



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Carlo Antonio Stival
via A. Valerio 6/1
34127 Trieste
+390405583489
cstival@units.it

ARGOMENTO

17

21 APRILE 2022

Chiusure orizzontali superiori

Coperture verdi

A. A. 2021-2022

Laboratorio di **Costruzione dell'Architettura**

Corso di **Tecnologie e soluzioni edilizie**

per la sostenibilità ambientale

Breve storia del verde orizzontale in architettura

Uno dei più antichi e spettacolari esempi di **verde pensile** sono i **giardini di Babilonia**, annoverati tra le sette meraviglie del mondo antico e prototipo arcaico delle coperture verdi. Risalenti al 590 a.C., furono commissionati dal re Nabucodonosor II, sebbene la tradizione voglia che sia stata la regina assira Semiramide a volerne la costruzione.

I giardini comprendevano un **orto botanico** con **flora arborea, arbustiva e erbacea non autoctona**, bensì originaria di climi più umidi. Per questo motivo, assieme alla realizzazione dei giardini stessi fu costruito un complesso **sistema di irrigazione** con l'acqua del fiume Eufrate. Si ritiene che l'edificio stesso su cui erano alloggiati i giardini pensili contenesse i canali necessari per l'irrigazione per i servizi degli abitanti. Il verde pensile era ospitato da **terrazzamenti** su cui lo strato colturale raggiungeva 1-2 metri di spessore.

Riproduzione dei giardini pensili di Babilonia
(www.nationalgeographic.it/)



Breve storia del verde orizzontale in architettura

Un altro esempio di giardini pensili dell'antichità, ed il primo di cui si abbia documentazione nella penisola italiana, sono le **tombe etrusche** realizzate a partire dal XI secolo a.C.; alcune di queste realizzazioni sono tuttora intatte.

Dopo lo scavo del terreno al fine di ricavare lo spazio necessario al seppellimento dei defunti, la parte superiore dei sepolcri veniva ricoperta, secondo una **configurazione cupolare**, con lo stesso terreno su cui cresceva la vegetazione.

I sepolcri etruschi nella necropoli della "Banditaccia" a Cerveteri (RM)
(www.etruriameridionale.beniculturali.it).



Breve storia del verde orizzontale in architettura

All'epoca romana risalgono altre realizzazioni di verde pensile; nella **civiltà romana** questa tecnologia era **piuttosto conosciuta e frequentemente applicata**. A questo periodo, a Roma si ascrivono il **mausoleo di Augusto** (29 a.C.) – in cui la copertura era, in origine, ricoperta di terra e poi inverdita con cipressi – ed il mausoleo di Adriano (130 d.C.), la villa dell'imperatore Adriano a Tivoli (92 d.C.) e le ville di Plinio il Giovane (ad esempio villa Laurentina, risalente al I secolo d.C.).

Plinio il Giovane riporta che la villa di proprietà in Toscana presentasse uno **xystus**, ossia un **giardino pensile** direttamente **accessibile dall'edificio**, costituito da tumuli in terra in pendenza spessi 1 ml, in cui l'inclinazione assicurava l'allontanamento delle acque piovane ed elementi di contenimento evitavano eccessivi fenomeni di dilavamento.

Mausoleo di Augusto (www.sovrintendenzaroma.it/)



Breve storia del verde orizzontale in architettura

In epoca medioevale il verde pensile fu impiegato negli **edifici ecclesiastici** per consentire la coltivazione nei chiostri, ma soprattutto **castelli** e **fortezze** ospitavano giardini pensili atti a diverse finalità: oltre alla funzione architettonica di decoro, essi venivano utilizzati come **accumuli di terra**, ricoperta dalla vegetazione, per **attutire** gli effetti dei **colpi d'arma da fuoco** e ripristinare le opere dai danneggiamenti subiti, in prevalenza depositi di armi, di munizioni e dispense. È bene evidenziare che, in questa epoca, la funzione di decoro dei giardini pensili era spesso affiancata, se non subordinata, alle loro diverse utilità pratiche, evidenziandone un primo tentativo di **fruizione**.

Il valore del verde quale elemento ornamentale e decorativo è riscoperto a partire dal XV secolo.

Da questo momento, e per i successivi quattro secoli, si possono apprezzare diverse realizzazioni di giardini pensili di significativo pregio: tra queste si ricordano la villa D'Este a Tivoli (RM), Villa Aldobrandini a Frascati (RM), il Palazzo Reale a Napoli, i giardini del Belvedere nel Vaticano. L'utilizzo del verde pensile, in questo periodo, aumenta la fruibilità degli spazi esterni, di cui costituisce **spazio di relazione con l'edificio**.



Villa d'Este a Tivoli (www.villadestetivoli.info)

Breve storia del verde orizzontale in architettura

Fino al

XIX secolo

i giardini pensili erano concepiti esclusivamente per soddisfare **requisiti estetici** e **funzionali**.

Dal

1865

cominciano ad emergere anche i pregi che queste soluzioni comportano da un punto di vista **ambientale**.
L'architetto **C. Rabitz** (1823-1891) pubblica un trattato sui giardini pensili evidenziandone, per primo, il **contributo** alla **salubrità** dei **contesti** a **forte densità abitativa**.

Negli

Anni '20

da queste premesse, nacque l'inserimento di **parchi** estesi al centro dei quartieri e giardini pensili **sulle coperture degli edifici**.

All'inizio del

XX secolo

la forte espansione industriale e l'aumento della densità nelle aree antropizzate portarono alle prime **riflessioni** sui temi dell'ecologia e della salvaguardia ambientale, per elaborare soluzioni di **mitigazione ambientale**.

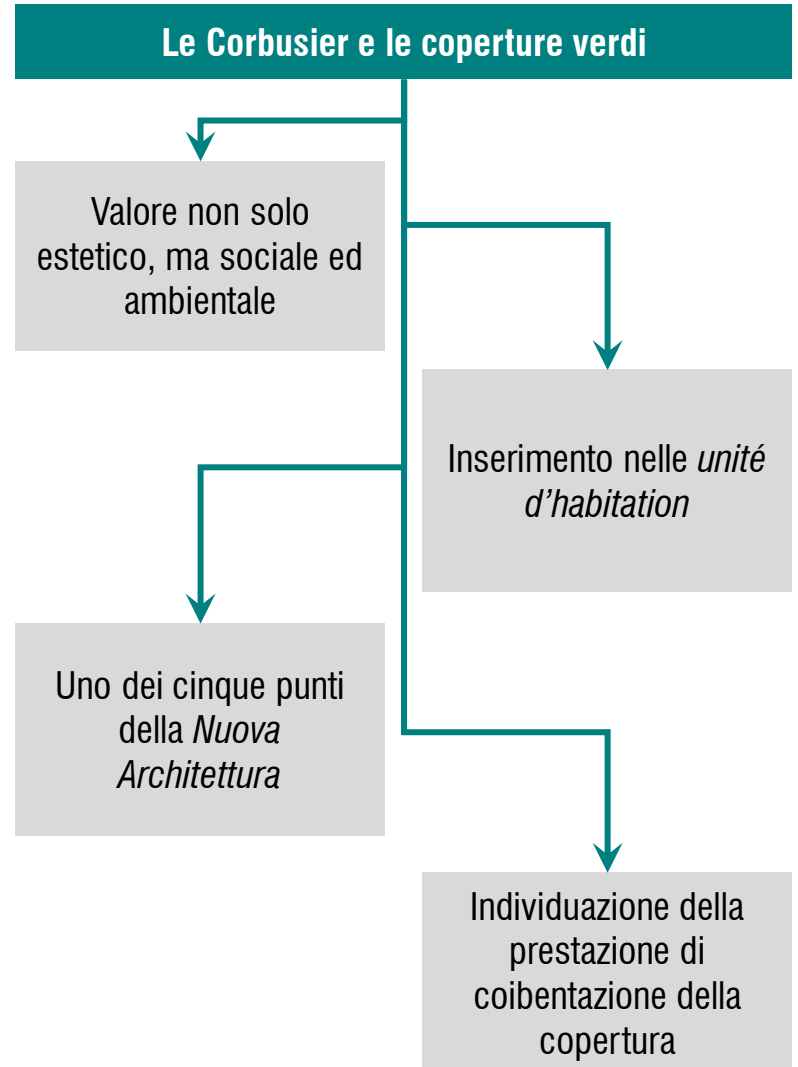
Breve storia del verde orizzontale in architettura

Anche Le Corbusier (1887-1965) riconosce il valore estetico, ambientale e sociale delle soluzioni a verde pensile.

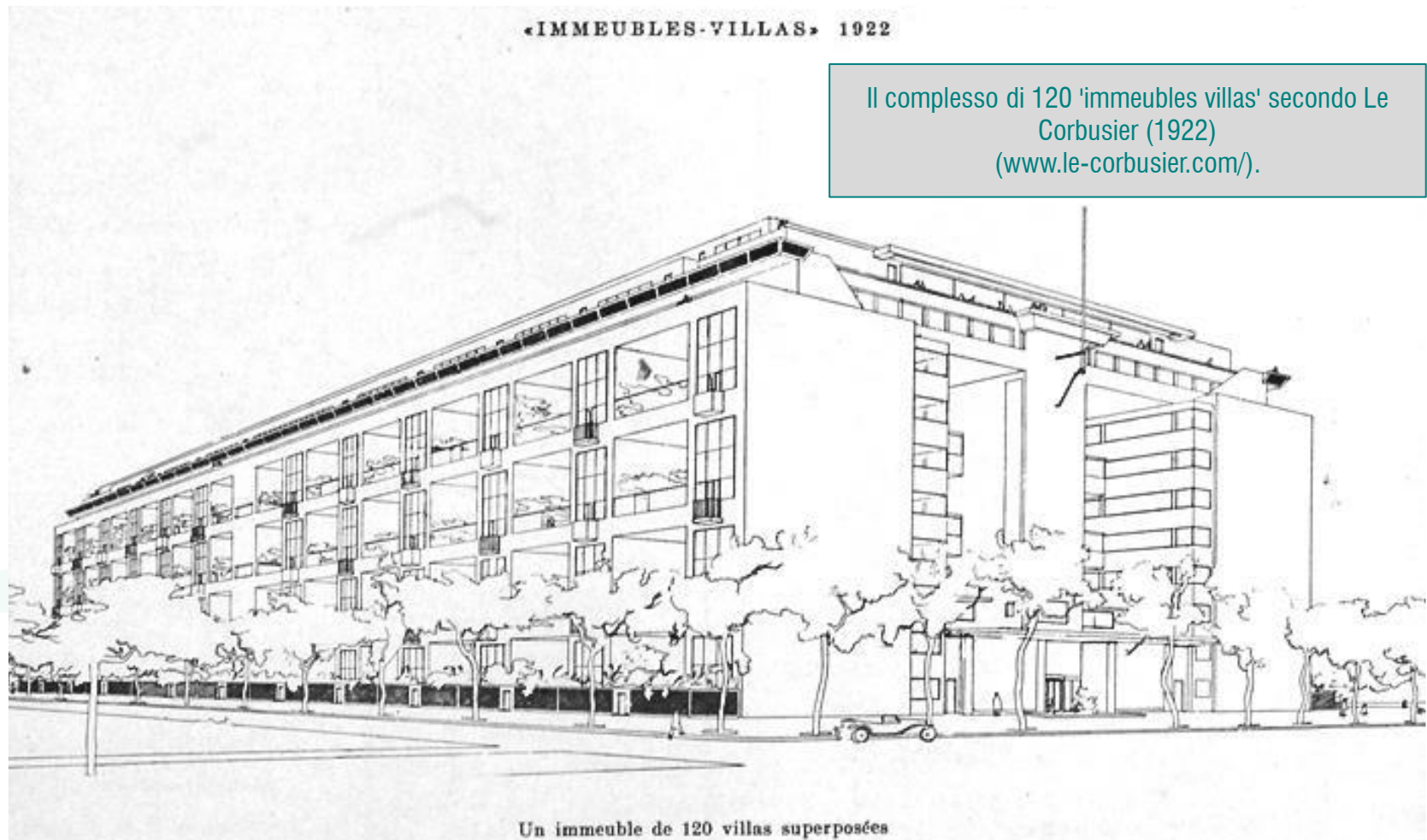
Nel progetto delle *immeubles villas* (1922) sono presenti i caratteri delle *unité d'habitation*, caratterizzati anche da terrazzi giardino.

In questo progetto, il verde pensile è utilizzato come elemento di riequilibrio ambientale e sociale, tanto che l'architetto svizzero ne fa uno dei cinque punti della Nuova Architettura (Vers une Architecture, 1923), il *toit terrasse* (tetto a terrazza).

Esso permette di rendere all'uomo il rapporto con il verde, che si colloca al di sopra dell'edificio: qui evidenzia la *funzione coibente* nei confronti dei piani inferiori e sottolinea il fatto che tali soluzioni rendono lussureggiante e *vivibile il tetto*.

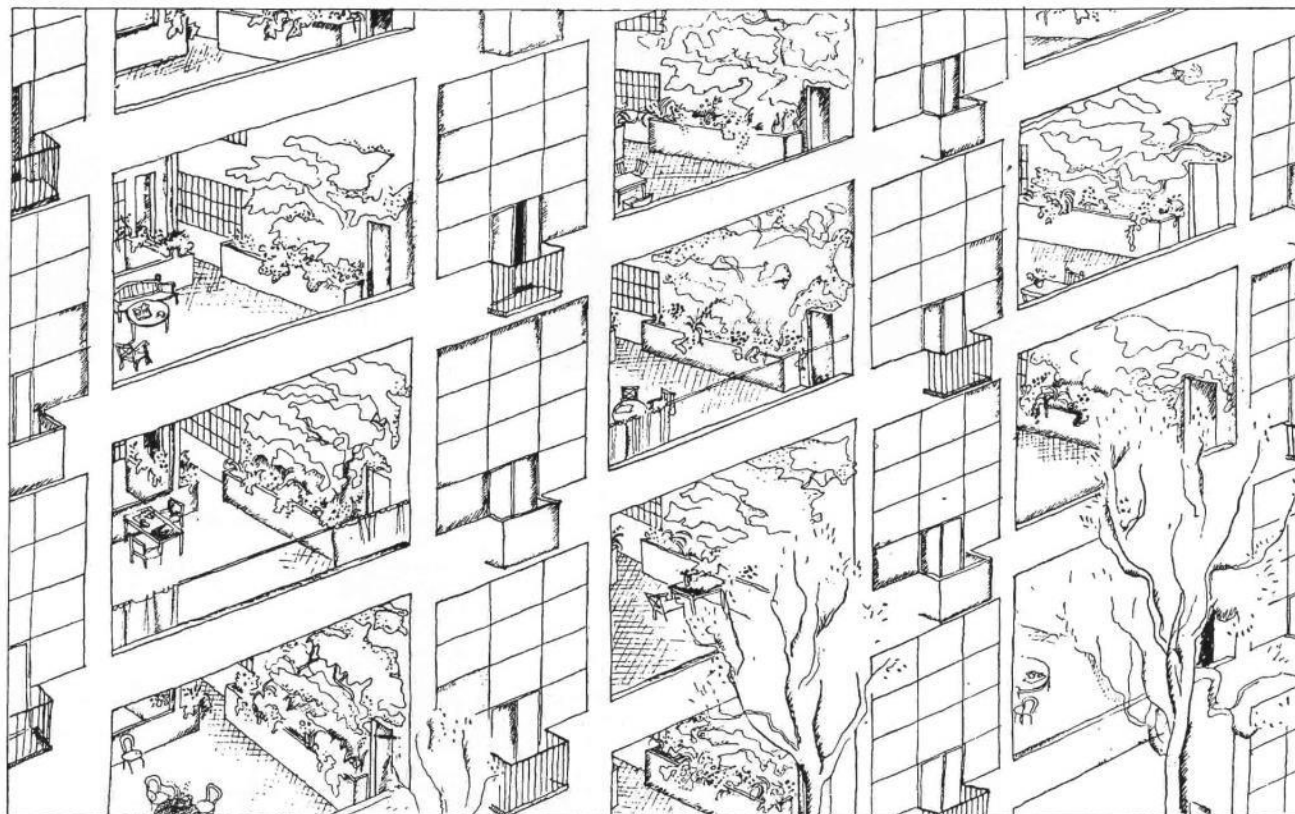


Breve storia del verde orizzontale in architettura



Breve storia del verde orizzontale in architettura

«IMMEUBLES-VILLAS» 1922



«Lotissements fermés à alvéoles». Le module étriqué des façades actuelles (3,50 m) est porté à 6 m, conférant à la rue un caractère d'ampleur tout nouveau.

