (vale a dire di capacità di

	FASE	MATERIA	FUNZIONE
	SOLIDA	Particelle terrose organiche e inorganiche	Ancoraggio degli apparati radicali e fertilità
	LIQUIDA	Soluzione circolante (acqua + sali disciolti)	Approvvigionamento idrico e nutritivo
	GASSOSA	Aria	Respirazione radicale e vita agli organismi degradatori

garantire la vita alla vegetazione che abbisogna di un substrato ben aerato, ma anche fertile) sia in termini di capacità drenante e di accumulo, in quanto è ancora il substrato il principale “gestore” dell’assorbimento e dell’allontanamento dell’acqua.

Pur con un certo margine di semplificazione, si assume che la capacità di accumulo idrico è determinata dall’andamento della fase liquida del substrato in relazione alle precipitazioni meteoriche, mentre la capacità drenante e di aerazione dello strato colturale deriva dall’andamento della fase gassosa. Da ciò si deduce che quando un substrato presenta degli sbilanciamenti delle tre fasi la tecnologia causa delle problematiche di sistema: nel caso di una saturazione d’acqua persistente degli spazi vuoti del substrato (condizione che implica grande capacità di accumulo, ma scarsa capacità drenante e quindi una prevalenza della fase liquida sulla fase gassosa) le piante vanno incontro a marcescenza e asfissia; invece nel caso contrario, in cui l’acqua non venisse trattenuta dal substrato per un prolungato periodo di tempo (condizione che implica grande capacità drenante ma scarsa capacità di accumulo, ossia una prevalenza della fase gassosa sulla fase liquida), allora la vegetazione non potrebbe nutrirsi e andrebbe incontro a disidratazione.

Di conseguenza i requisiti caratteristici della copertura a verde (elencati nella tabella IV.7 della pagina successiva) sono strettamente interconnessi fra loro: la capacità agronomica, di accumulo idrico, di drenaggio e di aerazione sono correttamente differenziati e definiti a uno a uno, ma nella sostanza essi si riferiscono a “un’unica questione”, che coinvolge trasversalmente l’intera stratigrafia del sistema a verde e che è rappresentato dalla gestione idrica.

A questa considerazione si aggiunge che il substrato è il principale responsabile della realizzazione di un corretto movimento dell’acqua nella copertura a verde. Come si vede nella tabella IV.7 lo strato colturale assolve a tutti i requisiti, ad eccezione della capacità di aerazione dello strato drenante, e la sua incidenza nel loro soddisfacimento è predominante rispetto a quella degli altri strati. In primo luogo ciò accade perché lo spessore e le funzionalità del substrato sono superiori a quelle di qualsiasi altro elemento, e in secondo luogo perché la sua collocazione nella stratigrafia è immediatamente al di sotto della vegetazione e quindi è il primo materiale a ricevere l’acqua meteorica. L’acqua, infatti, nel suo spontaneo percorso di discesa all’interno della stratigrafia, attraversa prima lo strato colturale e solo successivamente l’elemento filtrante, l’elemento di accumulo idrico e di drenaggio.

Queste considerazioni emergono con evidenza confrontando la capacità di

Tabella IV.6: Le tre fasi del substrato

Ogni tipo di terreno è costituito di tre fasi, cioè tre stati di materia: solida, liquida e gassosa.

Ciascuna di esse ha una funzione specifica per le piante e dal loro rapporto equilibrato deriva l’esito positivo della tecnologia di copertura a verde. La fase solida costituisce le particelle terrose vere e proprie (che possono essere di natura organica o inorganica), la fase liquida rappresenta invece la soluzione circolante (acqua e sali disciolti), la fase gassosa, infine, rappresenta l’aria cioè lo spazio libero fondamentale per la respirazione delle radici.

REQUISITO CARATTERISTICO	DEFINIZIONE (Fonte: UNI 11235: 4)	STRATI/ELEMENTI COINVOLTI
CAPACITÀ AGRONOMICA	Attitudine di un sistema e/o di un suo componente a favorire e mantenere nel tempo le condizioni agronomiche necessarie al corretto sviluppo della vegetazione in funzione del contesto	Tutti gli strati
CAPACITÀ DRENANTE	Attitudine della copertura a consentire il drenaggio di acqua di origine naturale o artificiale	Strato colturale Elemento drenante
CAPACITÀ DI AERAZIONE DELLO STRATO DRENANTE	Attitudine dello strato drenante a mantenere una sufficiente aerazione per consentire idonee condizioni di ossigenazione	Elemento filtrante Elemento drenante
CAPACITÀ DI ACCUMULO IDRICO	Attitudine di elementi o del sistema nel suo complesso ad assumere acqua piovana o di irrigazione e di trattenerla rendendola disponibile per la vegetazione	Strato colturale Elemento di accumulo idrico
CAPACITÀ DI AERAZIONE DELLO STRATO COLTURALE	Attitudine dello strato colturale a mantenere una sufficiente aerazione per consentire idonee condizioni di ossigenazione	Strato colturale
RESISTENZA AGLI ATTACCHI BIOLOGICI	Attitudine a non subire una riduzione di prestazione a seguito della presenza di organismi viventi	Tutti gli strati

Tabella IV.7: I requisiti caratteristici della copertura a verde

I requisiti del sistema tecnologico di copertura a verde sono descritti dalla normativa italiana UNI 11235.

Essi riguardano solamente il sistema a verde, in quanto per il sistema di confinamento idrico vero e proprio la normativa rimanda ai requisiti propri dei sistemi di copertura continui.

Cinque dei sei requisiti del sistema a verde sono assolti in prevalenza dallo strato colturale.

accumulo idrico dei vari componenti di una stratigrafia di copertura a verde. La tabella IV.8 riporta un esempio di una copertura a verde estensivo a cui, per ciascuno strato, è specificato lo spessore e la capacità massima di accumulo. Confrontando i valori della quarta colonna “capacità di accumulo idrico” emerge che il volume massimo d’acqua contenuto nello strato colturale, in questo caso di spessore pari a 10 centimetri, è di 30 litri al metro quadro, mentre lo strato di drenaggio e di accumulo idrico è in grado di contenere al massimo 4 litri al metro quadro, valore addirittura inferiore della capacità di accumulo dell’elemento di protezione meccanica (che è in questa stratigrafia una stuoia di polipropilene) pari a 5 litri al metro quadro.

In termini percentuali circa il 77% della capacità di accumulo (30 litri su 39 totali) è attribuita al substrato di coltivo, il 10% all’elemento di drenaggio e di accumulo e il 13% all’elemento di protezione meccanica.

È evidente quindi che l’accumulo idrico, pur essendo una funzione assolta anche da un elemento specificatamente preposto, è in realtà garantito in modo più significativo dallo strato di coltivo.

Assunto quindi che la gestione dell’acqua di una copertura a verde è prevalentemente affidata allo strato colturale e che dal comportamento idrologico dello stesso dipendono il soddisfacimento dei requisiti caratteristici e altresì la capacità di regimentazione dell’acqua, è ora necessario analizzare l’andamento delle tre fasi di un substrato, ossia la capacità di ritenzione idrica, per stabilire le peculiarità idriche della tecnologia di copertura a verde.

Come descritto precedentemente la capacità di ritenzione idrica è l’attitudine, riferibile a un materiale, a una superficie o a un sistema tecnologico, di trattenerne l’acqua che riceve, diminuendo così i volumi di deflusso. La capacità di ritenzione idrica è al contempo responsabile di un altro

STRATIGRAFIA	COMPONENTE	SPESSORE [cm]	CAPACITÀ DI ACCUMULO IDRICO [l/m ²]	CAPACITÀ DI ACCUMULO IDRICO/TOTALE [%]
	Strato di vegetazione	Variabile ~ 6	---	---
	Strato colturale	10	30	77
	Elemento filtrante	0,6	trascurabile	---
	Elemento di accumulo idrico e di drenaggio	4	4	10
	Elemento di protezione meccanica	0,5	5	13
	Elemento di tenuta	0,5	---	---
	TOTALE	21,6	39	100

effetto, la detenzione idrica, che determina una risposta idrologica attenuata nelle quantità a una scala temporale breve. Nelle coperture a verde questa attitudine è determinata dalle caratteristiche fisiche e chimiche del substrato che costituisce lo strato colturale. La capacità di ritenzione idrica dipende fondamentalmente da due parametri fisici: la porosità e il potenziale idrico. La porosità è il rapporto fra il volume degli spazi vuoti di un substrato (di un terreno o di un suolo) e il volume totale che esso occupa; per tale motivo definisce la relazione fra la fase solida e le altre due fasi, e si esprime in percentuale: una porosità dell'80%, ad esempio, indica che l'80% di un volume di terreno è costituito da spazio libero e solo il 20% da materia solida. Lo spazio libero viene occupato dall'acqua o dall'aria in dipendenza dalla forza con cui il substrato è in grado di trattenere l'acqua.

La tabella IV.9 nella pagina seguente specifica ulteriormente questa proprietà: la porosità totale di un substrato è descrivibile come la somma di macro-pori (indicati con la lettera "M") e di micro-pori (indicati con la lettera "m"). Nei macro-pori del terreno l'acqua si muove, tende cioè a "scendere", lasciando lo spazio libero all'aria; nei micro-pori, invece, l'acqua viene tratteneuta con maggiore forza. La macroporosità e la microporosità specificano quindi la capacità di ritenzione idrica del substrato: maggiore è la percentuale della macroporosità sulla porosità totale, maggiore è la capacità drenante

Tabella IV.8: Capacità di accumulo idrico dei diversi strati di una copertura a verde

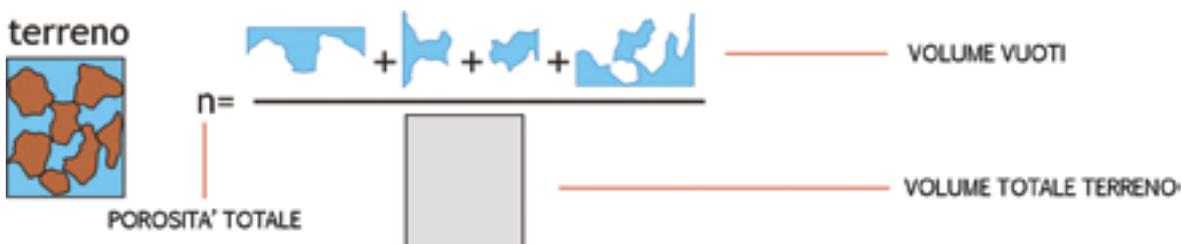
Anche per una copertura estensiva con uno spessore di substrato ridotto, lo strato che presenta capacità di accumulo idrico superiore è lo strato colturale (77% del totale), seguono l'elemento di protezione meccanica (13%) e l'elemento drenante e di accumulo idrico (10%).

LA POROSITÀ

Figura IV.13: La porosità totale del terreno

La porosità totale di un terreno si ottiene dividendo il volume dei vuoti per il volume totale occupato.

Questo parametro, unitamente alla granulometria e al contenuto di sostanza organica, è fondamentale per le prestazioni idriche di una copertura a verde.



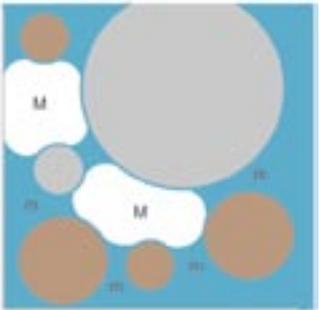
	POROSITÀ TOTALE = MACROPOROSITÀ + microporosità	CAPACITÀ DI ACCUMULO IDRICO	CAPACITÀ DRENANTE
	MMMMMMMMMM + mm	bassa	ALTA
	MM + mmmmmmmmm	ALTA	bassa

Tabella IV.9: Macro e micro-porosità

Alla caratterizzazione di macroporosità di un substrato (indicata con la lettera "M") è associata una maggiore capacità di drenaggio, al contrario alla microporosità ("m") è associata la capacità di accumulo idrico. I substrati impiegati nelle coperture a verde sono più drenanti di un suolo naturale, presentano cioè una macroporosità superiore determinata dall'assenza di granulometrie finissime.

FRAZIONI SIGNIFICATIVE D'ACQUA NEL SUOLO

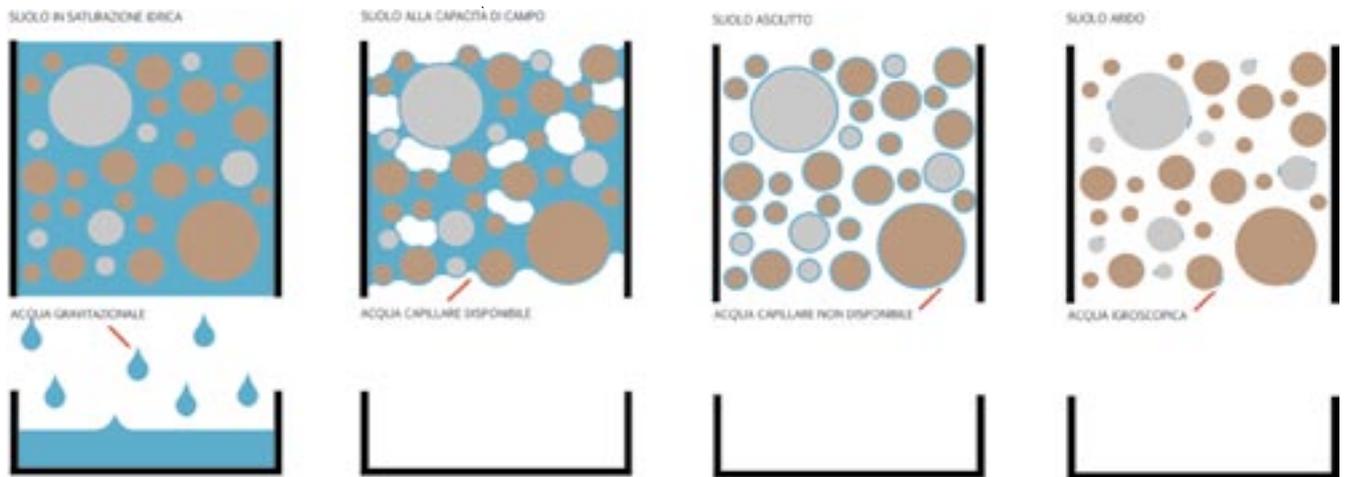
e minore la capacità di ritenuta idrica; contrariamente maggiore è la percentuale della microporosità sulla porosità totale, maggiore è la capacità di ritenuta idrica e minore la capacità drenante.

A seconda della distribuzione e della percentuale dei macro e dei micro-pori di un substrato è possibile definire quattro intervalli di umidità in cui l'acqua contenuta presenta altrettanti differenti destini, in quanto soggetta a tensioni diverse. Questi intervalli, rappresentati schematicamente nella figura IV.14 della pagina a fianco, identificano l'acqua gravitazionale, capillare disponibile, capillare non disponibile e igroscopica:

1. L'acqua gravitazionale o di percolazione è sottratta facilmente al substrato per effetto della forza di gravità. Essa scorre fra i macropori e perciò ha una permanenza nella miscela limitata nel tempo. In una copertura a verde l'acqua gravitazionale è l'acqua che defluisce verso gli impianti di scarico e quindi è quella quota d'acqua captata e rilasciata espressa dal coefficiente di deflusso ψ ;
2. L'acqua capillare disponibile è l'acqua trattenuta nei micro-pori del substrato e pertanto non sottratta dalla forza di gravità; nel momento in cui la percolazione dell'acqua dal suolo si interrompe, la parte trattenuta è rappresentata da questa frazione e il suolo si dice "alla capacità di campo". L'acqua capillare disponibile si esaurisce solo in dipendenza dall'evaporazione del substrato e dall'assorbimento radicale. In una copertura a verde l'acqua capillare è l'acqua di maggiore interesse in quanto facilmente disponibile per la vegetazione: il ripristino di questa frazione è necessario per la vita delle piante e, se non grazie a eventi meteorici, deve avvenire attraverso le tecniche irrigue;
3. L'acqua capillare non disponibile è quel volume che si sottrae al substrato solo grazie all'evaporazione. La maggior parte delle piante, infatti, non è in grado di assimilare quest'acqua, ad eccezione di alcune specie adattate a climi siccitosi. In una copertura a verde l'acqua capillare non disponibile è in buona parte inutilizzabile dalle piante;
4. L'acqua igroscopica è un volume infinitesimamente ridotto d'acqua che non si sottrae al terreno. In una copertura a verde questa condizione non si raggiunge mai.

IL POTENZIALE IDRICO

Il secondo fattore che incide complessivamente sulla capacità di ritenzione idrica di un substrato è il potenziale idrico e si descrive come la forza con cui l'acqua viene trattenuta dalle particelle del suolo. Tale forza è deter-



minata in parte dai fattori geometrici della macro e micro-porosità appena citati e in parte da una serie di forze e di tensioni, quali l'imbibizione dei colloidali, la capillarità, l'osmosi e altri, che si determinano spontaneamente fra l'acqua e il substrato. Per gli scopi di questa ricerca l'analisi e la quantificazione delle singole forze e delle singole tensioni non è significativa; risulta invece particolarmente utile stimare la forza complessiva con cui il terreno trattiene l'acqua, forza che determina il rapporto fra la capacità di ritenzione idrica e la quantità d'acqua effettivamente contenuta nel substrato. Tale forza costituisce una proprietà caratteristica di ciascuna miscela di terreno e si può descrivere attraverso la "curva di ritenzione idrica", la cui lettura fornisce un quadro complessivo della capacità di trattenere e rilasciare l'acqua operata da un substrato.

La figura IV.15 nella pagina seguente rappresenta una curva di ritenzione idrica. Tale curva è empirica, si ottiene cioè attraverso l'osservazione di una prova laboratoriale. L'asse delle ascisse riporta tre tensioni significative, pari a 10, 50 e 100 centimetri di colonna d'acqua: la tensione rappresenta la forza con cui il substrato trattiene l'acqua; l'asse delle ordinate riporta il volume del substrato in percentuale. Il segmento orizzontale viola esprime il valore della fase solida, in questo caso il volume percentuale solido è pari al 15% (corrispondente a una porosità totale dell'85% come indicato dalla freccia rossa a destra del grafico): il segmento è orizzontale in quanto il volume della fase solida è costante.

La curva arancione rappresenta la fase liquida, cioè la curva di ritenzione vera e propria: man mano che aumenta la tensione esercitata su un substrato umido, esso, non essendo in grado di contrastare tale tensione, rilascia l'acqua liberando dello spazio per la fase gassosa (rappresentato dalla superficie bianca al di sopra della fase liquida).

Il volume d'acqua allontanato dal substrato alla tensione di 10 centimetri di colonna d'acqua (segmento verticale blu) definisce l'acqua gravitazionale, ossia l'acqua contenuta nei macropori che la miscela non è in grado di trattenere, in questo caso pari al 30% del volume totale. Come rappresentato nella figura IV.14 questa quantità costituisce il deflusso vero e proprio.

Figura IV.14: Frazioni significative d'acqua nel suolo

Le frazioni d'acqua significative di un suolo sono quattro. La prima, la saturazione idrica, si verifica quando micropori e macropori sono totalmente imbibiti d'acqua. In una condizione come questa si generano dei deflussi e l'acqua che lascia il substrato è definita "acqua gravitazionale". La massima saturazione idrica, cioè la totale occupazione dei macro e micro-pori non si verifica in una copertura a verde.

La seconda è la capacità di campo che rappresenta uno stato molto importante poiché descrive la condizione in cui un substrato non rilascia acqua gravitazionale, pur essendo tutti i suoi micropori imbibiti: in sostanza questa frazione descrive la massima capacità di accumulo idrico.

La terza definisce un suolo asciutto, la cui poca acqua contenuta non è in gran parte estraibile dalle piante. E infine l'ultima frazione significativa è quella che descrive un suolo arido dove le particelle terrose contengono solo acqua igroscopica.

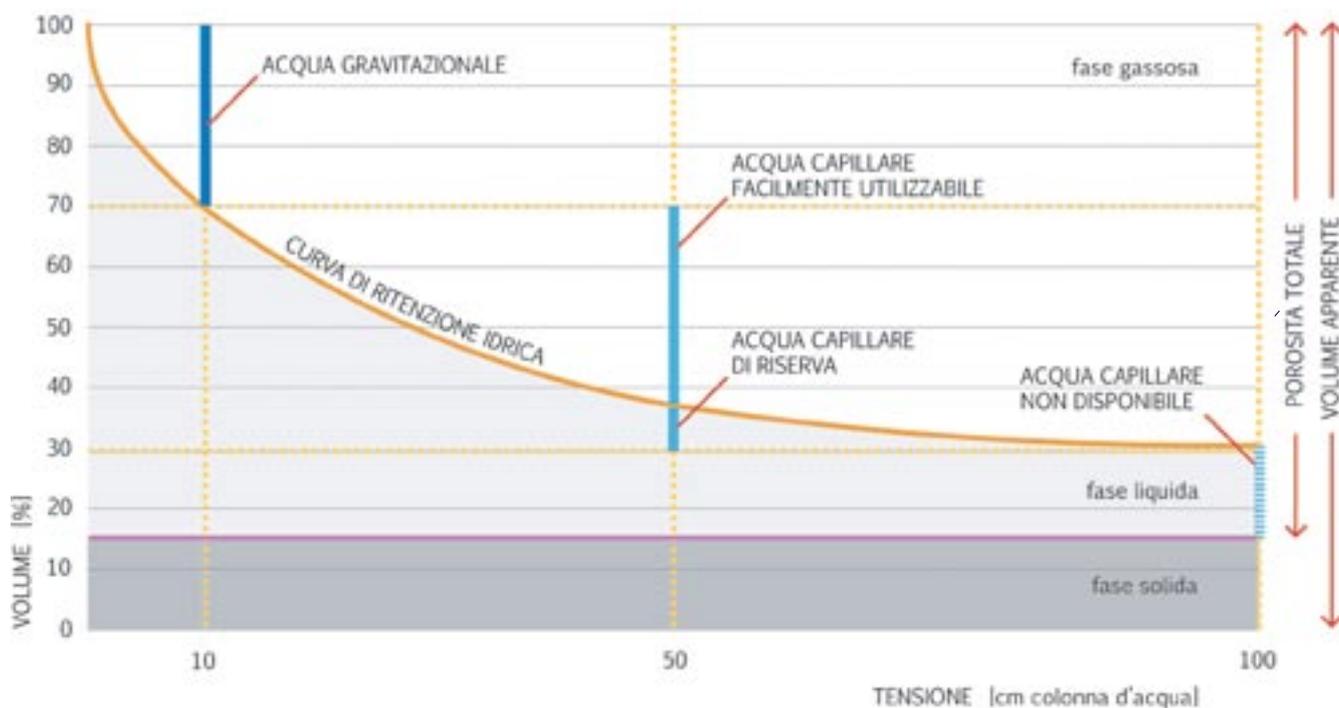


Figura IV.15: Curva di ritenzione idrica del terreno

La curva di ritenzione idrica di un terreno ne descrive dettagliatamente le caratteristiche idrologiche: in ascissa si ha il volume del terreno espresso in percentuale e in ordinata la tensione (si assuma la tensione, riportata nell'asse delle ascisse, e misurata in centimetri di colonna d'acqua, come una forza in grado di sottrarre l'acqua contenuta nel terreno).

L'area grigio scuro rappresenta la fase solida: la percentuale corrispondente è data dalla retta viola (in questo caso 15%). L'area

grigio chiaro rappresenta la fase liquida: essa è separata dalla fase gassosa (area bianca) dalla curva di ritenzione idrica (curva arancione) che assume valori più bassi man mano che aumenta la tensione.

Fra 0 e 10 centimetri di colonna d'acqua la curva definisce l'acqua gravitazionale (percentuale descritta dal segmento blu): questa quantità d'acqua non viene trattenuta dal terreno, in quanto ne occupa i macro-pori (cfr figura IV.14). Fra 10 e 50 centimetri di colonna d'acqua la curva definisce l'acqua capillare disponibile per le piante (oltre che la capacità di campo del terreno stesso,

cfr. figura IV.14). Il segmento azzurro sopra la curva arancione indica la percentuale d'acqua facilmente utilizzabile, mentre il segmento azzurro sotto la curva la percentuale di riserva. In corrispondenza di 100 centimetri di colonna d'acqua il segmento azzurro tratteggiato definisce la percentuale di acqua capillare non disponibile.

Fonte (elaborata): Massimo Valagussa, "Lo strato culturale: caratteristiche agronomiche", Corso Norma UNI 11235: progettare e realizzare coperture a verde secondo il codice di buona pratica, Verona 15 maggio 2008.

Il volume d'acqua sottratto al deflusso alla tensione di 50 centimetri di colonna d'acqua (segmento verticale azzurro continuo) e il volume d'acqua alla tensione di 100 centimetri di colonna d'acqua (segmento verticale azzurro tratteggiato) costituiscono l'acqua capillare trattenuta dal substrato nei micro-pori, che viene assorbita dalle piante o evaporata dal suolo. Questa porzione è pari al 55% del volume totale e alla tensione di 50 centimetri di colonna d'acqua si trova l'acqua utilizzabile dalle piante (qui pari al 40% del volume totale) di cui il 33% è acqua facilmente disponibile per le piante, mentre il 7% è acqua di riserva; infine alla tensione di 100 centimetri di colonna d'acqua si trova l'acqua capillare non disponibile che rispetto a questa curva assume il valore di 15% del volume totale.

LE CURVE DI RITENZIONE IDRICA

La curva di ritenzione idrica rappresenta lo strumento di valutazione più significativo delle capacità idriche di un substrato, restituendo di conseguenza una precisa caratterizzazione della capacità di ritenzione e della capacità drenante del sistema tecnologico della copertura a verde.

Nella lettura della curva di ritenzione si deve prestare attenzione alle seguenti caratteristiche:

1. l'altezza della curva: tanto più una curva è alta, tanto maggiore è la sua capacità di ritenzione idrica;
2. la pendenza della curva fra 0 e 10 centimetri di colonna d'acqua: tanto più la curva, in questo intervallo, è pendente, tanto maggiore è la sua capacità drenante;
3. la pendenza della curva fra 10 e 100 centimetri di colonna d'acqua: tanto più la curva è qui piatta, tanto maggiore è la sua capacità di accumulo idrico.

Una lettura comparata di diverse curve di ritenzione offre la possibilità di dedurre alcune proprietà significative dei materiali normalmente impiegati nelle coperture a verde.

