

Il volume è frutto della ricerca svolta dal Gruppo di lavoro coordinato dal prof. Paolo Rosato e dal prof. Edino Valcovich e composto dall'ing. Raul Berto, dall'ing. Giovanni Cechet e dall'ing. Carlo Antonio Stival; la ricerca è stata finanziata con il Fondo di Ricerca di Ateneo 2012 dell'Università degli Studi di Trieste.

La scelta del tema relativo alle coperture verdi deriva dai caratteri di sostenibilità ambientale e sociale riconducibili a queste soluzioni, aspetti sui quali i componenti del Gruppo di lavoro operano da alcuni anni. Affrontare in modo completo ed esauriente l'ampio tema delle coperture verdi è operazione non semplice, tuttavia la volontà è stata quella di affrontare lo studio secondo una visione ampia e coordinata.

Il lavoro che è ha preso forma nell'ambito di questa ricerca, getta le basi per un futuro sviluppo dello studio della potenzialità di implementazione del verde architettonico sull'edilizia esistente, includendo oltre alle coperture verdi, anche il cosiddetto verde verticale, e affrontandolo da un punto di vista meno generale e più particolare, con le opportune contestualizzazioni e i casi di studio.



Le coperture verdi

Implicazioni tecnologiche, strutturali,
energetiche ed economico-sociali



EUT

A cura di:
Raul Berto
Giovanni Cechet

Paolo Rosato
Carlo Antonio Stival
Edino Valcovich

Pagina bianca

Le coperture verdi

Implicazioni tecnologiche, strutturali,
energetiche ed economico - sociali

A cura di:

Raul Berto

Giovanni Cechet

Paolo Rosato

Carlo Antonio Stival

Edino Valcovich

© copyright EUT Edizioni Università di Trieste

2015 EUT Edizioni Università di Trieste

via Weiss 21, 34128 Trieste

<http://eut.units.it>

eut@units.it

fb <https://www.facebook.com/EUTEdizioniUniversitaTrieste>

Proprietà letteraria riservata. I diritti di traduzione, memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale e parziale di questa pubblicazione, con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm, le fotocopie e altro) sono riservati per tutti i paesi

ISBN 978-88-8303-700-9

Sommario

1.	Le coperture verdi	9
1.1.	Breve storia del verde pensile e delle coperture verdi	12
1.2.	Le prospettive future delle coperture verdi	18
1.3.	Struttura del lavoro	21
1.4.	Bibliografia	22
2.	Analisi funzionale delle coperture verdi	23
2.1.	Criteri di classificazione delle coperture verdi	24
2.1.1.	Geometria.....	25
2.1.2.	Tipologia di installazione.....	26
2.1.3.	Accessibilità / fruibilità	27
2.1.4.	Manutenzione.....	27
2.1.5.	Classificazione in base alle prestazioni	29
2.2.	Individuazione di esigenze e requisiti connotanti delle coperture verdi ...	31
2.2.1.	Definizione di un quadro di esigenze per le coperture verdi	31
2.2.2.	Il contesto ambientale	34
2.2.3.	Requisiti connotanti.....	35
2.3.	Schema decisionale per la progettazione delle coperture verdi	39
2.4.	Bibliografia	41
3.	Le prestazioni connotanti delle coperture verdi.....	44
3.1.	Soluzioni tecnologiche	45
3.1.1.	Sistema Es.A.Da.Is.....	46
3.1.2.	Sistema Es.B.Da.Is	48
3.1.3.	Sistema II.A.Dn.Is.....	49
3.1.4.	Sistema II.A.Dn.Ns.....	50
3.1.5.	Sistema II.A.Da.Is.....	52
3.1.6.	Sistema II.A.Da.Ns.....	52
3.1.7.	Sistema II.B.Dn.Is	54
3.1.8.	Sistema II.B.Dn.Ns	54
3.1.9.	Sistema II.B.Da.Is	56
3.1.10.	Sistema II.B.Da.Ns.....	56

3.1.11.	Sistema Ip.A.Dn.Ns.....	58
3.1.12.	Sistema Il.A.Da.Ns.....	58
3.2.	Strati funzionali caratterizzanti le coperture verdi	60
3.2.1.	Strati funzionali primari	64
3.2.2.	Strati funzionali secondari	81
3.3.	Prestazioni delle coperture verdi.....	83
3.3.1.	Prestazioni energetiche	83
3.3.2.	Prestazioni di mitigazione del microclima nei contesti urbanizzati..	94
3.3.3.	Prestazioni relative al controllo del ciclo idrico	99
3.4.	Bibliografia.....	104
4.	Valutazione delle implicazioni strutturali delle coperture verdi.....	110
4.1.	Le prestazioni richieste allo strato portante e le verifiche a scala locale	111
4.2.	L'approccio agli interventi su edifici esistenti nel D.M. 14/01/2008	113
4.3.	Le soluzioni tecnologiche considerate.....	114
4.3.1.	Stato di fatto.....	115
4.3.2.	Stato di progetto	117
4.4.	Analisi dei carichi delle soluzioni considerate	119
4.5.	Bibliografia.....	125
5.	Valutazione della convenienza economica delle coperture verdi	126
5.1.	L'edificio di riferimento	127
5.1.1.	Il sistema edificio – impianto.....	128
5.1.2.	Le soluzioni tecnologiche per la copertura.....	129
5.2.	Definizione dei parametri dell'analisi economica	135
5.2.1.	Definizione dei tempi dell'analisi	136
5.2.2.	Determinazione del saggio di sconto	137
5.2.3.	Valutazione dei costi.....	140
5.2.4.	Costo globale attualizzato negli scenari prospettati	148
5.3.	Le coperture verdi nei regolamenti locali italiani: norme prescrittive e meccanismi incentivanti	153
5.3.1.	Regolamenti locali prescrittivi.....	154
5.3.2.	Meccanismi locali di incentivo per le coperture verdi	157
5.4.	Possibili incentivi supplementari a livello locale	162

5.4.1.	Riduzione dell'imposizione locale sugli immobili	162
5.4.2.	Concessione di bonus volumetrici	164
5.5.	Bibliografia	167
6.	Aspetti sociali correlati alle coperture verdi	171
6.1.	Effetti a scala locale.....	172
6.2.	Effetti a scala urbana	173
6.3.	Intervento di Housing Sociale con copertura verde	173
6.4.	Bibliografia	178
7.	Conclusioni.....	179

Presentazione

Il volume è frutto della ricerca svolta dal Gruppo di lavoro coordinato dal prof. Paolo Rosato e dal prof. Edino Valcovich e composto dall'ing. Raul Berto, dall'ing. Giovanni Cechet e dall'ing. Carlo Antonio Stival; la ricerca è stata finanziata con il Fondo di Ricerca di Ateneo 2012 dell'Università degli Studi di Trieste.

La scelta del tema relativo alle coperture verdi deriva dai caratteri di sostenibilità ambientale e sociale associabili a queste soluzioni, aspetti sui quali i componenti del Gruppo di lavoro operano da alcuni anni.

Affrontare in modo completo ed esauriente l'ampio tema delle coperture verdi è operazione non semplice, soprattutto in considerazione dei molteplici aspetti sui quali agiscono questi elementi tecnici; è quindi più frequente trattare singolarmente i diversi aspetti della sostenibilità correlati alle coperture verdi, studiando di volta in volta una soluzione, un'idea, un sistema.

Le coperture verdi generano delle implicazioni in campo ambientale, tecnologico, sociale ed economico tali per cui è stato possibile analizzare ciascuna di queste implicazioni secondo una visione complessiva, seguendo un unico filo conduttore. Naturalmente non si ritiene di avere trattato in modo completo tutti gli aspetti legati a questi elementi tecnici, avendo tra gli altri tralasciato quelli legati alla biodiversità e alla psicologia, tuttavia la volontà è stata quella di affrontare lo studio secondo una visione ampia e coordinata.

Inoltre, la produzione scientifica che tratta il tema delle coperture verdi ha ampiamente dimostrato la bontà di tali soluzioni, sotto i diversi aspetti trattati. Tuttavia, sulla base dell'idea che in questo momento storico sia molto importante saper valorizzare il patrimonio edilizio esistente, ci si è resi conto della necessità di valutare le potenzialità d'implementazione di tali tipologie di chiusure superiori sugli edifici esistenti. Per questo motivo gli approfondimenti riguardanti gli aspetti tecnologici sono stati sviluppati soprattutto in quest'ottica.

Infine, il lavoro che è ha preso forma nell'ambito di questa ricerca, getta le basi per un futuro sviluppo dello studio della potenzialità di implementazione del verde architettonico sull'edilizia esistente, includendo oltre alle coperture verdi, anche il

cosiddetto verde verticale, e affrontandolo da un punto di vista meno generale e più particolare, con le opportune contestualizzazione e il caso, o i casi, di studio.