Particolare delle 'immeubles villas' di Le Corbusier (1922); sono ben riconoscibili gli spazi adibiti a giardino in ciascuna 'villa'.

(cargocollective.com/ampuqam/Regard-authentique-p3-Immeuble-villa-cache).

Breve storia del verde orizzontale in architettura

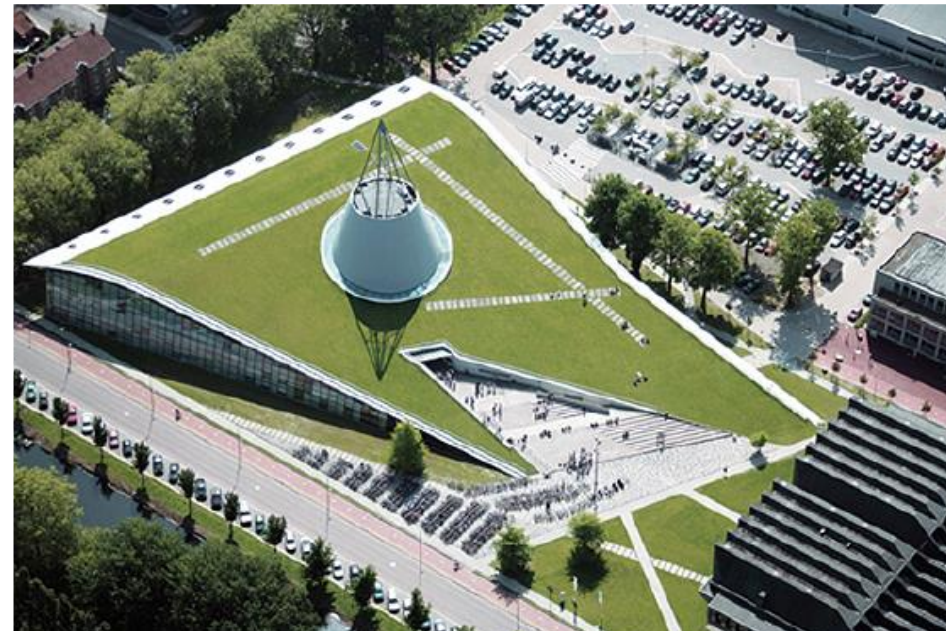
Dagli anni Sessanta del secolo scorso la tecnologia delle coperture verdi cominciano a diffondersi in Europa principalmente come **strategia** per il **recupero di aree ed edifici industriali degradati**.

In questo periodo il verde pensile ha trovato sviluppi differenti nei Paesi europei quale **misura compensativa** per rigenerare aree verdi che, in particolar modo nel Secondo Dopoguerra, erano state prima trascurate e poi ridotte in dimensioni dalle necessità di ricostruzione in tempi brevi sia del tessuto industriale, sia dell'edilizia abitativa, processo spesso carente in programmazione a lungo termine.

Nei paesi dell'Europa settentrionale le coperture verdi trovano la loro maggior diffusione quale elemento di **mitigazione** del **microclima urbano**.

In Germania, ad esempio, dalla fine degli anni '80 una legge nazionale cita il verde pensile quale strumento di compensazione ambientale e permette ai Comuni di incentivare o prescrivere l'impiego di queste tecnologie.

Library of University of Technology, Delft (NL).
(www.mecanoo.nl)



Breve storia del verde orizzontale in architettura

In Italia non è ancora pienamente apprezzabile la diffusione delle coperture verdi, sebbene si ritiene che il settore della tecnologia sia decisamente in crescita.

Probabilmente, alla base di questo scarso utilizzo ci sono ragioni di carattere culturale, di know-how tecnico ed economico, con particolare riferimento agli **strumenti incentivanti** che solo recentemente sono stati resi operativi a livello soprattutto locale.

Environment Park, Torino, progetto architettonico E. Ambasz, B. Camerana, G. Durbiano
(www.greenroofs.com/projects/).

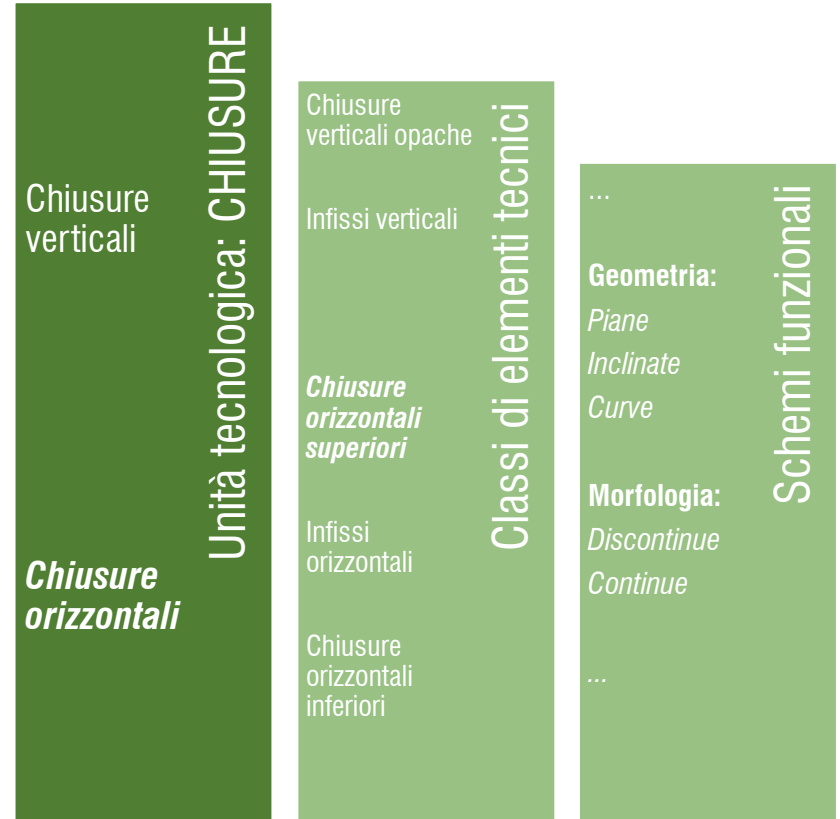


Analisi funzionale delle coperture verdi

Le coperture sono classificabili in base a criteri afferenti alle peculiarità dell'elemento tecnico, alla fase di gestione ed alla caratterizzazione dei suoi strati funzionali, e precisamente ai criteri seguenti:

1. geometria;
2. tipologia d'installazione;
3. accessibilità / fruibilità;
4. manutenzione e gestione;
5. prestazionale.

17



Analisi funzionale delle coperture verdi

1 GEOMETRIA

Le installazioni verdi in copertura sono realizzabili per tutte le configurazioni geometriche della copertura, in quanto è possibile prevedere coperture verdi su superfici piane o inclinate con **pendenza inferiore a 30-35°**.

Il costo di realizzazione e di manutenzione è crescente all'aumentare della pendenza: su coperture inclinate sono inoltre necessari strati funzionali discontinui accessori, volti a conferire stabilità alla copertura, a controllarne i fenomeni erosivi e di dilavamento, a permettere lo svolgimento delle azioni manutentive in sicurezza.

Pendenza 0 ÷ 2% (0 ÷ 1°) - coperture piane

- massime prestazioni richieste allo strato drenante e di impermeabilizzazione
- installazione vantaggiosa in zone di scarse precipitazioni
- possibile installazione di coperture verdi intensive con irrigazione ad accumulo

Pendenza 2 ÷ 5% (1 ÷ 3°)

- condizione ottimale per l'implementazione del verde pensile

Pendenza 5 ÷ 36% (3 ÷ 20°)

- verifica del fenomeno dell'accumulo idrico
- predisposizione di elementi rompitratta antiscivolamento nello strato colturale per pendenze superiori a 15° (26%)

Pendenza 36 ÷ 58% (20 ÷ 30°)

- integrazione del sistema antiscivolamento con strati colturali più compatti caratterizzati da pezzatura irregolare

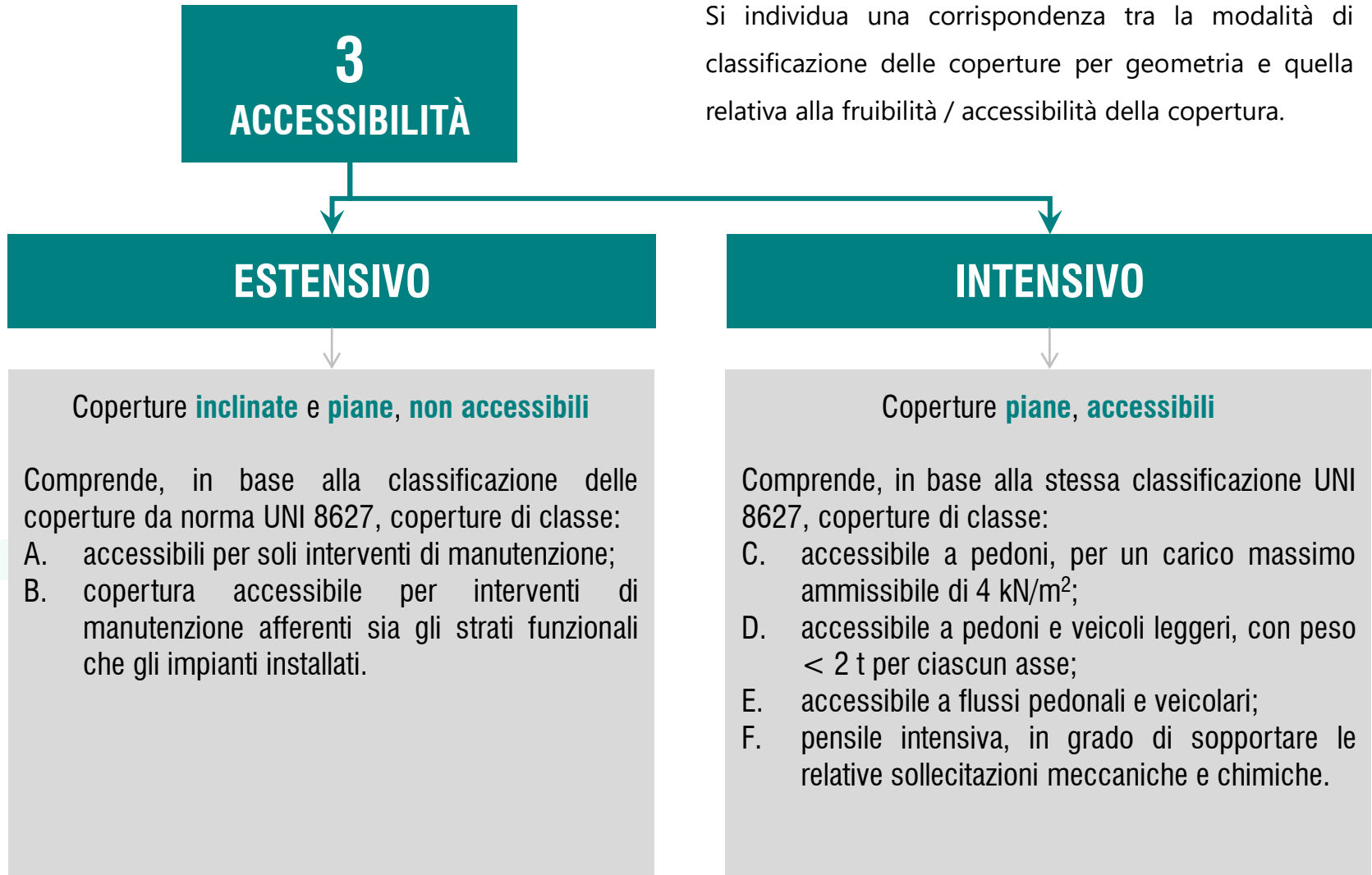
Pendenza 58 ÷ 100% (30 ÷ 45°)

- possibile non convenienza economica
- verifica statica della copertura e del sistema di ancoraggio

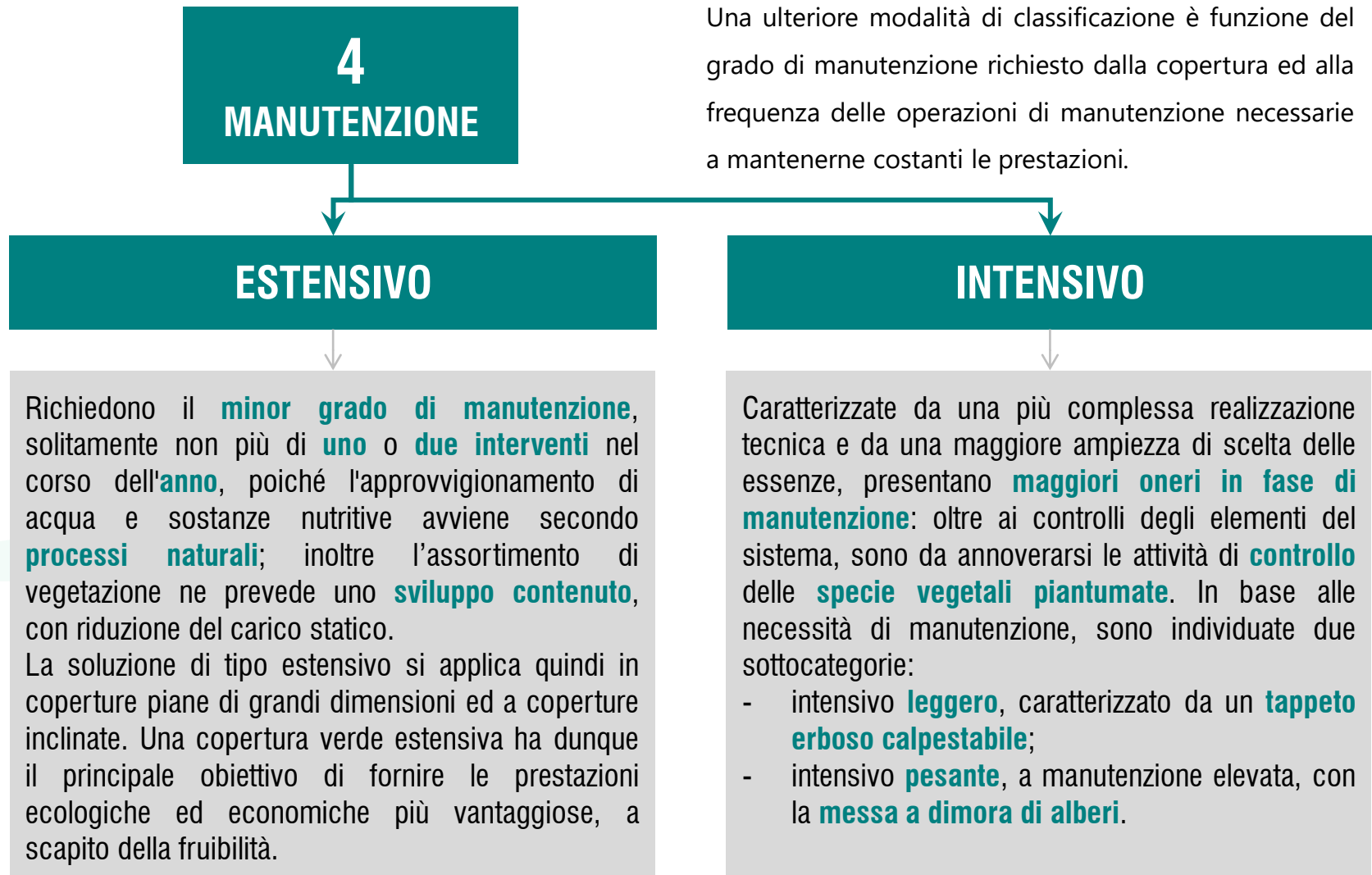
Analisi funzionale delle coperture verdi



Analisi funzionale delle coperture verdi



Analisi funzionale delle coperture verdi



Una ulteriore modalità di classificazione è funzione del grado di manutenzione richiesto dalla copertura ed alla frequenza delle operazioni di manutenzione necessarie a mantenerne costanti le prestazioni.