Le figure IV.16, IV.17 e IV.18 nella pagina seguente rappresentano le curve di ritenzione idrica di materiali organici, mentre le figure IV.19, IV.20 e IV.21 le curve di materiali inorganici: anche ad un primo sguardo si nota che esse sono caratterizzate da andamenti differenti. Osservando la curva della torba rappresentata nella figura IV.16 si rileva che il volume della fase solida è pari al 10% del volume totale; il restante 90% è caratterizzato da un'andamento della fase liquida per cui l'acqua gravitazionale è pari al 10%, mentre l'acqua alla capacità di campo è pari all'80%: il 30% acqua disponibile per la vegetazione e il 50%, invece, acqua non disponibile. Il valore dell'acqua gravitazionale suggerisce quindi che il substrato sia poco drenante mentre il valore alla capacità di campo descrive che la torba presenti ottime capacità di accumulo idrico.

La curva del compost, della figura IV.17 sembra essere simile alla curva della torba, però alcune differenze sono rilevabili: innanzitutto la fase solida è quasi doppia rispetto a quella della torba, 18% contro 10%, ugualmente l'acqua gravitazionale è superiore, 20% contro 10%, e di conseguenza l'acqua alla capacità di campo è al 62% mentre quella della torba è all'80%. Il compost quindi è un substrato leggermente più drenante e denso della torba. Sulla base di questa chiave di lettura della curva risulta evidente che la fibra di legno sia un materiale eccezionalmente drenante e caratterizzato, a fronte di una capacità di campo del 35% del volume totale, da una quota abbastanza elevata di acqua disponibile per l'assorbimento radicale (20%).

I materiali inorganici delle figure IV.19, IV.20 e IV.21 sono in generale più drenanti dei materiali organici, infatti le curve sono "più basse". Fa eccezione la lana di roccia che, data una fase solida del 3%, è sia ben drenante, sia capace di un consistente accumulo idrico, peraltro facilmente disponibile per l'assorbimento radicale.

ACQUA GRAVITAZIONALE
descrive la capacità drenante

ACQUA ALLA CAPACITÀ DI CAMPO
descrive la massima capacità di accumulo
d'acqua

Figura IV.16: Curva di ritenzione idrica della torba

La torba è un materiale caratterizzato da un'ottima capacità di accumulo idrico, ma da una scarsa capacità drenante.
Fonte: Valagussa, "Lo strato colturale".

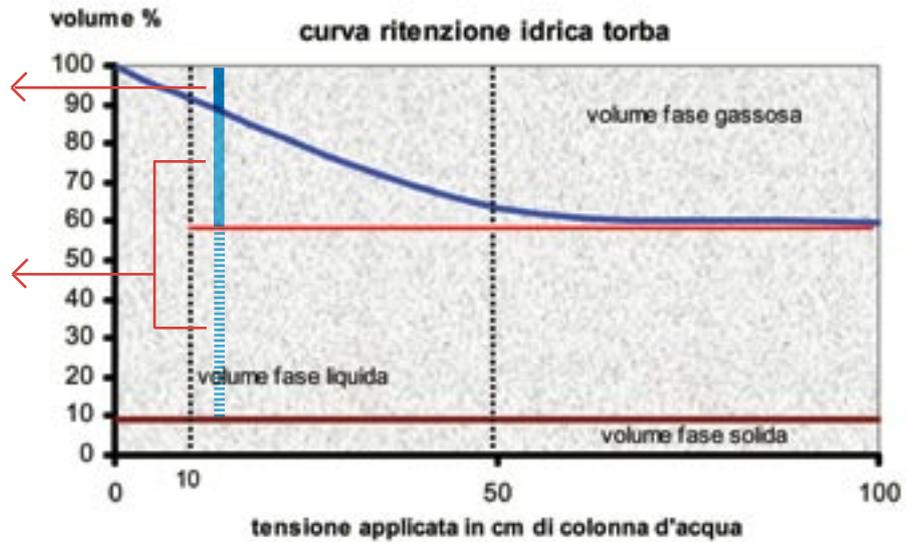


Figura IV.17: Curva di ritenzione idrica del compost

Il compost, similmente alla torba, ha un'ottima capacità di accumulo, pur essendo caratterizzato da una fase solida e da una capacità drenante superiori.
Fonte: Valagussa, "Lo strato colturale".

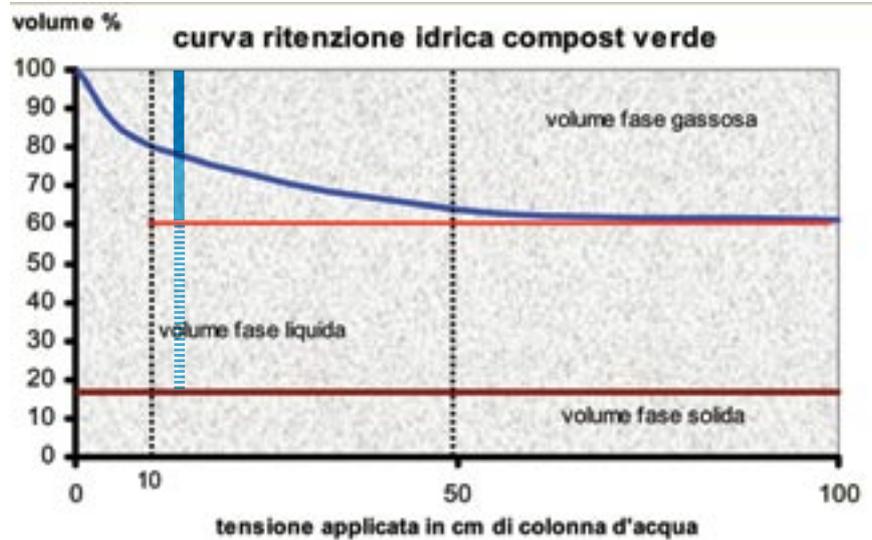
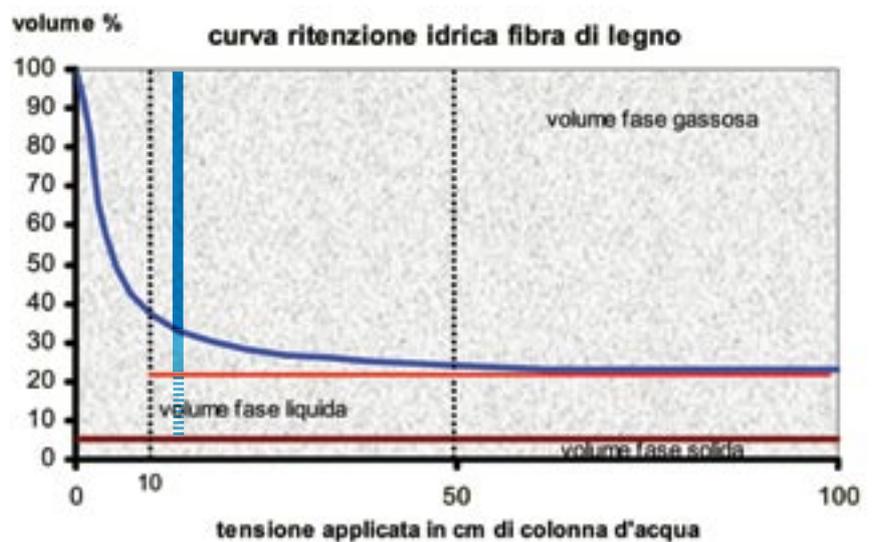


Figura IV.18: Curva di ritenzione idrica della fibra di legno

Differentemente dai tradizionali materiali organici la fibra di legno è molto drenante; allo stesso tempo è caratterizzata da una capacità di accumulo non elevata di cui la parte disponibile all'assorbimento radicale è però buona. Il segmento verticale continuo azzurro, che definisce l'acqua trattenuta dal materiale e disponibile per l'assorbimento delle radici, corrisponde circa al 12% del volume apparente.
Fonte: Valagussa, "Lo strato colturale".



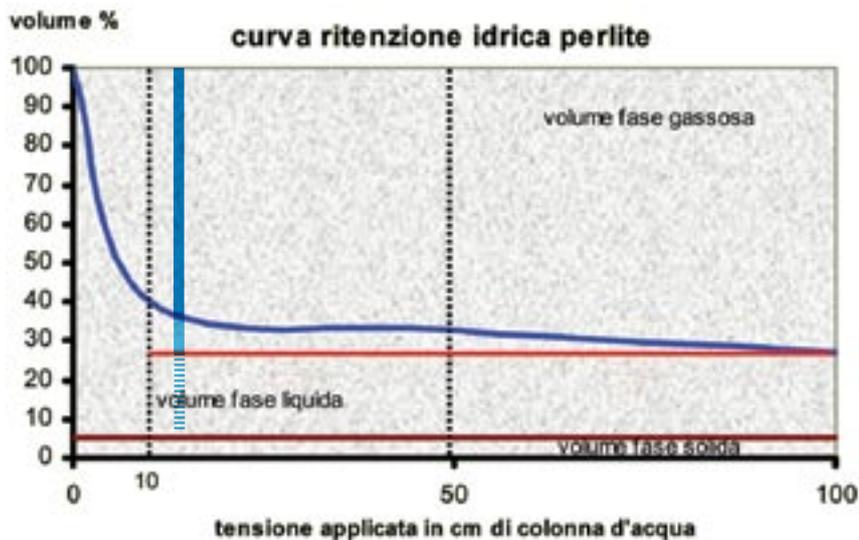


Figura IV.19: Curva di ritenzione idrica della perlite

La perlite è un materiale molto drenante al pari della maggior parte dei substrati minerali. Pur essendo dipendente dalla granulometria, è in generale caratterizzata da una fase solida contenuta, il 5% del volume apparente, e da una discreta capacità di accumulo idrico.

Fonte: Valagussa, "Lo strato culturale".

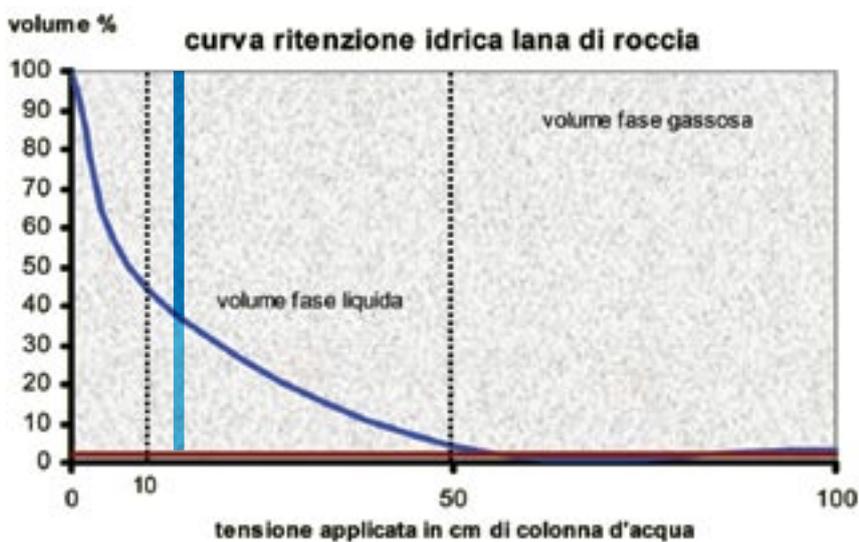


Figura IV.20: Curva di ritenzione idrica della lana di roccia

La lana di roccia è un materiale particolare, molto drenante e al contempo capace di accumulo idrico. È un silicato amorfo prodotto dalla roccia, non utilizzato per le applicazioni come substrato vero e proprio, ma come materiale aggiuntivo a quelli normalmente impiegati nel sistema a verde per conferire maggiori prestazioni idriche.

Fonte: Valagussa, "Lo strato culturale".

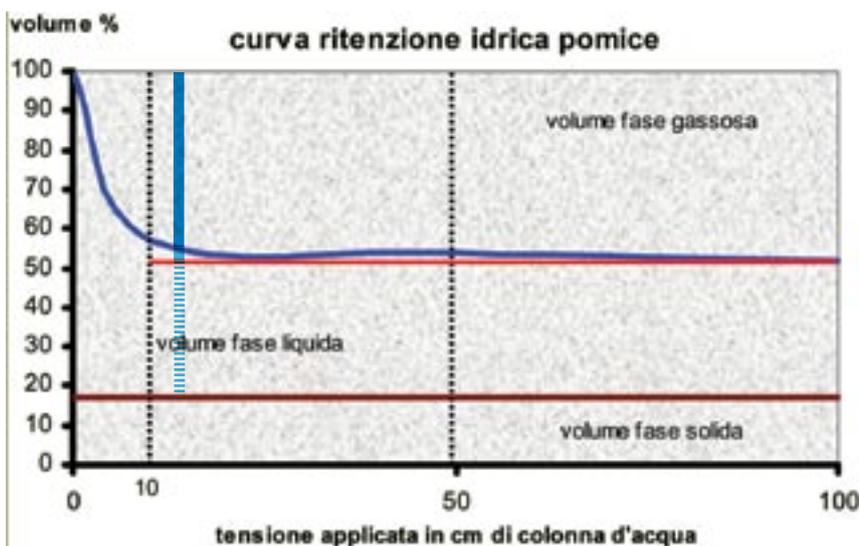


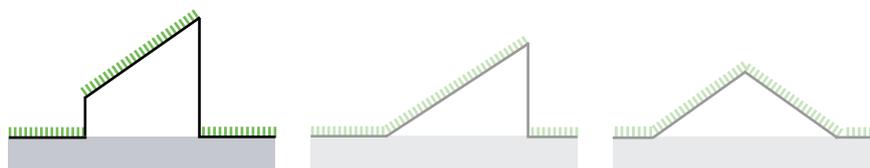
Figura IV.21: Curva di ritenzione idrica della pomice

La pietra pomice è una roccia magmatica effusiva, leggerissima, caratterizzata da un'elevata porosità e viene utilizzata come drenante. Pur avendo complessivamente una buona capacità di accumulo idrico, l'acqua che mette a disposizione agli apparati radicali delle piante è un valore molto basso, in questa curva circa il 3%.

Fonte: Valagussa, "Lo strato culturale".

Accademia della California delle Scienze

LUOGO	San Francisco - California
PROGRAMMA.....	isolamento termico, microventilazione
ARCHITETTO	Renzo Piano
PAESAGGISTA.....	SWA Group
REALIZZAZIONE.....	2008
USO DELLA COPERTURA	belvedere, zona di sosta, tribuna
PRATICABILITÀ.....	non accessibile
SUPERFICIE.....	18000 m ²
PENDENZA.....	variabile
VERDE	estensivo
SISTEMA.....	Modular Bio Tray™ - Rana Creek



Un interessante esempio di copertura a verde in cui grande attenzione è stata riservata alle caratteristiche del substrato è offerto dall'Accademia delle Scienze della California a San Francisco, un istituto di scienze naturali dove l'attività di ricerca scientifica è affiancata a funzioni museali ed educative per il pubblico. Lo stesso edificio infatti ospita una serie di sale espositive all'interno delle quali sono ricostruiti numerosi biotopi naturali (acquari e serre), servizi per il pubblico e unitamente gli spazi dedicati all'attività di ricerca e all'archiviazione di campioni scientifici.

L'edificio, di pianta rettangolare, distribuisce le sue funzioni su 4 livelli (di cui uno sotterraneo) ed è chiuso superiormente da una copertura a verde che presenta una forma a geometria variabile: la copertura infatti è piana in corrispondenza del perimetro esterno dell'edificio, mentre verso la superficie centrale si curva generando una serie di calotte di cui le due di raggio maggiore coprono i volumi interni del planetario e del biotopo della foresta pluviale.

In questo progetto la copertura a verde non è funzionale alla fruizione, poiché la sua superficie non è accessibile per quasi tutta la sua estensione (fa eccezione un piccolo belvedere raggiungibile dall'interno dell'edificio), nè a una "volontà mimetica": essa si imposta totalmente fuori terra a un'altezza di 10 metri, non presupponendo alcuna continuità fra suolo naturale e artificiale. Invece, l'impiego della copertura a verde sembra essere legato all'evocazione di un elemento del paesaggio naturale circostante all'area di inserimento: così come il Vulcano Buono, progettato da Renzo Piano nei



pressi di Nola, imita il profilo del prospiciente Vesuvio, allo stesso modo la copertura a verde dell'Accademia richiama con le sue curve l'ondulato paesaggio caratteristico del territorio della città di San Francisco nel quale si contano più di cinquanta rilievi.

L'artificio che porta la vegetazione in copertura è in questo progetto enfatizzato da alcuni elementi che svolgono una funzione tanto importante quanto manifesta all'osservatore: la copertura ospita i dispositivi necessari a portare la luce all'interno: sia la luce artificiale, attraverso le celle fotovoltaiche che sono installate nella cintura vetrata perimetrale, sia quella naturale che oltrepassa la copertura attraverso i lucernari illuminando la foresta pluviale e il planetario, ricostruzioni *indoor* di una porzione di mondo reale.

In questo edificio la copertura a verde è uno di tanti artifici che riproducono ecosistemi naturali: all'interno dell'Accademia sono stati ricostruiti acquari che ospitano coralli, serre dai climi esotici, simulazioni della pioggia, una palude, ecc. In questo contesto la copertura a verde veicola un messaggio e un'invocazione alla sostenibilità delle attività dell'uomo, qui rappresentate e ricreate attraverso l'attività scientifica. In questo progetto, infatti, considerata l'estensione dell'edificio, la copertura a verde instaura una forte relazione di tipo visivo con il pubblico, facendosi manifesto di un approccio sostenibile alle costruzioni proprio attraverso l'impiego di bio-tecnologie costantemente ibridate con le tecnologie edilizie.

La copertura a verde dell'Accademia delle Scienze presenta un inverdimento estensivo di circa 10000 metri quadrati. Attraverso il sistema a verde

Figura IV.22: Copertura a verde dell'Accademia delle Scienze della California

La geometria della copertura è caratterizzata da una superficie perimetrale piana che verso il centro si flette generando delle alture inverdite che evocano il paesaggio collinare dell'immediato entroterra della città di San Francisco. Alcune di queste alture sono forate da numerosi lucernari che illuminano i giardini d'inverno posti all'interno.

Fonte: http://seedmagazine.com/slideshow/california_academy_of_sciences/



Figura IV.23: Vista dall'alto della copertura a verde dell'Accademia

A eccezione della cintura perimetrale vetrata della copertura, su cui sono installate 55000 celle fotovoltaiche, e del grande lucernaio centrale, la copertura è interamente inverdita con un sistema estensivo.

La superficie ricoperta di piante è estesa circa 9000 metri quadri.

Fonte: <http://gigaom.com/cleantech/california-academy-of-sciences-shines-with-solar-roof/>

Figure IV.24 e IV.25: Prospetto longitudinale e sezione trasversale

In corrispondenza delle calotte centrali si trovano "la foresta pluviale" (un grande giardino climatizzato) e un planetario.

Fonte: www.archgreen.info/it/ > california-academy-of-sciences

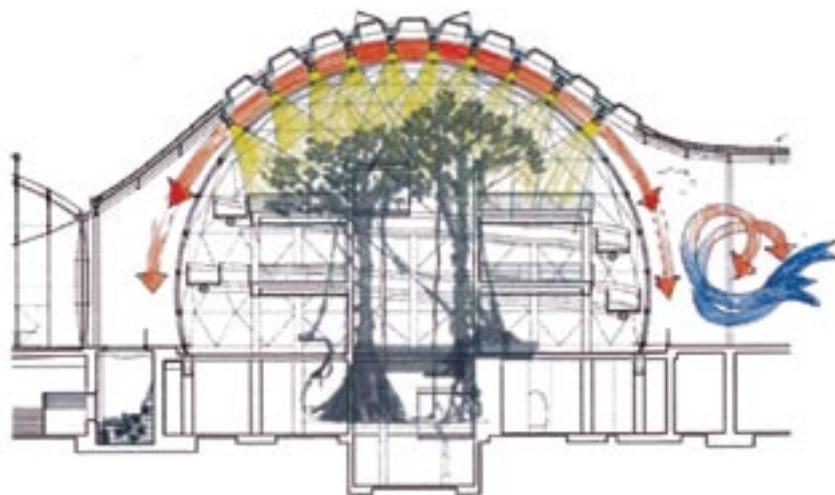


Figura IV.26: Generazione del microclima della foresta pluviale

Il sistema di copertura raddoppia il suo spessore in corrispondenza delle calotte: all'interno è posta una seconda pelle vetrata che genera un'intercapedine d'aria con l'elemento portante della copertura a verde. L'aria riscaldata per "effetto serra" garantisce un microclima adeguato alla vegetazione pluviale sottostante.

Fonte: http://seedmagazine.com/slideshow/california_academy_of_sciences/

L'acqua di origine meteorica viene filtrata e raccolta per essere reimpiegata come acqua di irrigazione sia per le piante in copertura, sia per le piante dei giardini interni dell'Accademia. La copertura presenta una notevole complessità: all'interno delle calotte maggiori si trovano due calotte interne, che generano così uno spazio libero per la circolazione dell'aria; nell'intercapedine sovrastante il giardino d'inverno l'aria si riscalda per l'effetto serra prodotto dai numerosi lucernari e dalle lampade posti in copertura, raggiungendo temperature favorevoli a mantenere il microclima tropicale richiesto dalla ricostruzione della foresta pluviale sottostante. Altrettanto vale per l'intercapedine fra il planetario e la copertura, seppur in forma attenuata vista la presenza di un numero di lucernari nettamente inferiore. Invece, in corrispondenza della grande serra, la presenza del verde circostante attenua il riscaldamento dell'estesa vetrata centrale (poiché genera all'esterno, in prossimità dell'estradosso della copertura, una lieve microventilazione). La copertura a verde è quindi funzionale non solo per le prestazioni termiche di isolamento e raffrescamento a favore dell'ambiente interno confinato, ma anche per l'azione di microventilazione che la presenza delle piante innesca a livello superficiale.

Nella figura IV.26 della pagina seguente è possibile osservare che la struttura portante del sistema di impermeabilizzazione è costituita da travi in acciaio a doppia T e da un solaio di calcestruzzo armato dello spessore di 12 centimetri, sopra il quale è steso l'elemento di tenuta; fra l'elemento di tenuta e il sistema a verde si trova l'elemento di isolamento termico (tetto caldo). La stratigrafia del sistema a verde prevede l'impiego di uno strato di drenaggio e accumulo idrico in materiale disciolto dello spessore di 7,5 centimetri sul quale sono appoggiati moduli quadrati pre-vegetati.

La particolarità di questa copertura risiede nell'impiego di moduli di fibra di cocco, compattati da un materiale totalmente biodegradabile a base di addensato di lattice e pre-vegetati con specie vegetali dalle caratteristiche di resistenza a prolungata siccità. La pre-vegetazione consente mirate e più agevoli lavorazioni agrotecniche che favoriscono l'attecchimento e l'irro-

Figura IV.27: Dettaglio della copertura a verde in corrispondenza della gronda e del lucernario centrale

In prossimità del cambio del manto della copertura, fra il lucernario centrale e l'inverdimento, si trova una doppia linea di gronda, ciascuna dedicata a raccogliere l'acqua intercettata da un'unica falda.

A ridosso della trave di bordo della copertura a verde si trova un drenaggio in ghiaio come appare di consueto nelle soluzioni conformi delle coperture inclinate.

Fonte: Fonte: *The Plan*, 30 (2008): 24.

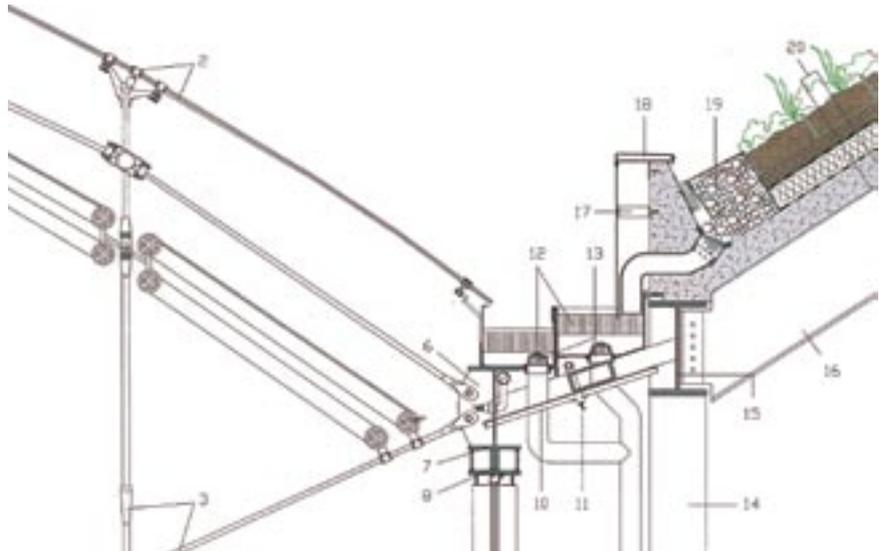


Figura IV.28: Moduli pre-vegetati impiegati nella copertura

L'inverdimento dell'intera copertura è costituito da pannelli pre-vegetati di fibra di cocco racchiusa attraverso un addensato di lattice. Questi moduli quadrati, brevettati con il nome di Bio Tray™, hanno le seguenti dimensioni: 48 centimetri di lato e 7,5 centimetri di altezza: si tratta quindi di un'inverdimento estensivo e che in virtù dell'impiego della fibra di cocco è in grado di garantire un'ottima inerzia idrica.

Fonte: www.flickr.com/photos/tremco-greenhq/page4/

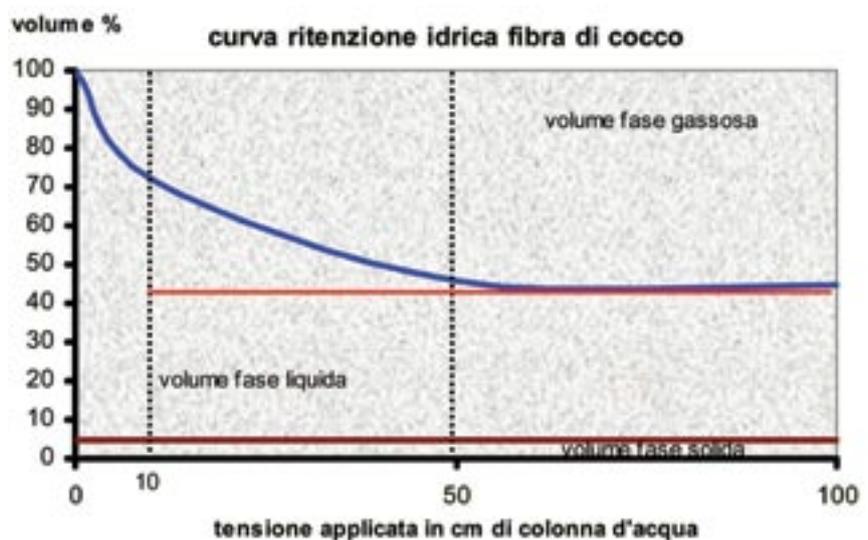


Figura IV.29: Curva di ritenzione idrica della fibra di cocco

La fibra di cocco è un eccellente substrato per coperture a verde: oltre a essere un materiale organico e quindi fertile, è caratterizzato sia da una buona capacità drenante (l'acqua gravitazionale è circa il 28% del volume apparente) sia soprattutto da un'ottima capacità di accumulo idrico (67%). Il 30% del volume totale è inoltre acqua facilmente utilizzabile dalla vegetazione.