Il lavoro di ricerca, sviluppato nell'arco temporale 2013-2014, è unitariamente strutturato anche sulla base di lunghe, appassionate e proficue discussioni comuni. Tuttavia, in tale ambito sono riconoscibili le seguenti attribuzioni ai componenti del Gruppo di lavoro.

Paolo Rosato

- *Capitolo 1. Le coperture verdi.* Prospettive future delle coperture verdi. Struttura del lavoro di ricerca.
- *Capitolo 5. Valutazione della convenienza economica delle coperture verdi.* Definizione dei parametri dell'analisi economica, tempi e saggio di sconto. Le coperture verdi nei regolamenti locali italiani.

Edino Valcovich

- *Capitolo 2. Analisi funzionale delle coperture verdi.* Criteri di classificazione delle coperture verdi.
- *Capitolo 6. Aspetti sociali correlati alle coperture verdi.* Interventi di housing sociale con coperture verdi. Effetti a scala locale. Effetti a scala urbana.

Raul Berto

- *Capitolo 1. Le coperture verdi.* Storia del verde pensile e delle coperture verdi.
- *Capitolo 3. Le prestazioni connotanti delle coperture verdi.* Soluzioni tecnologiche.
- *Capitolo 4. Valutazione delle implicazioni strutturali delle coperture verdi.* L'approccio agli interventi sugli edifici esistenti. Soluzioni tecnologiche considerate e analisi dei carichi.

Giovanni Cechet

- *Capitolo 3. Le prestazioni connotanti delle coperture verdi.* Soluzioni tecnologiche.
- *Capitolo 5. Valutazione della convenienza economica delle coperture verdi.* L'edificio di riferimento.
- *Capitolo 6. Aspetti sociali correlati alle coperture verdi.* Interventi di housing sociale con coperture verdi. Effetti a scala locale. Effetti a scala urbana.

Carlo Antonio Stival

- *Capitolo 2. Analisi funzionale delle coperture verdi.* Individuazione di esigenze e requisiti connotanti alle coperture verdi. Schema decisionale di progettazione delle coperture verdi.
- *Capitolo 3. Le prestazioni connotanti delle coperture verdi.* Strati funzionali nelle coperture verdi. Prestazioni delle coperture verdi.
- *Capitolo 4. Valutazione delle implicazioni strutturali delle coperture verdi.* Le prestazioni richieste allo strato portante e le verifiche a scala locale.
- *Capitolo 5. Valutazione della convenienza economica delle coperture verdi.* Valutazione dei costi e determinazione del costo globale attualizzato. Possibili incentivi a livello locale.

Capitolo 1

Le coperture verdi

Raul Berto, Paolo Rosato

La tecnologia nota come “*verde pensile*” fa riferimento ad una superficie vegetale continua che non presenta, per posizione, giacitura o modalità di realizzazione, continuità fisica, geometrica ed ecologica con il suolo naturale inverdito. Infatti, la sua principale applicazione si concretizza nell’involucro di edifici o volumi architettonici o tecnici fuori terra, oppure ancora interrati in tutto o in parte, ed assolve a svariate funzioni riferibili agli ambiti architettonico, energetico, della salvaguardia ambientale e della sostenibilità sociale. Il contenuto tecnologico delle coperture verdi risulta perciò arricchito – almeno in parte – dai benefici usualmente associati al suolo naturale vegetato, pur evidenziandone la differente composizione ed un conseguente diverso comportamento .

Le diverse tecnologie afferenti al “*verde pensile*”, applicabili all’intero involucro edilizio, si differenziano dalle altre tipologie di involucro in quanto le finiture sono costituite da individui appartenenti a specifiche specie vegetali – e non da materiali inerti

‘tradizionali’. Queste tecnologie sono riconducibili alle seguenti famiglie, caratterizzate da diversi contenuti differenziatesi nel tempo in seguito all’evoluzione della tecnica:

- verde verticale, porzioni di involucro edilizio a giacitura verticale o sub-verticale coltivate con essenze vegetali specifiche, capaci di svilupparsi in questo contesto con differenti livelli di manutenzione; le tecniche impiegate per la realizzazione di pareti e facciate verdi si sono nel tempo distinte da quelle di inverdimento in copertura, sia sotto il profilo delle prestazioni richieste, sia sotto il profilo tecnologico¹.



Figura 1.1 – Verde verticale e copertura verde nell’edificio sportivo polifunzionale Sportplaza Mercator a Amsterdam, progetto architettonico studio Venhoeven CS, Amsterdam (NL); progetto del verde studio Copijn, Utrecht (NL) (fonte artdco.net//, foto Luuk Kramer).

- giardini pensili, consistenti in giardini realizzati in quota rispetto al livello del suolo naturale e caratterizzati da vegetazione di tipo ornamentale posta su una copertura di tipo tradizionale o su un volume di terreno di riporto contenuto entro strutture di contenimento verticali;
- coperture verdi, vere e proprie installazioni vegetali differenti per tipologia, caratteristiche botaniche ed ecologiche, praticate su uno strato strutturale piano o inclinato a copertura di un elemento tecnico appositamente progettato o modificato nella sua soluzione tecnologica.

Le tecnologie afferenti alle coperture verdi (piane ed inclinate) ed al verde verticale sono attualmente distinte a livello tecnologico per obiettivi e finalità, modalità realizzative e prestazioni offerte, al punto che possono essere considerate applicazioni distinte ed autonomamente individuabili.



Figura 1.2 – Siteplan della Nouvelle École de la Biodiversité de Boulogne – Billancourt a Parigi, progetto architettonico Chartier Dalix Architectes, Paris (F) (fonte www.metalocus.es/).



Figura 1.3 – Il giardino pensile della Nouvelle École de la Biodiversité de Boulogne – Billancourt a Parigi. L'installazione del giardino pensile in copertura è stata promossa con l'obiettivo primario di realizzare un ecosistema locale basato su specie vegetali e animali capaci di colonizzare lo spazio urbano (fonte www.metalocus.es/).

La terminologia “*verde pensile*”, dunque, individua l’intero sistema di soluzioni di involucro edilizio che contemplino l’installazione di impianti vegetali in discontinuità rispetto al terreno naturale; la definizione di “copertura a verde”, nota in bibliografia anche come “tetti verdi”, “tetti vegetati”, “tetti ecologici”, “coperture continue a verde” e, nella letteratura anglosassone, come “*green roofs*”, “*eco roofs*”, “*cool roofs*”, identifica soltanto una famiglia di tecnologie del verde pensile in un edificio, riferendosi alla presenza di una soluzione tecnologica, la cui composizione derivi da un’analisi esigenziale e dalla valutazione delle pertinenti prestazioni offerte, specificamente dedicata a tale finalità.

Le coperture verdi possono quindi sostituire alle tradizionali mantenendo un pertinente contenuto tecnologico e garantendo, almeno in parte ed in aggiunta rispetto alle coperture tradizionali, le prestazioni offerte dal suolo naturale ricoperto da vegetazione.

1.1. Breve storia del verde pensile e delle coperture verdi

L’utilizzo del verde da parte dell’uomo per ricoprire e proteggere le abitazioni ha origini molto antiche.

Uno dei più antichi e spettacolari esempi di verde pensile sono sicuramente i giardini pensili 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.



Figura 1.4 – Riproduzione dei giardini pensili di Babilonia (fonte www.nationalgeographic.it/)

La localizzazione dei giardini pare essere ancora oggi incerta, tanto che alcuni storici non sono sicuri dell'esistenza stessa di tali realizzazioni. L'architetto tedesco Robert Koldewey (1855 - 1925) ipotizzò che i giardini si trovassero nell'angolo a nord-est del Palazzo Meridionale, anche se questa teoria non risulta del tutto accettabile a causa della lontananza del sito dal fiume Eufrate, risorsa fondamentale per l'irrigazione della zona. D.J. Wiseman (1918 - 2010) ritiene allora probabile il collocamento "sopra e a settentrione della grande muratura a ovest" del Palazzo Sud, in stretta vicinanza con le rive dell'Eufrate. Un'ipotesi ancora diversa è stata avanzata nel 1992 da D.W.W. Stevenson (1942 -) il quale ritiene che i giardini pensili fossero stati realizzati su di un edificio indipendente più vicino al Palazzo Meridionale. Un'altra teoria più recente, sostenuta da S. Dalley, ritiene che in realtà i giardini fossero stati realizzati non in Babilonia, bensì a Ninive, città vicina.

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 di terra e di drenaggio raggiungeva uno o forse due metri di spessore.

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.



Figura 1.5 – I sepolcri etruschi nella necropoli della "Banditaccia" a Cerveteri (RM) (fonte www.etruriameridionale.beniculturali.it).

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 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 un metro, in cui l'inclinazione assicurava l'allontanamento delle acque piovane e specifici elementi di contenimento impedivano eccessivi fenomeni di dilavamento.