4

MANUTENZIONE

ESTENSIVO

INTENSIVO

Richiedono il **minor grado di manutenzione**, solitamente non più di **uno o due interventi** nel corso dell'**anno**, poiché l'approvvigionamento di acqua e sostanze nutritive avviene secondo **processi naturali**; inoltre l'assortimento di vegetazione ne prevede uno **sviluppo contenuto**, con riduzione del carico statico.

La soluzione di tipo estensivo si applica quindi in coperture piane di grandi dimensioni ed a coperture inclinate. Una copertura verde estensiva ha dunque il principale obiettivo di fornire le prestazioni ecologiche ed economiche più vantaggiose, a scapito della fruibilità.

Caratterizzate da una più complessa realizzazione tecnica e da una maggiore ampiezza di scelta delle essenze, presentano **maggiori oneri in fase di manutenzione**: oltre ai controlli degli elementi del sistema, sono da annoverarsi le attività di **controllo delle specie vegetali piantumate**. In base alle necessità di manutenzione, sono individuate due sottocategorie:

- intensivo **leggero**, caratterizzato da un **tappeto erboso calpestabile**;
- intensivo **pesante**, a manutenzione elevata, con la **messa a dimora di alberi**.

Analisi funzionale delle coperture verdi

4 MANUTENZIONE

CLASSI	DESCRIZIONE	IRRIGAZIONE	MANUTENZIONE MDO ⁽¹⁾ [h/m ² /yr]	RAPPORTO DI COSTI M/C [%] ⁽²⁾
1	Verde estensivo	in caso di siccità	< 0,02	< 1
2	Verde intensivo leggero	prevista	0,021 ÷ 0,06	1 ÷ 5
3	Verde intensivo pesante	prevista	> 0,06	> 5

(1) MANODOPERA

(2) C: IL COSTO DELLA COSTRUZIONE DELLA COPERTURA VERDE AL NETTO DEL TRASFERIMENTO IN QUOTA DEI MATERIALI; M: COSTO ANNUO DELLA MANUTENZIONE ORDINARIA.

Analisi funzionale delle coperture verdi

ricapitolando...

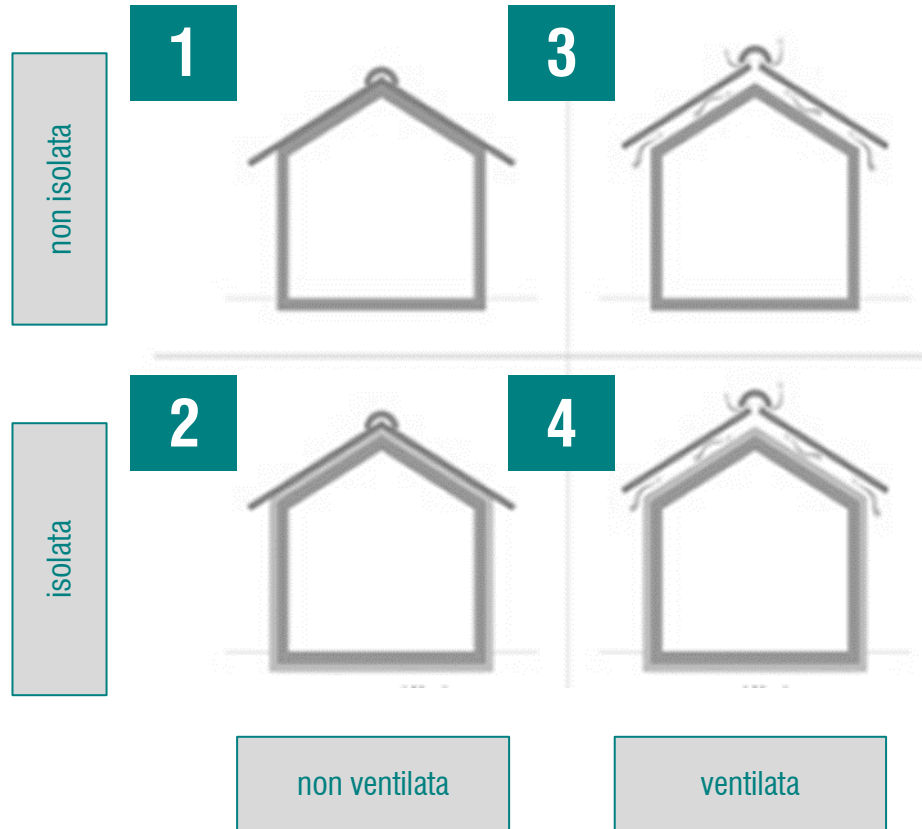
CLASSIFICAZIONE	ESTENSIVO	INTENSIVO	
		LEGGERO	PESANTE
GEOMETRIA	piana, inclinata	piana (pendenza inferiore al 5%)	
ACCESSIBILITÀ	non praticabile	praticabile e coltivabile	
MANUTENZIONE	minima	media	elevata
VEGETAZIONE	tappeto erboso	tappeto erboso	tappeto erboso, arbusti, alberi

Analisi funzionale delle coperture verdi

5 PRESTAZIONI

Le soluzioni conformi previste per tali classi di elementi tecnici in termini di controllo della dispersione del calore e di controllo del flusso di vapore sono così individuate:

1. coperture **non isolate** e **non ventilate**, prive di strati funzionali precisamente individuati che agiscano sulla trasmissione del calore e sul comportamento igrometrico;
2. coperture **isolate** e **non ventilate**, che permettono il solo controllo delle dispersioni di calore;
3. coperture **non isolate** e **ventilate**, in cui uno specifico strato funzionale consente il controllo del comportamento igrometrico;
4. coperture **isolate** e **ventilate**, aventi strati funzionali capaci di operare il controllo di entrambi i fattori.



Analisi funzionale delle coperture verdi

5 PRESTAZIONI

Le coperture verdi sono prevalentemente caratterizzate da **soluzioni conformi di tipo isolato**. La presenza di uno specifico strato di **isolamento termico, complementare** alla prestazione offerta dallo strato colturale, deve essere valutata in fase di determinazione dei livelli di prestazione che la copertura deve offrire.

Il controllo del comportamento igrometrico è invece affidato ad uno **strato funzionale di barriera al vapore** per evitare l'accumulo di vapore all'interno della soluzione e la formazione di condensa interstiziale.

Anche in questo caso la prestazione complessiva del pacchetto deve essere attentamente valutata in considerazione della quantità d'acqua presente nello strato colturale, assai differente rispetto a quelle connotanti le coperture tradizionali.

Le coperture continue, introdotte nella classificazione morfologica, sono elementi tecnici in cui il requisito di tenuta all'acqua è garantito da uno specifico strato funzionale che garantisce **l'impermeabilizzazione** in forza della propria continuità, indipendentemente dalla geometria della copertura stessa.

È allora possibile individuare **tre diverse soluzioni conformi** che fanno riferimento alla collocazione di questo strato funzionale.

Analisi funzionale delle coperture verdi

5 PRESTAZIONI

«TETTO CALDO»

Lo strato funzionale di **tenuta all'acqua** è posto immediatamente **sopra allo strato di isolamento termico**, dunque verso l'estradosso della copertura. In questo caso è **necessaria** la presenza di uno strato di **barriera al vapore** che eviti fenomeni di condensazione interstiziale capaci di inibire le prestazioni termoisolanti della copertura.

«TETTO ROVESCIO»

Lo strato funzionale di **tenuta all'acqua** è posto immediatamente **sotto allo strato di isolamento termico**, verso l'intradosso della copertura. Poiché lo strato termoisolante funge da protezione allo strato di tenuta, il primo deve essere capace di resistere alle sollecitazioni meccaniche indotte (ivi comprese le dilatazioni termiche). Lo strato funzione di tenuta svolge anche la funzione di barriera al vapore.

«TETTO SANDWICH»

La soluzione conforme è indicata in contesti in cui è necessario conferire elevate prestazioni di resistenza termica al sistema copertura; in essa sono presenti **due** distinti **strati di isolamento termico** ai quali è **interposto** lo **strato di tenuta all'acqua**.

Requisiti connotanti

La molteplicità di effetti correlati alle coperture verdi è evidenziata innanzitutto dalla **norma tecnica di riferimento UNI 11235**; una copertura verde si configura come momento operativo nel perseguire i seguenti obiettivi:

- **fruibilità della copertura** per lo svolgimento di determinate **attività all'aperto**, legata alla **valutazione** dei **carichi agenti in copertura**;
- **fruibilità visiva** (valenza architettonica ed estetica della copertura verde);
- **modifica delle prestazioni ambientali interne** dell'edificio, con riferimento al comportamento energetico e acustico;
- **modifica delle prestazioni ambientali esterne** dell'edificio (effetto "isola di calore"), controllo del deflusso delle acque meteoriche, abbattimento della concentrazione di polveri sottili in atmosfera;
- **compensazione architettonica**.

SICUREZZA

- resistenza meccanica ai carichi statici e dinamici
- resistenza all'erosione
- resistenza agli agenti fisici, chimici e biologici

FRUIBILITÀ

- creazione di superfici destinate allo svolgimento di attività diverse
- fruibilità per accessi pedonali e veicolari

ASPETTO

- incremento della qualità visiva
- riduzione dell'impatto paesaggistico

BENESSERE, IGIENE E SALUTE DELL'UTENTE

- tenuta agli agenti atmosferici
- isolamento acustico
- riduzione dell'effetto isola di calore
- abbattimento delle polveri atmosferiche

UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE

- isolamento termico
- controllo dell'inerzia termica
- protezione degli strati di isolamento termico e di impermeabilizzazione
- recupero di materiali e suolo

SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE

- gestione dell'acqua meteorica
- contributo alla realizzazione di reti ecologiche

Requisiti connotanti

SICUREZZA STRUTTURALE

17

I **carichi permanenti** – strutturali e non strutturali – indotti da una copertura verde rappresentano il **principale parametro** da determinare in fase di progettazione: nel caso di intervento di nuova costruzione, ma soprattutto in **interventi di ristrutturazione** della copertura esistente che non interessino direttamente le strutture portanti dell'organismo. La nuova copertura può infatti comportare un **aggravio dei carichi trasmessi in fondazione** che deve essere accuratamente valutato: la struttura portante dell'edificio esistente, infatti, può non essere capace di sostenere i nuovi carichi.

La progettazione deve quindi considerare attentamente il sovraccarico aggiuntivo portato, in prevalenza, dallo strato colturale: a favore di sicurezza, lo **strato deve trovarsi in condizioni di saturazione**, ove ciò possa accadere. I carichi di progetto derivano dalle masse volumiche a saturazione dei singoli strati funzionali, e variano da 4 kN/m² a 10 kN/m² per strati ammendati, fino a 12 kN/m² per strati colturali in condizioni di saturazione.

I carichi variabili che agiscono sull'elemento tecnico di copertura sono calcolati per legge in base alla **destinazione d'uso della copertura**: particolari situazioni si riscontrano in caso di copertura praticabile ad uso privato ($q_a=2$ kN/m²) o ad uso pubblico ($q_a=4$ kN/m²). Sugli elementi strutturali vanno altresì considerati, secondo un'opportuna combinazione di carico, i pesi associati alle operazioni di manutenzione, secondo la frequenza con cui questa avviene.

Il requisito di resistenza meccanica non afferisce esclusivamente allo strato portante: i diversi strati funzionali devono possedere prestazioni tali da consentire l'espletamento delle proprie funzioni. In particolare, lo **strato di isolamento termico deve essere scevro da possibilità di deformazione**, al fine di ridurre sensibilmente la resistenza termica. Il requisito di resistenza agli urti è particolarmente rilevante nella fase realizzativa della copertura, in quanto possono risultare danneggiati strati funzionali sensibili quali lo strato di tenuta all'acqua.

Requisiti connotanti

FRUIBILITÀ

In particolari situazioni, una copertura verde può essere fruibile ed essere quindi eventualmente destinata allo svolgimento di attività all'aperto. La caratterizzazione di queste attività risulta necessaria al fine di individuare i **carichi variabili** agenti sulla copertura stessa, il grado previsto di usura della vegetazione, i conseguenti livelli ed **intensità degli interventi manutentivi**, e deve quindi essere prevista già in fase metaprogettuale.

17

TIPOLOGIA DI ACCESSO RICHIESTA	DESCRIZIONE
MANUTENZIONE STRAORDINARIA	Accesso mediante botole o comunicazioni esterne
MANUTENZIONE ORDINARIA	Sistemi di sicurezza e protezione individuale (linea-vita)
ACCESSO PUBBLICO	Predisposizione di parapetti di protezione per almeno 120 cm dal piano colturale Comunicazioni interne all'edificio

Requisiti connotanti

ASPETTO

Una copertura verde può essere progettata per avere funzione di compensazione architettonica: un mezzo per restituire, almeno in parte, la **valenza naturalistica** originaria del sistema ambientale presente nel sito in esame, al fine ottimale di mimetizzare particolari siti quali, ad esempio, gli insediamenti industriali. La destinazione a verde pensile di una copertura permette di ridurre l'impatto visivo delle strutture antropiche, migliorando l'aspetto complessivo del paesaggio e consentendo la creazione di particolari ambienti di vita per piante e piccoli animali. In tal senso, le superfici edificate destinate a verde contribuiscono alla realizzazione di **corridoi ecologici**, insieme di aree sufficientemente ravvicinate ed interconnesse da permettere l'insediamento e gli spostamenti di diverse specie all'interno del tessuto urbano; il **contributo** al **corridoio ecologico** è senz'altro **maggiore** nelle **coperture verdi** di tipo **estensivo**.

BENESSERE, IGIENE, SALUTE DELL'UTENZA

Requisito primario relativo a questa classe di esigenza è la tenuta all'acqua, assolto da uno strato avente questa specifica funzione, che deve possedere idonee caratteristiche di durabilità a causa della **laboriosità** di una sua **successiva sostituzione**. L'elemento di tenuta frequentemente svolge anche la funzione di controllo della permeabilità dell'aria. In merito al benessere acustico, il livello sonoro reputato accettabile negli ambienti posti immediatamente al di sotto della copertura è legato al potere fonoisolante complessivo della copertura stessa. Poiché il potere fonoisolante apparente di una chiusura è determinato, per ampi campi di frequenze, dalla **legge di massa**, lo strato culturale offre un apprezzabile contributo all'incremento del potere fonoisolante di copertura.