Normalmente la fibra di cocco viene miscelata in quanto il suo valore commerciale è molto elevato.

Fonte: Valagussa, "Lo strato colturale".



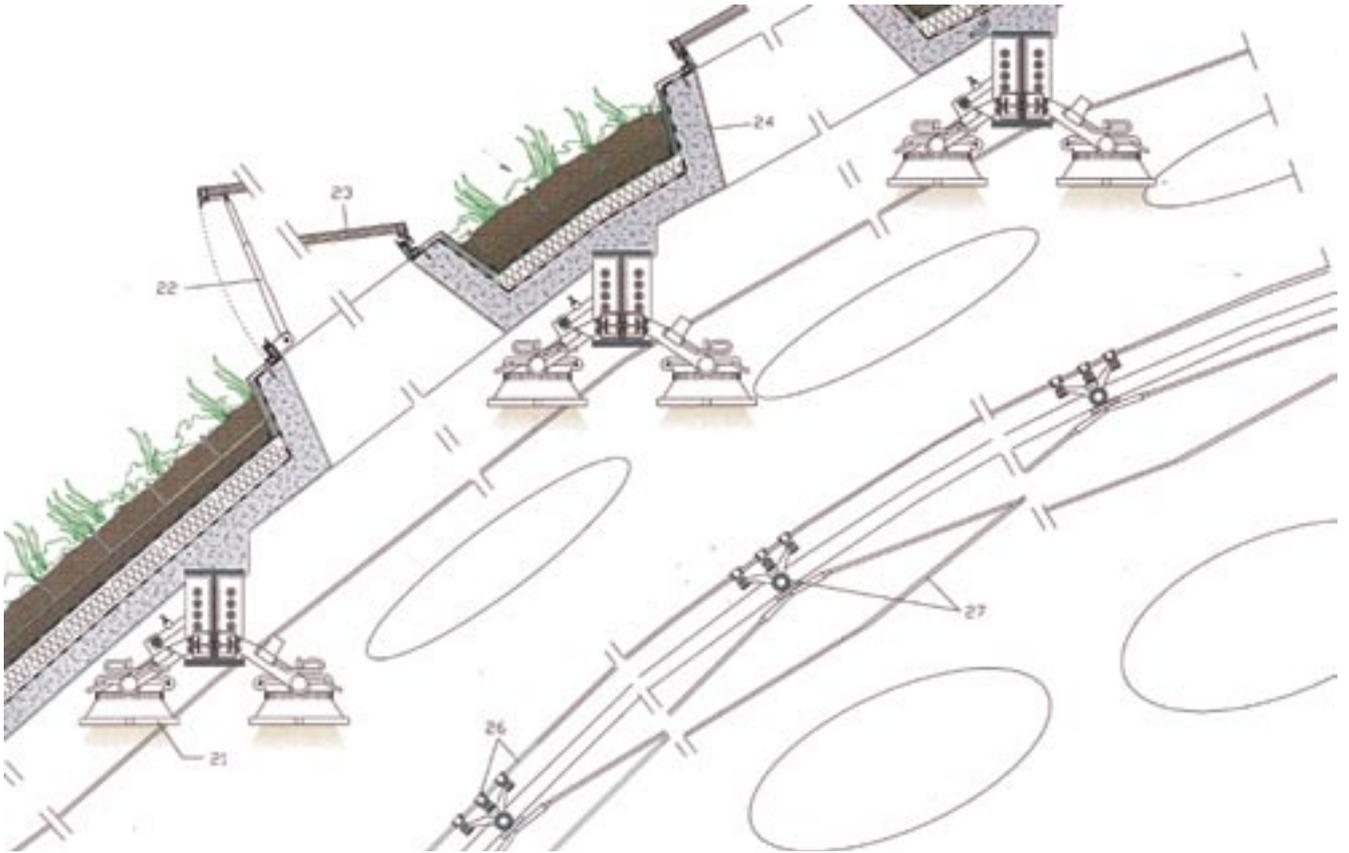


Figura IV.30: Sezione della copertura in corrispondenza dei lucernari

La struttura portante della copertura è mista: l'orditura primaria e secondaria è costituita da travi in acciaio a doppio T; il solaio invece da calcestruzzo armato gettato fuori opera. La stratigrafia prevede, inoltre, uno strato di isolamento termico fra il solaio e l'elemento di tenuta (tetto caldo). Sul lato interno delle calotte si trova un secondo involucro costituito da lastre di vetro che, in collaborazione con i lucernari posti sulla copertura, favoriscono la generazione di un effetto serra utile a garantire temperature elevate all'interno della grande serra tropicale sottostante. Quest'effetto è favorito anche dalla presenza dei fari di illuminazione (alimentati dai pannelli fotovoltaici posti sulla cintura vetrata della copertura) che in sinergia con i lucernari aumentano le temperature dell'intercapedine d'aria.

Fonte: *The Plan*, 30 (2008): 25.



Figura IV.31: Lucernario della copertura

I lucernari sono dotati di meccanismi automatici di apertura/chiusura che garantiscono la regolazione delle temperature della calotta interna innescando o meno una ventilazione naturale fra interno ed esterno.

Ciascun lucernario è fissato su un anello di calcestruzzo posto in continuità con il solaio della copertura ed emerge di circa una

decina di centimetri dal limite superiore dello strato colturale per assicurare una distanza di sicurezza dagli strati umidi. In questa copertura gli elementi emergenti non sono circondati da drenaggi aggiuntivi.

Fonte: www.arup.ie/index.p?p=125&n=142



Figura IV.32: Vista del cantiere
 Fonte: <http://greenarchitecturenotes.com/2009/04/a-success-story/>

bustimento delle piante giovani, mentre la fibra di cocco, eccellente materiale organico per substrati di coltivo, garantisce ottime prestazioni idriche; il lattice inoltre, rappresenta una naturale fertilizzazione a lento rilascio, andando a nutrire tutti i batteri decompositori che producono azoto e altre sostanze necessarie alla nutrizione vegetale. Questo sistema, così ricco di sostanza organica, risulta particolarmente autonomo e fecondo: le radici penetrano nel tempo la fibra di cocco, traggono il nutrimento da un humus fertile e, differentemente da quanto accade con i moduli in plastica, le radici trovano spazio per la crescita in uno strato di drenaggio in materiale minerale disciolto caratterizzato da proprietà agrotecniche superiori ai pannelli preformati, per la presenza di minerali e per la capacità di scambio cationico garantita dagli inerti.

Inoltre il sistema risulta particolarmente appropriato per l'impiego in una copertura a geometria variabile o inclinata: gli apparati radicali delle piante, riuscendo a penetrare tutto lo spessore del modulo ma anche lo strato inerte sottostante, solidarizzano la fibra di cocco con il drenaggio, conferendo al sistema a verde una forte coesione, fondamentale per contrastare lo scivolamento del sistema a verde lungo le pendenze.

In questo progetto sono stati utilizzati 48000 moduli quadrati della dimensione di 43 centimetri di lato. L'impiego della fibra di cocco presenta un'unica problematica di tipo strettamente commerciale: un costo molto elevato non competitivo con i materiali, per lo più inerti, comunemente applicati alle coperture a verde.

Figura IV.33: Vista di una della quattro calotte dell'Accademia
 Fonte: http://blog.calgarypubliclibrary.com/blogs/eco_action/archive/2009/05.aspx



IV.4

La variazione delle prestazioni idriche in relazione alle differenti tecnologie

In sintesi le prestazioni idrologiche di una copertura a verde dipendono essenzialmente dalla capacità di ritenzione idrica operata dallo strato colturale, espressa attraverso il coefficiente di deflusso Ψ che fornisce i valori indicativi dei volumi d'acqua assorbiti dal sistema a verde e restituiti all'atmosfera per effetto dell'evapotraspirazione, a una scala temporale stagionale o annuale. La stessa capacità di ritenzione idrica riferita alla scala temporale dell'evento meteorico mette in luce, per il ciclo idrologico nell'ambiente urbano, ulteriori effetti virtuosi che complessivamente si possono descrivere come un depotenziamento della risposta idrologica del sistema tecnologico in termini quantitativi e temporali. Questi effetti sono due: il ritardo della portata massima dell'acqua meteorica intercettata (ritardo del conferimento del picco) e la riduzione di tale portata (riduzione del volume del picco). La ritenzione e la detenzione idrica operate da una copertura a verde variano in base ad alcune caratteristiche della stratigrafia e a seconda dell'inclinazione della falda della copertura.

La quantità effettiva di acqua di deflusso dipende in primo luogo dallo spessore dello strato colturale. La seconda colonna della tabella IV.10 nella pagina a fianco riporta i valori di riferimento del coefficiente di deflusso di coperture a verde caratterizzate da strati colturali di differenti spessori. Incrementando lo spessore dello strato colturale la ritenzione idrica della copertura aumenta in modo considerevole: un substrato di 30-40 centimetri di spessore garantisce una capacità di ritenzione idrica più che doppia (80% di acqua trattenuta e 20% rilasciata) rispetto a un substrato di 8-10 centimetri (40% di acqua trattenuta e 60% rilasciata).

I valori sono da considerarsi indicativi: a ciascun intervallo di valore, definito dallo spessore dello strato colturale, è associato un coefficiente di deflusso rappresentativo di un'ipotetica combinazione fra spessore e composizione del substrato: miscele diverse forniscono prestazioni idriche diverse, di conseguenza il coefficiente si riferisce a un intervallo di valori dello spessore e non a valori specifici.

Secondariamente il deflusso generato da una copertura a verde è influenza-

Tabella IV.10: Variazione del coefficiente di deflusso della copertura a verde.

SPESSORE DELLO STRATO COLTURALE - S [cm]	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - ψ	
	Pendenza < 15°	Pendenza > 15°
S > 50	0,1	---
25 < S < 50	0,2	---
15 < S < 25	0,3	---
10 < S < 15	0,4	0,5
6 < S < 10	0,5	0,6
4 < 6*	0,6	0,7
2 < S < 4*	0,7	0,8

* la normativa italiana impone per il verde estensivo uno spessore minimo del substrato pari a 8 centimetri, tali valori sono quindi da considerarsi esplicativi

to dall'inclinazione della falda. Nella terza colonna della tabella IV.10 sono indicati i valori del coefficiente di deflusso di coperture inclinate; questi valori sono caratterizzati dall'essere leggermente meno prestanti: a parità di spessore il coefficiente di deflusso di una copertura a verde inclinata cresce del 10% rispetto a quello di una copertura piana.

In terzo luogo, la capacità di ritenzione idrica è determinata, seppur in quota minore, dalla capienza dello strato di accumulo idrico. Nel caso di pannelli preformati questo valore è fornito dal produttore e normalmente varia per le coperture estensive da 4 a 8 litri al metro quadro e per le coperture intensive da 6 a 12 litri al metro quadro. Nel caso di aggregati granulari, invece, la capacità di accumulo idrico è determinata dalla porosità e dal potenziale idrico del materiale, analogamente a quanto accade per lo strato colturale.

Se i volumi di ritenzione in relazione a differenti valori assunti dalle variabili sopra elencate (tipo e spessore del substrato, pendenza della copertura e tipo di strato di accumulo idrico) sono da tempo oggetto di studi e di analisi che hanno permesso una valutazione dei diversi comportamenti, altrettanto non è ancora avvenuto per quanto concerne i volumi di detenzione (volumi d'acqua sottratti al deflusso alla scala di evento meteorico). Rispetto ai volumi di ritenzione, utilizzati per indagare i fenomeni che coinvolgono la copertura a verde nel lungo periodo, questi ultimi possono essere estremamente utili per le indagini riferite ad archi temporali più brevi, essendo sensibilmente variabili in dipendenza dall'intensità e dall'andamento di ogni singolo evento meteorico. La quantificazione dei valori della detenzione assume particolare rilevanza in quanto la detenzione agisce nei momenti più critici del verificarsi di un evento meteorico, ossia durante la formazione dei picchi di deflusso. Questi risultano contemporanei o immediatamente successivi ai picchi di intensità di pioggia, e, particolarmente nelle aree urbane edificate, sono pressoché invariati rispetto alla portata della pioggia. In altre parole nel momento in cui piove intensamente sul suolo edificato si formano in tempo brevissimo deflussi di intensità pari alla

quantità d'acqua intercettata. Deflussi che, moltiplicati per l'estensione delle superfici impermeabili e alimentati dalla continuità della pioggia, possono generare allagamenti, carichi eccessivi alla rete di drenaggio, portate di piena dei corpi idrici recettori, ecc.

Al fine di indagare più approfonditamente i fenomeni che coinvolgono la copertura a verde e di valutare le ricadute che essi possano avere non solo e non tanto alla scala del singolo edificio, ma soprattutto a scala urbana, è possibile esaminare come le variabili meteorologiche implicino determinate reazioni di un sistema a verde prefissato. Assunta una stratigrafia predefinita di riferimento, di cui sono note le prestazioni idriche in relazione alla scelta di ciascuno strato (elencati in ordine decrescente di importanza):

- capacità di ritenzione del substrato (cioè un fattore intrinseco di un materiale);
- spessore del substrato (fattore dimensionale dello stesso materiale);
- pendenza della falda (fattore geometrico del sistema);
- presenza o meno dello strato di accumulo idrico (fattore costante di un componente),

l'esame della reazione di una copertura a verde non può che essere attuato per via sperimentale: l'acqua allo stato liquido, in ingresso e in uscita da un sistema di copertura, risulta infatti l'unica grandezza misurabile in modo attendibile a cui legare la descrizione qualitativa e quantitativa delle capacità di ritenzione e detenzione idrica. L'evapotraspirazione è infatti un processo che, quand'anche fosse misurabile sperimentalmente (e non attraverso via numerica), non sarebbe significativo a livello generale, perchè troppo dipendente dallo stretto contesto microclimatico e dalle variabili esterne non dipendenti dal sistema tecnologico.



Figura IV.34: Copertura a falde semi-intensiva
Fonte: Jacopo Gaspari

Quinto capitolo

La reazione della copertura a verde all'acqua meteorica: un caso sperimentale

Al fine di verificare il ruolo che le diverse variabili illustrate nel precedente capitolo rivestono rispetto ai fenomeni di gestione dell'acqua operata da una copertura a verde è stata effettuata una verifica sperimentale in collaborazione con l'azienda tedesca *ZinCo GmbH*, leader nella progettazione e produzione di sistemi di copertura a verde, che ha messo a disposizione la strumentazione necessaria all'esecuzione dell'esperimento nonché la sua lunga esperienza nel settore.

L'esperimento è stato condotto sottoponendo una falda campione a un simulatore di pioggia regolabile da un'apparecchiatura appositamente predisposta alla modulazione dell'intensità degli eventi meteorici. L'acqua immessa nel sistema di copertura e l'acqua di deflusso sono state misurate in tempo reale e, come conseguenza, è stato possibile determinare le prestazioni idriche della falda in esame. La stratigrafia di copertura (vale a dire la composizione del substrato, il suo spessore, il tipo di elemento di accumulo idrico e la pendenza della falda) è stata scelta con precise finalità: lo scopo della sessione sperimentale è stato quello di ottenere una serie di dati caratterizzanti della ritenzione e della detenzione idrica operate da un sistema a verde dotato di prestazioni di livello minimo.

La sessione sperimentale vera e propria è stata effettuata a seguito di un periodo di messa a punto/taratura degli strumenti impiegati e a un periodo di acquisizione delle competenze necessarie a conoscere e a gestire la complessità dell'apparato strumentale.

In una fase successiva i dati ottenuti dalla sperimentazione sono stati impiegati per verificare l'efficacia della tecnologia di copertura a verde nel regimentare l'acqua alla scala urbana: sono state infatti effettuate una serie di ipotesi di conversione di coperture esistenti in coperture a verde dell'edificio della città di Vicenza, città che ben si presta a simulare le particolari condizioni del clima padano-veneto, prevedendo quindi diversi scenari di uso del suolo urbano.

V.1

Verifica del comportamento idrico: premesse e scopo dell'esperimento

L'esperimento ha avuto come obiettivo principale la descrizione della risposta idrica di una copertura a verde estensivo nelle condizioni di piovosità più intense. Tale scelta è stata dettata dall'intenzione di ottenere dati sperimentali riguardanti le proprietà del sistema durante le condizioni meteorologiche più critiche, proprio quando la copertura tende alla condizione di saturazione e, nello stesso tempo, i tradizionali sistemi di educazione delle acque delle città possono rivelarsi sottodimensionati, cioè incapaci di raccogliere quei volumi d'acqua eccezionalmente elevati e provenienti dalle superfici impermeabilizzate che rivestono il suolo urbano.

La stratigrafia sottoposta all'esperimento è stata consapevolmente composta per descrivere le prestazioni idriche assunte come minime di una copertura a verde, così da restituire una capacità di regimentazione idrica definibile "di base"; ogni versione più raffinata e tecnologicamente articolata garantisce infatti prestazioni migliori. Le proprietà attese dal sistema a verde indagato, congiuntamente alla simulazione di eventi meteorici intensi, hanno quindi dato valori ampiamente cautelativi della risposta idrologica di una copertura a verde estensivo, che per sua stessa definizione è una tipologia caratterizzata da una bassa inerzia idrica.

I parametri indagati sono stati:

1. la ritenzione idrica, descritta attraverso il coefficiente di deflusso ψ della copertura che definisce la riduzione dei deflussi e dell'evapotraspirazione totale annuale del sistema;
2. la detenzione idrica, cioè la riduzione e il ritardo dei picchi del deflusso, che descrive il decremento dell'intensità con cui l'acqua gravitazionale raggiunge le reti di drenaggio urbano.

Questi due parametri restituiscono il comportamento idrico dettagliato del sistema, vale a dire dati attendibili e utilizzabili per analisi riguardanti la regimentazione idrica di un territorio urbano.

V.2

Descrizione della strumentazione: la camera della pioggia

La camera della pioggia è un dispositivo atto a riprodurre il fenomeno meteorico all'interno di un spazio chiuso, non esposto agli eventi atmosferici.

La camera è composta di tre principali apparati: il primo è costituito dalla stanza vera e propria, un volume intercluso all'interno del quale ha luogo il fenomeno piovoso; il secondo dal simulatore di pioggia, una sorta di impianto di irrigazione posizionato sopra la stanza in grado di imitare verosimilmente il fenomeno piovoso: infine il terzo è costituito da una serie di apparecchiature capaci di regolare e misurare i volumi d'acqua immessi nella stanza sotto forma di *pioggia* e uscenti da essa sotto forma di *deflusso*.

La figura V.1 nella pagina successiva rappresenta schematicamente il percorso dell'acqua nei singoli strumenti che compongono la camera della pioggia. L'acqua entrante nel circuito (1.) attraversa una serie di valvole e un manometro in grado di regolarne la portata (2.): l'apertura e la chiusura delle valvole, unitamente alla variazione della pressione operabile dal manometro, consente la riproduzione di diverse intensità di pioggia. Successivamente l'acqua passa attraverso un flussimetro che ne misura la portata (3.). I dati vengono trasmessi in tempo reale a una centralina e quindi a un computer (7.) che registra le variazioni delle intensità programmate.

Oltrepassati gli strumenti di regolazione e misurazione, l'acqua viene distribuita in forma nebulizzata da un simulatore di pioggia (4.). In forma di piccolissime gocce, l'acqua cade sulla falda allestita con un sistema a verde. Qui viene assorbita dal substrato (5.) fino al livello della massima capacità di ritenuta per poi fuoriuscire da una gronda posta lungo uno dei quattro lati della falda. Alla gronda è collegato un tubo che conduce l'acqua attraverso un secondo flussimetro (6.), che, come il primo, trasmette i valori di portata al computer (7.). Successivamente l'acqua viene canalizzata e smaltita.

La stanza è un volume di 5 metri cubi racchiuso inferiormente da un impalcato ligneo rivestito da una membrana impermeabilizzante e lateralmente da quattro pareti in lastre di vetro intelaiate in una struttura di alluminio; superiormente questo volume è aperto per consentire l'ingresso della

Figura V.1: Schema funzionale della camera della pioggia

L'acqua in ingresso attraversa in primo luogo la strumentazione in grado di regolarne il flusso. Secondariamente transita attraverso un flussimetro che ne misura le portate per giungere poi al simulatore di pioggia che la distribuisce in forma nebulizzata all'interno della stanza contenente il sistema a verde. Dopo aver attraversato la stratigrafia della copertura una parte dell'acqua precipitata e viene convogliata da una gronda verso un secondo flussimetro e poi verso l'esterno. I due flussimetri, uno per l'acqua in ingresso e uno per l'acqua in uscita, inviano i dati a un computer che ne registra i valori.

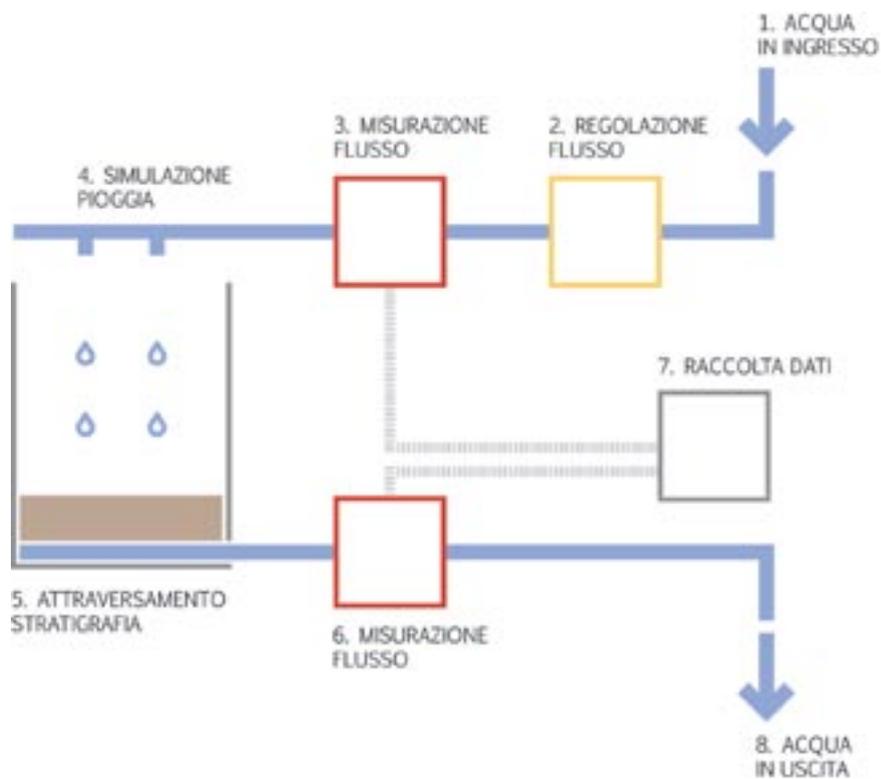


Figura V.2: Vista della camera della pioggia



pioggia proveniente dall'impianto di irrigazione (figura V.3).
L'impalcato ha una superficie rettangolare di 5 metri quadri (figura V.4) e poggia su robuste basi di calcestruzzo. Presenta un'inclinazione regolabile dal 2% al 9% attraverso il semplice inserimento di spessori fra la superficie inferiore dell'impalcato e le sottostanti basi di calcestruzzo. Lungo tre dei quattro spigoli l'impalcato è chiuso da sponde alte 20 centimetri atte a contenere il sistema a verde da sottoporre ai test; la sponda laterale è interrotta

ASSETTO DI BASE DELLA
CAMERA DELLA PIOGGIA (5.)

Figura V.3



PARTICOLARI DELL'IMPALCATO E
DELLA GRONDA DI RACCOLTA
DELLE ACQUE(5.)

Figure V.4 e V.5

lungo uno dei quattro spigoli per consentire il deflusso dell'acqua verso una gronda (figura V.5). Le sponde e l'impalcato sono completamente rivestiti da una membrana a base di poliolefina che ne garantisce la totale impermeabilità durante le simulazioni.

Le pareti di vetro che racchiudono il volume della stanza sono intelaiate ad una struttura scatolare rigida di alluminio (figura V.6): esse non possono essere aperte singolarmente, ma possono essere interamente sollevate da due verricelli (figure V.7 e V.8) a cui è agganciato il telaio di alluminio. La struttura portante delle quattro pareti è semplicemente appoggiata alle fasce laterali dell'impalcato ligneo di base.

IL SISTEMA DI CHIUSURA LATERALE VETRATO (5.)

Figure V.6, V.7 e V.8





IL SIMULATORE DI PIOGGIA (4.)

Figure V.9, V.10 e V.11

Il fenomeno della pioggia viene simulato da un particolare sistema di irrigazione (figure V.9, V.10 e V.11): tale sistema è composto da due tubicini paralleli che presentano ogni 30 centimetri un ugello che spruzza acqua in forma nebulizzata. La maglia viene sostenuta e irrigidita da una struttura di profilati in alluminio che si appoggia sul telaio perimetrale superiore delle pareti di vetro.

La regolazione dei volumi d'acqua immessi nella stanza avviene grazie a due strumenti che governano l'intensità e la frequenza dell'evento piovoso (figure V.12 e V.13 nella pagina successiva): essi sono rispettivamente un manometro (figura V.14) e un sistema di valvole in parte automatico (figura V.15) e in parte manuale. Il manometro, modificando la pressione dell'acqua, consente di regolare l'intensità dell'evento piovoso. Esso presenta un intervallo di lavoro compreso fra 0 e 6 bar e la sua regolazione avviene attraverso la rotazione manuale di una ghiera.

Le valvole invece consentono di impostare la frequenza e la durata degli eventi piovosi; oltre alla valvola automatica, il percorso d'ingresso dell'acqua è regolabile attraverso tre rubinetti operabili manualmente. Essi rappresentano un sistema di sicurezza dell'apertura e della chiusura dei volumi in ingresso, oltre che di correzione delle valvole automatiche.

La valvola automatica viene regolata attraverso un'interfaccia che presenta quattro canali, ciascuno dei quali ha quattro programmi (figura V.16): si possono quindi impostare sedici impulsi automatici per ciascuna sessione dopo la quale è necessario intervenire manualmente.