Figura 1.6 – Mausoleo di Augusto (fonte www.sovrintendenzaroma.it/).

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, evidenziando un primo tentativo di fruizione, o piuttosto di speculazione, sulle possibilità offerte da questa tecnologia.

Proprio il valore del verde quale elemento architettonico 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, il Castello di Collepardo a Frosinone, la Reggia di Versailles a Parigi. L'utilizzo del verde pensile, in questo periodo,

umenta la fruibilità degli spazi esterni, di cui costituisce parte integrante e, al contempo, spazio di relazione con l'edificio.

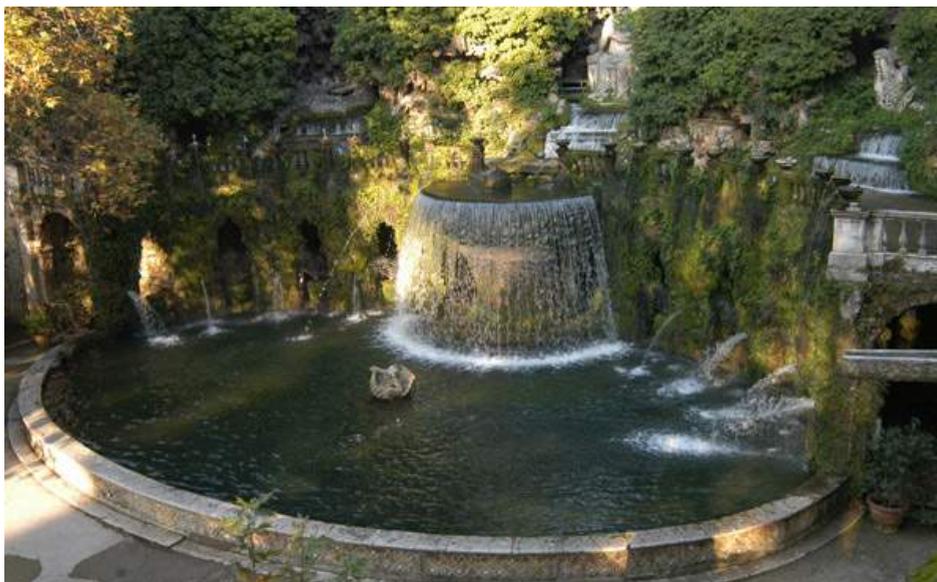
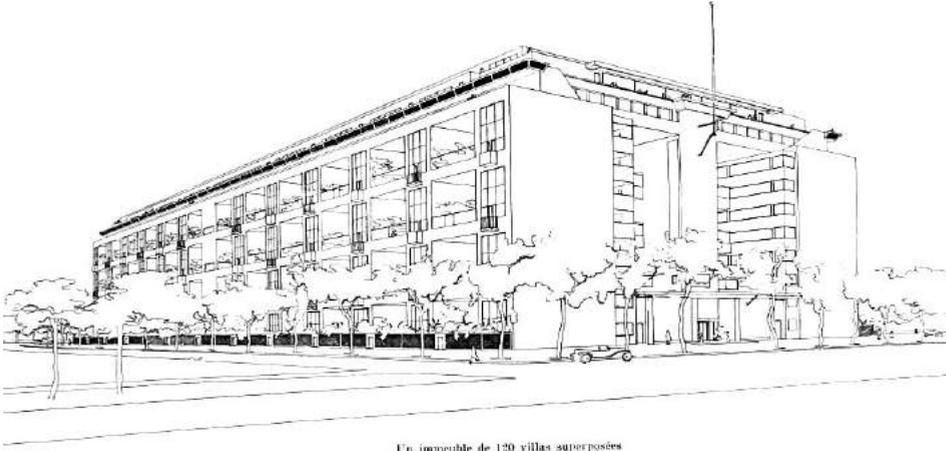


Figura .1.7 – Villa d'Este a Tivoli (fonte <http://www.villadestetivoli.info/>)

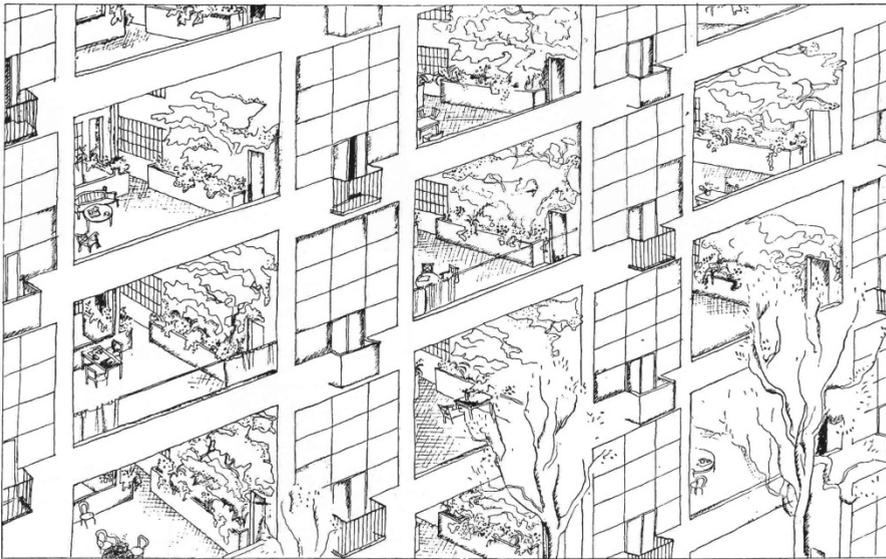
Fino al XIX secolo, i giardini pensili erano concepiti esclusivamente per soddisfare requisiti estetici e funzionali. Dal 1865, invece, cominciano ad emergere anche i pregi che queste soluzioni portano con sé da un punto di vista ambientale: la cesura viene fatta risalire alla pubblicazione di un trattato da parte dell'architetto C. Rabitz (in alcuni testi C. Von Rabitz, 1823-1891), che pubblica un trattato sui giardini pensili evidenziandone per la prima volta il contributo alla salubrità nei contesti a forte densità abitativa. La forte espansione industriale e l'aumento della densità delle aree antropizzate portò infatti alla nascita delle riflessioni sui temi dell'ecologia e della salvaguardia ambientale. Con questi, crebbe la necessità d'individuare soluzioni che permettessero la mitigazione ambientale e una miglior compensazione urbana. Da questa necessità nacquero parchi estesi al centro dei quartieri e giardini pensili sulle coperture degli edifici.

Le Corbusier (1887-1965) riconosce il valore estetico, ambientale e sociale contenuto nelle soluzioni a verde pensile. Nel progetto delle *immeubles villas* (1922) – complessi di 120 alloggi nella parte periferica di una città contemporanea destinata ad ospitare 3 milioni di abitanti – sono presenti i caratteri delle *unité d'habitation*, caratterizzati anche da terrazzi giardino. Nelle *immeubles villas* 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 sopra – grazie alla concezione strutturale più libera derivante dall'impiego dei *pilotis* – ma soprattutto 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.



Un immeuble de 120 villas superposées

Figura 1.8 – Il complesso di 120 'immeubles villas' secondo Le Corbusier (1922) (fonte www.le-corbusier.com/). La didascalia può essere tradotta come "un edificio di 120 ville sovrapposte".



«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.

Figura 1.9 – Particolare delle 'immeubles villas' di Le Corbusier (1922); sono ben riconoscibili gli spazi adibiti a giardino in ciascuna 'villa' (fonte <http://cargocollective.com/ampuqam/Regard-authentique-p3-Immeuble-villa-cache>). La didascalia può essere tradotta come "Suddivisioni a cellule chiuse. Lo stretto modulo delle facciate attuali (3,50 m) è aumentato a 6 m, conferendo alla strada un'impressione d'ampiezza tutta nuova".

Dagli anni Sessanta del secolo scorso la tecnologia delle coperture verdi comincia a diffondersi in Europa: in particolare è impiegata frequentemente come strategia per il recupero di aree ed edifici industriali degradati². 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 centrale e settentrionale – in particolare in Germania, dove dalla fine degli anni '80 una legge nazionale cita il verde pensile quale strumento di compensazione ambientale e permette ai Comuni tedeschi di incentivare o prescrivere l'impiego di queste tecnologie – le coperture verdi trovano la loro maggior diffusione quale elemento di mitigazione del microclima urbano. Il valore del verde pensile è allora incrementato da una nuova consapevolezza legata alle superfici di copertura: i tetti piani delle zone commerciali e produttive non sono soltanto spazi inutilizzati, ma portano alla progressiva degradazione del microclima urbano a causa delle proprie superfici impermeabili³.

In Italia non è ancora pienamente apprezzabile la diffusione delle coperture verdi, sebbene si ritenga 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 infine economico, con particolare riferimento agli strumenti incentivanti – diretti e indiretti – che solo recentemente sono stati resi operativi soprattutto a livello locale.