Requisiti connotanti

**USO RAZIONALE
DELLE RISORSE
ENERGETICHE**

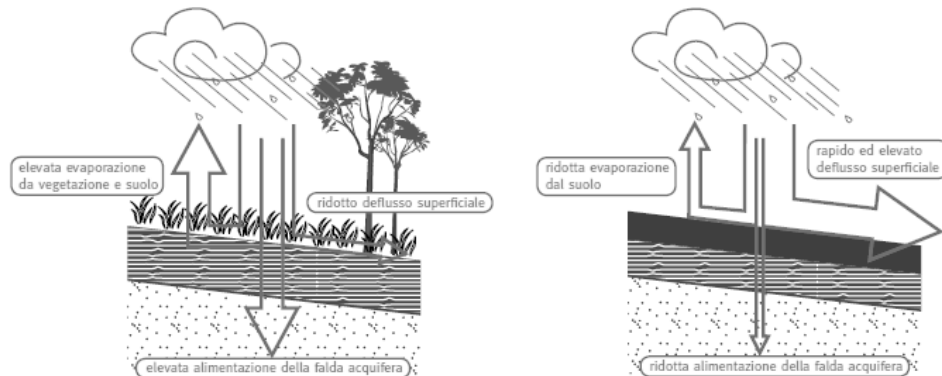
**SALVAGUARDIA
AMBIENTALE**

La copertura verde costituisce l'elemento tecnico deputato al controllo del flusso termico nella stagione invernale ed estiva. È opportuno evidenziare sin da ora che la **resistenza termica** complessiva della copertura è **fortemente influenzata** dal **grado di saturazione** dello **strato culturale**, ed in questa valutazione risiedono le maggiori criticità.

Le coperture verdi, contribuendo al mantenimento / ricostruzione dei corridoi ecologici, permettono la **tutela** delle **specie endemiche** compensando almeno parzialmente la trasformazione degli ecosistemi.

La gestione delle acque meteoriche e la riduzione dell'impatto della costruzione sul ciclo idrologico si traduce nella richiesta di **massimizzazione** della **superficie drenante** a contrasto dell'impermeabilizzazione dei suoli, con materiali che favoriscano la penetrazione diffusa dell'acqua meteorica, a velocità tali da contenere i picchi di portata ai corpi ricettori finali.

Differenti regimi di deflusso delle
acque piovane
(Provincia Autonoma di Bolzano,
2008)



Schema decisionale di progettazione

Il processo di progettazione di una copertura verde richiede la collaborazione e la coordinazione professionale di diverse figure:

- la committenza;
- l'architetto paesaggista,
- il progettista architettonico,
- il responsabile del progetto strutturale,
- il progettista energetico,
- il produttore del sistema di inverdimento;
- i futuri responsabili della manutenzione.

È possibile individuare una check-list di questioni da considerarsi al fine di pianificare l'intervento già in fase metaprogettuale e realizzare un'installazione esteticamente pregevole e funzionale all'oggetto edilizio di cui sarà parte.

1. La copertura sarà (anche solo in parte) fruibile?

- Si intende quindi definire il grado di fruibilità della copertura, che influisce sulla scelta delle essenze vegetali e sulla destinazione di parte degli spazi a percorsi pedonali.

2. La copertura sarà visibile da punti di vista esterni?

- La questione è relativa alla valorizzazione architettonica ed estetica dell'inverdimento, anche al fine di accrescerne il valore di mercato.

Schema decisionale di progettazione

3. Qual è la superficie da destinare all'inverdimento?

- Si fa riferimento alle richieste della committenza, in accordo con i regolamenti vigenti (inerenti le prestazioni energetiche, le eventuali misure di compensazione ambientale, gli obiettivi di regimazione delle acque meteoriche, etc.) e con eventuali ulteriori requisiti per l'accesso ad agevolazioni o a certificazioni ambientali.

4. È definibile un carico di progetto per la copertura verde?

- Si considerano i carichi indotti dalla copertura verde sulla struttura dell'edificio, con massima attenzione da porre in casi di riqualificazione dell'elemento tecnico di copertura di un edificio esistente, o di fruibilità della copertura per specifiche attività. Le specie vegetali da piantumare incidono sul carico di progetto, in quanto richiedono spessori diversi di strato colturale per il loro alloggiamento.

5. Qual è la pendenza della copertura, se inclinata?

- Sono infatti richiesti accorgimenti progettuali specifici per l'ancoraggio del suolo in coperture inclinate con pendenza superiore a 15°.

6. Sono richieste specifiche prestazioni per la qualità dell'aria?

- Tale questione si riferisce ai possibili stress che la vegetazione potrebbe accusare in presenza di inquinamento atmosferico o di diretta esposizione a uscite di sistemi di estrazione dell'aria esausta o di trattamento dell'aria indoor.

7. Sono stati considerati gli effetti del vento sulla copertura?

- La copertura verde dovrà infatti resistere ai flussi d'aria impedendo l'erosione dello strato colturale.

Schema decisionale di progettazione

CHECK-LIST DI PROGETTAZIONE DI UNA COPERTURA VERDE

1. Definizione della finalità della copertura

- Valutazione dei requisiti di fruibilità, aspetto e percezione visiva, controllo delle acque meteoriche, contenimento dei consumi energetici.
- Individuazione degli obiettivi prioritari.

2. Definizione degli schemi funzionali

- Individuazione degli schemi più adatti al contesto, considerando la giacitura della copertura.
- Prima valutazione cautelativa dei carichi indotti sulla struttura portante dell'edificio.

3. Individuazione delle condizioni climatiche e meteorologiche

- Conoscenza dei parametri ambientali che permettono di valutare le perdite d'acqua per evapotraspirazione (temperatura media mensile dell'aria esterna, umidità relativa massima, radiazione solare incidente sulla copertura, direzione ed intensità dei venti prevalenti, intensità delle precipitazioni).
- Valutazione dei carichi variabili di neve e vento che si presume interessino l'elemento tecnico di copertura.

4. Scelta della classificazione funzionale della copertura

- Con / senza accumulo idrico.
- Configurazione a tetto caldo / rovescio / sandwich.
- Definizione della successione di strati funzionali.

Schema decisionale di progettazione

CHECK-LIST DI PROGETTAZIONE DI UNA COPERTURA VERDE

5. Individuazione delle specie vegetali

- Valutazione delle condizioni climatiche del sito, delle esigenze d'aspetto, dell'onerosità e della frequenza delle operazioni manutentive.
- Individuazione del suolo di coltura e del conseguente carico massimo agente in copertura (peso della vegetazione al massimo sviluppo atteso, strato colturale saturo).
- Valutazione della necessità di prevedere un impianto di irrigazione.

6. Dimensionamento degli strati funzionali

- Definizione delle prestazioni in termini di resistenza a compressione, trazione, punzonamento e stabilità dimensionale, resistenza agli agenti biochimici, tenuta, volume d'acqua disponibile e controllo della capacità drenante.
- Accorgimenti specifici per la soluzione adottata (zavorramenti, ancoraggi, rompitratte).

7. Definizione della soluzione tecnologica

- Materiali ed elementi tecnici da impiegare.

8. Valutazione delle prestazioni complessive

- Classificazione prestazionale.

9. Programmazione delle manutenzioni

Abaco delle soluzioni

Definiti i **requisiti** pertinenti di una copertura verde, si individuano gli **strati funzionali** caratterizzanti le soluzioni conformi. Esse sono caratterizzate da parametri tecnici derivanti dai requisiti connotanti:

- **spessore dello strato culturale**, del quale la norma tecnica UNI 11235:2007 fornisce **valori minimi consigliati** in base all'impianto vegetale previsto;
- **peso totale** dell'elemento tecnico di copertura, da valutarsi nelle condizioni di carico maggiormente penalizzanti (saturazione dello strato culturale);
- **deflusso superficiale** garantito dalla copertura verde al carico derivante dalle acque meteoriche;
- **fabbisogno idrico dell'impianto vegetale**, funzione delle essenze e del microclima del sito d'installazione, eventualmente integrato da impianto di irrigazione.

Si riportano ora le **soluzioni tecnologiche** tipiche dei sistemi di copertura verde. Le soluzioni sono razionalizzate in un abaco dei vari sistemi.

SISTEMA COPERTURA	Es	Estensivo
	Il	Intensivo leggero
	Ip	Intensivo pesante
SCHEMA FUNZIONALE	A	Copertura piana
	B	Copertura inclinata
STRATO DRENANTE	Dn	Strato drenante naturale
	Da	Strato drenante artificiale
STRATO DI ISOLAMENTO	Is	Strato di isolamento termico presente
	Ns	Strato di isolamento termico assente

Abaco delle soluzioni

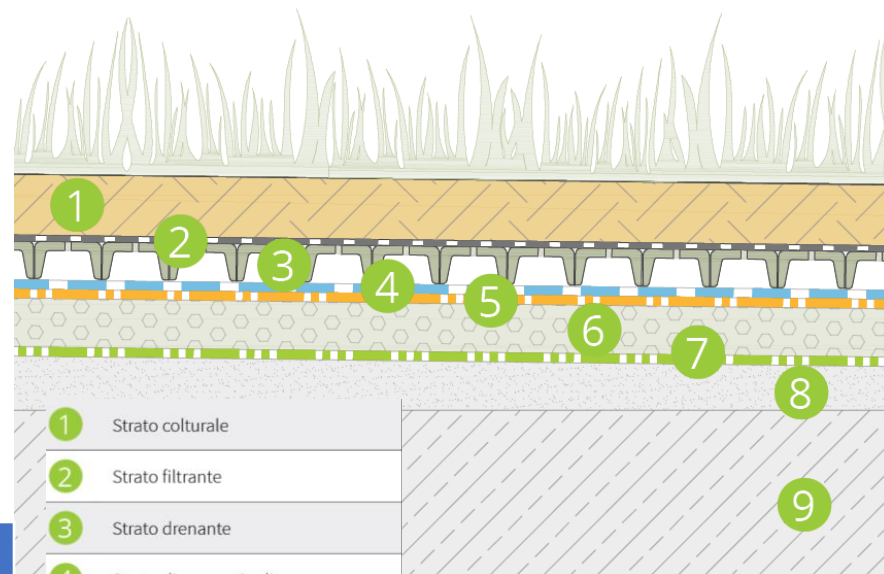
Questa soluzione è caratterizzata da **spessori ridotti**, **pesi contenuti** e **ridotta manutenzione**. La vegetazione è composta da una miscela di varietà di **sedum** ed ha la capacità di adattarsi alle condizioni climatiche del luogo, di **resistere** ai periodi di **siccità**, di **propagarsi** e rigenerarsi in **maniera autonoma** senza la necessità dell'intervento umano. È adatta a **coperture di grandi dimensioni** e a tutti i casi in cui sia richiesto un sistema che non necessiti di irrigazione.

Spessore	16 ÷ 20 cm
Peso (a secco)	75 ÷ 95 kg/m ²
Peso (saturo)	115 ÷ 145 kg/m ²
Pendenza massima supporto	fino al 25%
Accumulo idrico	24 l/m ² (pendenza 3%)
Manutenzione	minima
Impianto di irrigazione	non necessario
Calpestabilità	solo per manutenzione
Coefficiente di deflusso medio annuo	0,2



Abaco delle soluzioni

1. verifica integrità e tenuta all'acqua della soluzione;
2. posa dell'elemento di drenaggio e accumulo;
3. posa del filtro di stabilizzazione sopra l'elemento di accumulo e drenaggio, con sovrapposizione di circa 10 cm, e risolto in verticale per altezza pari allo spessore del substrato;
4. realizzazione di protezione della soluzione impermeabile perimetrale mediante posa di ghiaia;
5. posa dello strato colturale e livellamento;
6. concimazione;
7. semina di miscela di sedum mediante spaglio delle talee e successivo interrimento manuale.



- 1 Strato colturale
- 2 Strato filtrante
- 3 Strato drenante
- 4 Strato di sep. antiradice
- 5 Strato impermeabilizzazione
- 6 Strato isolante ad alta densità
- 7 Strato di barriera al vapore
- 8 Strato di pendenza
- 9 Strato portante

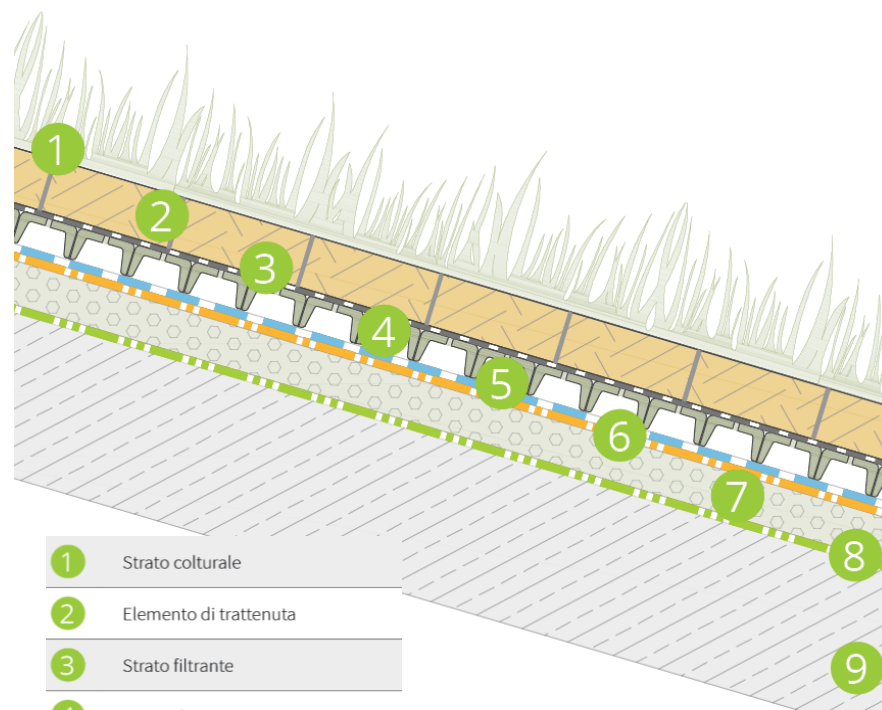
**SISTEMA
Es.A.Da.Is**

n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	80 ÷ 120 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice) e sostanze organiche
2	strato filtrante	1,30 mm	geotessile
3	strato drenante	80 mm	polistirene espanso sinterizzato
4	strato antiradice	-	PVC

Abaco delle soluzioni

Nel caso di coperture inclinate l'inverdimento raggiunge un elevato grado di complessità con conseguente incremento degli oneri manutentivi. Infatti, al soddisfacimento dei requisiti del verde estensivo su coperture piane, si aggiungono le esigenze di **stabilità** e **sicurezza del sistema**, nonché di regolare smaltimento delle acque. In fase progettuale si dovrà prestare molta attenzione alle caratteristiche dei **sistemi di trattenimento** ed al sistema di drenaggio in relazione alle dimensioni delle falde.