I REGOLATORI DEL FLUSSO (2.)

Figure V.12 e V.13



APPARECCHIATURE DI REGOLAZIONE DEL FLUSSO (2.)

Figure V.14, V.15 e V.16





I MISURATORI DI FLUSSO (2. e 6.)
Figure V.17 e V.18

La misurazione dei volumi d'acqua immessi nella stanza e defluiti da essa avviene attraverso due flussimetri (figure V.17 e V.18): il primo misura i flussi in ingresso ed è posizionato fra il manometro e l'impianto di irrigazione, il secondo misura i flussi in uscita ed è posizionato dopo il canale di gronda. Ciascuno dei due flussimetri registra due valori: il flusso (che date queste condizioni equivale all'intensità e alla portata), espresso in litri al minuto, e il volume totale d'acqua transitata, espresso in litri.

I flussimetri trasmettono i dati a una centralina (figura V.19) che invia i valori a un computer. I dati dei flussi sono espressi in litri al minuto e vengono registrati ogni 15 secondi.

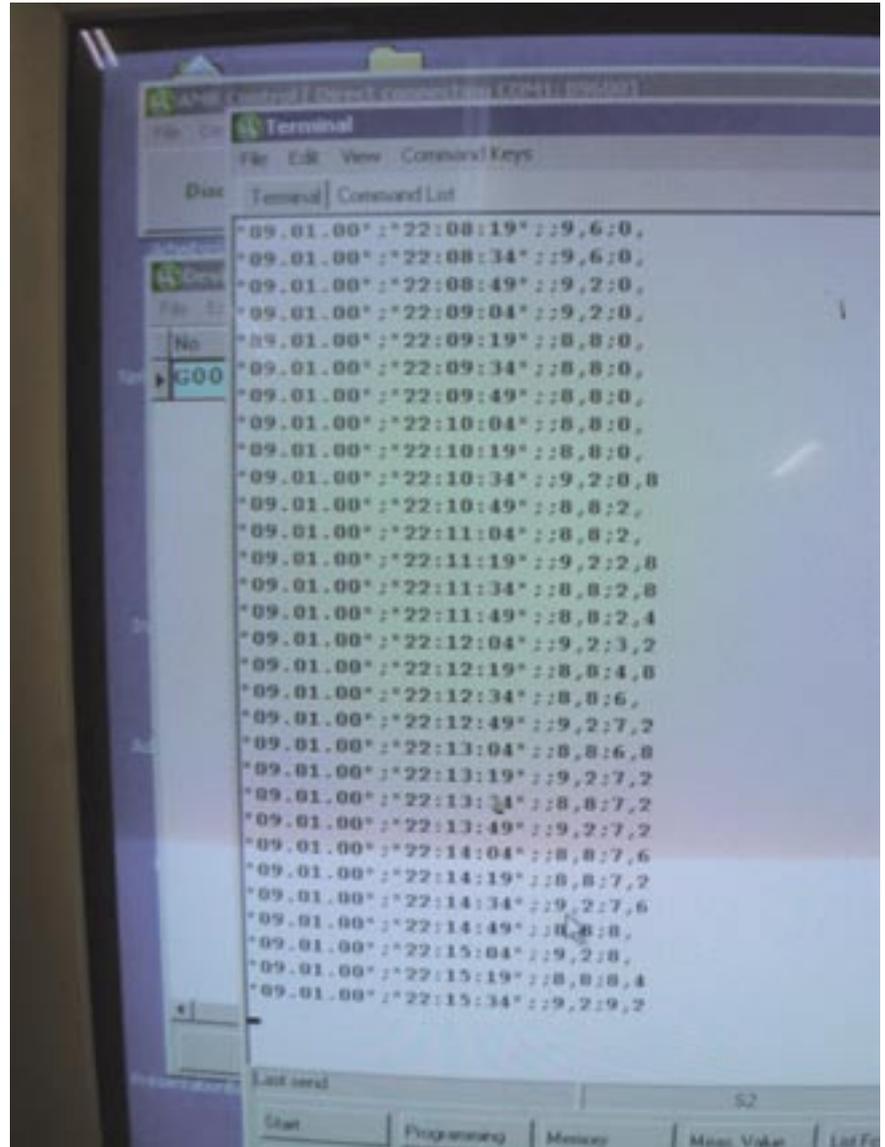
I programmi utilizzati per l'elaborazione dei dati sono:

1. *AMR-Control versione 5.10.0.125 | 05-12-2006* per la registrazione dei dati misurati dal flussimetro di uscita (figura V.20);
2. *Microsoft Excel* per l'elaborazione.



FASI DI REGISTRAZIONE
DEI DATI (7.)

Figure V.19, V.20 e V.21



V.3

I dati in ingresso: il clima padano-veneto

Per gli obiettivi posti dalla ricerca attraverso questa sperimentazione è stato necessario selezionare dati d'ingresso significativi riguardanti gli eventi piovosi intensi. Dati da cui ottenere, sulla base di opportune valutazioni di tipo qualitativo, una risposta idrologica significativa per le prestazioni idriche della stratigrafia prescelta per la sperimentazione. Posto che il valore della ritenzione idrica, espresso dal coefficiente di deflusso ψ , si ottiene attraverso una sperimentazione normata dall'FLL⁴⁴, utilizzando quindi valori di ingresso prestabiliti, la ricerca dei dati si è concentrata sui valori necessari al calcolo della detenzione idrica, pertanto è stato scelto di analizzare le piogge intense verificatesi in un determinato territorio.

Sebbene sia corretto ritenere che gli eventi meteorici intensi, cioè i forti acquazzoni e i nubifragi, presentino picchi di intensità analoghi in territori caratterizzati da diversi regimi pluviometrici (in altre parole i rovesci violenti presentano intensità simili sia nella maggior parte delle regioni italiane, sia nel centro-nord Europa: le piogge intense non sono caratterizzate da portate differenti, piuttosto da distribuzioni stagionali differenti), è stato fondamentale studiare l'andamento delle precipitazioni di una zona definita al fine di estrarre dati significativi per la sperimentazione, ma anche ponderare, in una fase successiva, gli esiti ottenuti.

La lettura dei dati è stata quindi contestualizzata a una condizione climatica reale e non ipotetica, fornendo così, per una circoscritta porzione di territorio, risposte soppesate in ragione di una ben definita e documentata caratterizzazione climatica.

I dati scelti per l'analisi statistica delle piogge intense sono stati quelli relativi alla città di Vicenza, e precisamente quelli registrati dalla stazione agrometeorologica Arpav di Quinto Vicentino⁴⁵ (paese conurbato alla città). Quest'area è stata scelta principalmente per due motivi: in primo luogo le caratteristiche climatiche sono rappresentative di una vasta porzione del territorio padano-veneto e in particolare delle province di Vicenza, Verona, Padova e Treviso. Le figure V.21 e V.22 mettono in evidenza che in tutta la fascia centrale della regione la piovosità media annua è elevata (compresa fra

DEFINIZIONE DEI PARAMETRI CLIMATICI

⁴⁴ FLL: "Green roofing guidelines", 2008: 101-102.

⁴⁵ I dati sono stati forniti dal Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - Servizio Centro Meteorologico di Teolo, e sono stati registrati dalla Stazione agrometeorologica di Quinto Vicentino.

Tabella V.1 e V.2: Precipitazioni medie annuali di alcune città italiane ed europee

Confrontando i valori delle precipitazioni medie annuali riportati nelle tabelle si evince che la piovosità in Italia è mediamente superiore rispetto a quella della maggior parte dei territori europei.

Fonte: Autore Ignoto, Precipitazioni, usai_cap: 25-26.

Città	Precipitazione media annua per il secolo 1851-1950 (in mm)
Milano	994
Venezia	748
Genova	1271
Parma	749
Modena	669
Bologna	678
Firenze	851
Perugia	933
Roma	836
Napoli	867
Palermo	694

Capitale o città	Precipitazione media annua per il trentennio 1961-1990 (in mm)
Amsterdam	780
Atene	368
Berlino	584
Bruxelles	820
Bucarest	595
Budapest	516
Copenaghen	525
Dublino	733
Hebinki	615
Istanbul	678
Tallinn (Estonia)	675
Lisbona	751
Londra	611
Lubiana	1368
Madrid	427
Milano	943
Mosca	691
Oslo	763
Parigi	644
Praga	526
Riga (Lettonia)	633
Roma	733
Sofia	571
Stoccolma	539
Varsavia	520
Vienna	621
Vilnius (Lituania)	683
Zurigo	1086

900 e 1100 millimetri) e non esiste una vera e propria stagione secca. Differentemente dalla maggior parte dei territori italiani, infatti, le estati presentano una piovosità circa pari a quella autunnale e primaverile, mentre l'inverno è la stagione meno piovosa. Questi dati rispecchiano una distribuzione delle piogge costante in tutte le province del Veneto, pur con valori medi differenti in relazione alla latitudine.

In secondo luogo anche da un punto di vista dell'uso del suolo Vicenza e la sua area metropolitana sono rappresentative di una tipica zona antropizzata del nord-est italiano. Collocati in pianura, la città e i comuni limitrofi sono caratterizzati da una vasta occupazione del suolo sia per la presenza di un centro storico di proporzioni urbane (quindi sufficientemente esteso), sia per le attività produttive industriali e per le infrastrutture presenti nella cintura urbana. Al pari di molti capoluoghi di provincia l'area soffre di una alterazione significativa del segmento del ciclo idrologico al suolo a causa dell'urbanizzazione.

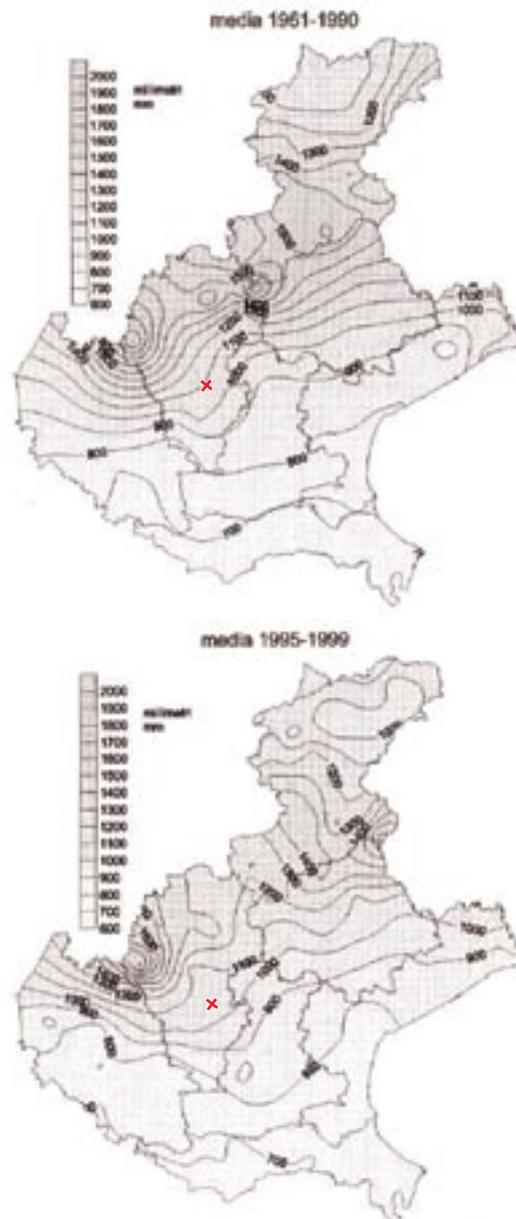


Figure V.21 e V.22: Piovosità media annua della Regione Veneto negli intervalli 1961-1990 e 1995-1999

L'area scelta per l'analisi dei dati in ingresso è la città di Vicenza, collocata sulla isoietta dei 1100 millimetri annuali.

Fonte: ARPAV, *La caratterizzazione climatica del territorio veneto*, Rovigo: Europrint Rovigo: 9.

Dai dati messi in evidenza nelle figure V.21 e V.22 emerge che l'andamento delle precipitazioni medie annuali si può ritenere crescente da sud a nord: la provincia di Rovigo presenta una precipitazione media annua di 700 millimetri, mentre, man mano che ci si dirige verso nord, le precipitazioni aumentano. Le province di Venezia e Padova variano da 800 a 1000 millimetri, mentre le aree più piovose della regione sono quelle in corrispondenza dei primi rilievi orografici, nelle province di Verona, Vicenza e Belluno, dove si raggiungono normalmente i 1500 millimetri all'anno e, in prossimità di alcuni rilievi, i 2000 millimetri. La città di Vicenza, segnata dalla croce rossa, si trova circa sulla isoietta dei 1100 millimetri.

Se si confrontano questi dati con i valori delle precipitazioni di altre città italiane elencati nella tabella V.1 nella pagina a fianco si vede come Vicenza e la sua cintura presentino una piovosità fra le più elevate d'Italia, da cui trarre, pertanto, valori di intensità della precipitazione significativamente alti per la verifica sperimentale.

Nel dettaglio lo studio delle precipitazioni è stato condotto analizzando i dati di piovosità registrati dal 1992 (anno ufficiale di inizio delle misurazioni nella stazione agrometeorologica ARPAV di Quinto Vicentino) al 2009. In particolare i dati trattati a livello statistico sono stati:

1. i 5 valori annuali più alti delle piogge intense della durata di 5 minuti (definiti picchi d'intensità di pioggia a 5 minuti). In altre parole per ciascuno dei 18 anni sono state estratte le 5 intensità più alte registrate in un intervallo di tempo di 5 minuti, corrispondenti quindi a 90 valori;
2. i valori giornalieri di pioggia. Per ciascuno dei 18 anni sono stati elaborati i valori di pioggia giornalieri.

Dal confronto di questi dati sono poi stati selezionati due periodi della durata di 10 giorni ciascuno, precisamente dall'8 al 17 settembre 1994 e dal 4 al 13 agosto 2002, in cui si è verificata la più alta concentrazione di piogge intense nell'arco dei 18 anni analizzati. Di questi due periodi sono stati osservati successivamente:

3. i valori di pioggia registrati a 5 minuti, ossia l'intera progressione degli eventi meteorici dei due periodi scelti registrata a intervalli di 5 minuti.

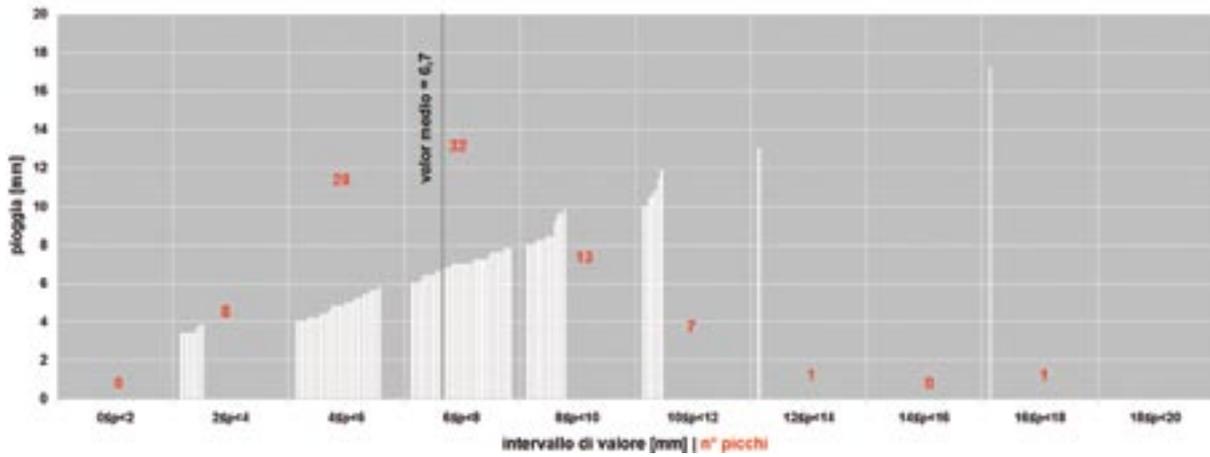
Osservando le distribuzioni e le medie dei picchi si comprende complessivamente l'andamento delle piogge intense dell'area scelta.

Come si vede dal grafico rappresentato nella figura V.23 i picchi di intensità di pioggia analizzati presentano un valore medio pari a 6,7 millimetri. Osservando la distribuzione dei valori si nota che la maggior parte dei picchi è compresa fra 6 e 8 millimetri (32 valori) e secondariamente fra 4 e 6 millimetri (28 valori).

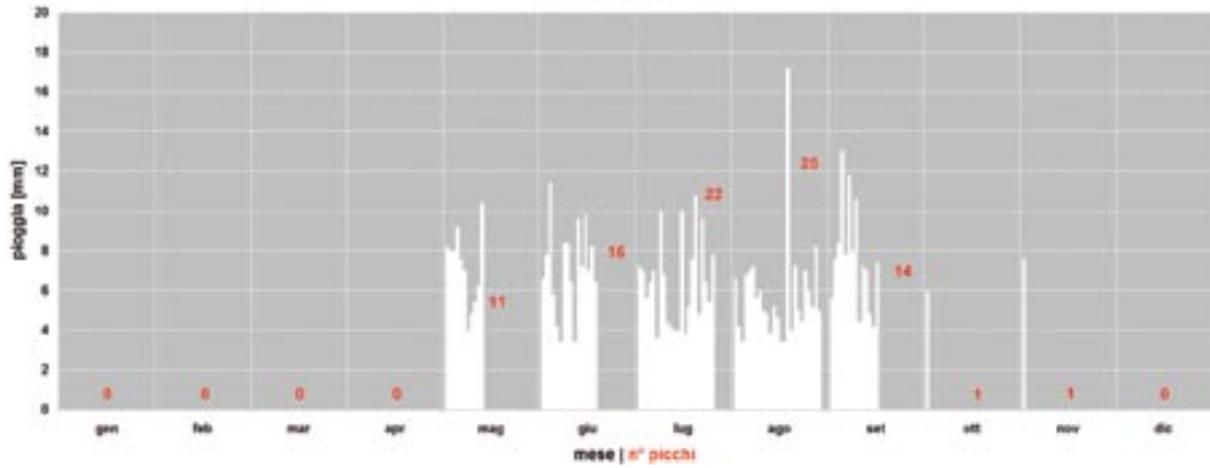
La distribuzione mensile dei picchi rappresentata nella figura V.24 mette in evidenza che la totalità dei picchi di massima intensità di pioggia è distribuita nei mesi che vanno da maggio a settembre, con una distribuzione più elevata a luglio e agosto (47 picchi su 90).

Per la scelta dei valori da sottoporre a sperimentazione si è osservata la distribuzione dei valori più alti e la piovosità giornaliera riferita a questi picchi. Come si vede nelle figure V.23 e V.25 il picco più elevato in assoluto è pari a 17,2 millimetri, seguono otto valori superiori a 10 millimetri. Di tutti questi

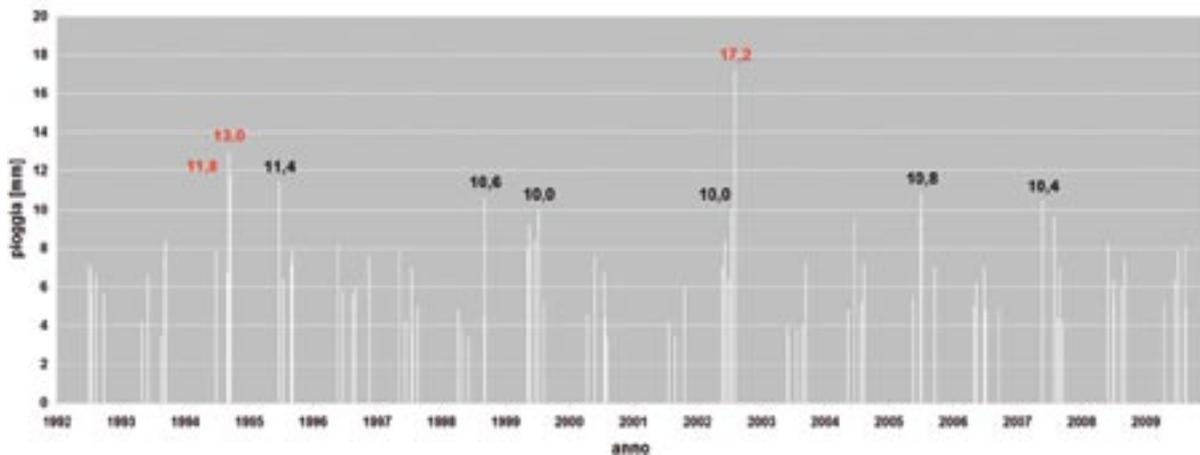
Distribuzione dei valori dei picchi di massima intensità di pioggia $\Delta t = 5$ min
1992 - 2009



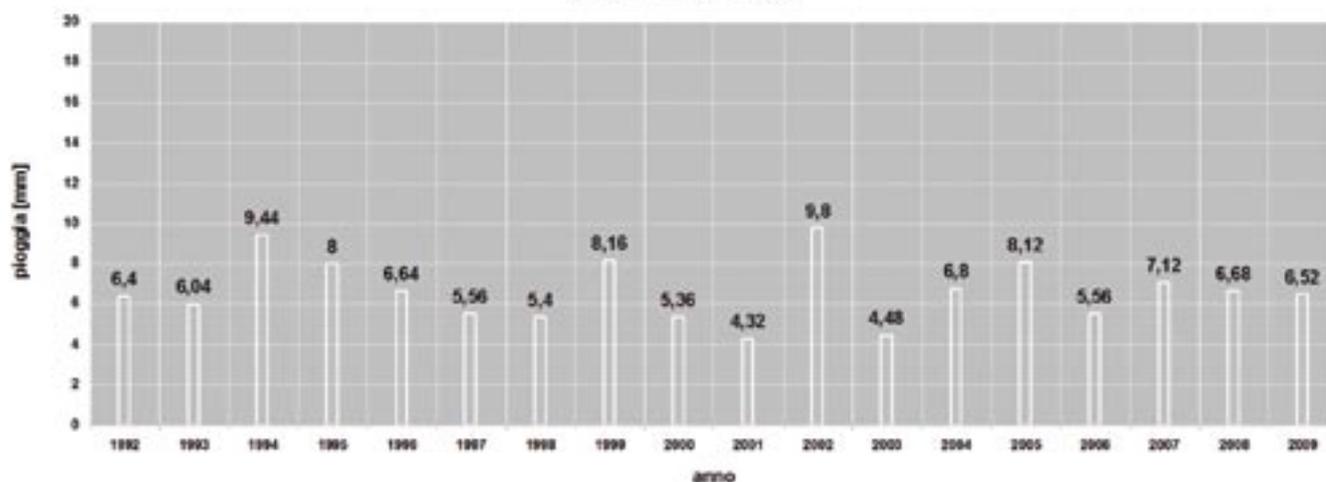
Distribuzione mensile dei picchi di massima intensità di pioggia $\Delta t = 5$ min
1992 - 2009



Distribuzione annuale dei picchi di massima intensità di pioggia $\Delta t = 5$ min
1992 - 2009



Valor medio annuale dei picchi di massima intensità di pioggia
 $\Delta t = 5\text{min}$ 1992 - 2009



Valor medio mensile dei picchi di massima intensità di pioggia
 $\Delta t = 5\text{min}$ 1992-2009

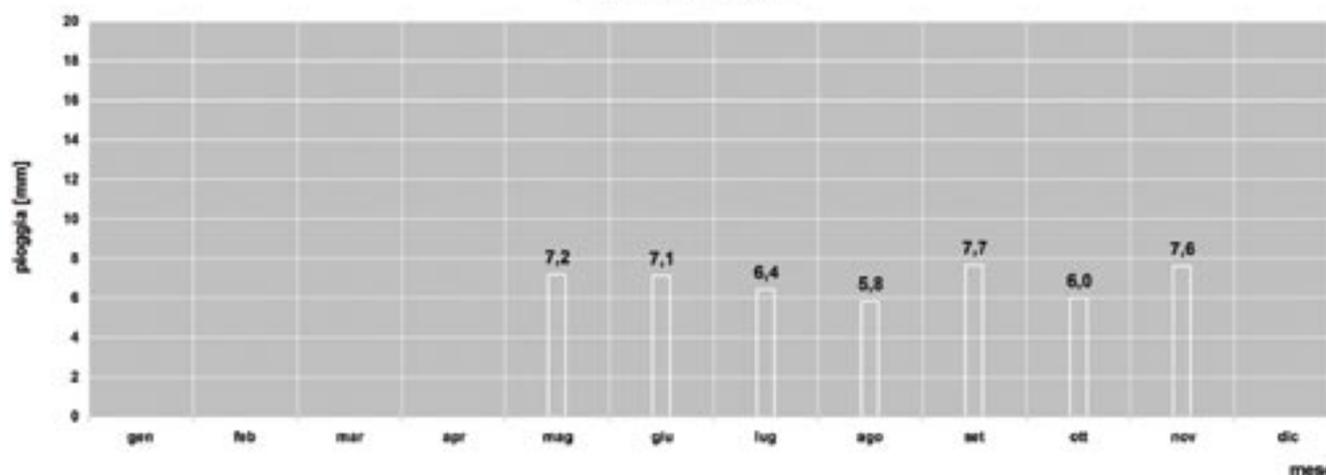


Figura V.28: Valor medio annuale dei picchi di massima intensità di pioggia

Figura V.29: Valor medio mensile dei picchi di massima intensità di pioggia

Tabella V.3: Valori dell'intensità della pioggia e definizioni

La tabella associa i valori caratterizzanti l'intensità della pioggia con le "definizioni di pioggia" secondo il senso comune. I picchi di intensità utilizzati in questo esperimento sono ampiamente superiori ai fenomeni comunemente percepiti come "nubifragi".

DEFINIZIONE DELLA PIOGGIA IN BASE ALL'INTENSITÀ	mm/ora	mm/5min
PiovigGINE	< 0,5	< 0,04
Pioggia leggera	1	0,08
Pioggia moderata	4	0,35
Pioggia forte	15	1,25
Pioggia violenta	40	3,35
Nubifragio	100	8,35

V.4

Fasi e sessioni dell'esperimento

Prima di eseguire le varie sessioni sperimentali atte a fornire i valori della ritenzione e della detenzione idrica è stato necessario effettuare una serie di operazioni per mettere a punto la camera della pioggia.

La sostituzione di svariati strumenti, la pulizia dei flussimetri, la taratura del manometro sono stati interventi necessari a garantire l'attendibilità dei dati di uscita e quindi un esito positivo della sperimentazione. La sperimentazione è iniziata dopo un'accurata taratura degli strumenti che ha consentito, oltre alla verifica del funzionamento di tutti gli apparecchi, il calcolo della corrispondenza tra la pressione dell'acqua in ingresso, regolabile manualmente dal manometro, e l'intensità della pioggia corrispondente ai dati. Successivamente alla taratura è stata costruita la stratigrafia del sistema a verde; la figura V.30 nella pagina successiva ne rappresenta la sezione.