Figura 1.10 – Environment Park, Torino, progetto architettonico E. Ambasz, B. Camerana, G. Durbiano (fonte www.greenroofs.com/projects/). È il risultato della riqualificazione di un precedente brownfield esteso per 150 ettari avvenuta tra il 1996 ed il 1999.

1.2. Le prospettive future delle coperture verdi

Negli ultimi decenni la necessità di ridurre gli effetti negativi dell'antropizzazione del territorio e i consumi energetici legati ai servizi tecnici degli edifici ha portato all'implementazione negli involucri edilizi di tecniche e forme architettoniche proprie degli ambienti naturali.

Si può dunque parlare, in ambiti diversi, di *Green Architecture* e *Green Technology*, intendendo con la prima l'inserimento di specifiche strategie progettuali – dalla scala urbana a quella di involucro edilizio – di elementi tecnici capaci di ridurre i consumi energetici da fonti non rinnovabili, le emissioni inquinanti di anidride carbonica in atmosfera, infine gli impatti ambientali in genere derivanti dall'utilizzo di determinati materiali da costruzione; con la seconda, invece, si considera la mitigazione dell'impatto architettonico ed estetico e gli effetti benefici di alcune soluzioni di progetto alla scala di soluzione tecnologica, ricorrendo ad esempio ad una versione più attuale dell'architettura vernacolare⁴, volta all'integrazione del volume costruito in un contesto a forte connotazione naturale.



Figura 1.11 – Remota Hotel, Puerto Natales (RCH), progetto architettonico arch. G. del Sol, 2005 (fonte greenroofs.com/projects/). Il concept dell'edificio, che ospita 72 camere da letto, ha considerato come primo obiettivo il contenimento dei consumi energetici: è stato privilegiato l'orientamento dei volumi in modo da favorire l'accumulazione passiva dell'energia solare. La copertura dell'edificio è stata realizzata con ghiaia e erbe tappezzanti del luogo: la giacitura dell'elemento è duplice, 14% in corrispondenza della reception dell'hotel e 7% nel volume destinato alle camere.

Gli elementi di involucro – facciate e coperture – divengono allora elementi di confine capaci di interagire positivamente con gli elementi climatici, anche grazie all'utilizzo del suolo e della vegetazione, fungendo da elemento di transizione. Se la sperimentazione sugli elementi di “involucro verde” riguarda soprattutto le possibilità architettoniche offerte, con l'obiettivo di recuperare almeno in parte il paesaggio perturbato, il contenuto tecnologico di queste soluzioni è pari o superiore alle chiusure ‘tradizionali’, in quanto molteplici sono i contenuti progettuali da considerare. Queste attenzioni tecniche hanno perciò ampliato il ruolo svolto dal verde in architettura riconoscendone il potenziale contribuito alla riqualificazione dell'ambiente costruito, e non più il mero ruolo di contenuto visivo ed estetico dell'edificio.



Figura 1.12 – Nanyang Technological University – School of Art, Design and Media, Singapore (SG), progetto architettonico CPG Consultants Pte Ltd, 2006 (fonte www.alwittra.de). I tre volumi architettonici, di forma planimetrica ad arco per realizzare uno spazio centrale raffrescato con giochi d'acqua, presentano aperture in direzione nord e sud per minimizzare gli apporti solari. Tali volumi sono caratterizzati da coperture verdi, accessibili lungo i bordi, di pendenza massima pari al 100%: le coperture fungono da spazio comune per le attività all'aperto e da volano termico per gli ambienti indoor sottostanti, inoltre sono irrigate da un impianto di recupero dell'acqua meteorica. Lo strato portante è costituito da una soletta in c.a. irrigidita da travi fuori spessore.

Ai fini della mitigazione climatica dei contesti urbani, nei Paesi dell'Estremo Oriente – in particolare in Giappone – e successivamente negli Stati Uniti sono stati avviati programmi di ricerca e sperimentazione per la rifunionalizzazione delle coperture piane ad ampio raggio. Nei paesi a clima freddo, invece, le coperture verdi mantengono prevalentemente le proprie prerogative di elemento tecnico capace di contenere le dispersioni termiche.



Figura 1.13 – Library of University of Technology, Delft (NL), progetto architettonico Mecanoo Architecten, Delft (fonte www.mecanoo.nl/Projects/). La copertura dell'edificio, preesistente e rinnovata nel 2009, consiste in un piano inclinato che riprende il tappeto erboso degli spazi esterni, praticabile e destinata ad attività all'aperto e relax. La copertura verde, le finestre ad elevate prestazioni energetiche e l'accumulo termico interrato configurano un edificio sostenibile.

D'inverno la copertura è utilizzata come pista da sci.



Figura 1.14 – Marina Barrage, Singapore (SG), progetto architettonico Architects Team 3 Pte Ltd, 2008 (fonte www.pub.gov.sg/marina/). Il mantenimento di condizioni di comfort nell'edificio è assicurato dalla copertura verde – che mimetizza l'edificio nel contesto naturale e permette lo svolgimento di attività all'aperto – e da serramenti ad elevata protezione solare. L'impianto di irrigazione è collegato a sensori di pioggia per la sua disattivazione in presenza di precipitazioni.

Il verde costituisce, infine, un mezzo per restituire – almeno in parte – la valenza naturalistica originaria del sistema ambientale in particolari siti, permettendo la mimetizzazione dell’opera, in alternativa a realizzazioni ipogee. La continuità della superficie a verde rispetto al suolo naturale può creare specifici ambienti di vita per piante e piccoli animali.

1.3. Struttura del lavoro

La valutazione delle potenzialità di installazione di una copertura verde in un edificio nuovo, ed a maggior ragione le possibilità di applicazione ad un organismo esistente in sostituzione / integrazione della precedente copertura, è stata oggetto del lavoro di ricerca ed è esposta, in questo volume, in quattro ambiti cruciali, inerenti sia gli aspetti di sostenibilità, sia l’onerosità tecnica ed economica di applicazione:

- I. ambito tecnologico, in cui ci si propone di vagliare le specifiche esigenze e i corrispondenti requisiti che indirizzano la scelta progettuale verso l’inverdimento dell’elemento tecnico di copertura. Un’analisi degli strati funzionali tipici di una copertura verde ha considerato materiali e componenti attualmente disponibili sul mercato, ed è quindi stato possibile definire le prestazioni specifiche di ciascuno – atte principalmente a garantire funzionalità e durabilità della copertura – e, successivamente, quelle globali dell’intero elemento tecnico (controllo del microclima locale, regimazione delle acque meteoriche, contenimento dei consumi energetici e contributo alle condizioni di comfort indoor) al variare delle possibili soluzioni tecnologiche, delle quali è stato proposto un abaco;
- II. ambito prettamente strutturale, in cui si è fornita una prima valutazione delle possibilità di installazione di una copertura verde in un edificio esistente, delineandone le criticità, illustrandone il rapporto con la vigente normativa in materia di costruzioni mediante la predisposizione di un caso di studio, infine proponendo un’analisi critica con le tipologie edilizie più diffuse sul territorio italiano;
- III. ambito economico; mediante la definizione di un caso studio in cui fosse prevista la sostituzione con conseguente efficientamento energetico della copertura esistente, è stata condotta un’analisi economica a scenari volta a definire la differenza di costo globale tra una nuova copertura tradizionale efficiente ed una copertura verde estensiva, indagando poi sulla forma di possibili incentivi locali che rendano economicamente vantaggiosa l’installazione della seconda;
- IV. ambito sociale, in cui è stato analizzato il ruolo delle coperture verdi nella caratterizzazione di spazi esterni che qualifichino l’ambiente costruito in comfort e qualità percettiva, e siano eventualmente fruibili per specifiche attività.

1.4. Bibliografia

Abram P., *Verde pensile in Italia e in Europa*, il Verde Editoriale, Milano, 2006. ISBN: 88-86569-24-6.

Fiori M. (a cura di), *Coperture a verde. Ricerca, progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile*. Hoepli Editore, Milano, 2011. ISBN: 978-88-203-4159-6.

Fiori M., Poli T., *Coperture a verde. Esempi di progettazione*. Maggioli Editore, Rimini, 2008.

Grosso M., Peretti G., Piardi S., Scudo G., *Progettazione ecocompatibile dell'architettura*. Sistemi Editoriali, Napoli, 2005. ISBN: 978-88-513-0286-3.

Perini K., *Progettare il verde in città*. Franco Angeli Editore, Milano, 2013.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, a cura di Andri S. e Sauli G., *Verde Pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico*. Roma, 2012. ISBN: 978-88-448-0534-0.

NOTE AL CAPITOLO 1

¹ ISPRA, 2012, pag. 7.