Spessore	16÷20 cm
Peso (a secco)	85÷105 kg/m ²
Peso (saturo)	135÷170 kg/m ²
Pendenza massima supporto	fino al 100%
Accumulo idrico	10÷20 l/m ²
Manutenzione	minima
Impianto di irrigazione	non necessario
Calpestabilità	solo per manutenzione
Coefficiente di deflusso medio annuo	0,2

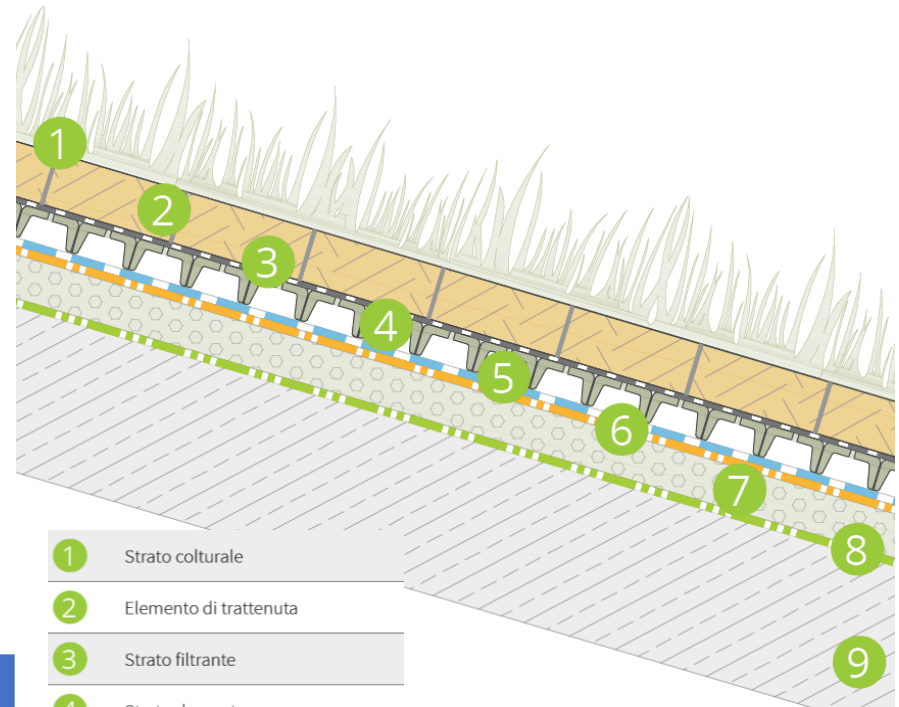


- 1 Strato culturale
- 2 Elemento di trattenimento
- 3 Strato filtrante
- 4 Strato drenante
- 5 Strato di separazione antiradice
- 6 Strato di impermeabilizzazione
- 7 Strato isolante ad alta densità
- 8 Strato di barriera al vapore
- 9 Strato portante

SISTEMA
Es.B.Da.Is

Abaco delle soluzioni

Il metodo di posa è analogo a quello visto per le coperture verdi estensive piane, fatta eccezione per la posa dei componenti del sistema di trattenimento che dovranno essere posizionati sopra lo strato filtrante prima della posa del substrato ed adeguatamente ancorati.



- 1 Strato colturale
- 2 Elemento di trattenuta
- 3 Strato filtrante
- 4 Strato drenante
- 5 Strato di separazione antiradice
- 6 Strato di impermeabilizzazione
- 7 Strato isolante ad alta densità
- 8 Strato di barriera al vapore
- 9 Strato portante

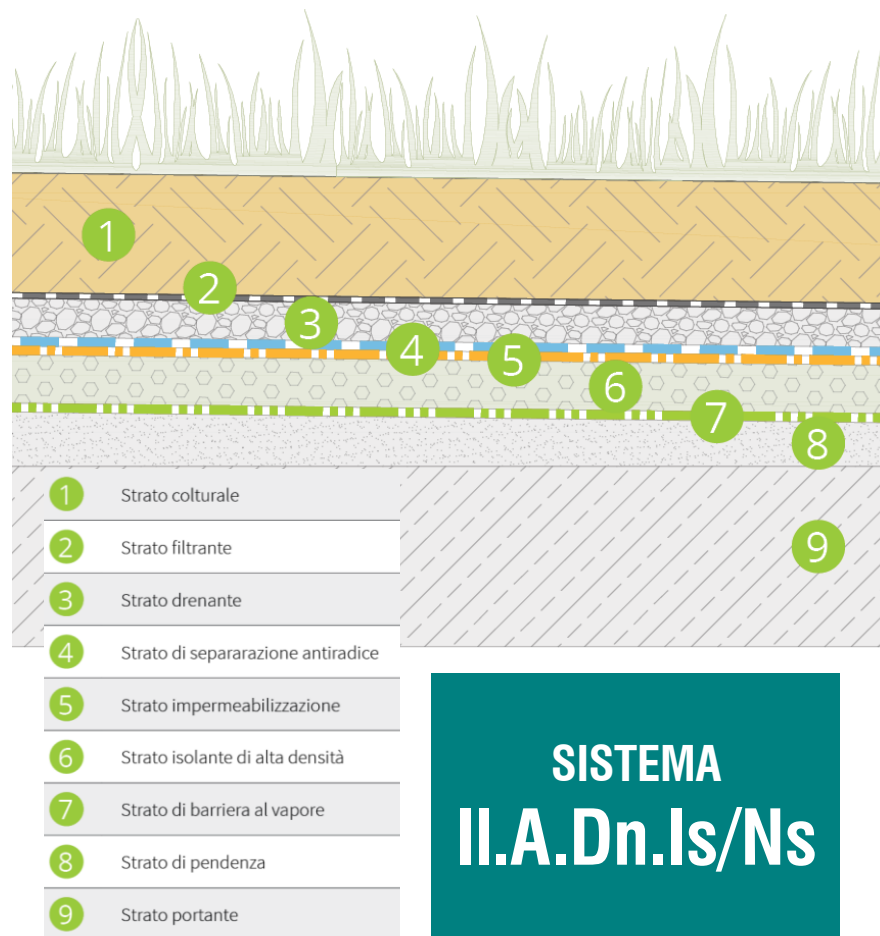
**SISTEMA
Es.B.Da.Is**

n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	80 ÷ 120 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice) e sostanze organiche
2	strato filtrante	1,30 mm	geotessile
3	strato drenante	80 mm	polistirene espanso sinterizzato
4	strato antiradice	-	PVC

Abaco delle soluzioni

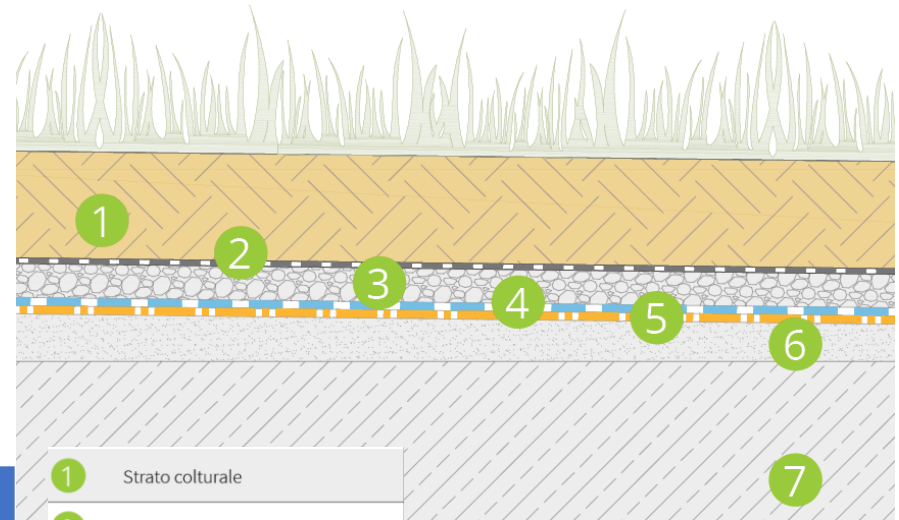
I sistemi a verde intensivo leggero descritti sono caratterizzati da una **resa estetica** nettamente **superiore** alle tipologie estensive e richiedono **interventi di manutenzione frequenti** e **costante irrigazione**. Inoltre, offrono elevate prestazioni in termini di accessibilità e fruibilità, al costo di spessore e peso complessivo più elevati rispetto alle soluzioni estensive. La vegetazione è composta da una miscela di graminacee: queste soluzioni sono in grado di ospitare anche arbusti e alberature.

Spessore	24 cm per tappeto erboso 34 cm per arbusti a basso sviluppo
Peso (a secco)	170÷240 kg/m ²
Peso (saturo)	215÷305 kg/m ²
Pendenza massima supporto	fino al 10%
Accumulo idrico	18 l/m ² (pendenza 3%)
Manutenzione	in funzione della vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	buona



Abaco delle soluzioni

1. verifica integrità e tenuta all'acqua della soluzione.
2. posa dell'elemento di drenaggio e accumulo;
3. posa dello strato filtrante sopra l'elemento di accumulo e drenaggio, con sovrapposizione di circa 10 cm, e risvoltato in verticale per altezza pari allo spessore dello strato colturale;
4. posa dello strato colturale dello spessore previsto in sede progettuale;
5. concimazione del substrato;
6. installazione impianto di irrigazione;
7. semina o posa del prato precoltivato.



1	Strato colturale
2	Strato filtrante
3	Strato drenante
4	Strato di separazione antiradice
5	Strato di impermeabilizzazione
6	Strato di pendenza
7	Strato portante

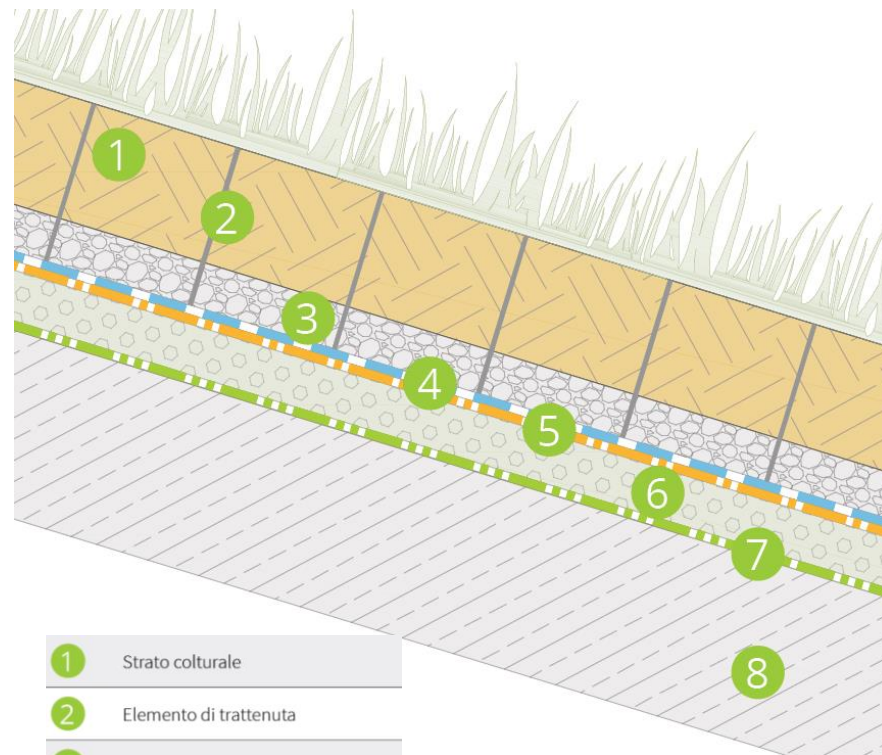
**SISTEMA
II.A.Dn.Is/Ns**

n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	150 ÷ 250 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice) e sostanze organiche
2	strato filtrante	1,45 mm	geotessile
3	strato drenante	60 mm	sassi e pietrisco
4	strato antiradice	-	PVC

Abaco delle soluzioni

I sistemi a verde intensivo leggero su copertura inclinata differiscono tra loro solo per la presenza o meno di uno strato d'isolamento termico. A causa dei frequenti interventi di manutenzione richiesti dalla tipologia di vegetazione delle coperture verdi intensive, questi sistemi sono idonei per **pendenze massime di 35°**. Inoltre, visti gli importanti carichi che entrano in gioco, assume un ruolo di fondamentale importanza il dimensionamento e la corretta posa del sistema di **trattenimento** del substrato.

Spessore	22 cm per tappeto erboso 32 cm per arbusti a basso sviluppo
Peso (a secco)	185÷270 kg/m ²
Peso (saturo)	230÷335 kg/m ²
Pendenza massima supporto	fino al 75%
Accumulo idrico	4÷12 l/m ²
Manutenzione	in funzione della vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	buona

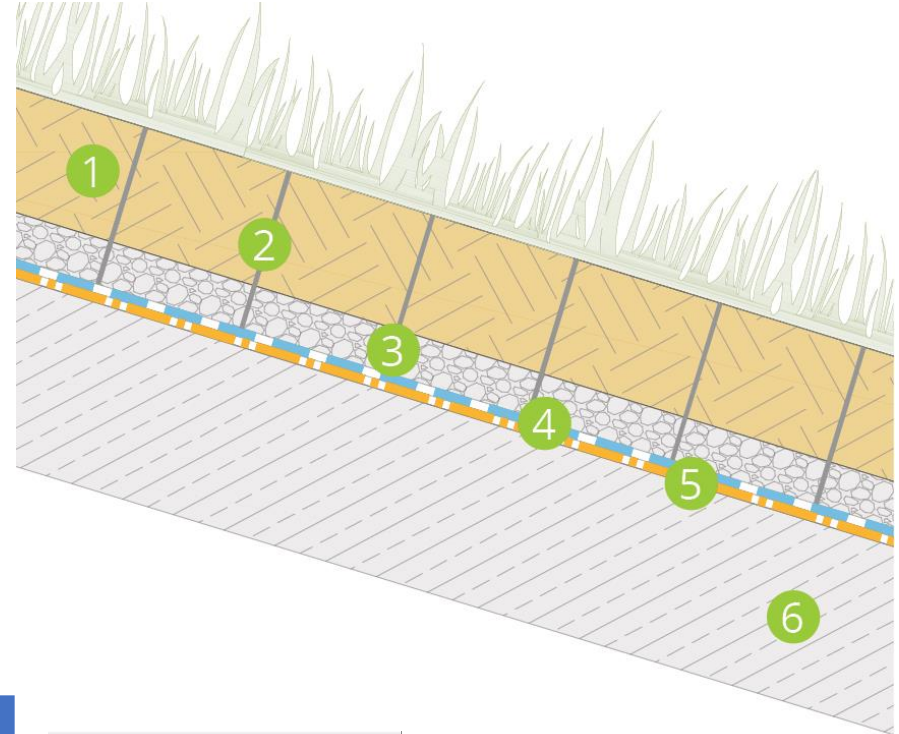


- 1 Strato culturale
- 2 Elemento di trattenuta
- 3 Strato drenante
- 4 Strato di separazione antiradice
- 5 Strato impermeabilizzazione
- 6 Strato isolante ad alta densità
- 7 Strato di barriera al vapore
- 8 Strato portante

**SISTEMA
II.B.Dn.Is/Ns**

Abaco delle soluzioni

Il metodo di posa è analogo a quello visto per le coperture verdi intensive leggere piane, eccezion fatta per la stesura degli elementi del sistema di trattenimento che saranno posizionati sopra lo strato filtrante prima della posa dello strato colturale ed adeguatamente ancorati.



n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	150 ÷ 250 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice) e sostanze organiche
2	strato filtrante	1,45 mm	geotessile
3	strato drenante	60 mm	Sassi e pietrisco
4	strato antiradice	-	PVC