La copertura sottoposta all'esperimento è un sistema multistrato di spessore complessivo pari a 15 centimetri. La stratigrafia è costituita da:

1. strato colturale: è una miscela inorganica di pietre vulcaniche di 10 centimetri di spessore. Le prestazioni idriche attese di questa miscela sono un'elevata capacità drenante contro una scarsa capacità di accumulo idrico;
2. elemento filtrante: è un foglio di polipropilene dello spessore di 0,6 millimetri;
3. elemento drenante e di accumulo idrico: si tratta di un pannello preformato in polipropilene riciclato, dello spessore di 6 millimetri, caratterizzato da una capacità massima di accumulo idrico pari a 4 litri al metro quadro;
4. elemento di protezione meccanica: è un tessuto di polipropilene riciclato di spessore pari a 5 millimetri.

Le varie simulazioni sono state distribuite in un arco di tempo di quattro giorni. La programmazione è stata effettuata stabilendo un inter-evento di 18 ore, ad eccezione dell'FLL test per il quale l'inter-evento di 24 ore è stato regolarmente rispettato. La tabella V.5 nella pagina successiva sintetizza il cronoprogramma delle varie sessioni sperimentali.

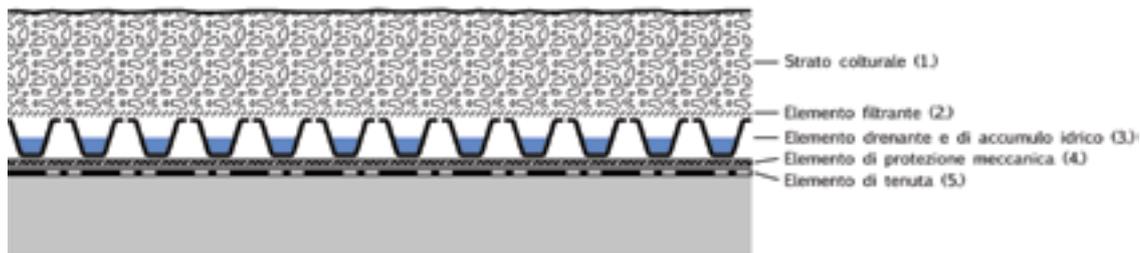


Figura V.30: Sezione della stratigrafia dell'esperimento

Il sistema a verde costruito per l'esperimento è di tipo estensivo. Lo spessore del substrato è pari a 10 centimetri e l'elemento di accumulo idrico ha una capacità di 4 litri al metro quadro.

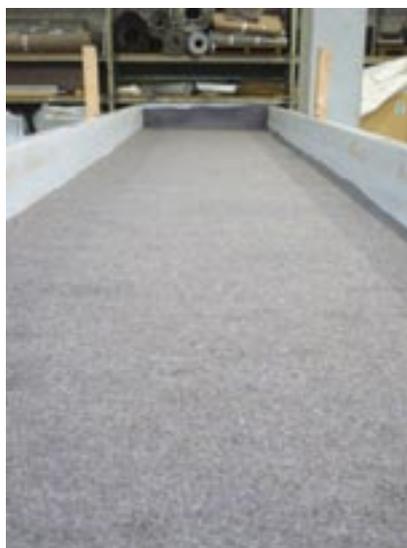
Fonte: ZinCo

Figure-serie V.31: Sequenza di costruzione del sistema a verde della sperimentazione

Il sistema impiegato nella sperimentazione è una stratigrafia multistrato realizzata a norma. Sopra la membrana impermeabile in poliolefina è stato steso l'elemento di protezione meccanica, successivamente appoggiato un pannello di accumulo idrico e

di drenaggio, quindi l'elemento filtrante e lo strato culturale.

Nelle sperimentazioni la vegetazione non è prevista, secondo le prescrizioni normative dell'FLL, perchè è uno strato di cui non è possibile descrivere un comportamento costante.



CARATTERISTICHE DEL SUBSTRATO		
PROPRIETÀ	UNITÀ	VALORE
Densità apparente - materiale secco	Kg/m ³	980
Densità apparente - alla massima capacità di accumulo	Kg/m ³	1390
Porosità	% volume	63
Massima capacità di accumulo	% volume	40
Contenuto d'aria alla massima capacità di accumulo	% volume	23
Contenuto organico	% massa	3,2
pH	- - -	7,7

Tabella V.4: Caratteristiche del substrato

I dati riguardanti il substrato mettono in evidenza le principali caratteristiche del materiale: la densità apparente è piuttosto elevata (980 kg/m³) e la capacità di accumulo idrico è pari al 40% del volume totale. Confrontando questi dati con le curve di ritenzione delle figure IV.15-IV.20 del capitolo precedente emerge che le caratteristiche di questo substrato siano analoghe per capacità di accumulo a quelle della pomice, ma inferiori per il contenuto d'aria. Dalla lettura dei dati è prevedibile che le prestazioni idriche siano tendenzialmente limitate.

Fonte: Certificazione ZinCo

La simulazione 1 è da considerarsi particolarmente importante in quanto le condizioni di partenza dell'umidità del substrato erano note: il substrato era arido e questo ha consentito di verificare la capacità di accumulo idrico. Questo esperimento è stato quindi interessante non tanto per osservare la detenzione idrica della copertura, poichè la condizione di aridità è inverosimile per un sistema a verde costruito, quanto per la verifica della capacità massima di accumulo. Il picco simulato è stato quello più elevato registrato il 4 agosto 2002, pari a 17,2 millimetri.

La simulazione 2 è stata condotta esattamente con gli stessi dati di ingresso della simulazione 1, con un inter-evento di 3 ore. La simulazione 3 ha eseguito l'evento meteorico caratterizzato dalla serie ripetuta di picchi dell'8 settembre del 1994. Questa simulazione, come tutte le successive, è stata avviata allo scadere di 18 ore di inter-evento. In questa fase è stato possibile notare come la copertura abbia reagito sia alla pioggia intensa, sia alla pioggia leggera.

La simulazione 4 è dedicata al calcolo del coefficiente di deflusso ψ che si effettua con un valore di picco predefinito ($\psi = 9$ millimetri/5minuti) e infine nella simulazione 5 è stata ripetuta la simulazione 3, cioè l'evento caratterizzato dalla serie di picchi dell'8 settembre 1994, inclinando la copertura al valore massimo possibile pari al 9%. Questo ha consentito di verificare la differenza fra la risposta idrologica di una copertura piana e di una copertura inclinata.

Gli esperimenti sono stati eseguiti attraverso una procedura standard che prevedeva una serie di verifiche preventive del funzionamento dei singoli apparecchi prima di ogni sessione, al fine di non immettere erroneamente nella camera della pioggia volumi d'acqua non previsti dalla programmazione dell'esperimento.

SIMULAZIONE n° [n]	Data di esecuzione simulazione [gg mmm aaaa]	Data dell'evento [gg mmm aaaa]	Inclinazione copertura [%]	Durata dell'evento [ora h min']	Valore del picco [mm]
Taratura	19-22 mar 2010	- - -	2%	- - -	- - -
1	23 mar 2010	04 ago 2002	2%	1 h 35'	17,2
2	23 mar 2010	04 ago 2002	2%	1 h 35'	17,2
3	24 mar 2010	08 set 1994	2%	5h 40'	13,0 11,0 9,2 8,0 5,4
4	25 mar 2010	- - -	2%	7h 00'	FLL test 9,0
5	26 mar 2010	8 set 1994	9%	5h 40'	13,0 11,0 9,2 8,0 5,4

**Tabella V.5: Cronoprogramma delle
sessioni sperimentali**

V.5

I dati in uscita: analisi e confronto dei risultati

Simulazione 1 - sintesi dei dati in ingresso				
Durata dell'intero evento [ora ^h mm']	Intensità del picco [mm/5min]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]	Inclinazione della copertura [%]	
1 ^h 23'	17,2	170,0	2%	
Umidità del substrato all'inizio della simulazione				
Substrato arido				
Grandezze indagate - sintesi dei dati in uscita				
Capacità di accumulo [l]	Ritardo della risposta idrologica [ora ^h mm']	Ritardo del conferimento del picco [mm' ss'']	Riduzione dell'intensità del deflusso [mm/5min]	Volume totale del deflusso [l]
290	1 ^h 23'	Non è stato conferito alcun picco	Il valore massimo del deflusso è stato 1,6mm/5min	6,5

Nella **simulazione 1** si è verificato che conseguentemente all'intercettazione di 170 litri d'acqua la stratigrafia ne abbia ceduti 6,5 litri, equivalenti al 3,8% del totale di questa sessione. La scarsissima quota di acqua gravitazionale è determinata dall'iniziale stato arido del substrato: in questa fase non è stato quindi conferito alcun picco di intensità infatti il valore massimo del deflusso è stato 1,6 millimetri/5minuti. Il substrato è riuscito a trattenere 145 litri d'acqua, quindi la capacità di accumulo qui dimostrata è stata pari a 290 litri al metro quadro. Tale valore è inferiore a quello fornito dalla scheda tecnica del materiale (40% del volume cfr. tabella V.4) probabilmente perché nell'arco di 1 ora e 23 minuti di pioggia l'acqua non è stata assorbita fino nelle cavità più profonde e completamente asciutte del materiale.

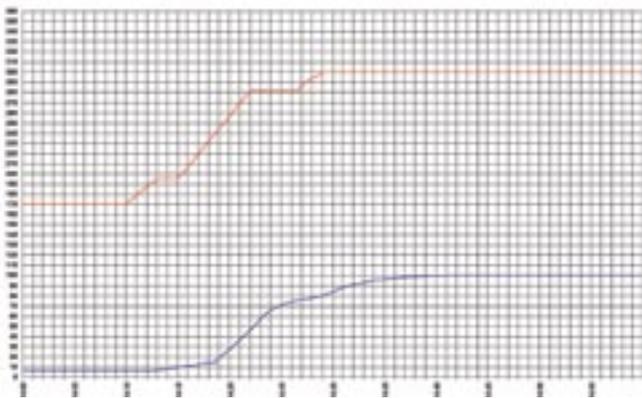
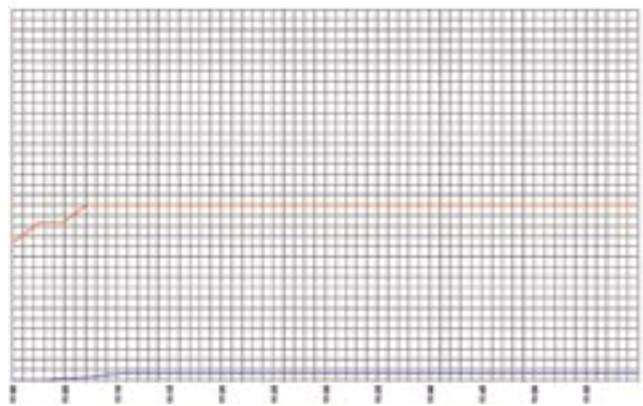
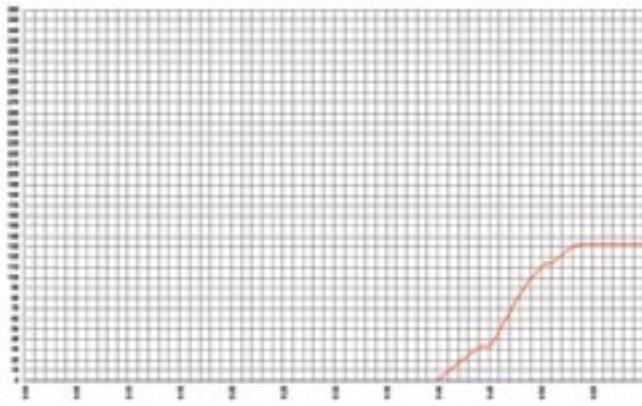


Figure-serie V.32: Porzioni significative dei grafici delle simulazioni 1 (in alto) e 2 (a sinistra)

La linea rossa rappresenta la cumulata della pioggia, mentre la linea blu la cumulata del deflusso. Nel primo esperimento si evidenzia che alle 11.03 inizia a generarsi un minimo deflusso che dopo 7 minuti raggiunge la quota di 6,5 litri. Sono stati immessi 170 litri d'acqua. 3 ore dopo la simulazione 1 è stata avviata una nuova sessione: come si vede il deflusso si genera dopo 3 minuti dall'inizio dell'evento meteorico, ma la sua intensità è significativamente più bassa, ciò è descritto dalla differenza fra la pendenza delle due curve. Il deflusso è complessivamente ritardato rispetto al verificarsi della pioggia e ridotto nei volumi.

Simulazione 2 - sintesi dei dati in ingresso			
Durata dell'intero evento [ora ^h mm']	Intensità del picco [mm/5min]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]
1 ^h 23'	17,2 mm	170,2	2%
Umidità del substrato all'inizio della simulazione			
Superiore alla capacità di campo: la stratigrafia rilascia minimi volumi d'acqua, inferiori a 0,4 l/min. Inter-evento = 3 ore			
Grandezze indagate - sintesi dei dati in uscita			
Ritardo della risposta idrologica [ora ^h mm']	Ritardo del conferimento del picco [mm' ss'']	Riduzione dell'intensità del deflusso [mm/5min]	Volume totale del deflusso [l]
3'	8' 45''	2,4	124,8

Nella **simulazione 2**, effettuata dopo 3 ore dalla fine della simulazione 1, la stratigrafia satura d'acqua ha risposto con un ritardo di 3 minuti: dopo quest'intervallo di tempo, infatti, piccoli volumi d'acqua registrabili dai flussimetri hanno iniziato a defluire dalla copertura. Dopo 9 si sono generati deflussi consistenti, ma d'intensità comunque inferiore a quella dell'acqua immessa. Le figure della serie V.32 mostrano le curve più significative delle simulazioni 1 e 2: la linea rossa rappresenta la pioggia e la linea blu il

deflusso. Come si vede dalle due curve in alto della figura V.32, riferite alla simulazione 1, il deflusso è molto basso, differentemente la curva sottostante mostra che la risposta idrica della sessione 2 è stata molto più rapida e più consistente. Ciò nonostante l'intensità del deflusso è inferiore all'intensità della pioggia, questo si evince dal confronto delle pendenze delle due curve.

Simulazione 3 - sintesi dei dati in ingresso			
Durata dell'intero evento [ora ^h mm']	Intensità del picco [mm/5min]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]
5 ^h 40'	13,0 - 11,0 - 9,2 - 8,0 - 5,4	357,0	2%
Umidità del substrato all'inizio della simulazione			
Substrato umido, inferiore alla capacità di campo - Inter-evento = 18 ore			
Grandezze indagate - sintesi dei dati in uscita			
Ritardo della risposta idrologica [ora ^h mm']	Ritardo del conferimento del picco [mm' ss'']	Riduzione dell'intensità del deflusso [mm/5min]	Volume totale del deflusso [l]
3'	7' 30''	2,0	313,5

Nella **simulazione 3** la copertura ha registrato la presenza di acqua gravitazionale dopo 3 minuti dall'inizio dell'evento meteorico: lo strato colturale, avendo raggiunto e superato la capacità di campo 18 ore prima, è ormai saturo e rilascia quindi rapidamente l'acqua che riceve. Durante l'intera sessione della durata di 5 ore e 40 minuti, in cui è stata simulata una lunga serie di eventi molti dei quali caratterizzati da un'elevata intensità, sono stati raggiunti valori di picco di deflusso elevati. Complessivamente in questa sessione la copertura ha dimostrato di reagire sia con una riduzione delle portate, sia con un ritardo del conferimento del deflusso all'inizio della sessione, mentre in una fase successiva la riduzione delle portate si è quasi annullata e il beneficio è stato solamente il ritardo del conferimento del deflusso.

La **simulazione 4** ha dato come esito il coefficiente di ritenzione idrica ψ del sistema a verde adottato. Tale valore corrisponde a 0,68. Il valore ottenuto è secondo le aspettative più basso rispetto ai valori presenti nella letteratura scientifica che si riferiscono a stratigrafie a verde di pari spessore. Nella tabella V.6 il valore è messo a confronto con i coefficienti standard ordinati secondo lo spessore; una copertura a verde di 10 centimetri dovrebbe avere un coefficiente compreso fra 0,4 e 0,5. La copertura dell'esperimento, invece, ha un valore prossimo alle coperture continue zavorrate con uno strato di ghiaia. In realtà tale esito è probabilmente determinato dall'eccezionale quantità d'acqua a cui la copertura è stata sottoposta nelle sedute dei tre giorni precedenti. In ogni caso, non essendoci prescri-

Simulazione 4 - sintesi dei dati in ingresso			
Durata dell'intero evento [ora ^h mm']	Intensità del picco [mm/5min]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]
15' ripetuto 4 volte con differenti inter-eventi	9,0	135,0 135,0 · 4 = 540,0	2%
Umidità del substrato all'inizio della simulazione			
Substrato umido inferiore alla capacità di campo - Inter-evento = 24 ore la prima volta; i successivi 3 ore, 2 ore, 1 ora			
Grandezze indagate - sintesi dei dati in uscita			
Coefficiente di deflusso			
0,68			

zioni normative circa lo stato di saturazione antecedente alle 24 ore prima del verificarsi del test, tale valore è da considerarsi attendibile.

La figura V.33 rappresenta il grafico descrittivo di questa simulazione. Il coefficiente di deflusso si calcola immettendo per 15 minuti pioggia all'intensità di 9 millimetri/5minuti, che per una copertura di 5 metri quadri corrispondono a 135 litri in 15 minuti. Tale simulazione dev'essere effettuata 24 ore dopo aver portato a saturazione il substrato della copertura. Come si vede dal grafico il volume dell'acqua defluita al quindicesimo minuto è pari a 92 litri su 135 (dato da cui deriva il valore del coefficiente, 92/135). È interessante notare che anche in questa terza giornata di simulazione il ritardo della risposta idrologica è di circa 3 minuti e che il deflusso presenta a partire dall'ottavo minuto un'intensità pari a quella dell'evento meteorico. Come già descritto nella simulazione 3 il substrato è in grado di accettare una quantità molto limitata d'acqua per il suo stato di persistente saturazione dei giorni precedenti.

La **simulazione 5** ripete i valori di intensità della simulazione 3, ma con un'inclinazione della falda al 9%. La differenza fra la risposta idrologia della falda piana e della falda inclinata è stata meno significativa delle aspettative, infatti la copertura ha anticipato la risposta di soli 20 secondi (dopo

Tabella V.6: Coefficienti di deflusso a confronto

Il coefficiente di deflusso ottenuto dalla sperimentazione è significativamente superiore (inferiore per prestazioni) al valore indicato di coperture aventi pari spessore; questo è determinato da un insieme di fattori, fra cui l'assenza di materiale organico nella miscela.

La sperimentazione ha dato come esito un valore prossimo a quello delle coperture continue zavorrate in ghiaia.

COPERTURA A VERDE		COPERTURA CON ZAVORRATURA IN GHIAIA
SPESSORE DELLO STRATO COLTURALE - S [cm]	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - Ψ	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - Ψ
10 < S < 15	0,4	0,7
6 < S < 10	0,5	
4 < S*	0,6	
Esperimento	0,68	
2 < S < 4*	0,7	

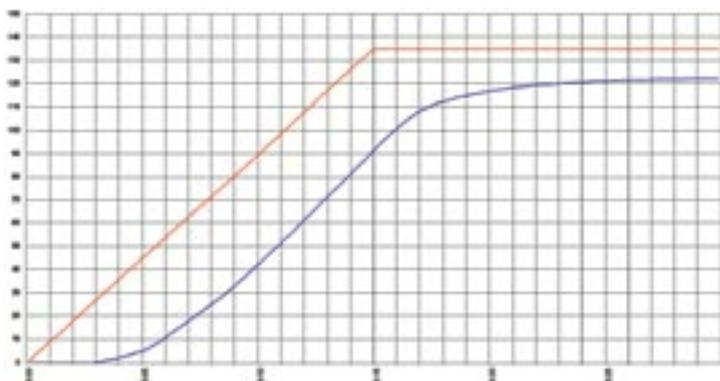


Figura V.33: Coefficiente di deflusso Ψ della copertura

Il coefficiente di deflusso ottenuto dalla sperimentazione è pari a 0,68. Al quindicesimo minuto della simulazione l'acqua rilasciata è pari a 92 litri su 135 immessi.

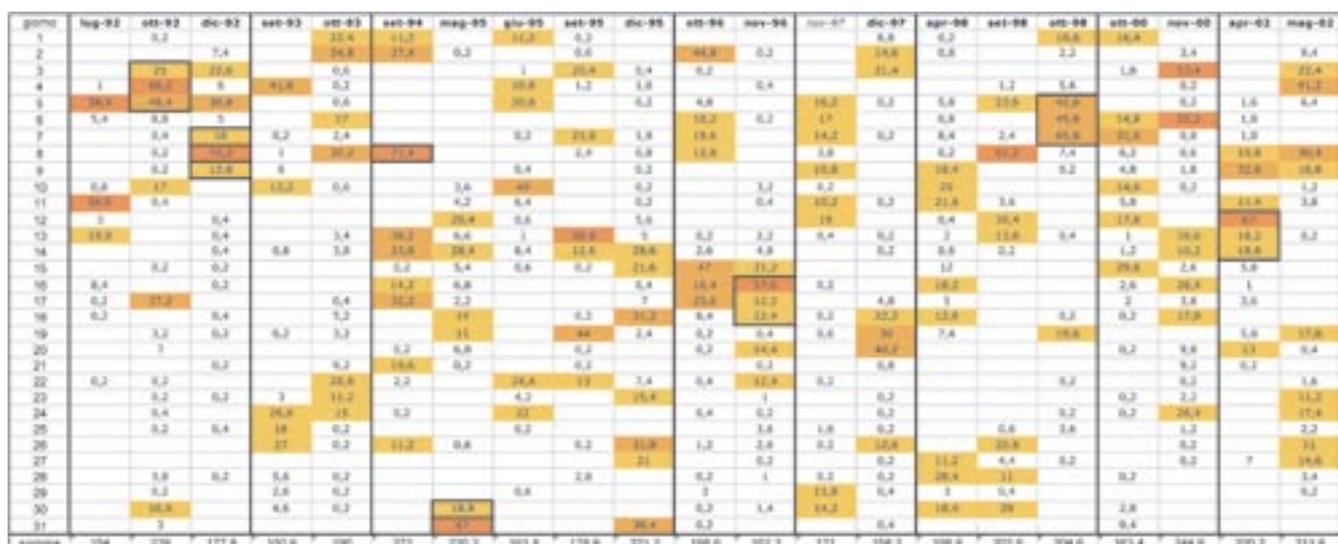
Simulazione 5 - sintesi dei dati in ingresso			
Durata dell'intero evento [ora ^h mm']	Intensità del picco [mm/5min]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]	Volume totale dell'acqua intercettata [l]
5 ^h 40'	13,0 - 11,0 - 9,2 - 8,0 - 5,4	351,4	9%
Umidità del substrato all'inizio della simulazione			
Substrato umido, inferiore alla capacità di campo - Inter-evento = 18 ore			
Grandezze indagate - sintesi dei dati in uscita			
Ritardo della risposta idrologica [ora ^h mm']	Ritardo del conferimento del picco [mm' ss']	Riduzione dell'intensità del deflusso [mm/5min]	Volume totale del deflusso [l]
2' 40"	7' 30"	1,6	305,0

2 minuti e 40 secondi, anziché 3 minuti della falda piana) l'acqua ha iniziato a defluire dalla copertura. Il picco di deflusso si è verificato dopo 7 minuti e 30 secondi in entrambi i casi e la sua intensità è stata pressoché identica a quella verificatasi con la falda piana. Da ciò si deduce che un substrato particolarmente drenante non altera significativamente il suo comportamento in relazione alla pendenza della sua giacitura.

Complessivamente l'intera sessione sperimentale è stata in grado di descrivere le prestazioni idriche del sistema tecnologico oggetto dell'indagine e tutti gli obiettivi posti a premessa della sperimentazione sono stati raggiunti:

1. volumi di ritenzione: il coefficiente di deflusso ψ della copertura è pari a 0,68, valore compatibile rispetto alle aspettative attese dalla stratigrafia sottoposta all'esperimento. Tale coefficiente rappresenta un valore limite superiore (inferiore per prestazioni) della capacità di ritenzione idrica di una copertura a verde estensivo.
2. volumi di detenzione in condizioni di umidità prossime alla capacità di campo:
 - la riduzione dell'intensità del deflusso è pari a circa il 15% dell'intensità dell'evento meteorico;
 - il ritardo del conferimento del picco presenta una durata media di circa 3 minuti;

SINTESI DEGLI ESITI



Giorni	I valore Quinto Vicentino (1992-2009)	II valore Quinto Vicentino (1992-2009)	III valore Quinto Vicentino (1992-2009)	Esperimento	Alluvione nov 2010 Quinto Vicentino	Alluvione nov 2010 Asiago Aeroporto
1	113,6 6 nov 2005	107,2 15 set 2006	83,6 3 ott 2005	108	49,8 31 ott 2010	110,6 31 ott 2010
2	123,2 5-6 nov 2005	123,2 15-16 set 2006	114,6 4-5 ott 1992	179,4	98,0 31 ott-1 nov 2010	202,2 31 ott-1 nov 2010
3	156,6 15-17 set 2006	154,2 5-7 ott 1998	139,6 3-5 ott 1992	249,4	135,0 31 ott-2 nov 2010	242,6 31 ott-2 nov 2010
4	164,6 15-18 set 2006	161,6 5-8 ott 1998	148,8 3-6 ott 1992	318,0	135,0 31 ott-3 nov 2010	242,6 31 ott-3 nov 2010

Un suolo artificiale: il ruolo dell'acqua nella progettazione della copertura a verde
Implicazioni tecnologiche e verifica sperimentale

- la riduzione delle portate, cioè la riduzione dell'acqua defluita dal sistema a verde durante eventi meteorici intensi e prolungati è pari circa al 13% dell'acqua intercettata.

Appare importante specificare che la risposta idrologica testata in questo esperimento risulta ampiamente cautelativa rispetto alle ipotetiche condizioni reali: non solo perché è stata impiegata una stratigrafia estensiva molto drenante e valori di pioggia eccezionalmente elevati, ma anche perché, in un contesto costruito, una copertura a verde perde una parte del suo contenuto d'acqua anche grazie alla traspirazione della vegetazione, mentre nell'esperimento tale processo non avviene in quanto le piante non sono presenti per le ipotesi assunte inizialmente.