² Ci si riferisce qui al tema del recupero dei cosiddetti *brownfield site*, vale a dire i suoli utilizzati in precedenza per finalità commerciali o produttive: questi siti possono essere caratterizzati da basse concentrazioni di rifiuti pericolosi o inquinanti, e ne è teoricamente possibile il riutilizzo in seguito ad un intervento di pulizia. I *brownfield* possono ospitare ecosistemi significativi con specie vegetali rare.

³ Abram P., 2006, pag. 18.

⁴ Poli T., *Nuovi scenari per l'architettura contemporanea*, in Fiori M., 2011, pag. 33.

Capitolo 2

Analisi funzionale delle coperture verdi

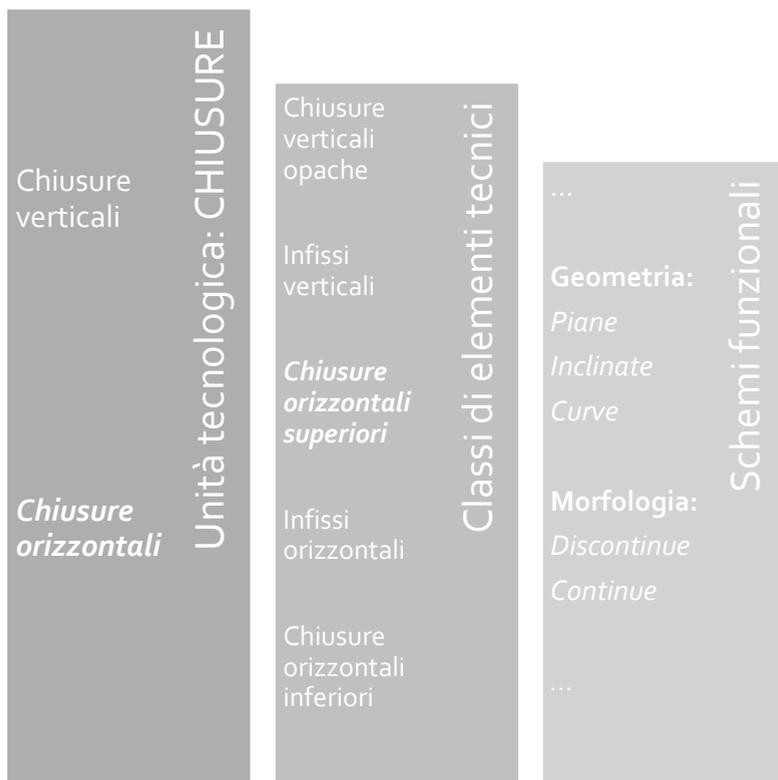
Edino Valcovich, Carlo Antonio Stival

Le coperture verdi costituiscono una particolare ed innovativa famiglia di soluzioni tecnologiche pertinenti alle chiusure orizzontali superiori: la funzione di tale classe di elementi tecnici è volta a separare gli ambienti indoor dell'edificio dallo spazio esterno sovrastante, garantendo in tali locali le condizioni per lo svolgimento delle attività umane ivi previste mediante la regolazione di flussi di materia ed energia. La collocazione nell'involucro edilizio e la consistenza fisica di tali chiusure conferiscono loro una grande importanza morfologica, influente sia sull'architettura dell'involucro, sia sulle peculiarità degli ambienti indoor.

Il consolidato approccio proprio dell'Architettura Tecnica individua tre possibili schemi funzionali per le coperture in base alla geometria: chiusure superiori piane, inclinate e curve. Con riferimento alla morfologia, le coperture sono differenziate poi in

base alla continuità dello strato di tenuta all'acqua, nelle sottoclassi coperture continue e coperture discontinue¹; queste ultime sono generalmente inclinate, in modo tale che la pendenza a loro conferita consenta il deflusso dell'acqua meteorica senza provocare infiltrazioni nelle discontinuità.

L'inserimento delle coperture verdi all'interno della classe di elementi tecnici richiamata richiede comunque opportuni approfondimenti, resi necessari dalle svariate esigenze correlabili alla loro installazione, afferibili a parametri di classificazione non limitati alla geometria ed alla morfologia delle stesse.



Prospetto 2.1 – Classificazione delle coperture in base a geometria e morfologia.

In questo capitolo saranno perciò affrontate le modalità di classificazione delle coperture verdi in base a diversi parametri, le esigenze ad esse correlate e i pertinenti requisiti connotanti.

2.1. Criteri di classificazione delle coperture verdi

I criteri di classificazione delle coperture verdi si riferiscono alla classe di elementi tecnici chiusure orizzontali superiori: in quanto tali, le coperture verdi assolvono alla

funzione di separazione tra ambienti indoor dallo spazio esterno caratterizzato da specifiche condizioni climatiche ed agenti atmosferici, permettendo le condizioni necessarie allo svolgimento delle attività previste per l'utenza.

Si possono dunque definire opportuni schemi funzionali derivanti da modelli di funzionamento della copertura: tali schemi descrivono quindi il funzionamento di un elemento tecnico in base a fenomeni dominanti, dovuti a specifici agenti e trasposti a livello tecnico in requisiti connotanti.

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;
3. accessibilità / fruibilità;
4. manutenzione e gestione;
5. prestazionale.

2.1.1. Geometria

La norma UNI 8627 [2] definisce due possibili schemi funzionali dei sistemi di copertura, distinguendo in coperture piane o inclinate.

La prima possibile classificazione delle coperture verdi è dunque pertinente alla loro geometria e individua tre possibili schemi funzionali:

- coperture orizzontali, caratterizzate da una pendenza inferiore all'1% per assicurare l'efficace deflusso delle acque meteoriche;
- coperture sub-orizzontali, con pendenza compresa tra l'1% ed il 5%;
- coperture inclinate, aventi pendenza superiore al 5%.

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.

Tale modalità di classificazione caratterizza dunque i sistemi di ancoraggio di strati funzionali ed elementi tecnici; inoltre, nelle coperture inclinate la cui pendenza è superiore al 5%, è generalmente accettabile la tipologia a verde estensivo, in seguito caratterizzata, per motivi di ordine economico, di progettazione tecnologica e di fattibilità tecnica. Le coperture piane richiedono, d'altro canto, la predisposizione di uno strato drenante di sicura efficacia, che bilanci le richieste di sostentamento della vegetazione con i requisiti di controllo ed allontanamento delle acque meteoriche.

Si propone di seguito il prospetto 2.1 che individua gli accorgimenti progettuali necessari all'installazione di una copertura verde in funzione di classi di pendenza dell'elemento tecnico di copertura.

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

Prospetto 2.2 – Individuazione delle criticità di installazione di coperture verdi in base al criterio di geometria.

2.1.2. **Tipologia di installazione**

Il codice di buona pratica UNI 11235 [3] opera una fondamentale distinzione nella tipologia di installazione delle coperture verdi in estensive ed intensive.

Nelle coperture di tipo estensivo, le specie vegetali impiegate sono capaci di svilupparsi e adattarsi alle condizioni ambientali in cui vengono a trovarsi, con livelli di manutenzione minimi. Le specie vegetali impiegate per l'inverdimento estensivo sono quindi caratterizzate da un'elevata capacità di insediamento, efficienza di riproduzione, resistenza agli stress idrici (*drought-tolerant species*) e termici a cui sono sottoposte nell'arco di un intero anno. Non sono applicabili, a causa del ridotto spessore dello strato colturale (5÷15 cm) e della possibile geometria inclinata della copertura, specie vegetali arboree; conseguentemente, il peso totale imputabile all'installazione vegetale risulta modesto.

Le specie vegetali impiegate in coperture di tipo intensivo sono caratterizzate da strati colturali di tipo organico, di maggiore profondità, necessitano di conseguenza di

un livello di manutenzione maggiore e di una giacitura piana orizzontale a pendenza pressoché nulla. Per l'inverdimento intensivo è più ampia la rosa delle specie vegetali impiegabili, valutando sia specie erbacee, anche perenni, sia specie arbustive ed arboree. In funzione della tipologia di inverdimento previsto variano sia lo spessore dello strato colturale necessario sia, di conseguenza, il sovraccarico gravante sulla struttura: gli inverdimenti di tipo intensivo sono quindi limitate

2.1.3. *Accessibilità / fruibilità*

È possibile inoltre individuare una corrispondenza tra la modalità di classificazione delle coperture per geometria, in funzione della pendenza, e quella relativa alla fruibilità / accessibilità della copertura stessa:

- coperture inclinate e piane, non accessibili, di tipo estensivo;
- coperture piane, accessibili, di tipo intensivo.

La classificazione delle coperture con strato superficiale vegetale in base al grado di accessibilità e fruibilità consiste in sei classi⁴:

- A. copertura accessibile per i soli interventi di manutenzione;
- B. copertura accessibile per interventi di manutenzione afferenti sia gli strati funzionali che gli impianti installati;
- C. copertura accessibile a pedoni, per un carico massimo ammissibile di 4 kN/m²;
- D. copertura accessibile a pedoni e veicoli leggeri, con peso inferiore a 2 t per ciascun asse;
- E. copertura accessibile a flussi pedonali e veicolari;
- F. copertura pensile intensiva, in grado di sopportare le relative sollecitazioni meccaniche e chimiche.