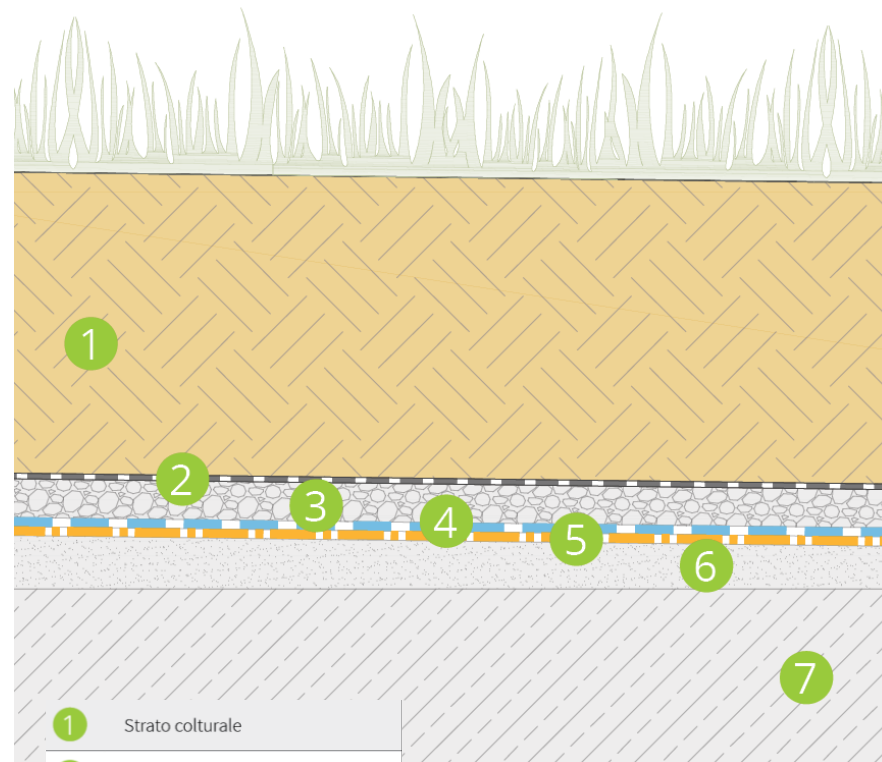
- 1 Strato colturale
- 2 Elemento di trattenuta
- 3 Strato drenante
- 4 Strato di separazione antiradice
- 5 Strato di impermeabilizzazione
- 6 Strato portante

**SISTEMA
II.B.Dn.Is/Ns**

Abaco delle soluzioni

Questa soluzione può presentare uno strato drenante naturale o artificiale. **Non si considera** una copertura **coibentata** in quanto le soluzioni intensive pesanti vengono solitamente utilizzate sulle coperture di autorimesse interrato. Tali sistemi sono caratterizzati da spessori e pesi elevati, nonché frequente e regolare manutenzione. Inoltre, è prevista una riserva idrica in quanto la risalita capillare è più difficile rispetto a substrati leggeri di minor spessore.

Spessore	> 45 cm
Peso (a secco)	> 380 kg/m ²
Peso (saturo)	> 530 kg/m ²
Pendenza massima supporto	fino al 10%
Accumulo idrico	16 l/m ² (pendenza 3%)
Manutenzione	in funzione della vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

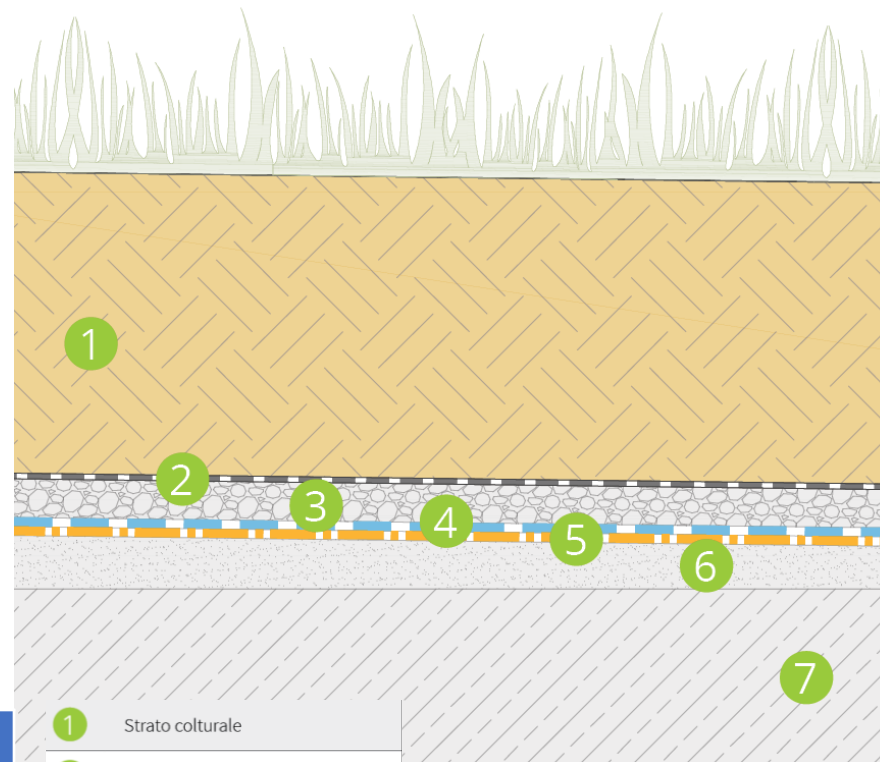


- 1 Strato culturale
- 2 Strato filtrante
- 3 Strato drenante
- 4 Strato di separazione antiradice
- 5 Strato di impermeabilizzazione
- 6 Strato di pendenza
- 7 Strato portante

SISTEMA
Ip.A.Dn.Ns

Abaco delle soluzioni

1. verifica integrità e tenuta all'acqua della soluzione;
2. posa a secco dell'elemento di drenaggio e protezione;
3. posa del filtro di stabilizzazione sopra l'elemento di drenaggio, con sovrapposizione di circa 10 cm, e risvoltato in verticale per altezza pari allo spessore del substrato;
4. stesura di terreno vegetale in spessore variabile (≥ 30 cm) in base alla vegetazione;
5. installazione di impianto di irrigazione;
6. semina o posa del prato precoltivato.



n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	> 300 mm	terreno di coltivo di buona qualità
2	strato filtrante	1,45 mm	geotessile
3	strato drenante	50 mm	sassi e pietrisco
4	strato antiradice	-	PVC

1	Strato colturale
2	Strato filtrante
3	Strato drenante
4	Strato di separazione antiradice
5	Strato di impermeabilizzazione
6	Strato di pendenza
7	Strato portante

SISTEMA
Ip.A.Dn.Ns

Strati funzionali

Il complesso sistema tecnologico corrispondente ad una copertura verde è stato oggetto di un processo di revisione progettuale e realizzativa che ha comportato l'evoluzione delle tecniche costruttive (si pensi alla riduzione del peso dello strato colturale mediante l'**impiego di materiali leggeri**, eventualmente derivanti da materie prime secondarie, oppure al controllo della tenuta all'acqua) e la conseguente regolamentazione delle prestazioni globali e di singolo strato funzionale.

Si distinguono:

- strati **primari** o fondamentali caratterizzanti una copertura verde, necessari a garantirne il corretto funzionamento;
- strati **complementari**, non necessariamente sono presenti in tutte le soluzioni;
- strati funzionali **accessori**, volti a garantire la stabilità meccanica su coperture inclinate ed il controllo dell'afflusso idrico alle piante su coperture pesanti di tipo intensivo.

STRATI FUNZIONALI PRIMARI O FONDAMENTALI

- vegetale superficiale
- colturale o di materia organica
- di separazione o filtrante
- drenante
- di accumulo idrico
- di protezione meccanica o antiradice
- di tenuta all'acqua
- termoisolante
- di isolamento acustico
- portante

STRATI FUNZIONALI SECONDARI O COMPLEMENTARI

- di ventilazione
- di barriera al vapore
- di continuità e regolarizzazione
- di pendenza
- di supporto
- di ripartizione dei carichi

STRATI FUNZIONALI ACCESSORI

- impianto di irrigazione
- impianto di smaltimento delle acque meteoriche
- di ancoraggio per la vegetazione
- per il trattamento dello strato colturale
- di compartimentazione antincendio

Strati funzionali

CLASSIFICAZIONE UNI 11235:2007	STRATO FUNZIONALE	MATERIALI IMPIEGABILI	CARATTERIZZAZIONE PROGETTUALE
secondario	ZAVORRAMENTO	ghiaia lavata	in zone perimetrali e su corpi emergenti
primario	VEGETAZIONE	essenze vegetali	funzione del contesto climatico e territoriale, della destinazione d'uso, della compatibilità architettonica e paesaggistica
	COLTURALE	varie	in base alle specie vegetali
secondario	ANTIEROSIONE	materiali biotessili	su coperture con $\alpha > 10\%$ per l'azione di vento e acqua
primario	FILTRANTE	aggregati naturali	prevenzione dell'occlusione dello strato di drenaggio
		materiali geosintetici	necessaria resistenza al punzonamento e ad agenti biochimici
	DRENAGGIO E ACCUMULO IDRICO	aggregati naturali	dimensionato secondo la capacità drenante richiesta
		elementi preformati	necessaria resistenza a trazione e compressione, agli agenti chimici e biologici
		materiali geosintetici	integrato allo strato di tenuta
	ANTIRADICE	membrane bituminose ad armatura in PVC o metallica	necessarie stabilità dimensioni, resistenza ai carichi, fatica
	PROTEZIONE MECCANICA	polistirene geotessili	a protezione dello strato di tenuta
TENUTA ALL'ACQUA	guaine bituminose poliolefiniche dipolivinilcloruro	necessaria resistenza all'azione dell'apparato radicale, di agenti biologici e chimici	
secondario	BARRIERA AL VAPORE	varie	protezione dello strato isolante da vapore e umidità
primario	ISOLAMENTO TERMICO	lana di roccia e di vetro	necessaria buona resistenza a compressione
		polistirene espanso fibra di sughero	controllo dell'assorbimento e della temperatura sul lato freddo
	PORTANTE O DI SUPPORTO STRUTTURALE	laterocemento predalles, tegoli / lamiera grecata, legno CLT	carichi maggiori rispetto ad una copertura tradizionale vincoli costituiti dalla luce, dalla freccia massima ammissibile e, in edifici esistenti, dal carico residuo in copertura

Strati funzionali

CLASSIFICAZIONE UNI 11235:2007	STRATO FUNZIONALE	MATERIALI IMPIEGABILI	CARATTERIZZAZIONE PROGETTUALE
accessorio	IMPIANTO D'IRRIGAZIONE	aspersione micro-irrigazione micro-irrigazione a spruzzo	in base al regime di vento presente nel sito ed alla vegetazione prevista
	IMPIANTO DI SMALTIMENTO DELLE ACQUE METEORICHE	lattonomie in rame lattonomie in alluminio	in dipendenza del coefficiente di deflusso
	ANCORAGGIO	varie	controventatura per inverdimenti a specie arbustive
	TRATTENIMENTO	elementi rompitratta solidali alla copertura	in base alla tipologia di strato colturale

La predisposizione di un **impianto irriguo** è una prerogativa riferibile alle coperture verdi **intensive**: le specie vegetali impiegate in queste installazioni necessitano di maggiori volumi d'acqua per il proprio **sostentamento**.

Le tipologie di distribuzione dell'acqua si riferiscono a sistemi ad **aspersione** (con erogatori fissi operanti ad alta pressione) e a **micro-irrigazione** (erogazione diretta all'apparato radicale, ad impulsi e portate prerogolate).

Energia e comfort

Una copertura verde è un sistema ad **elevata complessità**, costituito da **strati funzionali eterogenei** nei quali varia il contenuto d'umidità, coerentemente con le funzioni svolte in analogia ad un suolo naturale, ossia il sostentamento mediante elementi nutritivi, la traspirazione degli strati vegetale e colturale, l'accumulo idrico. Allora, le **prestazioni di isolamento termico** ed **inerzia termica** sono dipendenti, in uno specifico periodo, da fattori climatici quali:

- **intensità di precipitazioni;**
- **radiazione solare;**
- **temperatura dell'aria esterna.**

Definire il comportamento energetico di una copertura verde basandosi sulle prestazioni dei singoli strati funzionali nelle condizioni più sfavorevoli di umidità porta ad attribuirvi **prestazioni decisamente inferiori** rispetto a quelle desumibili dalle sperimentazioni.

MATERIALE	CONDUCIBILITÀ TERMICA [W / m·K]	RESISTENZA TERMICA DI RIFERIMENTO [m ² · K / W]	SPESSORE MINIMO [cm]
Pannelli di sughero espanso	0,040 ÷ 0,045		12 ÷ 14
Lastre di polistirene espanso	0,036 ÷ 0,040		10 ÷ 12
Pannelli di lana di roccia	0,034 ÷ 0,038	3,00	10 ÷ 12
Legno di abete ⁽¹⁾	0,100 ÷ 0,120		30 ÷ 35
Strato colturale per verde pensile ⁽²⁾	0,400 ÷ 0,900		120 ÷ 300

(1) Si assume un contenuto medio di umidità del legno pari al 15%; ogni punto percentuale di umidità in più aumenta la conduttività termica di un valore pari all' 1,2% del valore base.

(2) Si assume un grado di saturazione del terreno pari al 50%.

Energia e comfort

In una formulazione di prestazioni tecnologiche, una copertura verde consiste in un sistema complesso di strati funzionali, in cui gli **effetti significativi** dal punto di vista della prestazioni energetiche sono esplicitati sostanzialmente dai seguenti:

- strato **vegetale**;
- strato **colturale**;
- strato di **isolamento termico**, nelle soluzioni dette a 'tetto caldo';
- strato **portante** o di supporto strutturale.

La mutua interazione di questi strati definisce i complessi **meccanismi di scambio termico** dei diversi livelli di una copertura verde, di tipo conduttivo, convettivo, radiativo e latente. Le modalità di scambio termico sono diversamente attribuibili agli strati funzionali sopra citati, influenzando sui parametri progettuali necessari a descrivere le prestazioni energetiche di una copertura verde.

PARAMETRI SIGNIFICATIVI				
STRATO	ombregg.	contenuto d'umidità	conducib. termica	peso
vegetale	● ■ ◆	▲ ● ◆		
colturale		▲ ● ◆	▲	▲
isolamento termico			▲	
portante o di supporto strutturale			▲	▲

TIPOLOGIA DI SCAMBI:

▲ CONDUTTIVO; ● CONVETTIVO; ■ RADIATIVO; ◆ LATENTE.

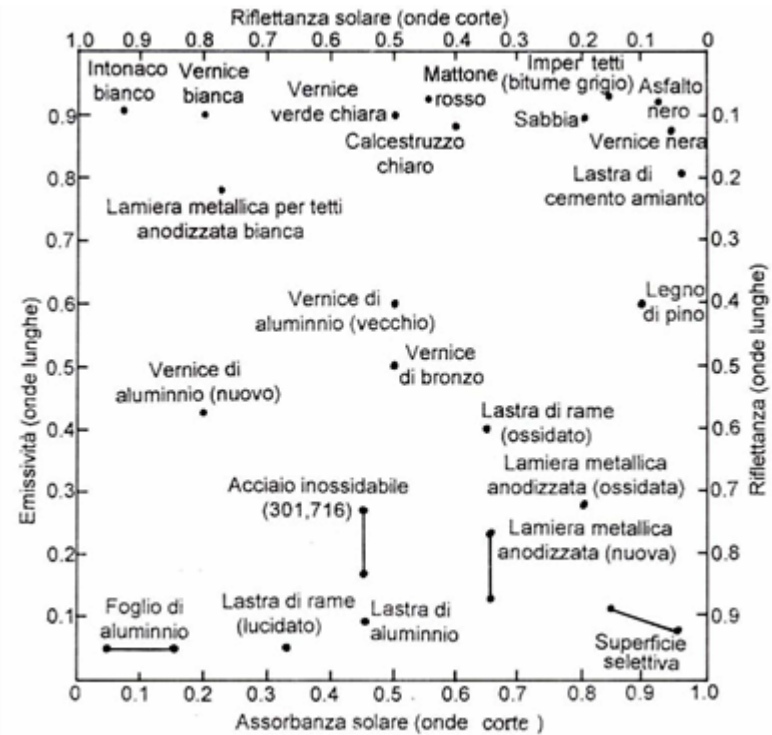
Energia e comfort

La progettazione dello strato vegetale considera anche i diversi tipi di scambio termico ad esso afferenti:

- scambi termici **radiativi**, riferiti al **controllo** dell'**irraggiamento solare** (in funzione dell'essenza vegetale) ed all'assorbimento nello strato stesso;
- scambi **convettivi** tra lo **stato vegetale**, il **suolo** e l'**ambiente esterno** per mezzo dell'aria interposta;
- scambi termici per **evapotraspirazione** degli apparati fogliari e della vegetazione a livello di terreno.