Inoltre in una copertura applicata a un edificio l'evapotraspirazione è in generale più elevata rispetto all'ambiente chiuso del laboratorio a casusa dell'effetto dell'irraggiamento solare, del vento, dell'umidità relativa dell'aria, ecc. Per queste ragioni è possibile asserire che il valore $\psi=0,68$ sia verosimile ma molto prudente rispetto alle eventuali prestazioni che il substrato è in grado di garantire una volta posto in opera: l'aspettativa è quindi una prestazione di base migliore.

È necessario infine commentare gli esiti dell'esperimento rispetto ad alcune considerazioni di carattere generale riguardanti i dati in ingresso impiegati e la sequenza temporale assunta dalle diverse simulazioni.

Gli eventi meteorici si sono susseguiti in un arco temporale molto breve, infatti la stratigrafia di copertura ha ricevuto 1589 litri d'acqua (cioè 318 millimetri, valore pari a $\frac{1}{3}$ della pioggia media annuale della città) concentrati nell'arco di soli 4 giorni. Confrontando questi dati con una statistica dei mesi più piovosi registrati dal 1992 al 2009 nella città di Vicenza e con i valori dell'alluvione di novembre 2010 rappresentati nella tabella V.7 nella pagina a fianco emerge che i valori di pioggia utilizzati nella sperimentazione sono superiori a tutti quelli statistici: l'acqua immessa nella camera della pioggia durante la sessione sperimentale (quinta colonna) è stata superiore ai valori statistici più elevati delle piogge della città di Vicenza registrati dal 1992 al 2009 (seconda colonna), e superiore anche ai valori registrati durante l'alluvione di novembre 2010 (sesta e settima colonna) nei comuni del vicentino interessati dalla catastrofe.

Date le debite proporzioni con gli eventi reali, è possibile presupporre che anche se non eccezionalmente performante la copertura testata offra comunque un contributo attivo significativo alla regimazione idrica: nell'arco dei 4 giorni il substrato, infatti, è stato costantemente portato alle condizioni di massima capacità di accumulo, ed è pertanto corretto supporre che in particolare i volumi di detenzione idrica, cioè la riduzione dei picchi di deflusso, il ritardo del conferimento dei picchi e la riduzione complessiva delle portate, presentino nelle condizioni reali valori significativamente migliori.

Figure-serie V.34 nella pagina accanto: Valori giornalieri più elevati della stazione di Quinto Vicentino

Per valutare i volumi d'acqua immessi nella camera della pioggia durante la sperimentazione sono stati estratti i valori di pioggia più elevati dei 18 anni presi in considerazione. Successivamente questi valori sono stati confrontati, oltre che con i dati della sperimentazione, anche con i volumi di pioggia riferiti all'alluvione di novembre 2010, sintetizzati nella tabella V.7.

Tabella V.7: Confronto fra i volumi di pioggia eccezionali

Nell'arco dei 4 giorni di sperimentazione l'acqua intercettata dalla copertura a verde è stata pari a 318 millimetri. Questo dato è superiore sia ai massimi volumi verificatisi in 18 anni nella città di Vicenza, sia ai volumi dell'alluvione di novembre 2010.

V.6

Ipotesi di conversione delle superfici di copertura e uso del suolo della città di Vicenza

Per comprendere come la copertura a verde possa influire sull'idrologia urbana grazie alla sua capacità di ritenzione idrica (proprietà esplicitata nel quarto capitolo e verificata sperimentalmente in questo capitolo) ne è stato analizzato il comportamento in relazione a un contesto urbano reale. L'efficacia della tecnologia in termini di riduzione dei volumi di deflusso è stata accertata attraverso varie ipotesi di impiego diffuso delle coperture a verde alla scala urbana, che, come è stato approfondito nel capitolo 4, presenta significative alterazioni del ciclo idrologico causate dall'impermeabilizzazione del suolo.

A tal fine all'interno di un'area costruita il cui uso del suolo fosse noto sono stati ipotizzati differenti scenari di conversione di coperture esistenti in coperture a verde e successivamente calcolati i volumi di ritenzione dello stato di fatto e di ciascuno degli scenari ipotizzati.

Per coerenza rispetto ai dati pluviometrici trattati nel corso dell'esperimento la scelta è ricaduta sul territorio comunale della città di Vicenza. Come si vede nella figura V.35 nella pagina successiva, l'area, pari a 715 ettari, è stata suddivisa in quattro zone di colore diverso in dipendenza da differenti valori di impermeabilizzazione del suolo. L'uso del suolo è stato classificato in 2 principali categorie, superfici impermeabili e superfici permeabili; per ciascuna di esse, inoltre, sono stati definiti due sotto-gruppi, ossia superfici di copertura e altre superfici impermeabili (strade, piazze, lastricati ecc.), e superfici invadite e coperture a verde.

Le tabelle evidenziate dai quattro diversi colori nella figura V.35 illustrano le percentuali d'uso per ciascuna area della città:

- l'area grigia, che individua il centro storico di Vicenza, è l'area più densamente costruita, il cui uso del suolo è caratterizzato dal 90% di superfici impermeabili (il 50% a coperture e il 40% a strade e piazze) e solo dal 10% di superfici permeabili;
- l'area arancione rappresenta la prima cintura urbana al di fuori del centro delimitato dalle antiche mura e l'ampia e densa espansione della città verso ovest, caratterizzata dal 60% circa di superfici

impermeabili (il 30% a coperture e altrettanto a strade e piazze) e il 40% da superfici permeabili;

- l'area gialla individua la periferia più recente, prevalentemente a destinazione d'uso solo residenziale, caratterizzata da un'impermeabilizzazione del suolo del 30% (il 15% di coperture e il 15% di strade e piazze);
- l'area verde, infine, rappresenta la porzione di territorio pressoché non edificato, la cui impermeabilizzazione è stata stimata al 4%.

Per ciascuna di queste aree, che, rispetto alla superficie complessiva analizzata di 715 ettari, presentano oltre che densità anche estensioni differenti, è stato calcolato il deflusso medio annuo sia allo stato di fatto, sia, successivamente, assumendo la conversione delle coperture esistenti (superfici impermeabili) in coperture a verde (superfici permeabili). Questi ipotetici scenari di conversione sono stati definiti da 4 diverse percentuali di trasformazione delle coperture: il 10%, il 20%, il 50% e il 100%.

Per il calcolo dei volumi di ritenzione sono stati utilizzati una serie di coefficienti di deflusso tratti dalla letteratura scientifica, riassunti nella tabella V.8 e associati alle superfici diversamente costruite: così per le coperture è stato genericamente fissato un coefficiente di deflusso pari a 0,95; per le strade, le piazze e tutte le pavimentazioni urbane si è applicato un coefficiente di 0,85 e per tutte le superfici invedite, parchi, campagna o cortili si è adottato un unico coefficiente pari a 0,10. Per le coperture a verde, invece, sono stati fissati 2 differenti coefficienti di deflusso: il primo, $\psi=0,68$, è il valore ottenuto dalla sperimentazione e il secondo è un valore medio utilizzato per coperture semi-intensive, $\psi=0,40$, valore migliore che esprime una capacità di ritenzione idrica delle coperture più frequentemente costruite in Italia, applicabile sia a coperture piane sia a coperture inclinate e aventi un substrato dalle prestazioni idriche definibili "medie".

La risposta idrologica dei complessivi 715 ettari della città e delle quattro differenti aree diversamente caratterizzate per uso del suolo è descritta negli schemi delle pagine seguenti.

USO DEL SUOLO	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO - ψ
Coperture tradizionali	0,95
Strade, piazze, parcheggi	0,85
Superfici permeabili: verde	0,10
Copertura a verde dell'esperimento	0,68
Copertura a verde " Ψ valor medio "	0,40

Tabella V.8: Coefficienti di deflusso utilizzati nelle ipotesi di conversioni

Alle varie tipologie d'uso del suolo sono stati associati i coefficienti di deflusso indicati in tabella. Per le coperture a verde sono stati impiegati due diversi coefficienti: quello ottenuto dalla sperimentazione e quello indicato nella letteratura scientifica per le coperture a verde semi-intensive, tipologia di invedimento molto diffuso in Italia.

La città di Vicenza presenta un'estensione di 715 ettari; di questi circa la metà (il 49,7%) è costituita da superfici impermeabili, fra strade, pavimentazioni varie e coperture.

Le percentuali di uso del suolo dell'intera area urbana sono sintetizzate nella tabella V.9 della pagina successiva.

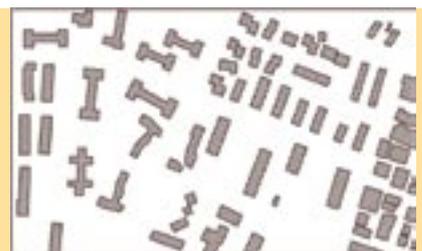




Figure-serie V.35: Analisi dell'uso del suolo della città di Vicenza

Il territorio della città di Vicenza è stato suddiviso in quattro aree caratterizzate da quattro diverse percentuali di uso del suolo. A eccezione del centro storico, dove le coperture presentano una superficie superiore per estensione a quella delle pavimentazioni, nelle altre tre aree le coperture hanno una superficie circa pari a quella delle pavimentazioni.

USO DEL SUOLO Stato di fatto 102 ha - 14,3%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	90%		10%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	50%	40%	10%	0%

USO DEL SUOLO Stato di fatto 356 ha - 49,8%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	60%		40%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	30%	30%	0%	40%

USO DEL SUOLO Stato di fatto 152 ha - 21,3%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	30%		70%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	15%	15%	0%	70%

USO DEL SUOLO Stato di fatto 105 ha - 14,6%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	4%		96%	
	Coperture	Altre superfici	Coltivazioni	Coperture a verde
	2%	2%	0%	96%

USO DEL SUOLO DELLA CITTÀ DI VICENZA	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	Stato di fatto 715 ha	49,7%		50,3%
	Coperture	Altre superfici imp.	Verde urbano	Coperture a verde
	25,61%	23,63%	50,3%	0%
Conversione 10%	23,5%			2,56%
Conversione 20%	20,49%			5,12%
Conversione 50%	12,80%			12,80%
Conversione 100%	0%			25,61%

Tabella V.9: Uso del suolo della città di Vicenza

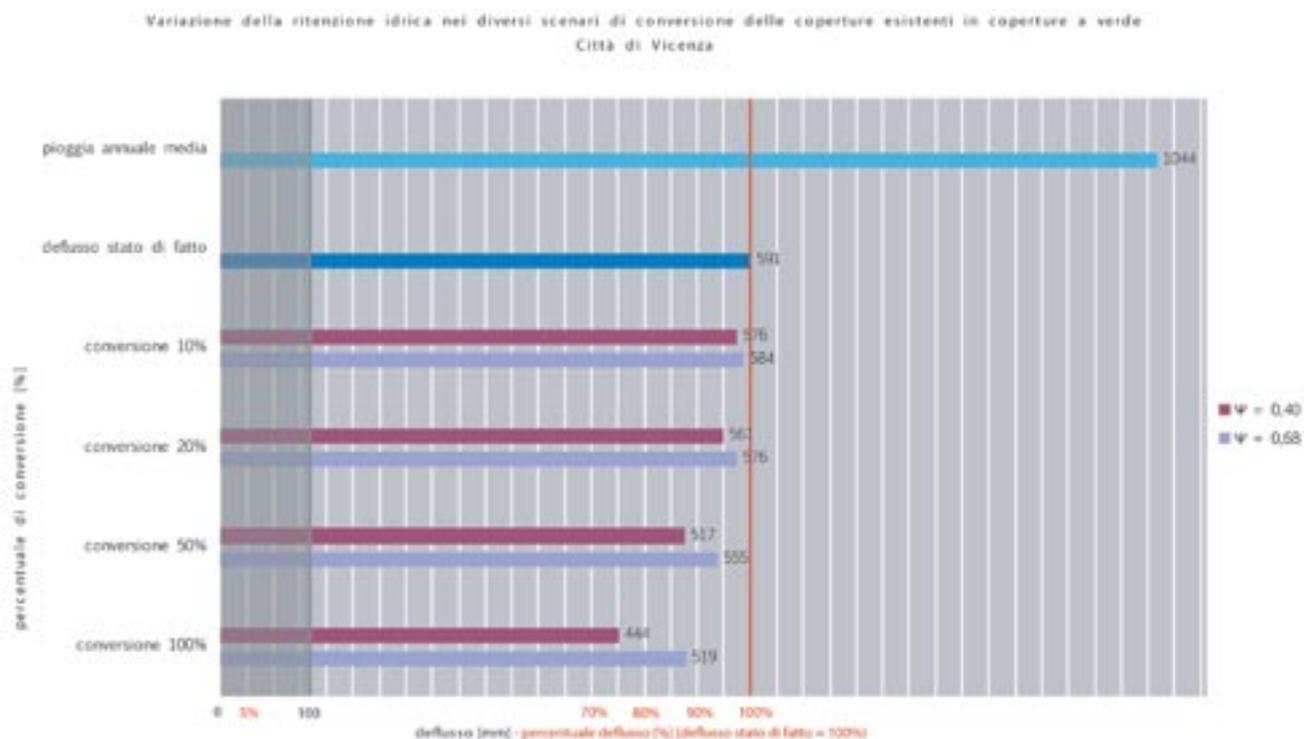


Figura V.36: Deflussi annuali della città nei vari scenari di conversione

Il grafico illustra la riduzione dei deflussi nelle differenti ipotesi di conversione delle coperture esistenti in coperture a verde.

La riga azzurra rappresenta la pioggia media annuale e quella blu il deflusso annuale dell'intera area allo stato di fatto (100%).

La superficie grigia più scura a sinistra descrive il deflusso che si verificherebbe se l'intera area fosse ricoperta dalla vegetazione, per cui tale valore si riferisce a una quota

di deflusso inevitabile.

Le righe viola e lilla rappresentano i valori del deflusso nei differenti casi di conversione riportati sull'asse delle ordinate (10-20-50 e 100%) rispettivamente impiegando il coefficiente di deflusso dell'esperimento e il coefficiente di deflusso di una coperture semi-intensiva.

Impiegando quest'ultima tipologia di coperture una conversione del 20%, ridurrebbe i deflussi annuali del 5% rispetto ai deflussi in atto (per un valore corrispettivo di 14 millimetri, pari a 14 litri al metro quadro)

che moltiplicati per l'intera superficie della città corrispondono a 100100 metri cubi d'acqua.

La riduzione del deflusso è un valore direttamente proporzionale all'aumento della superficie trasformata da impermeabile a verde, così per quote di conversione maggiori il deflusso diminuisce di una quantità nota. È importante ricordare che i volumi d'acqua sottratti al deflusso vengono restituiti all'atmosfera per effetto dell'evapotraspirazione, processo che sottrae calore all'atmosfera.

Il grafico della figura V.36 nella pagina a fianco rappresenta il valore del deflusso medio annuo della città di Vicenza sulla base dell'uso del suolo definito dai valori espressi nelle tabelle V.9. Sull'asse delle ordinate sono riportati i deflussi dei differenti scenari di conversione (suddivisi in relazione a due diversi coefficienti di deflusso: 0,40 corrispondente alle righe viola e 0,68 alle righe lilla), il deflusso dello stato di fatto (riga blu) e la pioggia media annua (riga azzurra). La fascia grigio scuro a sinistra del grafico indica il valore del deflusso medio annuo che l'area presenterebbe se fosse completamente ricoperta di piante, ovvero il deflusso minimo dell'area non generato dalle attività antropiche: tale valore corrisponde al 10% circa della pioggia intercettata e, rispetto al deflusso dello stato di fatto (pari a 591 millimetri) ha un valore pari al 17% del deflusso totale (la linea rossa verticale segnala il 100% del deflusso totale e ciascun passo della griglia indica il 5% di tale valore, come titolato nell'asse delle ascisse). Confrontando i vari scenari di conversione ipotizzati emerge che, assumendo come descrittivo delle prestazioni idriche delle coperture a verde il coefficiente $\psi=0,4$, una conversione del 10% porterebbe a una riduzione dei volumi di deflusso del 2,50% rispetto allo stato di fatto, mentre una conversione del 20% diminuirebbe, proporzionalmente, i deflussi del 5,07%. Gli scenari di conversione del 50% e del 100%, mostrano evidentemente un abbattimento dei deflussi di portate maggiori, rispettivamente del 12,52% e del 25,08%. Tali scenari sono da considerarsi evidentemente improbabili, ma indicativi di quali siano i livelli massimi di efficacia delle prestazioni idriche raggiungibili dalle tecnologie permeabili all'acqua rispetto a un contesto reale.

Le figure V.36, V.37, V.38 e V.39 nelle pagine seguenti descrivono la riduzione dei deflussi delle differenti aree classificate a seconda dell'uso del suolo. Nell'area grigia, impermeabilizzata al 90% (figura V.37), la conversione del 20% delle coperture esistenti in coperture a verde porterebbe a una riduzione del deflusso del 6,69% (quindi 1,5% in più rispetto al corrispondente valore riferito all'intera città), mentre nell'area arancione e nell'area gialla, impermeabilizzate rispettivamente al 60% (figura V.38) e al 30% (figura V.39) la conversione del 20% ridurrebbe i deflussi rispettivamente del 4,75% e del 4,59%. Nell'area verde (figura V.40) la riduzione dei deflussi non è significativa, vista la bassa impermeabilizzazione del suolo che già allo stato di fatto caratterizza questa porzione di territorio.



USO DEL SUOLO Stato di fatto 102 ha - 14,3%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	90%		10%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	50%	40%	10%	0%

Variatione della ritenzione idrica nei diversi scenari di conversione delle coperture esistenti in coperture a verde
90% suolo impermeabile

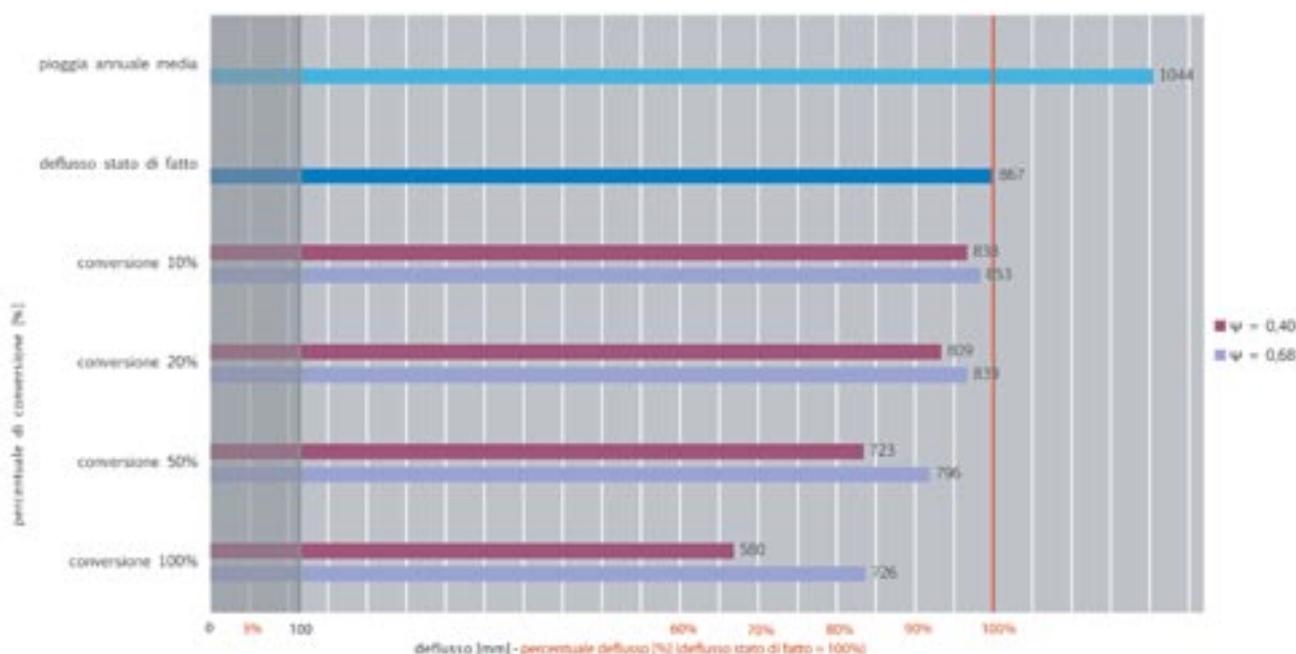


Figure-serie V.37: Deflussi annuali della città nei vari scenari di conversione dell'area grigia più densamente edificata

In questo caso un'ipotetica conversione delle coperture esistenti in coperture a verde si dimostrerebbe più efficace nell'abbattimento dei deflussi rispetto agli stessi valori riferiti all'intera città, poichè la densità del costruito è qui superiore e di conseguenza le superfici impermeabili occupano una maggiore estensione di suolo. Una conversione al 20% implicherebbe una riduzione annuale dei

deflussi di 29 millimetri contro i 14 del valore riferito all'intero territorio urbano.

Confrontando la riga blu di questo grafico con quello del deflusso della figura V.36 dell'intero territorio urbano, si nota che in questo caso il deflusso annuale è più prossimo al valore della pioggia media annuale: qui il deflusso è pari a 867 millimetri, mentre il deflusso medio della città di Vicenza è pari a 591 millimetri. Questo è l'effetto tangibile generato dall'impermeabilizzazione del territorio.



USO DEL SUOLO Stato di fatto 356 ha - 49,8%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	60%		40%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	30%	30%	0%	40%

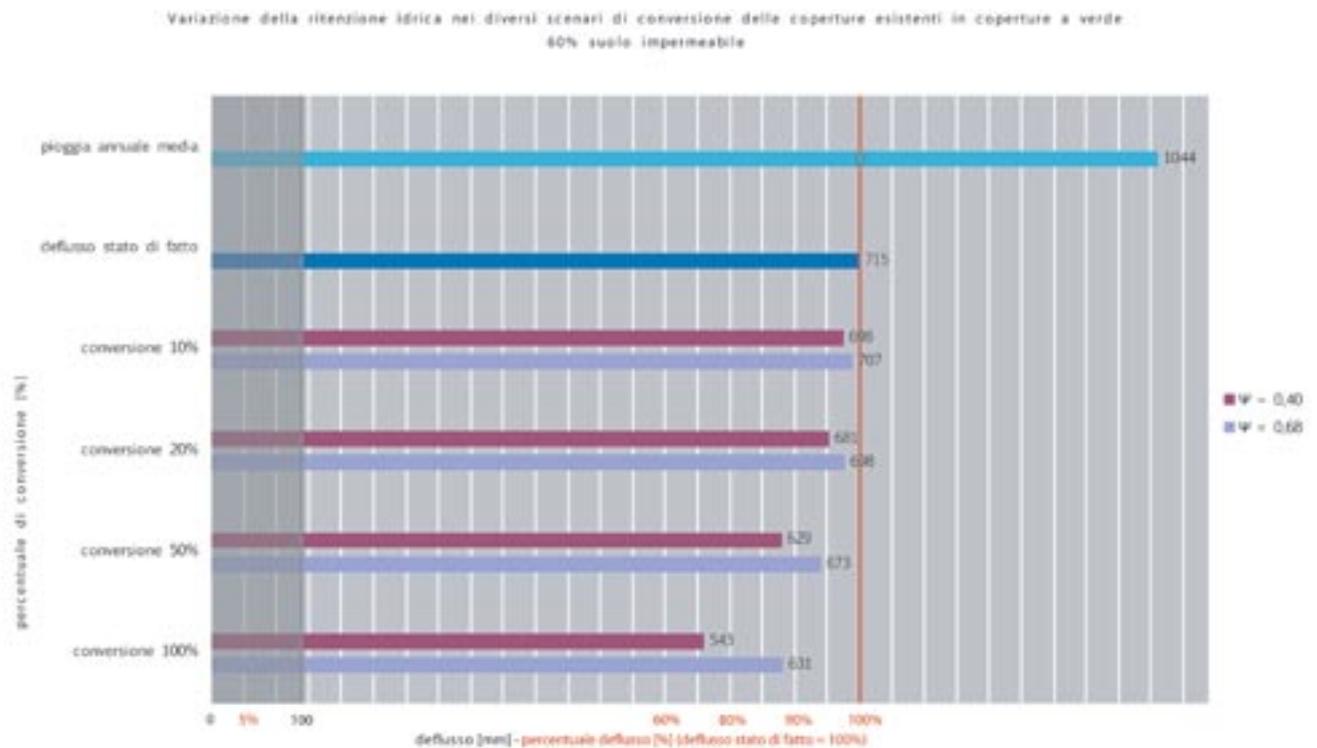
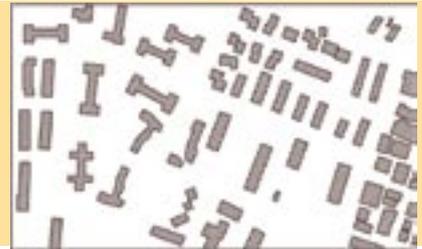


Figure-serie V.38: Deflussi annuali della città nei vari scenari di conversione dell'area arancione, la più estesa della città
 Nell'area arancione, che definisce una porzione molto vasta di territorio urbano (pari al 49,8%), l'impermeabilizzazione del suolo corrisponde al 60% della sua estensione. La conversione in quest'area incide in modo analogo ai valori messi in evidenza dalla conversione riferiti al territorio dell'intera città. Una conversione del 20% ridurrebbe i deflussi annuali del 4,5% circa.