La fruibilità della copertura deve essere dichiarata dalla committenza e prevista in sede di progettazione al fine di definire compitamente i carichi gravanti sulla copertura stessa ed agenti globalmente sulle strutture portanti.

2.1.4. *Manutenzione*

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.

Coperture verdi di tipo estensivo richiedono il minor grado di manutenzione, solitamente non più di uno o due interventi nel corso dell'anno, in quanto l'approvvigionamento di acqua e sostanze nutritive avviene secondo processi che si verificano naturalmente e 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; l'accessibilità è consentita solo per interventi manutentivi, con interventi di irrigazione previsti nella fase di avvio ed in caso di emergenze climatiche. Una copertura verde estensiva ha dunque il principale obiettivo di fornire le prestazioni ecologiche ed economiche più vantaggiose, a scapito della fruibilità dello spazio.

Le coperture verdi di tipo intensivo, caratterizzate da una più complessa realizzazione tecnica e da una maggiore ampiezza di scelta delle essenze, presentano quindi maggiori oneri in fase di manutenzione: oltre ai controlli degli elementi del sistema e dello strato di vegetazione tipici dell'inverdimento estensivo, sono da annoverarsi le attività di controllo delle specie vegetali piantumate, caratterizzate da una maggiore varietà rispetto al verde estensivo. In base alle necessità di manutenzione, sono individuate due sottocategorie:

- verde intensivo leggero, caratterizzato da un tappeto erboso calpestabile;
- verde intensivo pesante, ad elevata manutenzione, che comprende la messa a dimora di alberi.

La copertura verde intensiva si configura come uno spazio aperto fruibile e destinabile ad attività diverse, provvisto di specie vegetali arbustive ed arboree e dotato di elementi d'arredo: è quindi più spiccata la funzione dell'inverdimento intensivo in termini di fruibilità ed aspetto.

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.

Tabella 2.1 – Classificazione delle coperture verdi in base alle necessità di operazioni manutentive (fonte UNI 11235:2007, par. 6.1.2.).

Un livello di bassa manutenzione prevede il solo controllo di strati funzionali ed elementi costituenti il sistema; sono quindi monitorati lo stato fisiologico e fitosanitario della vegetazione, ad esempio l'eventuale presenza di parassiti o di agenti infestanti che possano inficiare la funzionalità del sistema. L'irrigazione può essere effettuata eventualmente in alcune occasioni, allorquando condizioni di stress idrico lo richiedano.

In caso di medio o alto livello di manutenzione, applicabile prevalentemente a sistemi intensivi, oltre ai controlli descritti in precedenza, sono da effettuarsi le attività agronomiche necessarie ad una corretta gestione delle aree verdi. È altresì necessario prevedere un congruo impianto d'irrigazione per il sostentamento della vegetazione.

Gli interventi di manutenzione si dividono cronologicamente in due categorie:

- manutenzione di avviamento, dedicata al controllo di opere e forniture necessarie al raggiungimento del pieno stato di operatività, comprese le

misure per la protezione dello strato colturale e della vegetazione dai fenomeni di erosione idrica ed eolica (ad esempio, predisposizione di strutture rompitratta nelle coperture inclinate). Sono qui comprese le lavorazioni agronomiche inerenti il controllo dello spessore dello strato colturale, di costipamento ed eventuale integrazione, di risemina o reimpianto delle specie vegetali adottate, di efficienza e funzionalità dell'eventuale sistema di irrigazione;

- manutenzione ordinaria, effettuata in seguito all'avviamento, volta a mantenere nel tempo la funzionalità della copertura, ad esempio rimozione di specie infestanti, operazioni di rasatura e sfalcio, azioni di potatura di contenimento ed a scopi estetici, trattamenti fitosanitari.

Considerando le modalità di classificazione delle coperture verdi per geometria, tipologia di installazione ed oneri manutentivi, e quindi riproponendo la distinzione tra inverdimento estensivo, intensivo leggero ed intensivo pesante, è possibile riassumere le principali caratteristiche di tali soluzioni conformi nella Tabella 2.2.

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

Tabella 2.2 – Sommario delle principali caratteristiche delle coperture verdi in base alle diverse modalità di classificazione introdotte.

2.1.5. Classificazione in base alle prestazioni

Tale modalità di classificazione è pertinente alla funzione caratteristica svolta da specifici strati funzionali costituenti una soluzione di chiusura orizzontale superiore. 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:

- coperture non isolate e non ventilate, prive di strati funzionali precisamente individuati che agiscano sulla trasmissione del calore e sul comportamento igrometrico;
- coperture isolate e non ventilate, che permettono il solo controllo delle dispersioni di calore;
- coperture non isolate e ventilate, in cui uno specifico strato funzionale consente il controllo del comportamento igrometrico;

- coperture isolate e ventilate, che possiedono strati funzionali capaci di operare il controllo di entrambi i fattori.

Le coperture verdi sono prevalentemente caratterizzate da soluzioni conformi di tipo isolato. La presenza di uno specifico strato di isolamento termico, che risulti complementare alla prestazione offerta dallo strato colturale, deve essere valutata in fase di determinazione dei livelli di prestazione richiesti, in particolare verificando se la copertura deve offrire determinate prestazioni di resistenza termica. Lo strato di isolamento termico è necessariamente previsto nelle coperture verdi estensive, mentre nelle soluzioni di tipo intensivo gli spessori dello strato colturale e dello strato drenante ne rendono spesso non necessario l'impiego.

Il controllo del comportamento igrometrico è invece affidato ad uno strato funzionale di barriera al vapore, capace di evitare l'accumulo di vapore all'interno della soluzione e la conseguente 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, condizione significativamente differente rispetto a quelle riscontrabili nelle coperture di tipo tradizionale.

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 diverse soluzioni conformi in merito alla collocazione di questo strato funzionale:

- soluzione conforme "a tetto caldo", in cui 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;
- soluzione conforme "a tetto rovescio" in cui 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.
- soluzione conforme "a tetto sandwich", 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.

La prestazione energetica di una copertura verde risulta particolarmente incisiva nella stagione estiva, in quanto la massa caratterizzante lo strato colturale fornisce elevate prestazioni di inerzia termica. Relativamente a tali prestazioni, è possibile distinguere tre livelli prestazionali inerenti anche il potere fonoisolante di facciata, anch'esso direttamente correlato alla massa superficiale dell'elemento tecnico:

- I livello, se il peso degli strati soprastanti l'elemento di tenuta è inferiore a 150 kg/m²;
- II livello, se il peso degli strati soprastanti l'elemento di tenuta è compreso tra 150 kg/m² e 300 kg/m²;
- III livello, se il peso degli strati soprastanti l'elemento di tenuta è superiore a 300 kg/m².

2.2. Individuazione di esigenze e requisiti connotanti delle coperture verdi

2.2.1. Definizione di un quadro di esigenze per le coperture verdi

Inquadrando la tecnologia delle coperture verdi in un quadro di esigenze e requisiti connotanti associati, emerge una notevole varietà degli effetti portati da queste soluzioni, i quali possono essere riferiti, secondo diversi gradi e con una certa sicurezza, al tradizionale approccio esigenziale - prestazionale.

In termini di classi di esigenza, le coperture verdi contribuiscono al soddisfacimento di diverse esigenze, riferibili alle classi di:

- aspetto;
- fruibilità;
- benessere;
- salvaguardia ambientale;
- utilizzo razionale delle risorse.

Tale molteplicità di effetti è evidenziata innanzitutto dalla stessa norma tecnica di riferimento UNI 11235, che sottolinea come l'adozione di una copertura verde si configuri come momento operativo nel perseguire uno o più dei seguenti obiettivi:

- fruibilità della copertura per lo svolgimento di determinate attività, derivante dalla volontà di realizzare uno spazio idoneo allo svolgimento di attività all'aperto. La definizione di tali attività è relazionata alla valutazione dell'usura del manto vegetale ed ai carichi agenti sulla copertura;
- fruibilità visiva, correlata alla valenza architettonica ed estetica della copertura verde;
- modifica delle prestazioni ambientali interne dell'edificio, con particolare riferimento al comportamento energetico e, in una certa misura, al comportamento acustico;
- modifica delle prestazioni ambientali esterne dell'edificio, con particolare riferimento all'effetto "isola di calore", al controllo del deflusso delle acque meteoriche, all'abbattimento della concentrazione delle polveri sottili in atmosfera;
- compensazione architettonica, avente come oggetto la restituzione parziale o totale delle caratteristiche peculiari del sistema ambientale precedente

l'intervento⁵. Le ricadute di questo obiettivo si riferiscono allora al ripristino delle condizioni microclimatiche ed atmosferiche del contesto.