Uno dei principali parametri che influenzano le prestazioni offerte da uno strato vegetale è l'indice di area fogliare **LAI** (dalla letteratura anglosassone **Leaf Area Index**), pari al rapporto tra lo sviluppo complessivo dell'area delle foglie e la superficie vegetata: tale parametro costituisce la sintesi per misurare l'effetto dello strato vegetale sugli **scambi evapotraspirativi** e sul **controllo** della **radiazione solare**.

Proprietà emissive di diversi materiali impiegati in edilizia (fonte Grosso M. et al.)



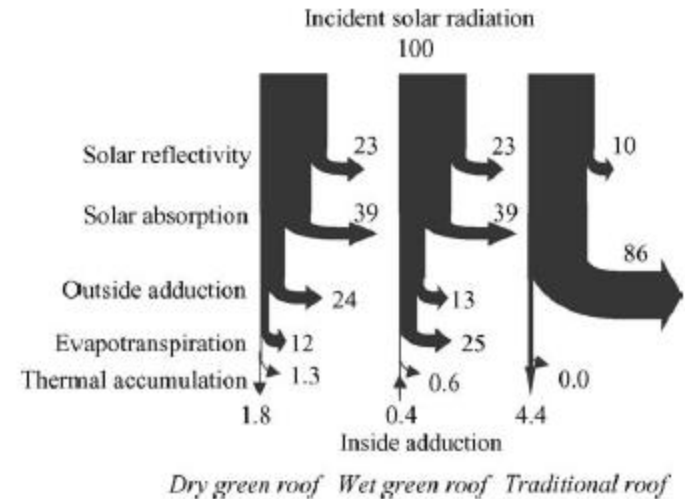
L'albedo delle superfici vegetali, in media compreso nell'intervallo 0,20 ÷ 0,35, aumenta in base a specifiche condizioni climatiche, al LAI e all'intensità di colore.

Energia e comfort

La componente di flusso termico latente dovuta ai processi evapotraspirativi svolge un ruolo importante nella stagione estiva; in condizioni di siccità dello strato colturale, una copertura verde può **ridurre del 60% il carico termico trasmesso agli ambienti sottostanti** rispetto ad una soluzione tradizionale mediamente isolata; in condizioni di saturazione, il flusso termico entrante può addirittura invertirsi, connotando la copertura verde come sistema di **raffrescamento passivo** innescato dall'evapotraspirazione.

Lo strato colturale è responsabile di comportamenti energetici dipendenti dal proprio spessore, dal tipo di installazione verde e dalla composizione. I composti utilizzati per la realizzazione di strati vegetali possiedono una **ridotta massa volumica** ($8 \div 9 \text{ kN/m}^2$) e una ridotta percentuale di materia organica, arricchita da humus e materiali quali **pomice frantumata** o **pozzolana**: la **conducibilità termica** degli strati colturali è quindi **inferiore** a quella del **suolo naturale**.

Valutazione percentuale degli scambi energetici attraverso una copertura verde nel Nord Italia (fonte Lazzarin R. M. et al.)



I principali effetti energetici correlati allo strato colturale sono inerenti la **prestazione estiva** della copertura, in quanto si riferiscono alla sua **inerzia termica** complessiva.

Energia e comfort

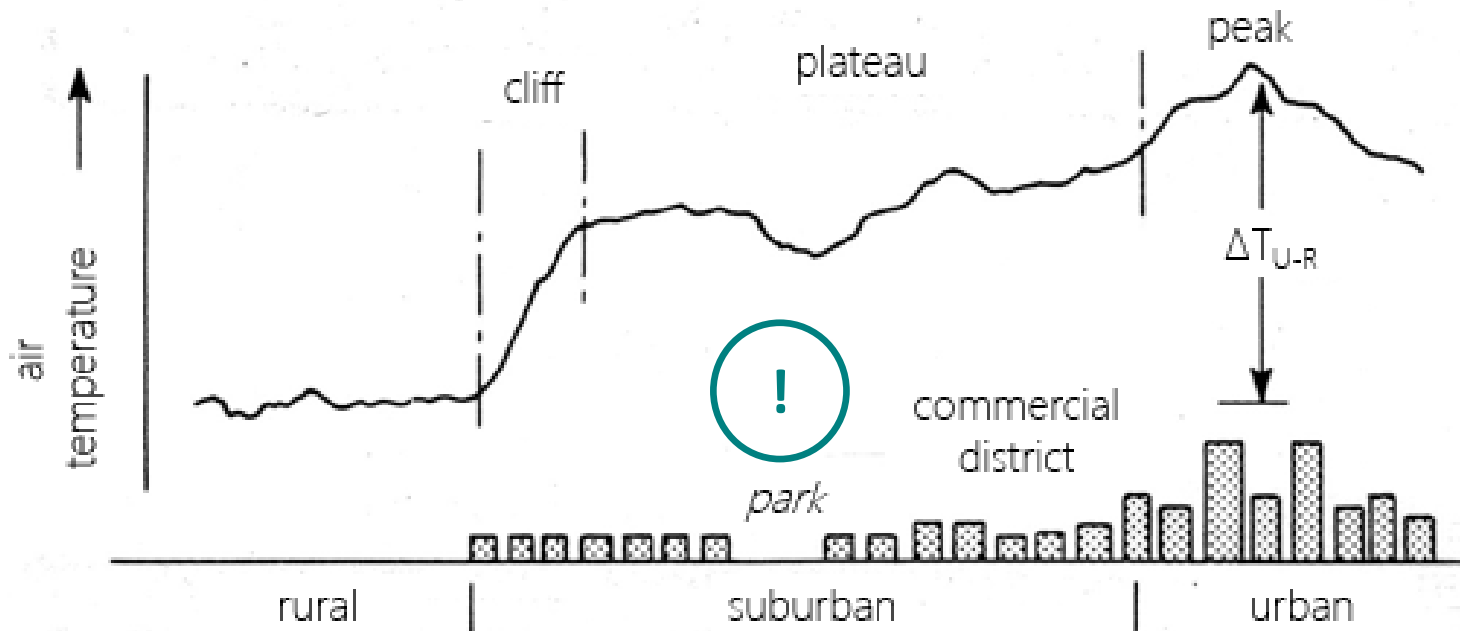
STRATO FUNZIONALE	INCIDENZA SULLE PRESTAZIONI ENERGETICHE NELLA STAGIONE	
	INVERNALE	ESTIVA
vegetale	riduzione scambi termici convettivi aumento dei fenomeni traspirativi con conseguente incremento dei flussi termici	riduzione radiazione solare incidente sulla copertura per ombreggiamento (con LAI ≥ 3) dispersione del calore per fenomeni evapotraspirativi
colturale	aumento della resistenza termica rispetto a coperture non isolate prestazioni di isolamento termico non superiori alle coperture isolate conducibilità termica variabile in funzione del contenuto d'umidità contributo trascurabile per spessori contenuti e significativo solo per inverdimenti intensivi	riduzione flusso di calore in ingresso rispetto a coperture non isolate riduzione della temperatura alla base dello strato rispetto ad una copertura tradizionale necessità di elevato contenuto idrico per dissipare energia latente
termoisolante	necessario per ottenere adeguati valori di resistenza termica	prestazione significativa in funzione del materiale che lo costituisce
portante	prestazione variabile in funzione del materiale costituente	effetti di inerzia termica in funzione della massa superficiale

Mitigazione del microclima

Alla scala di edificio, in estate la temperatura superficiale di una copertura esposta al sole può **superare i 70 °C** in presenza di manti impermeabili di colore scuro (es. guaine nere in bitume o ardesia); anche manti aventi una minore frazione assorbita possono presentare elevate temperature in giornate estive terse in cui è continuo l'irraggiamento.

Il fenomeno cosiddetto dell' **'isola di calore'**, l'incremento sensibile della temperatura dell'aria sugli insediamenti di medie e grandi dimensioni, rappresenta una problematica tipica dei contesti fortemente antropizzati, dovuta a:

- differenti **caratteristiche morfologiche** dei **suoli**;
- diversa **massa termica** degli **oggetti antropici**.



Distribuzione delle temperature nell'isola di calore urbana (adattamento da Oke T. R., 1987).

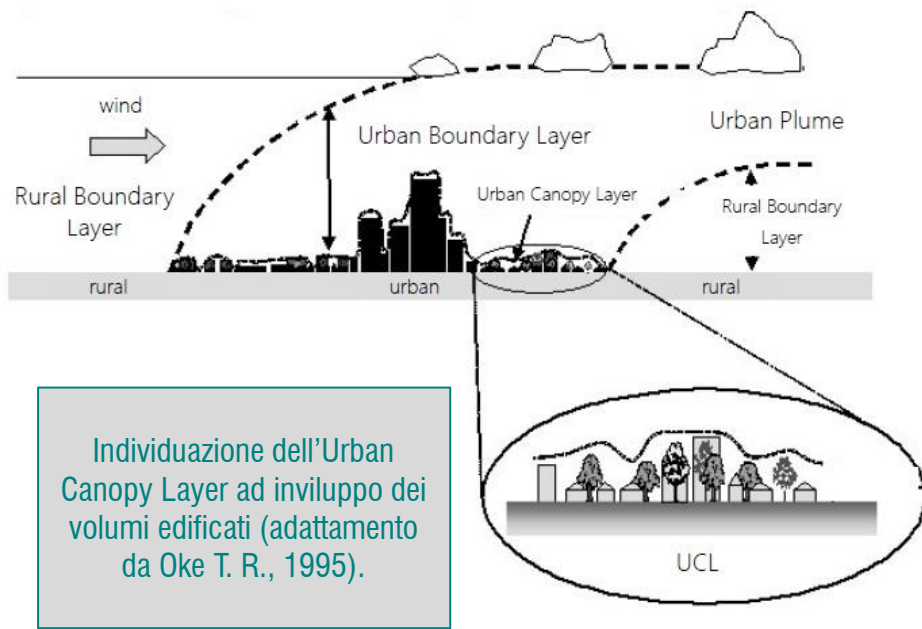
Mitigazione del microclima

In prossimità di un insediamento di grandi dimensioni, è possibile riscontrare una discontinuità nello strato atmosferico a diretto contatto con la superficie terrestre (nella letteratura anglosassone il **Planetary Boundary Layer** è la porzione verticale di atmosfera nella quale si concentrano le attività e le conseguenti modificazioni da esse indotte), definita **Urban Boundary Layer**: al suo interno, lo strato che involupa i volumi edificati si definisce **Urban Canopy Layer**.

La distorsione del bilancio termico in ambito urbano origine dell'effetto isola di calore dipende da diversi fattori:

- geometria del tessuto urbano, in particolare in presenza di **canyon urbani**;
- **sostituzione** delle **superfici verdi** originarie con superfici **impermeabili**, a ridotto coefficiente di riflessione solare;
- **capacità termica** e grado di **finitura superficiale** dei materiali impiegati.

In contesti di grande densità abitativa, l'analisi dei dati relativi alla distribuzione delle temperature nel periodo invernale e primaverile su scala urbana, rapportata alla posizione delle aree verdi inserite nel tessuto urbano, rivela che in questi ultimi siti si verificano locali abbassamenti della temperatura.

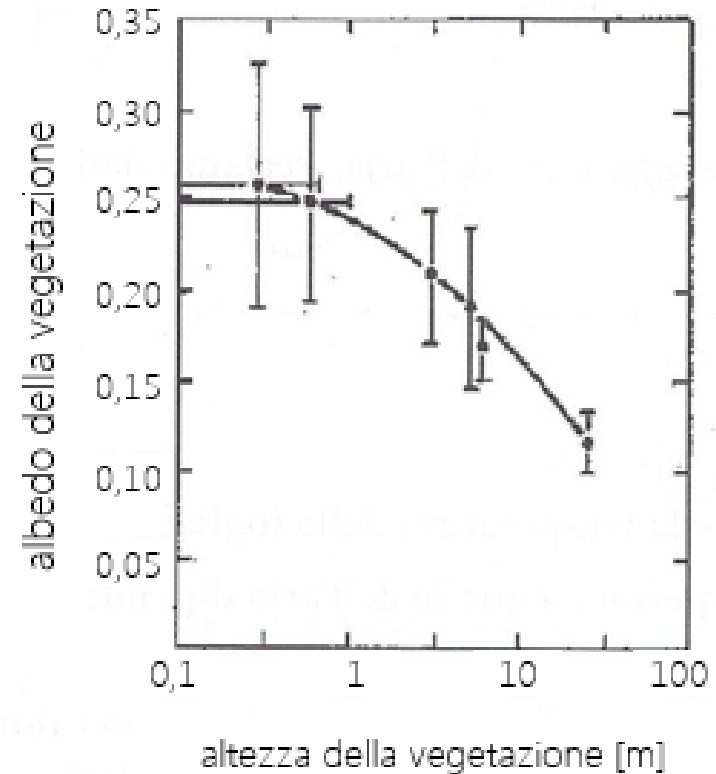


Mitigazione del microclima

All'interno dell'*Urban Canopy Layer*, quindi, la presenza di una zona verde porta ad una **riduzione sensibile della temperatura dell'aria**: l'efficacia di superfici trattate a verde, **comprese** quelle poste in **copertura agli edifici**, a scala di edificio, è comunque maggiore nel contenimento dei consumi energetici che non nel contrasto all'isola di calore urbana. Per questo motivo, il miglioramento del microclima urbano deve essere perseguito operando a tre diverse scale:

- la pianificazione territoriale;
- la pianificazione urbana, (controllo dell'interazione tra sollecitazioni ambientali e costruito);
- la progettazione architettonica, laddove le coperture verdi rappresentano una possibile soluzione per la riduzione delle temperature superficiali.

Se la presenza di aree verdi in ambito urbano, anche poste in copertura ai volumi edificati, permettono di migliorarne il bilancio energetico, il contributo dovrebbe essere **integrato alle scale più ampie**.