USO DEL SUOLO Stato di fatto 152 ha - 21,3%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	30%		70%	
	Coperture	Altre superfici	Verde urbano	Coperture a verde
	15%	15%	0%	70%

Variazione della ritenzione idrica nei diversi scenari di conversione delle coperture esistenti in coperture a verde
30% suolo impermeabile

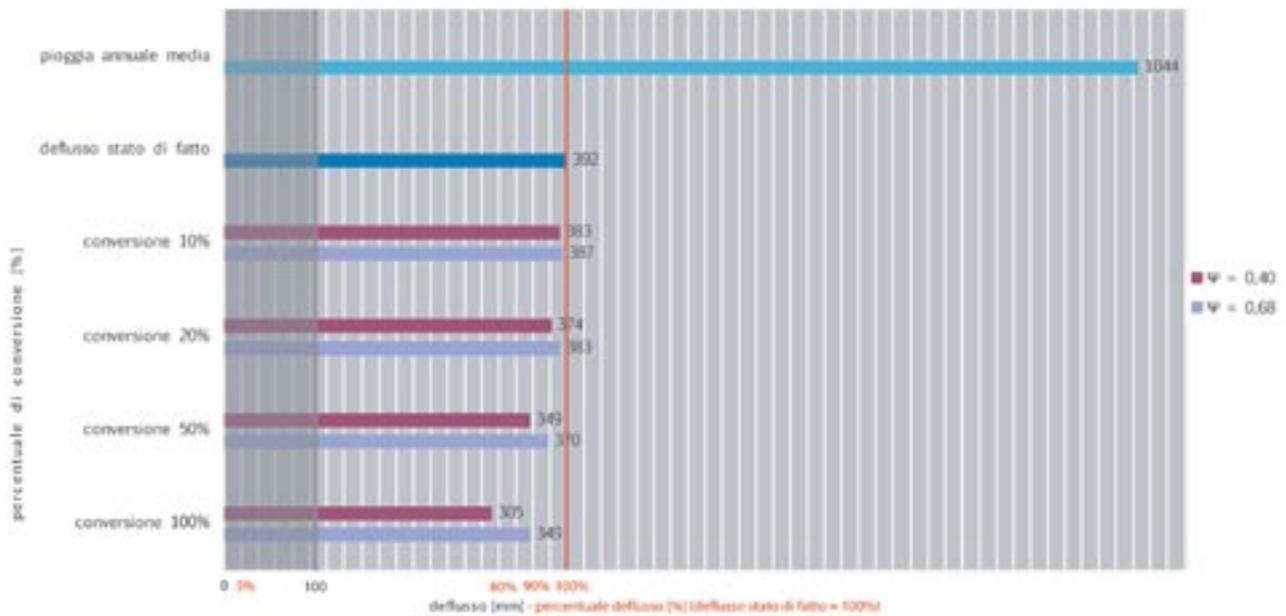


Figure-serie V.39: Deflussi annuali della città nei vari scenari di conversione dell'area gialla

Come nel caso dell'area arancione i deflussi nei quattro scenari di conversione corrispondono in termini percentuali agli stessi deflussi riferiti all'intera città. In quest'area, caratterizzata dal 30% di superficie impermeabile, il deflusso annuo dello stato attuale è significativamente più basso dei casi precedenti e corrisponde a 392 millimetri contro, ad esempio, 867 millimetri dell'area

grigia del centro storico. In quest'area quindi un'eventuale conversione a coperture a verde assumerebbe meno significatività rispetto alle aree precedenti caratterizzate da un uso del suolo più elevato.



USO DEL SUOLO Stato di fatto 105 ha - 14,6%	Superfici impermeabili		Superfici permeabili	
	4%		96%	
	Coperture	Altre superfici	Coltivazioni	Coperture a verde
	2%	2%	0%	96%

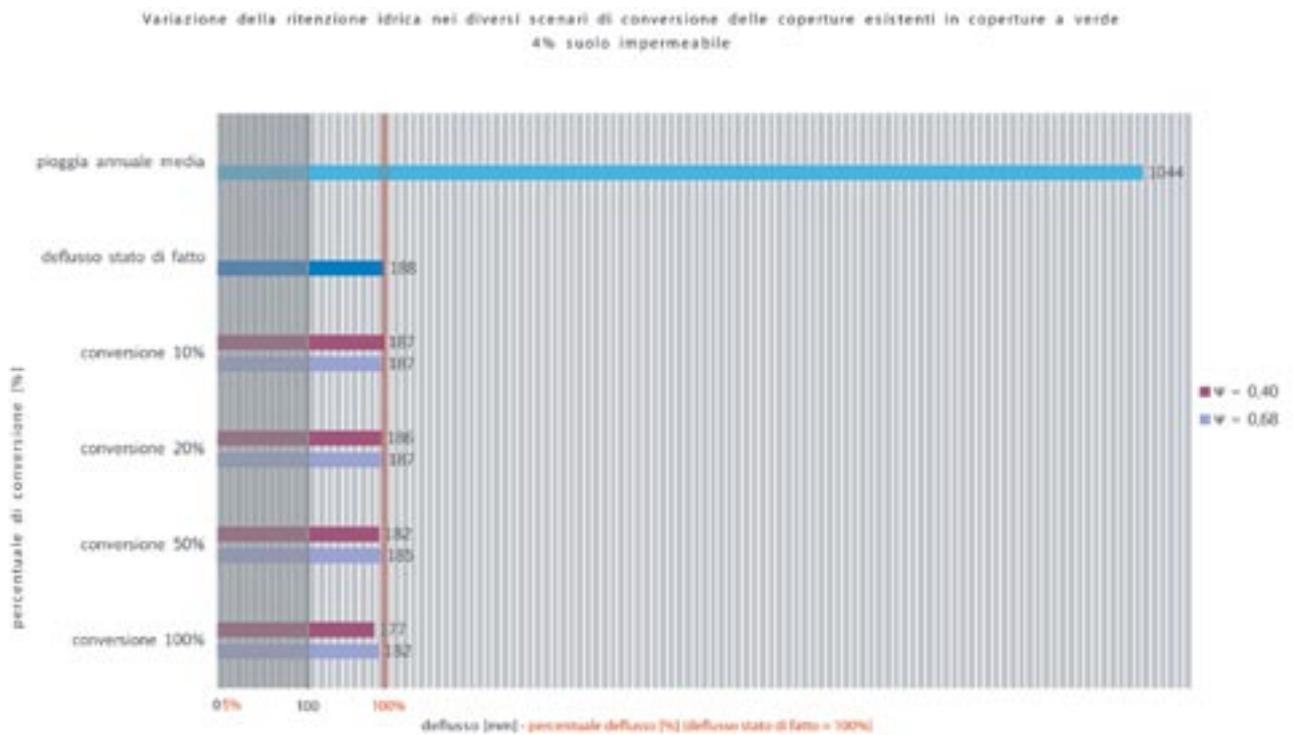


Figure-serie V.40: Deflussi annuali della città nei vari scenari di conversione dell'area verde

Nel caso delle aree poco edificate la presenza di superfici verdi aggiuntive non appare significativa, pertanto la conversione in queste zone non assume senso. Come si vede dalla riga blu del grafico i valori di deflusso si avvicinano molto ai valori di deflusso dell'area grigio scura, ossia al valore di deflusso che l'area avrebbe se non fosse costruita ma interamente popolata dalla vegetazione.

Ai valori della riduzione dei deflussi annuali espressi in quest'analisi è utile affiancare per completezza della trattazione uno studio sperimentale⁴⁶ che ha quantificato i benefici rispetto alla detenzione idrica derivanti dalla conversione di coperture tradizionali in coperture a verde. La figura V.41 illustra la riduzione dei volumi di detenzione di un isolato della città di Genova, Colle Olmetti, caratterizzato da un uso del suolo sintetizzato nella tabella V.10 (è interessante notare che i valori d'uso qui riportati sono estremamente simili ai valori dell'area arancione riferiti alla città di Vicenza). I due grafici mostrano la riduzione del deflusso durante i primi 7 e 15 minuti del verificarsi di un evento meteorico. Confrontando i valori emerge che la riduzione è maggiore, proporzionalmente, durante i primi 7 minuti, in quanto, allo scadere di un inter-evento, la fase gassosa di un substrato è superiore, mentre, via via che si verifica l'evento meteorico, la fase liquida aumenta a scapito della fase gassosa. La riduzione dei volumi di deflusso durante i primi 7 minuti (grafico a sinistra) è pari, in un'ipotesi di conversione del 10%, al 12% per tutte le differenti intensità di pioggia, mentre tale valore cala all'8% se si osserva il secondo grafico che riguarda i primi 15 minuti di pioggia. Una conversione del 20% mostra un miglioramento di tali dati che nei primi 7 minuti non mostra proporzionalità, (si passa infatti dal 12% al 18% circa), mentre nei primi 15 minuti il rapporto presenta una riduzione dei deflussi doppia (dall'8% al 16% circa), proporzionale all'incremento della percentuale della conversione che passa dal 10% al 20%. Tali dati dimostrano un'efficacia significativa della riduzione dei picchi per effetto della diffusa applicazione del verde pensile: in sostanza è provato che la sola conversione del 10% di un'area urbana caratterizzata dal 60% di superficie impermeabile è in grado di ridurre i picchi di intensità di pioggia del 12%. È significativo che tale valore non cambi sostanzialmente per differenti valori di intensità di pioggia.

⁴⁶ Anna Palla, "Unsaturated flow in engineered porous media for Hydrologic restoration", Tesi di dottorato in fluidodinamica e processi di ingegneria ambientale, DICAT Università di Genova 2008.

Figura V.41: Riduzione percentuale dei volumi di detenzione di Colle Olmetti a Genova

In uno scenario del 20% di conversione la riduzione dei picchi di deflusso durante i primi 7 minuti dall'inizio dell'evento meteorico è pari circa al 18% del valore dei picchi di pioggia (indicati nell'asse delle ascisse). Tale valore si riduce di 1 o 2 punti percentuali se si estende l'intervallo di tempo ai primi 15 minuti dall'inizio dell'evento meteorico. Fonte: Palla "Unsaturated flow": 141.

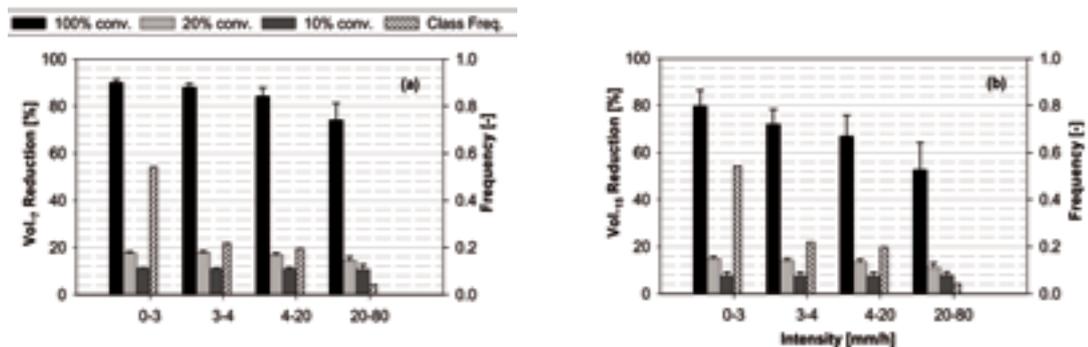


Tabella V.10: Uso del suolo di Colle Olmetti

L'uso del suolo dell'isolato urbano analizzato nell'esperimento di Palla è molto simile ai valori dell'area urbana evidenziata in arancione della città di Vicenza. Fonte: Palla "Unsaturated flow": 141.

Land use (-)	Area (ha)	(%)
Impervious areas		
Sloping Roof	1.33	29.2
Flat Roof	0.08	1.7
Road and Parking Lot	1.28	28.1
Other	0.06	1.3
Total Impervious Area - existing land use	2.75	60.3
Pervious areas		
Green Area	1.28	28.1
Farmland	0.53	11.6
Total Pervious Area - existing land use	1.81	39.7

Sulla base dell'analisi dell'uso del suolo della città di Vicenza e degli esiti che le diverse ipotesi di conversione hanno fornito in merito alla riduzione dei deflussi annuali è possibile stabilire che la copertura a verde rappresenti un sistema efficace per contrastare le problematiche derivate dall'impermeabilizzazione del suolo dei territori antropici; infatti i valori di riduzione del deflusso messi in rilievo, che, per il 10% di conversione delle coperture da tradizionali a verdi nelle aree più densamente costruite, oscillano fra il 2,2% e il 3,5% circa, risultano significativi per il miglioramento del ciclo idrologico di un territorio urbanizzato.

La tabella V.11 mette a confronto i dati calcolati in questa ricerca con quelli relativi ad altre due ricerche riguardanti l'effetto dell'applicazione delle coperture a verde sulla regimazione idrica urbana. Come si vede i valori, pur riferendosi a tre aree urbane differenti per estensione e probabilmente per le condizioni di piovosità (Vicenza, Brussels e North River), i valori dei volumi di ritenzione risultano omogenei nel rapporto di scala.

Tabella V.11: Confronto dei valori di riduzione dei deflussi ottenuti con altri studi

La riduzione dei deflussi della città di Vicenza, nelle ipotesi di conversione elaborate, è simile per ordine di grandezza ai valori emersi da altri studi riguardanti l'uso del suolo e l'efficacia della copertura a verde come tecnologia di controllo delle acque meteoriche.

Autori	Scenari di conversione	Città	Ritenzione annuale
Jeroen Mentens (2006)	10%	Brussels	2,70%
Debra Tillinger (2006)	10%	North River - New York	2,00%
Elena Giacomello (2010)	10%	Vicenza	2,54% con $\psi=0,40$ 1,18% con $\psi=0,68$

Dato il carattere di sostanziale irreversibilità dell'uso del suolo a causa delle attività antropiche, le tecnologie che sono in grado di assorbire l'acqua meteorica in modo diffuso rappresentano una delle poche possibilità praticabili per contrastare sia la generazione dei deflussi che la generazione dell'isola di calore a livello microclimatico. Proprio quest'ultima caratteristica differenzia la copertura a verde da altri tipi di tecnologie che sottraggono l'acqua meteorica al deflusso, fra cui i pozzi perdenti o altri tipi di bacini di raccolta, poiché essi, non essendo a contatto diretto con l'atmosfera, non sono soggetti al processo continuo di evapotraspirazione.

Inoltre la copertura a verde, ricreando in quota un suolo sottratto a raso, può garantire ritenzione e detenzione idrica proprio in quelle porzioni del territorio densamente edificate dove lo spazio libero per altre tecnologie di raccolta risulta assente.

Ciò non di meno è evidente che la sola applicazione in modo diffuso della tecnologia di copertura a verde non possa essere sufficiente a risolvere i problemi dei deflussi urbani, ma che solo una combinazione di vari sistemi oltre a questo possa apportare benefici significativi al ciclo idrologico del suolo antropizzato.

Conclusioni

UNA RICERCA TRASVERSALE

Assumendo come punto di partenza il rapporto sinergico che si instaura tra materia inerte e organica, tra costruzione e vegetazione, la ricerca viene sviluppata come un percorso di indagine trasversale che, alle diverse scale del progetto, mira ad approfondire quelle specifiche caratteristiche che consentono di trasformare le tecnologie di copertura a verde in un potenziale strumento di “condizionamento ambientale” di notevole rilevanza.

Condizionamento inteso nel senso più ampio del termine e soprattutto nell’accezione di interazione con le caratteristiche climatiche, termoigrometriche e morfologiche dell’area in cui ci si trova a operare. Se l’interesse per la copertura a verde è generalmente rivolto alle possibilità di integrazione con il paesaggio, alle opportunità di compensazione ambientale o, in casi più specifici, a una più precisa conoscenza delle prestazioni fornite dalla presenza della vegetazione, in questo contesto il principale oggetto di indagine è rappresentato invece da quelle caratteristiche da cui dipendono non solo la possibilità di sviluppo e di mantenimento dello strato vegetale in relazione alla composizione della stratigrafia del pacchetto costruttivo, ma anche una serie di proprietà fisiche che comportano rilevanti ricadute sul piano della qualità ambientale e del comfort all’interno di uno spazio confinato.

Una copertura a verde può essere intesa come il risultato di una “tecnologia ibrida” in cui i “componenti naturali” sono integrati ai tradizionali materiali edilizi per conseguire tanto le funzioni proprie dell’elemento tecnico di copertura - quindi chiusura, impermeabilizzazione, isolamento, comfort, ecc. - quanto quelle di un suolo vero e proprio. Quest’ultimo permette lo sviluppo della vita vegetale grazie alla sua fertilità, alla presenza dell’acqua e di altri microorganismi che, insieme alle piante, danno luogo a un ecosistema in cui varie attività possono essere svolte.

Questo punto di vista assume di accettare che l’ibridazione fra costruzione e coltivazione attuata dalla copertura a verde includa tra le principali ricadute anche l’integrazione fra approcci propri della tecnologia edilizia con altri propri delle agrotecnologie. Tale presupposto è alla base del taglio assegnato alla ricerca e rappresenta tra l’altro il principale elemento di distanza tra

L'analisi di un sistema a verde posto in copertura e uno posto in facciata: infatti, a differenza del verde verticale, in cui l'apporto tecnologico-impian-tistico è pressoché costante e la distanza fisica tra superficie verde e parete è in molti casi indispensabile, il verde orizzontale si basa sull'idea di ricom-porre, attraverso la progettazione del substrato, un suolo naturale in cui le piante siano in grado di sopravvivere con un livello di autonomia quanto più elevato possibile.

Per questo motivo, durante la ricerca, ai tradizionali strumenti di analisi propri delle discipline tecnologiche sono stati affiancati metodi e strumenti provenienti da altri settori quali l'agrotecnica e l'idrogeologia.

In questo ambito le varie competenze specialistiche hanno permesso di perfezionare le soluzioni costruttive e di garantire una buona autonomia a un sistema che, pur necessitando di attività manutentiva, conserva la ciclicità della vita vegetale e garantisce la sopravvivenza con apporti energetici ridotti. Da una prima analisi ad ampio raggio, che parte dagli esiti dei principali esperimenti sul tema disponibili in letteratura, emergono chiaramente nell'applicazione di una copertura a verde alcuni fattori di elevata potenzialità che derivano proprio dall'associazione costruzione-vegetazione. A qualunque scala del progetto il rapporto sinergico che si instaura tra questi due "insiemi" produce dei vantaggi per l'ambiente antropico. Le piante sono per definizione elementi di compensazione ambientale capaci di attività primaria, cioè in grado di impiegare l'energia solare per attuare trasformazioni fisico-chimiche capaci di produrre ossigeno, di assorbire carbonio, fornire ombreggiamento, ecc; in altri termini sono determinanti nell'attuare dei processi di condizionamento del microclima in qualunque contesto si trovino.

UN SISTEMA DINAMICO

La natura organica - viva - della vegetazione trasforma il sistema ibrido in un sistema dinamico che si adatta alle condizioni al contorno per poter intervenire su di esse: la capacità delle piante di orientarsi nel modo più favorevole per intercettare la radiazione solare produce il più efficiente sistema di ombreggiamento disponibile, così come la capacità di dissipare calore attraverso l'evapotraspirazione offre un raffinato estrattore di calore di matrice totalmente naturale e a costo energetico zero. L'ombreggiamento e la riduzione della temperatura superficiale dei materiali edilizi rappresentano le maggiori opportunità di intervento sulla qualità dell'ambiente urbano in contrasto del fenomeno noto come "effetto isola di calore" cioè l'accumulo termico in aree a media-alta densità causato dal ritardo con cui i materiali edilizi rilasciano il calore accumulato in un arco di esposizione definito. Tutti gli esperimenti effettuati in questo ambito confermano che la presenza della vegetazione contribuisce significativamente a contenere tale effetto: lo strato vegetale possiede infatti la stessa temperatura dell'aria (o di poco superiore/inferiore) così come gli strati ombreggiati dalla vegetazione, con opportune differenze in relazione al tipo di foglie e di intorno (figure C.1 e C.2). Ponendo la vegetazione in aderenza alle coperture, con una stratigrafia continua come quella definita dalla normativa, è possibile ottenere ulteriori benefici per l'edificio: il contenimento delle temperature interne, in particolare in regime estivo, e la protezione dell'elemento di tenuta. Anche in

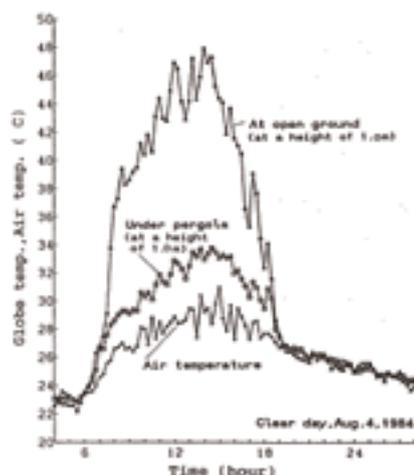


Figure C.1 e C.2: Contenimento delle temperature superficiali dei materiali edilizi

Molte sperimentazioni hanno messo in luce che la vegetazione posta in prossimità delle costruzioni garantisce ai materiali edilizi ombreggiati una temperatura superficiale vicina a quella dell'aria o di poco superiore/inferiore a seconda delle condizioni dell'immediato contesto.

Fonte: Hoyano, "Climatological use of plants": 184 - cfr. figure I.5 e I.6.

questo caso numerosi esperimenti dimostrano che gli strati sottostanti la vegetazione presentano una temperatura inferiore a quella dell'aria e quindi il sistema ibrido messo in atto non è solo in grado di isolare, ma anche di operare come un sistema di raffrescamento passivo (figure C.3 e C.4 nella pagina seguente).

Se l'analisi del comportamento di una copertura a verde alla scala edilizia rappresenta un livello di indagine necessario per comprendere i fenomeni che il sistema a verde è in grado di attuare e per i vantaggi che da essi è possibile ottenere, una più ampia riflessione sugli effetti a scala urbana che la combinazione di diverse unità edilizie siano in grado di produrre appare come un'opportunità ancora poco esplorata.

La chiave di lettura trasversale perseguita dalla ricerca parte quindi proprio dalla verifica alla scala edilizia per raggiungere quella urbana passando attraverso una specifica analisi delle proprietà dello strato vegetale e dei dinamismi che la capacità intrinseca di adattamento di un elemento organico è in grado di generare.

Le principali tematiche di approfondimento individuate sono:

1. capacità di isolamento termico del substrato e relativa influenza in regime invernale ed estivo;
2. capacità di estrazione del calore per effetto della presenza dell'acqua;
3. capacità di riduzione della temperatura superficiale per effetto dell'ombreggiamento e del fototropismo;
4. capacità di riduzione dell'effetto isola di calore grazie all'evapotraspirazione.

Trattandosi di un sistema che tende a favorire l'adattamento degli organismi che lo popolano, la ricerca non ha potuto trascurare altri fattori, di carattere non squisitamente tecnico, ma fondamentali per comprendere la logica di funzionamento, ma soprattutto le potenzialità applicative del verde orizzontale. L'inverdimento di una copertura (o di un insieme di coperture) dà luogo in prima istanza a una trasformazione percettiva che esplicita morfologicamente l'ibridazione che avviene sul piano tecnico-costruttivo. L'idea di ricreare un suolo - una porzione più o meno estesa di esso - determina anche un'altra implicazione concettuale e cioè che sia il suolo posto in quota

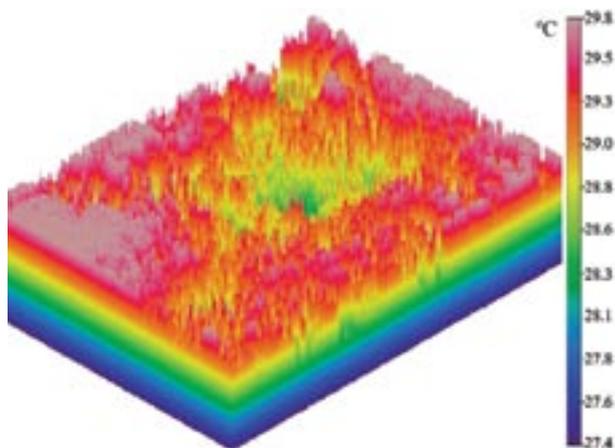


Figura C.3: Temperature dei vari strati componenti una copertura a verde

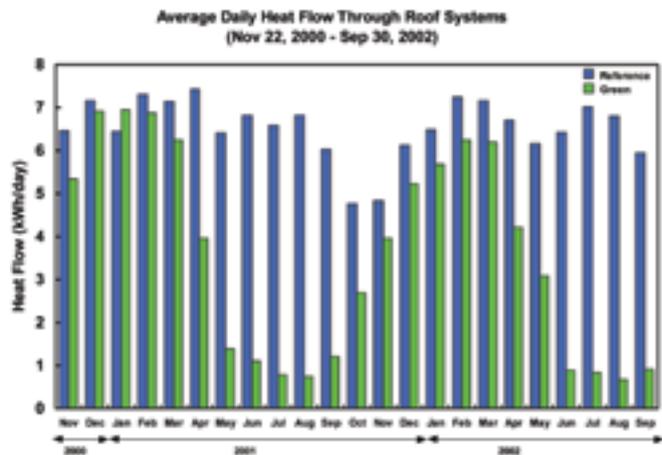
Oltre ai benefici termici dello strato vegetale, la copertura a verde si giova della presenza di un substrato di coltivo distribuito uniformemente su tutta la sua superficie, materiale che garantisce ulteriori prestazioni: alternativamente isolamento termico o estrazione di calore in relazione al contenuto d'acqua del substrato.

Fonte: Feng, "Energy balance of extensive green roof": 5 - cfr. figura I.54.

Figura C.4: Confronto fra il flusso termico passante attraverso una copertura con inverdimento (colonne verdi) e senza inverdimento (colonne azzurre)

Da un punto di vista termico la copertura a verde è molto più performante in regime estivo. In regime invernale la presenza dell'acqua nel substrato riduce significativamente la capacità isolante del sistema a verde. Ciononostante anche d'inverno si verifica una certa attenuazione delle dispersioni termiche dall'interno di un ambiente chiuso all'esterno.

Fonte: Liu "Thermal performance of green roofs": 10 - cfr. figura I.56.



o viceversa, l'edificio diventi parte del terreno. Ciò apre ulteriori scenari di indagine circa le possibilità fruibili e funzionali di architetture che assumano la copertura a verde non come espressione del linguaggio o adesione a manifesti di ecosostenibilità, ma come opportunità tecnologico-costruttiva finalizzata ad ottenere determinati vantaggi in chiave di controllo ambientale.

La contiguità ad altre discipline e saperi ha suggerito di indagare la progettazione della copertura a verde non semplicemente come un fatto tecnico - esito di una combinazione più o meno raffinata di componenti (inerti e organici) - ma come un ambizioso tentativo di riprodurre un suolo naturale, di ricreare cioè le condizioni tipiche di un terreno vero e proprio attraverso l'artificio. Il distinguo è sottile, ma fondamentale. Il fatto tecnico è infatti ineludibile: la normativa, più volte perfezionata nel corso dell'ultimo decennio, prescrive alcuni accorgimenti e soluzioni che garantiscono una corretta applicazione della tecnologia e il conseguimento di un manto inverdito di buona qualità. Come ogni altro prodotto edilizio anche i componenti utilizzati per un pacchetto di copertura a verde sono testati, certificati e frutto di un processo progettuale e produttivo finalizzato all'ottimizzazione del sistema. Ciò che invece risulta non controllabile o certificabile è rappresentato da quanto è estraneo al mondo edilizio: la vegetazione e il suo ciclo vitale. Vegetazione che rappresenta insieme il fine e il mezzo di una copertura a verde.