La definizione degli obiettivi è desunta anche dall'insieme degli agenti che interferiscono con il sistema complesso costituito da una copertura verde: biologici e chimici, idrici, meccanici, termici e radiativi.

In termini di aspetto, una copertura verde può restituire la valenza naturalistica (o una sua quota) presente in origine in un determinato contesto ambientale, contenendo l'impatto visivo della nuova edificazione e realizzando, quindi, uno spazio di qualità architettoniche e paesaggistiche.

Tra gli impatti più incisivi delle opere antropiche vi è l'impermeabilizzazione e la sigillatura dei suoli dovuta alla realizzazione di superfici con finitura in conglomerato cementizio o simili. Questa modifica alle condizioni originarie comporta in genere il surriscaldamento delle superfici in oggetto ed il conseguente incremento di temperatura della massa d'aria soprastante; inoltre, il più rapido deflusso delle acque meteoriche gravitanti su queste superfici riduce la quota originariamente infiltrata nel suolo e comporta un dissesto nella regimazione delle acque ora sottratte al ciclo idrologico dell'acqua. Una copertura verde, pur parte integrante di un'opera antropica, permette un ripristino perlomeno parziale delle funzioni del suolo naturale all'interno del ciclo idrologico, e offre prestazioni degne di nota anche nel controllo dei deflussi in seguito ad eventi meteorici particolarmente intensi.

La diffusione della tecnologia del verde pensile dipende anche da due ulteriori motivazioni quali l'effetto visivo e psicologico positivo dato da una superficie verde in un contesto altrimenti antropizzato e l'efficacia di queste soluzioni in termini di durabilità dei materiali – con particolare riferimento allo strato impermeabilizzante di copertura – e di efficienza energetica conferita all'involucro edilizio.

Per quanto concerne l'esigenza di benessere acustico, l'elemento tecnico di copertura deve ridurre il livello di pressione sonora dovuto alle sorgenti sonore aeree e di tipo impattivo agenti sulla copertura stessa. Il potere fonoisolante apparente che definisce la prestazione di isolamento acustico è variabile in funzione del tipo di esposizione e dell'attività svolta nei locali interni; in generale, le prestazioni offerte da un elemento tecnico inverdito sono elevate in quanto la massa coinvolta offre una notevole riduzione del livello di pressione sonora rispetto all'ambiente esterno.

Va comunque evidenziato che, rispetto ad una copertura "tradizionale", il verde pensile comporta oneri maggiori in termini di manutenzione e di mantenimento delle specie vegetali impiantate (nelle soluzioni di tipo estensivo si considerano i soli interventi manutentivi in condizioni eccezionali); inoltre, esso comporta un maggiore peso sulla struttura portante dell'organismo edilizio ed un incremento dei carichi in fondazione, condizione senz'altro più gravosa in applicazioni a verde pensile intensivo, le quali vedono ridotto il proprio campo di applicazione in interventi di riqualificazione di coperture esistenti.

È dunque possibile fissare specifiche esigenze e requisiti correlabili alle coperture verdi, in base alle classi definite dalla norme tecniche UNI 8289 [6] e UNI 8290 [7], come integrate dalla norma UNI 11277 [8], riportate nel prospetto 2.3.

SICUREZZA	<ul style="list-style-type: none"> • resistenza meccanica ai carichi statici e dinamici • resistenza all'erosione • resistenza agli agenti fisici, chimici e biologici
FRUIBILITÀ	<ul style="list-style-type: none"> • creazione di superfici destinate allo svolgimento di attività diverse • fruibilità per accessi pedonali e veicolari
ASPETTO	<ul style="list-style-type: none"> • incremento della qualità visiva • riduzione dell'impatto paesaggistico
BENESSERE, IGIENE E SALUTE DELL'UTENTE	<ul style="list-style-type: none"> • tenuta agli agenti atmosferici • isolamento acustico • riduzione dell'effetto isola di calore • abbattimento delle polveri atmosferiche
UTILIZZO RAZIONALE DELLE RISORSE	<ul style="list-style-type: none"> • isolamento termico • controllo dell'inerzia termica • protezione degli strati di isolamento termico e di impermeabilizzazione • recupero di materiali e suolo
SALVAGUARDIA DELL'AMBIENTE	<ul style="list-style-type: none"> • gestione dell'acqua meteorica • contributo alla realizzazione di reti ecologiche

Prospetto 2.3 – Individuazione di diversi aspetti riconducibili a specifiche classi di esigenza proprie della tecnologia delle coperture verdi.

Rispetto alle soluzioni “tradizionali”, le coperture verdi devono corrispondere positivamente a requisiti specifici e peculiari:

- capacità agronomica, ossia l’attitudine di un sistema o di un suo componente a favorire e mantenere nel tempo le opportune condizioni agronomiche per un corretto sviluppo della vegetazione,
- capacità drenante al fine di favorire il passaggio di acqua per il sostentamento della vegetazione;
- capacità di aerazione dello strato drenante, al fine di garantirvi idonee condizioni di ossigenazione;

- capacità di accumulo idrico, al fine di renderla disponibile per la vegetazione;
- capacità di aerazione dello strato colturale, al fine di instaurare idonee condizioni di ossigenazione.

Le coperture a verdi, delicato elemento tecnico di separazione e modulazione di flussi tra il clima esterno e l'ambiente interno, devono quindi soddisfare molteplici esigenze; la traduzione di tali esigenze in requisiti presuppone che essi possano essere riferiti con precisione ad uno strato funzionale, oppure ascrivibili alla totalità della soluzione in esame.

Ad ogni requisito connotante è associata una specifica di prestazione⁹, che permette di valutare il livello prestazionale raggiunto e, qualora richiesto dalla normativa vigente, di confrontarne il valore con la pertinente specificazione di prestazione¹⁰.

2.2.2. *Il contesto ambientale*

Le condizioni climatiche ed ambientali esterne risultano di fondamentale importanza per la scelta delle essenze vegetali da associare alla copertura verde, per l'individuazione delle proprietà dello strato colturale, infine per la valutazione delle prestazioni complessive dell'elemento tecnico: non è quindi possibile applicare indifferentemente una copertura verde in contesti climatici diversi.

Il progetto di una copertura verde non può prescindere dalla conoscenza dei parametri ambientali – alcuni dei quali necessari alla valutazione delle prestazioni ambientali delle coperture tradizionali – che permettono di valutare le perdite d'acqua alla vegetazione per evapotraspirazione, quali:

- temperatura dell'aria esterna su periodi mensili, declinata in media annua, media del mese più rigido, durata dei periodi caldi, escursione media annua;
- umidità relativa massima;
- radiazione solare incidente sulla copertura;
- direzione ed intensità dei venti prevalenti, a cadenza stagionale;
- intensità delle precipitazioni, comprese quelle a carattere nevoso, che contrastano il fenomeni evapotraspirativi;
- emergenze antropiche che portino ad un inquinamento atmosferico o da polveri sottili.

Questi dati (reperibili ad esempio tramite le statistiche meteorologiche elaborate dall'ISTAT, dai report proposti a livello regionale dalle ARPA (Agenzie Regionali Protezione Ambiente), dall'ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente), dal D.M. 14 gennaio 2008 e relativa circolare esplicativa per quanto concerne i carichi statici e dinamici, etc.) permettono di definire i fabbisogni idrici del sistema inverdito, in seguito all'asportazione d'acqua per evaporazione (dallo strato colturale) e traspirazione (dall'apparato vegetale)¹¹.

È importante evidenziare come il contesto climatico influisca diversamente su una copertura verde rispetto alla condizione della vegetazione posta in diretta continuità con il suolo naturale.

La scelta di essenze vegetali idonee al contesto climatico è limitata anche dagli oneri di manutenzione della vegetazione: maggiore è l'idoneità della vegetazione al contesto climatico, minori saranno le azioni manutentive (anche straordinarie) da prevedere per garantire sopravvivenza e sviluppo delle piante.

2.2.3. *Requisiti connotanti*

2.2.3.1. Requisiti relativi alla sicurezza

Con riferimento alla sicurezza strutturale, i principali riferimenti legislativi sono le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, allegate al D.M. 14/01/2008 [12], e relativa Circolare Esplicativa n. 617/2009 [13].

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 non vedere ridotta sensibilmente la propria 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.

Se è possibile che nella stagione invernale la temperatura dell'aria esterna, per alcuni periodi, scenda al di sotto di 0 °C, gli strati funzionali posti al di sopra dello strato di isolamento termico devono possedere idonea resistenza al gelo: il requisito è richiesto

agli strati drenante e di accumulo idrico, se presente: i suddetti strati, sottoposti a cicli di gelo e disgelo, non devono frammentarsi, riducendo la propria massa e la propria resistenza meccanica e perdendo così la propria funzione. Analoga richiesta è pertinente agli aggregati dello strato colturale.