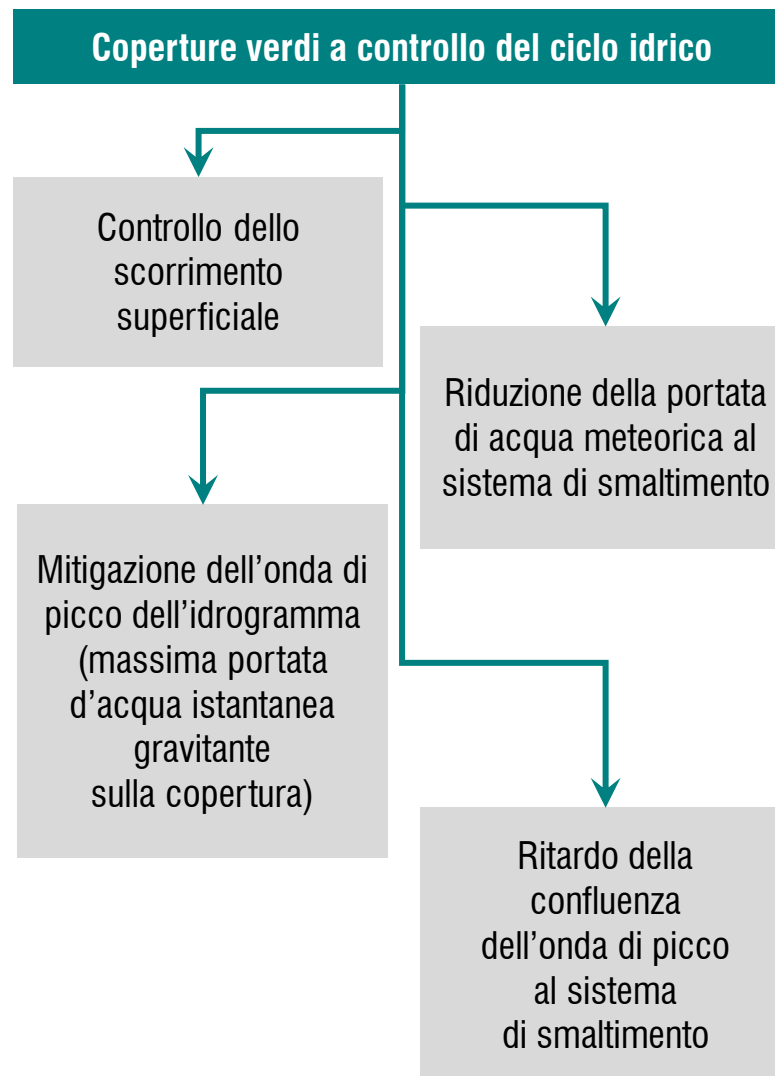
La variazione dell'albedo in funzione dell'altezza media della specie vegetale (adattamento da Oke T. R., 1987).

Controllo del ciclo idrico

La prestazione più efficace delle coperture verdi rapportata ad altre soluzioni tecnologiche di copertura – è il **controllo** del **deflusso delle acque meteoriche**, per lungo tempo motivo della mancata diffusione ed attenzione progettuale nei confronti del verde pensile: la linea operativa più diffusa era basata sul principio che l'acqua meteorica dovesse essere rapidamente allontanata dalle coperture.

SUOLO	PORTATA DI DEFLUSSO [l/(sec · km ²)]		VARIAZIONE
	PERIODI SICCITOSI	PERIODI PIOVOSI	
terreno naturale con bosco	120	200	80 [+ 66 %]
terreno improduttivo	80	300	220 [+ 275 %]
urbanizzato	40	700	660 [+ 1650 %]

Una delle principali funzioni efficacemente svolte dalle coperture verdi riguarda perciò il controllo delle modalità di deflusso delle acque meteoriche.

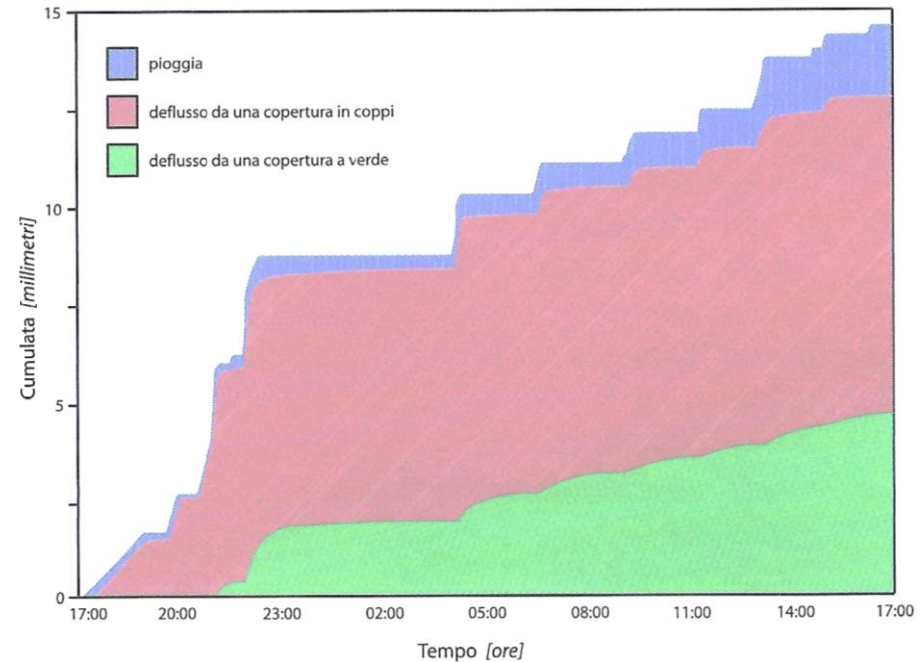


Controllo del ciclo idrico

La regimazione idrica consentita da una copertura verde avviene attraverso i processi di immagazzinamento che regolano la dispersione in atmosfera, mediante i fenomeni evapotraspirativi per una quota che può superare il 60% del volume precipitato, e con il rilascio al sistema di drenaggio di una **frazione** del volume di acqua meteorica, dipendente dall'inclinazione della copertura stessa:

- gli effetti di **detenzione** sono misurati determinando il rapporto tra il picco dell'idrogramma in uscita da una copertura sigillata e quello in uscita dalla copertura verde;
- gli effetti di **ritenzione** sono correlati al volume d'acqua ritenuto.

Parametro essenziale per la quantificazione di questi effetti è il **coefficiente di deflusso ψ** , definito come il rapporto tra il volume d'acqua uscente dalla copertura ed il volume d'acqua gravitante su di essa, nello stesso intervallo di tempo.



Effetto di ritenzione di una copertura verde alla scala di singolo evento meteorico (Giacomello E., 2011, pag. 90).

Controllo del ciclo idrico

L'**efficacia** nel **controllo** del **deflusso** offerta dalle coperture verdi è molto **ridotta** per **precipitazioni di forte intensità**: uno strato colturale in **condizioni prossime alla saturazione** all'inizio di un evento meteorico può ricevere soltanto una quota ridotta del volume prodotto.

Alle **scale temporali brevi** (singolo evento meteorico) influenzano la prestazione della copertura verde:

- il **contenuto di umidità** dello strato colturale;
- l'**altezza di pioggia** prodotta dalla precipitazione.

Considerando invece le prestazioni su scala temporale più ampia, i fattori significativi sono i **processi evapotraspirativi** che interessano la vegetazione e la **tecnologia costruttiva** dell'elemento tecnico:

- lo **spessore** complessivo della copertura, con particolare riferimento allo strato colturale e alla capacità dello strato di accumulo idrico;
- l'**inclinazione** dell'estradosso di copertura;
- lo **sviluppo** degli **apparati fogliari**.

SUOLO	NOTE	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO ψ
verde pensile estensivo ⁽¹⁾	strato colturale < 15 cm	0,45
verde pensile intensivo leggero ⁽¹⁾	strato colturale < 25 cm	0,35
	strato colturale < 35 cm	0,25
verde pensile intensivo ⁽¹⁾	strato colturale < 50 cm	0,20
	strato colturale > 50 cm	0,10
verde pensile estensivo ⁽²⁾	strato colturale < 10 cm	0,55
verde pensile intensivo leggero ⁽²⁾	strato colturale < 15 cm	0,50
coperture metalliche		0,90 ÷ 0,95
coperture zavorrate con ghiaia		0,70
coperture con pavimento sospeso		0,80
lastrici solari sigillati		0,80
manti di copertura discontinui		0,90
superfici verdi su suolo naturale		0,10
terreno degradato, sterrati		0,20

⁽¹⁾ IN PRESENZA DI STRATO DRENANTE E CON UN'INCLINAZIONE MASSIMA DI 12°.

⁽²⁾ COPERTURE SU FALDA INCLINATA.

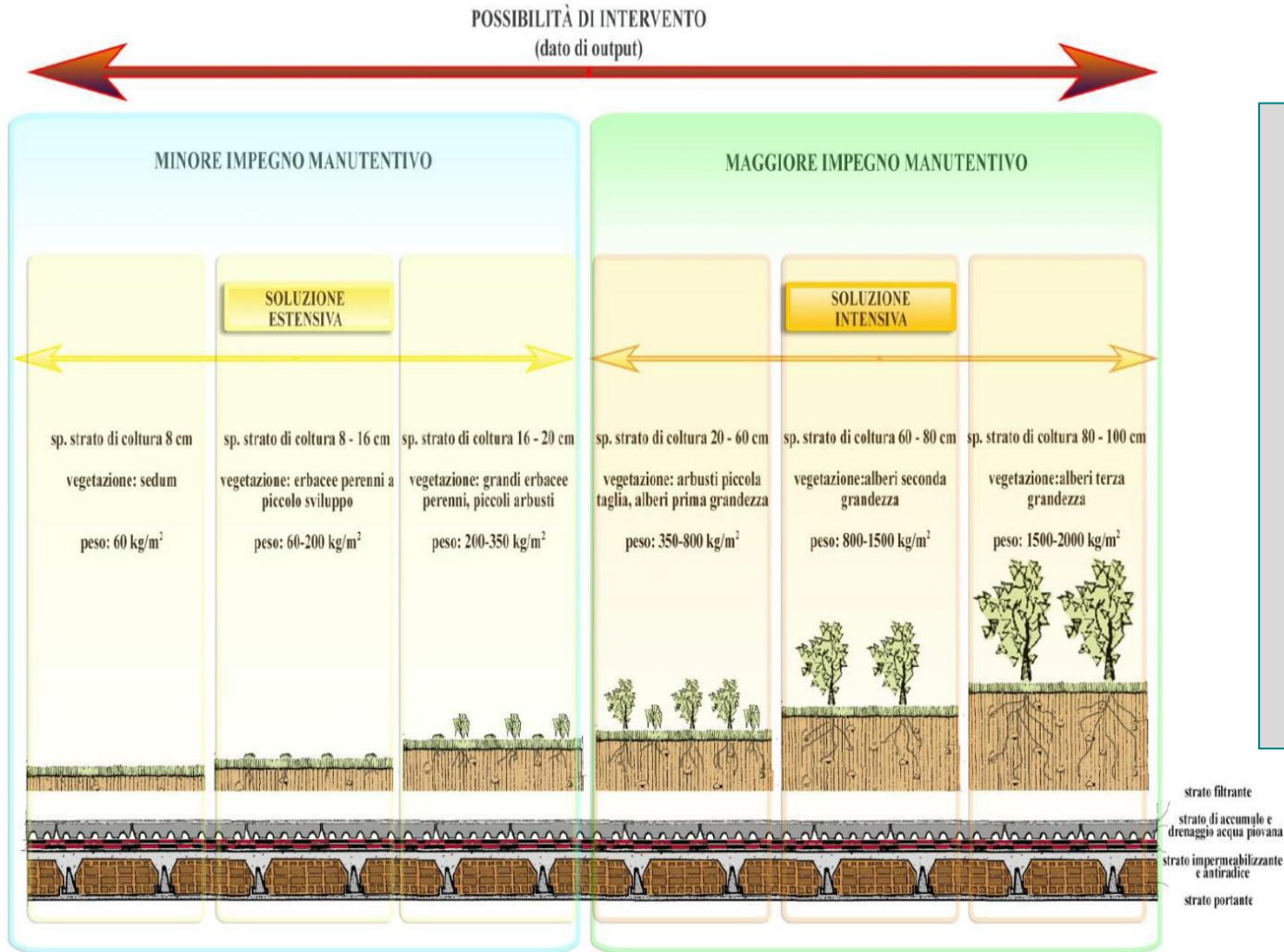
Implicazioni strutturali sull'esistente

La parziale trasformazione di una copertura per inverdimento, **subordinata in primis alla capacità portante residua dello strato portante**, consta nella sostituzione degli strati funzionali originari con nuovi strati – tipici di una soluzione a verde estensivo – che globalmente portano ad un maggiore contenimento dei consumi energetici ed a un incremento delle prestazioni ambientali dell'involucro edilizio.

Con riferimento alle prestazioni dello strato portante la norma tecnica UNI 11235 richiede l'**individuazione del carico permanente agente in copertura**, valutando i materiali costituenti gli strati funzionali e ipotizzandone, a favore di sicurezza, le **condizioni di saturazione**; le prestazioni meccaniche derivanti dal comportamento dell'elemento tecnico di copertura negli edifici esistenti sono riferibili a due diverse scale.



Implicazioni strutturali sull'esistente



Rappresentazione della variazione delle specie vegetali, dei pesi e degli spessori nelle diverse tipologie di copertura verde (fonte: tesi di laurea magistrale di Olaf Simonettig)

Implicazioni strutturali sull'esistente

Operando su edifici esistenti, determinare l'entità del sovraccarico applicabile – e, più in generale, la capacità del sistema strutturale di 'sopportare' una copertura verde – risulta un'azione fondamentale nella determinazione delle specifiche del progetto, che può portare a ridurre il novero delle soluzioni tecnologiche applicabili o addirittura ad escluderne la realizzazione, a meno di **interventi** di **rinforzo** ed **irrigidimento strutturali** significativi: **in sistemi strutturali esistenti**, è privilegiata la **tipologia estensiva**, che si esplicita con un minore spessore ed un, conseguente, minore sovraccarico indotto. Nell'ambito delle nuove costruzioni, la condizione vincolante principale risulta essere di natura economica, ossia il costo dell'intervento di realizzazione della copertura verde. Riferendosi al comportamento globale dell'edificio, la vigente normativa tecnica italiana (Norme Tecniche per le Costruzioni, di cui al D.M. 14 gennaio 2018) individua le seguenti categorie di intervento su edifici esistenti.

CATEGORIE
DI INTERVENTO
SU EDIFICI ESISTENTI
(D.M. 14 GENNAIO 2018)

- Interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle norme tecniche;
- Interventi di miglioramento atti a migliorare la sicurezza strutturale esistente, pur non raggiungendo necessariamente i livelli richiesti dalle norme tecniche;
- Interventi di riparazione, o locali, che interessano elementi tecnici isolati, volti ad un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

OBBLIGATORietà
DELLA VALUTAZIONE
DI SICUREZZA
ED EVENTUALE
ADEGUAMENTO

- Sopraelevazione della costruzione;
- Ampliamento della costruzione con opere strutturalmente connesse alla costruzione;
- Variazioni di classe e/o di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%; con l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti;
- interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

Bibliografia

- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”.
- Lechner N., Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects, 1a ed. John Wiley & sons Incorporated, New York, 2001. ISBN: 978-04-700-4809-2.
- Tortorici G. (a cura di), Architettura Tecnica. Edizioni Alinea, Firenze, 2012.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015 “Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 – Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici”.
- Ciaramella A., Tronconi O., Qualità e prestazioni degli edifici. Gruppo Editoriale il Sole 24 ore, Milano, 2011.
- Wienke U., Aria calore luce – Il comfort ambientale negli edifici. Tipografia del Genio Civile, Roma, 2005. ISBN: 884961441.
- Dassori E., Morbiducci R., Costruire l'architettura - Tecniche e tecnologie per il progetto. Edizioni Tecniche Nuove, Milano, 2010. ISBN 978-88-481-2298-6.
- Fiorito F., Involucro edilizio e risparmio energetico. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2009. ISBN: 978-88-7758-863-0.
- Trevisi A. S., Laforgia D., Ruggiero F., Efficienza energetica in edilizia. Maggioli Editore, Rimini, 2006. ISBN: 978-88-387-3824-6.
- <https://www.guidaedilizia.it/company/sirap-insulation/profile/>
- www.rockwool.it
- <http://www.indexspa.it/>