Definita nel corso dell'indagine come un suolo in miniatura, la progettazione della copertura a verde prevede di ricostruire tutte quelle funzioni caratteristiche del suolo naturale che riguardano le attività organiche e le attività idriche. Tali funzioni sono legate fondamentalmente al progetto del substrato: è questo lo "strato chiave" della tecnologia sia rispetto alla fertilità e al successo della vita vegetale, sia in relazione alle prestazioni individuate come strategiche tanto alla scala edilizia quanto a quella urbana.

A seguito di una scomposizione dell'intera stratigrafia della copertura verde in cui ogni componente viene descritto in relazione alla sua funzione e collocazione nel pacchetto, la ricerca individua il substrato come l'elemento

RIPRODURRE UN SUOLO

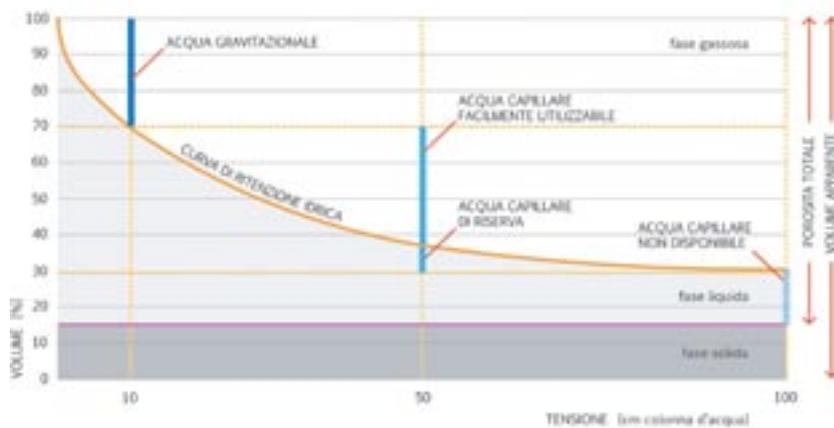


Figura C.5: Curva di ritenzione idrica di un substrato

Nella stratigrafia di una qualsiasi copertura a verde la gestione dell'acqua è affidata in larga parte allo strato culturale. La curva di ritenzione idrica rappresenta lo strumento più efficace per descrivere le capacità idrologiche del substrato di coltivo e, di conseguenza, dell'intero sistema di copertura.

Fonte (elaborata): Valagussa, "Lo strato culturale", 2008 - cfr. figura IV.15.

cardine di tutti quei processi di condizionamento ambientale in relazione al fatto che in esso si concentra la presenza dell'acqua: un componente mai citato esplicitamente ma indispensabile.

A differenza di qualunque altra copertura che tende a smaltire quanto più rapidamente l'acqua meteorica, quella a verde è concepita per trattenerla più a lungo possibile trasformandola in riserva idrica per gli organismi viventi. L'acqua è gestita, a livello stratigrafico, dall'elemento drenante e dall'elemento di accumulo: il primo favorisce la percolazione evitando una concentrazione eccessiva che produrrebbe marcescenza degli apparati radicali, il secondo ne trattiene un certo volume. Tuttavia, è nel substrato che la presenza dell'acqua si rivela strategica: se da una parte essa consente come è ovvio la sopravvivenza dello strato vegetale, dall'altra permette di raggiungere quegli effetti di evapotraspirazione o di estrazione del calore che condizionano la temperatura dell'intero pacchetto di copertura. Quest'ultimo tende così a riprodurre il sistema trifasico terra-aria-acqua tipico di un suolo vero e proprio (figura C.5).

Una volta identificata l'acqua come un componente presente, sebbene non dichiarato, della stratigrafia tipica di una copertura a verde, la ricerca si è prefissa l'obiettivo di indagarne le principali implicazioni cercando di individuare delle prestazioni caratteristiche di questa tecnologia e possibilmente di riuscire a darne una valutazione quantitativa e qualitativa.

La capacità di accumulo idrico, requisito proprio di più componenti, ma soprattutto dell'intero sistema, implica una capacità di gestione dell'acqua che il sistema riceve. Ciò si rivela in tutta la sua complessità e importanza specialmente in caso di precipitazioni intense che ne evidenziano il comportamento. La condizione tipica di progetto della copertura a verde è quella di trattenere l'acqua per un arco di tempo assai maggiore rispetto a qualunque altra soluzione e questo implica che in caso di precipitazione (ordinaria o violenta) la copertura a verde, proporzionalmente allo spessore del suo substrato, sia in grado di generare un ritardo nel conferimento dell'acqua verso le reti di raccolta e contestualmente anche una riduzione del suo volume. Da ciò deriva che l'acqua trattenuta si rende disponibile a partecipare al

LE PRESTAZIONI DI REGIMAZIONE IDRICA



Figure C.6 e C.7: Preparazione della stratigrafia da sottoporre all'esperimento

La stratigrafia sottoposta all'esperimento è stata scelta con la precisa finalità di testare un sistema dalle prestazioni idriche minime, per ottenere valori ampiamente cautelativi della risposta idrologica di una copertura a verde estensivo.

processo di evapotraspirazione (che è responsabile del contenimento delle temperature) sgravando parzialmente i corpi idrici recettori naturali e artificiali. Al pari di un suolo naturale, la superficie permeabile della copertura a verde contribuisce a immettere l'acqua nel segmento del ciclo idrologico più conveniente per la qualità dell'ambiente urbano.

L'individuazione e la descrizione di questa prestazione strategica rappresenta al contempo un importante punto di arrivo e di partenza della ricerca: da una parte questo fenomeno rappresenta, in tutta la sua complessità, una chiara espressione dell'ibridazione assunta come fondante l'intero percorso di indagine, dall'altra le sue ricadute a livello edilizio e soprattutto urbano richiedono di formulare delle valutazioni per entità e portata. In questo senso la metodologia di ricerca si è avvalsa dell'importante opportunità di cooperare con uno dei maggiori produttori di sistemi a verde a livello mondiale, *ZinCo GmbH*, presso la cui sede in Germania sono stati effettuati alcuni test su pacchetti campione appositamente predisposti in base alle analisi teoriche precedentemente condotte. Ciò ha permesso di misurare e di acquisire valori attendibili circa il diverso comportamento dei vari substrati in relazione allo spessore e all'inclinazione della copertura che, insieme ai fattori geometrici, rappresentano le principali variabili a livello di progetto.

La campagna sperimentale e la definizione di un quadro teorico di riferimento che assumesse la prestazione di regimentazione idrica come un potenziale elemento di valorizzazione applicativa, hanno suggerito la possibilità di attuare una simulazione delle possibili ricadute sull'ambiente costruito.

LE RICADUTE ALLA SCALA URBANA

Dalle analisi dei dati meteorici della città di Vicenza, località storicamente afflitta da precipitazioni abbondanti e da eventi di dissesto idrogeologico di rilevante entità (come testimonia anche la recente alluvione che ha colpito il Veneto centrale) è stata effettuata una simulazione scegliendo in un intervallo di 18 anni i valori giudicati più significativi, ossia quelli degli eventi più intensi e prolungati applicandoli a un pacchetto di copertura a verde predefinito. Pur avendo intenzionalmente scelto di adottare una stratigrafia a verde estensivo dalle prestazioni idriche non elevate, l'esperimento

ha dimostrato che la reazione della tecnologia all'evento meteorico avviene in ritardo, conferendo una quantità d'acqua inferiore a quella intercettata in ciascuna delle prove effettuate. In ciascuna campagna sperimentale sono stati rilevati i dati in ingresso e in uscita. Per meglio comprenderne la significatività si è ipotizzato un progressivo inverdimento delle superfici coperte del tessuto urbano vicentino al fine di valutare la modifica che ciò comporterebbe in termini di risposta idrica del territorio nel verificarsi di precipitazioni sostenute.

In prima istanza è stato analizzato l'uso dei suoli nei diversi quartieri della città di Vicenza e quindi ipotizzato un livello di conversione a verde delle coperture del 10%, del 20%, del 50% e del 100% calcolando di conseguenza di quanto venga ridotto il deflusso superficiale. La simulazione ha prodotto i seguenti risultati: il deflusso medio annuo dell'intera città diminuirebbe del 2,5% con il 10% di conversione di coperture esistenti in coperture a verde. Così, proporzionalmente, la riduzione del deflusso sarebbe pari al 5% con una conversione del 20%. Questi dati descrivono un significativo miglioramento della gestione idrica a livello urbano.

È evidente che la possibilità di conversione di una parte della superficie urbanizzata - fatto che presupporrebbe peraltro un piano organizzato e compatibile con le caratteristiche del tessuto edilizio presente - non è da sola sufficiente a sanare una situazione compromessa a più livelli da un eccessivo uso del suolo e da una gestione carente della rete idrica, tuttavia, i dati dimostrano che la tecnologia in esame è in grado di fornire un contributo potenzialmente rilevante che, se associato agli altri benefici ambientali come la riduzione dell'isola di calore, può trasformarsi in un potente strumento di controllo o quantomeno di condizionamento a livello di pianificazione dell'insediamento o di riqualificazione di un'area esistente. L'esito di questa simulazione, pur fornendo risposte puntuali agli obiettivi prefissati dalla sessione sperimentale, apre quindi nuovi interrogativi circa le possibilità di includere specifiche indicazioni sull'applicazione, la diffusione e le caratteristiche delle coperture a verde nei piani di intervento alla scala urbana.

Figura C.8: Variazione del deflusso annuale della città di Vicenza nei vari scenari di conversione di coperture esistenti in coperture a verde

Una conversione del 20% delle coperture esistenti in coperture a verde ridurrebbe il deflusso annuale dell'intero territorio della città del 5% circa. Tale valore cresce per le aree caratterizzate da un maggiore uso del suolo - cfr. figura V.36.



Nell'ambito delle tematiche affrontate nel corso della ricerca uno dei principali fattori di criticità a livello metodologico, e più diffusamente a livello culturale, è rappresentato dal fatto che la maggior parte degli studi e delle sperimentazioni condotte nel settore sono stati effettuati nell'area centro-nord europea e la normativa di riferimento a livello comunitario tende a riferirsi a quella tedesca. Pertanto sia le prescrizioni tecniche, sia le stesse conoscenze agrotecniche, sono state sviluppate in un contesto caratterizzato da climi temperati freschi o continentali in cui la presenza dell'acqua non è mai messa in discussione o al più deve essere gestita in ragione delle escursioni termiche presenti. Ciò pone seri elementi di difficoltà a confrontare i dati acquisiti o a trasferire gli strumenti di indagine da un luogo a un altro specialmente al di sotto della barriera alpina dove già nella pianura padano-veneta si registrano condizioni climatiche del tutto particolari.

Le difficoltà aumentano notevolmente laddove si voglia valutare il comportamento delle coperture a verde nelle zone climatiche del centro-sud Italia dove le temperature medie sono notevolmente più elevate e la piovosità è inferiore. I fattori di criticità sono costituiti non tanto dalla possibilità o meno di eseguire con successo l'applicazione di una copertura a verde, ma, nell'ottica tracciata nel corso di questa ricerca, di riuscire a conseguirla ripristinando quei livelli di autonomia tipici di un suolo naturale evitando così il ricorso a un costante sostentamento impiantistico-tecnologico che presupporrebbe un continuo dispendio di energia e di acqua. Alcuni parametri prestazionali e la stessa configurazione dei pacchetti, tradizionalmente impiegati in climi più favorevoli, restano interessanti elementi di approfondimento che potrebbero alimentare questo filone di indagine.

Particolarmente rilevante potrebbe essere l'analisi dei seguenti temi:

- l'incremento delle capacità di inerzia idrica al substrato e/o di altri elementi della stratigrafia in relazione a una significativa variazione delle condizioni al contorno;
- lo studio di differenti tipologie di superfici orizzontali soprattutto in relazione ai volumi e al ritardo del conferimento dell'acqua.

Un più ampio e condiviso interesse per l'analisi delle ricadute sul piano della qualità urbana e territoriale potrebbe incentivare la diffusione e lo sviluppo di interventi alla scala edilizia che innescherebbero virtuosi processi di riequilibrio ambientale con sensibili benefici sullo spazio pubblico.

Al termine del percorso di ricerca, alcune questioni, come il rapporto tra scala edilizia e scala urbana, rimangono aperte a definire ulteriori possibili scenari di indagine. Tra le linee di ricerca che potrebbero essere sviluppate vi è senz'altro quella sperimentale volta a valutare gli effetti di mitigazione prodotti dal verde nei confronti dell'effetto isola di calore e di conseguenza ad individuare opportune strategie di riqualificazione urbana o di conversione di superfici orizzontali di tipo convenzionale con positive ricadute anche sul piano della gestione idrica.

Un ulteriore filone operativo potrebbe riguardare la creazione di un database aggiornabile, su scala nazionale o europea, riguardante lo stato di funzionamento e il livello di manutenzione richiesto dagli interventi eseguiti dai

maggiori produttori di sistemi di copertura a verde con la finalità di incrociare i dati prestazionali e individuare possibili segmenti di sviluppo o fattori di correzione.

Seppur normata e ormai divenuta parte di un bagaglio conoscitivo solido la tecnologia a verde per la copertura rappresenta ancora un fertile terreno di ricerca soprattutto nell'ottica di sondare le potenzialità che ancora si celano nella combinazione tra la tecnologia propria dei componenti edilizi e quelle caratteristiche di adattabilità e dinamicità proprie degli organismi viventi.

Una ricerca che mutuando strumenti e metodi provenienti da settori contigui può sostenere su basi scientifiche, e non semplicemente sulla base di un calcolo di compensazione ambientale, l'applicazione di un sistema ricco di opportunità e potenzialità.

Bibliografia

LIBRI, SAGGI E TESI DI RICERCA

- Abram, Paolo. *Giardini pensili: Coperture a verde e gestione delle acque meteoriche*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2004.
- Abram, Paolo. “Nuovi criteri di qualità per il verde pensile: Il nuovo codice di pratica UNI 11235.” Materiale del corso: *Norma UNI 11235: progettare e realizzare coperture a verde secondo il codice di buona pratica*. Verona: maggio 2008.
- Abram, Paolo. *Verde pensile in Italia e in Europa*. Milano: Il Verde Editoriale, 2006.
- Arpav - Agenzia Regionale per la Prevezione e Protezione Ambientale del Territorio. *La caratterizzazione climatica della Regione Veneto*.”
- Bascaran, Bas, e Karen Liu. “Thermal performance of green roofs through field evaluation.” In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Bass, Brad, et al. “The impact of green roofs on Toronto’s heat island.” In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Bellomo, Antonella. *Pareti Verdi. Linee guida alla progettazione*. Napoli: Sistemi editoriali, 2003.
- Bettini, Virginio. *Elementi di ecologia urbana*. Torino: Einaudi, 1996.
- Busso von Busse, Hans, et.al. *Atlante delle terrazze*. Grande atlante di architettura. Torino: Utet, 1998.
- Castellotti, Francesco. “Studio sperimentale degli effetti energetici di un green roof sugli edifici.” Tesi di dottorato in fisica tecnica, Università degli Studi di Padova, ottobre 2003.
- Cheney, Colin, e Cynthia Rosenzweig. “Green roofs and environmental restoration: towards an ecological infrastructure for New York City.” In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Chiuppani, Anna Elisa, e Tatiana Prest. *La progettazione del verde per il controllo microclimatico*. Monfalcone: Edicom Edizioni, 2008.
- Clark, Corrie, Peter Adriaens, e Brian Talbot. “Probabilistic economic analysis for green roof benefits for policy design.” In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Boston, 2006.
- Croce, Sergio, e Vittorio Galimberti. *Impermeabilizzazione di costruzioni interrato*. Milano: Pirola Editore, 1992.
- Croce, Sergio, e Vittorio Galimberti. *Sistemi di impermeabilizzazione: Guida alla progettazione*. Milano: BE-MA Editrice, 2005.

- Dunnett, Nigel, e Noël Kingsbury. *Planting green roofs and living walls*. Portland: Timber Press, 2008.
- FAO. "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements." *FAO Irrigation and drainage Paper*. Roma, 1998.
- Filippi Marco, Marco Prino, e Valentina Serra. "Monitoraggio del comportamento termico di un tetto verde: procedura di misura e relative problematiche." In atti del *Congresso Annuale Associazione Termotecnica Italiana*. Padova - San Martino di Castrozza: settembre 2003. Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2003: 1863-1872.
- Fiori, Matteo. "La progettazione di coperture a verde secondo la normativa UNI 11235." Materiale del corso: *Norma UNI 11235: progettare e realizzare coperture a verde secondo il codice di buona pratica*. Verona: maggio 2008.
- Fiori, Matteo, e Tiziana Poli. *Coperture a verde: Esempi di progettazione*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli editore, 2008.
- Gaspari, Jacopo, ed Elena Giacomello. "Green living technologies in sustainable refurbishment strategies." In atti del convegno internazionale *CIB 2010: Building a better world*. Salford Quays: maggio 2010.
- Gray, Steven, Scott Armstrong, e Paul Pasqualini. "A green roof life cycle analysis." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Baltimore 2008.
- Hagerman, Joseph, e David Hodge. "Optimizing the building envelopes with green roofs: a discussion of architectural and energy performance requirements." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Boston, 2006.
- Henderson, Beau. "Human-Driven Extensive Greenroof Design." Tesi di master in Landscape Architecture, Virginia Polytechnic Institute & State University, giugno 2003.
- Hutchinson, Doug, et al. "Stormwater monitoring two ecoroofs in Portland, Oregon, Usa." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Koshimizu, Hajime, e Hyukjae Lee. "The psychological and physiological stress relief effect of the green roof." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Minneapolis, 2007.
- Lanza, Luca, e Anna Palla. "Scenari di regimazione idrica nella conversione a verde pensile delle coperture." In atti del *II Convegno nazionale: Il verde pensile nel clima mediterraneo*. Genova, marzo 2009.
- Lee, Hyukjae, e Hajime Koshimizu. "The psychological and physiological stress relief effect of the green roof." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Minneapolis, 2007:1.
- Liu, Karen, e Bas Baskaran. "Thermal performance of green roofs through field evaluation." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Minneapolis, 2007.
- Lora, Chiara, Massimiliano de Franceschi, Marco Sitta, e Dino Zardi. "Determinazione dell'effetto isola di calore urbana in una città alpina mediante utilizzo di reti di sensori a basso costo." In atti del *XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Roma, 2006.
- Lucchini, Angelo. *Le coperture innovative*. Milano: Il Sole 24 Ore, 2000.
- Marinosci, Ines, et al. "Analisi del processo di urbanizzazione delle città." ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale: www.reeurbane.apat.it/site/_contentfiles/00037700/37757_suolo
- Matteucci, Maria Elisabetta, Giovanni Sanesi, e Paola Spagnoli. *Progettare con il verde: Manuale di progettazione del verde e dei vuoti urbani*. Firenze: Alinea, 1994.
- Mentes, Jeroen, Dirk Raes, e Martin Hermy. "Effect on the water balance of greenroofs." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Munafò, M., G. Martellato, e N. Riitano. "Impermeabilizzazione e consumo del suolo." ISPRA: Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale: www.apat.gov.it/site/_contentfiles/154515_focus_suolo_compresso

- Osmundson, Theodore. *Roof gardens: History, design and construction*. Singapore: W. W. Norton & Company, 1999.
- Palla, Anna. "Unsaturated flow in engineered media for hydrologic restoration." Tesi di dottorato in fluidodinamica e processi dell'ingegneria ambientale. DICAT, Università di Genova: 2008.
- Peron, Fabio. "Vegetazione e ambiente costruito: Aspetti termigrometrici." In *Verde: Naturalizzare in verticale*, a cura di Valeria Tatano, 61-95. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2008.
- Prinzhorn, Martin. *Manincor*. Vienna: Schlebrügge Editor, 2005.
- Priore, Riccardo. "La Convenzione Europea del Paesaggio." Treviso: Fondazione Benetton Studi e Ricerche, 11 novembre 2004.
- Puay Yok, Tan, et al. "Thermal benefits of rooftop gardens in Singapore." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Robertson, Christine. "A roof built-out analysis for the University of Cincinnati: quantifying the reduction of stormwater run-off." Tesi di Master of Community Planning, University of Cincinnati, 2006.
- Schunck, Eberhard, et al. *Atlante dei tetti*. Grande atlante di architettura. Torino: Utet, 1998.
- Shirley, Chris. "The sustainability value of the green roof as a water recycling system in urban location." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Sicurella, Annibale. *Progettare il verde: Tecniche e soluzioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2003.
- Slone, Daniel K., e David E. Evans. "Integrating green roofs and low impact design into municipal storm water regulation." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Tatano, Valeria (a cura di). *Verde: Naturalizzare in verticale*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2008.
- Tillinger, Debra, et al. "Hydrologic functions of green roofs in New York City." In *Green roofs in the New York Metropolitan Region: Research report*. Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies, New York: 2006..
- Valagussa, Massimo. "Lo strato colturale: caratteristiche agronomiche." Materiale del corso: *Norma UNI 11235: progettare e realizzare coperture a verde secondo il codice di buona pratica*. Verona: maggio 2008.
- Velasquez, Ralph. "Life Cycle Cost - Phase one." Storm water management and life cycle calculation. In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Minneapolis, 2007.
- Weiler, Susan, e Katrin Scholz-Barth. *Green roof system. A guide to planning, design and constructing landscapes over structure*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- Yu, Chen, et al. "Thermal benefits of rooftop gardens in Singapore." In atti del convegno *World Green Roof Congress*. Chicago, 2003.
- Yu, Chen, e Wong Hien Nyuk. "Thermal benefits of city parks." *Energy and Buildings*, 38 (2006): 105-120.
- Zannoni, Giovanni. *Manuale tecnico tegola italiana*. Treviso: Europrint, 1999.
- Zimmermann, Astrid. *Constructing landscape*. Basilea: Birkhäuser, 2009.

RIVISTE E ARTICOLI

- Akbari, Hashem, Dan M. Kurn, Sarah E. Bretz, e James W. Hanford. "Peak power and cooling energy savings of shade trees." *Energy and Buildings*, 25 (1998): 139-148.
- Akbari, Hashem, M. Pomerantz, e H. Taha. "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." *Solar Energy*, 70 (2001): 295-310.

- Berthier, E., H. Andrieu, e J. D. Creutin. "The role of soil in the generation of urban runoff: development and evaluation of 2D model." *Journal of Hydrology*, 299 (2004): 252-266.
- Carter, Timothy, e C. Rhett Jackson. "Vegetated roofs for stormwater management at multiple scales." *Landscape and Urban Planning*, 80 (2007): 84-94.
- Echols, Stuart. "Split-flow theory: stormwater design to emulate natural landscapes." *Landscape and Urban Planning*, 85 (2008): 205-214.
- Eumorfopoulou, Ekaterini, e Dimitris Aravantinos. "The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece." *Energy and Buildings*, 27 (1998): 29-36.
- Feng, Chi, Qinglin Meng, e Yufeng Zhang. "Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs." *Energy and Buildings*, (2010): 7.
- Fioretti, Roberto, et al. "Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate." *Building and Environment*, 45 (2010): 1890-1904.
- Giacomello, Elena. "Verde in copertura: Naturale artificiale." *Modulo*, 359 (2010): 170-176.
- Giacomello, Elena. "Verde verticale: Utilizzo del verde oltre le coperture. Tecnologie e applicazioni a confronto." *Modulo*, 349 (2009): 154-161.
- Hoyano, Akira. "Climatological uses of plants for solar control and effects on the thermal environment of a building." *Energy and Buildings*, 11 (1988): 181-199.
- Kidd, Josh. "Optimum greenroof for Brisbane." *Water Sensitive Urban Design*, 2005: 39.
- Ingegneria Ambientale*, 3 (2009): 99.
- Journal of Hydrology*, 299 (2004): 163-165.
- Lazzarin, Renato, Francesco Castellotti, e Filippo Brusato. "Experimental measurements and numerical modelling of a green roof." *Energy and Buildings*, ? (2005): 8.
- Living Architecture Monitor*, 10 (2008).
- Living Architecture Monitor*, 11 (2009).
- Lotus International*, 135 (2008).
- Mentes, Jeroen, Dirk Raes, e Martin Hermy. "Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?" *Landscape and Urban Planning*, 77 (2006): 217-226.
- Nicholls, Sarah. "Measuring the impact of parks on property values: new research shows that green spaces increase the value of nearby housing." *www.findarticles.com > Parks > March 2004*, 2004.
- Ong Boon Lay. "Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning." *Landscape and Urban Planning*, 63 (2003): 197-211.
- Palla, Anna, e Luca G. Lanza. "Installazioni a verde pensile in area urbana per il controllo della formazione dei deflussi superficiali." *L'acqua*, 1 (2009): 19-32.
- Palla, Anna, Ilaria Gnecco, e Luca G. Lanza. "Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs." *Water*, 2 (2010): 140-154.
- Palla, Anna, Ilaria Gnecco, e Luca G. Lanza. "Unsaturated 2D modelling for subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof." *Journal of Hydrology*, 379 (2009): 193-204.
- Palomo Del Barrio, Elena. "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings." *Energy and Buildings*, 27 (1998): 179-193.
- Rizwan, Ahmed Memon, Dennis Leung, Liu Chunho. "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island." *Journal of Environmental Sciences*, 20 (2008): 120-128.

- Theodosiou, Theodore. "Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique." *Energy and Buildings*, 35 (2003): 909-917.
- Villarreal, E.L., e L. Bengtsson. "Response of a Sedum green-roof to individual rain events." *Ecological Engineering*, 25 (2004): 1-7.
- Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, e L. Bengtsson. "Inner city stormwater control using a combination of best management practices." *Ecological Engineering*, 22 (2004): 279-298.
- Wanphen, Surakha, e Katsunori Nagano. "Experimental study of the performance of porous materials to moderate roof surface temperature by its evaporative cooling effect." *Building and Environment*, 44 (2009): 338-351.
- Wilmers, Friz. "Green for melioration of urban climate." *Energy and Buildings*, 11 (1988): 289-299.
- Yu, Chen, e Wong Hien Nyuk. "Thermal benefits of city parks." *Energy and Buildings*, 38 (2006): 105-120.

NORMATIVE

- FLL: Green roofing guidelines. *Guidelines for the planning, construction and maintenace of green roofing*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. Bonn: FLL, 2008.
- UNI 8089: 1980. *Edilizia. Coperture e relativi strati funzionali. Terminologia funzionale*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 1980.
- UNI 8091: *Coperture. Terminologia geometrica*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 1980.
- UNI 8178: *Edilizia. Coperture e relativi strati funzionali*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 1980.
- UNI 8290: *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 1981.
- UNI 8627: *Sistemi di copertura. Definizioni e classificazione degli schemi funzionali, soluzioni conformi e soluzioni tecnologiche*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 1984.
- UNI 11235: *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*. Ente nazionale italiano di unificazione. Milano: UNI, 2007.