2.2.3.2. Requisiti inerenti la 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.

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

Tabella 2.3 – Tipologie di accesso alle coperture verdi (fonte www.greenroofguidelines.co.uk).

2.2.3.3. Requisiti di aspetto

Per quanto concerne la classe esigenziale dell'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.

2.2.3.4. Requisiti relativi al benessere, l'igiene e la 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.

Per quanto concerne il controllo della condensazione superficiale ed interstiziale, nella verifica condotta ai sensi della normativa tecnica UNI 13788 [14], la resistenza termica dello strato colturale può, a favore di sicurezza, essere trascurata¹⁵.

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 stessa¹⁶. Le specificazioni di prestazione per tale requisito sono quelle previste dal D.P.C.M. 5/12/1997 [17] per il requisito acustico passivo di potere fonoisolante di facciata, stabilito in funzione della destinazione d'uso dell'unità immobiliare direttamente afferente alla copertura.

Poiché il potere fonoisolante apparente di una chiusura è determinato, per ampi campi di frequenze, dalla legge di massa, lo strato colturale offre un apprezzabile contributo all'incremento del potere fonoisolante di copertura.

2.2.3.5. Requisiti relativi all'utilizzo razionale delle risorse energetiche

Il controllo del consumo delle risorse energetiche, tema che si intreccia con la necessità di garantire condizioni di benessere negli ambienti confinati e nelle aree esterne fruibili, è un'esigenza che si pone l'obiettivo di intervenire sull'involucro edilizio attraverso misure che, senza ricorrere direttamente ad un impianto tecnico di condizionamento (strategia passiva), permettano di mediare le condizioni climatiche esterne.

La copertura verde costituisce l'elemento tecnico deputato al controllo del flusso termico nella stagione invernale ed estiva, requisito che incide notevolmente sulle prestazioni energetiche complessive dell'edificio a causa della quota di superficie disperdente dell'involucro edilizio afferente alla chiusura superiore.

Le soluzioni di copertura verde, se previste nell'ambito di una ristrutturazione parziale o totale, devono presentare, al pari di una copertura tradizionale, una trasmittanza termica non superiore a quella prevista dalla normativa vigente (attualmente il D. Lgs. 311/2006, All. C). Queste specificazioni di prestazione sono le minime ammissibili, perciò la regolamentazione a livello locale può anche richiedere un livello prestazionale più elevato¹⁸.

È opportuno evidenziare sin da ora che la resistenza termica complessiva della copertura è fortemente influenzata dal grado di saturazione dello strato colturale, ed in questa valutazione risiedono le maggiori criticità.

Per quanto concerne il controllo dell'inerzia termica, il D.P.R. 59/2009 [19] definisce coperture verdi le "coperture continue dotate di un sistema che utilizza specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali caratteristiche della

copertura di un edificio. Tali coperture sono realizzate tramite un sistema strutturale che prevede in particolare uno strato colturale opportuno sul quale radicano associazioni di specie vegetali²⁰. Negli interventi di nuova costruzione e di ristrutturazione totale di edifici esistenti, il progettista deve verificare il livello di inerzia termica offerto dalle soluzioni d'involucro, ivi compresa la copertura.

Tale verifica, da condurre in tutte le zone climatiche ad eccezione della zona F nelle località in cui l'irradianza media sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione estiva sia non inferiore a 290 W/m^2 , richiede che il modulo della trasmittanza termica periodica Y_{IE} sia inferiore a $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Il Decreto specifica che tale obiettivo (specificazione di prestazione) può essere raggiunto con l'impiego di tecniche e materiali innovativi, tra cui le coperture verdi, al fine di contenere le oscillazioni della temperatura negli ambienti indoor derivanti dall'irraggiamento solare. Opportune documentazioni e certificazioni devono dimostrare l'equivalenza della prestazione della tecnologia e dei materiali adottati con i livelli prestazionali richiesti.

2.2.3.6. Requisiti inerenti la salvaguardia ambientale

Le coperture verdi rappresentano un potenziale strumento per equilibrare l'impatto delle costruzioni antropiche per ottenere spazi urbani caratterizzati da una maggiore vivibilità. Esse possono contribuire al mantenimento o alla ricostruzione dei corridoi ecologici qualora non sia possibile realizzare nuovi spazi verdi. In questo modo è possibile tutelare le 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 drenante²¹ – a contrasto dell'impermeabilizzazione dei suoli – mediante l'impiego di materiali che favoriscano la penetrazione diffusa dell'acqua meteorica, a velocità tali da contenere i picchi di portata ai corpi ricettori finali.

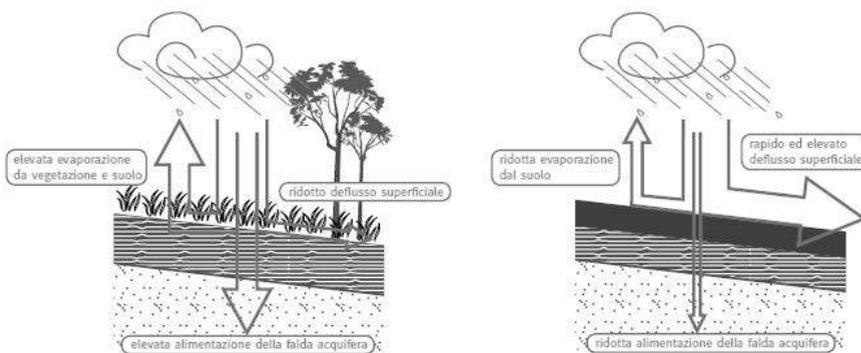


Figura 2.4 – Modifica del regime di deflusso delle acque piovane dovuto all'impermeabilizzazione delle superfici in assenza di strategie di controllo (fonte Provincia Autonoma di Bolzano, 2008).

Questo requisito fa dunque riferimento al contenimento dell'entità dei deflussi delle acque meteoriche e può essere ben ricompreso nella classe di esigenza della salvaguardia ambientale; il recupero ed il riutilizzo di queste acque per usi compatibili, in luogo dell'acqua potabile, può invece come utilizzo razionale della risorsa idrica.

Il trattamento superficiale delle aree esterne, ivi comprese le coperture dei volumi edificati, può rendere le stesse permeabili riducendo l'impatto sul ciclo idrologico. Lo strato colturale di una copertura verde può trattenerne quote considerevoli dell'acqua meteorica gravitante sulla superficie di copertura; inoltre, l'effetto depurativo del verde pensile permette di veicolare l'acqua defluita nelle canalizzazioni, e di qui ai ricettori²².

2.2.3.7. Requisiti specifici delle coperture verdi

Il controllo della capacità agronomica si riferisce all'attitudine di un sistema a mantenere nel tempo le condizioni per un corretto sviluppo della vegetazione in funzione del contesto. Questo requisito si riflette sulla disponibilità dei dati inerenti il contesto climatico e le necessità in termini energetici e idrici delle specie vegetali prescelte.

Il controllo della capacità drenante è requisito richiesto alla copertura verde specialmente nelle porzioni perimetrali, in cui il carico idrico è maggiore. La successione degli strati funzionali, da quello vegetale a quello con specifica funzione drenante, deve prevedere caratteristiche di permeabilità crescenti, al fine di permettere a quest'ultimo strato l'espletamento della propria funzione. In sistemi d'inverdimento privi di accumulo idrico la portata idraulica da eventi meteorici deve essere controllata, così da evitare il formarsi di battenti idrici.

Nelle condizioni nominali di esercizio, inoltre, nell'elemento drenante deve essere disponibile un volume d'aria per evitare l'immarcescimento degli apparati radicali.

2.3. Schema decisionale per la progettazione delle coperture verdi

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 e i futuri responsabili della manutenzione.

È possibile individuare una *checklist* 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 parti dell'edificio in cui è installata o dagli edifici circostanti?*, questione relativa alla valorizzazione architettonica ed estetica dell'inverdimento, anche al fine di accrescerne il valore di mercato.

- 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) *La copertura ha giacitura piana o 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 relativamente alla qualità dell'aria che caratterizza l'ambiente circostante?* 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.
- È evidente che una copertura verde può essere realizzata con diversi obiettivi finali²³. È quindi innanzitutto necessario definire l'obiettivo, la funzione prevalente della copertura, anche in funzione delle condizioni ambientali e climatiche del sito.

È possibile dunque delineare una *check-list* per la progettazione di una soluzione di copertura verde.

- 1) Definizione della finalità della copertura, con riferimento – non esaustivo – ai requisiti di fruibilità, aspetto e percezione visiva, controllo delle acque meteoriche, contenimento dei consumi energetici, e individuazione degli obiettivi prioritari.
- 2) Definizione degli schemi funzionali più adatti al contesto, considerando la giacitura della copertura e effettuando una prima valutazione cautelativa dei carichi indotti sulla struttura portante dell'edificio.
- 3) Individuazione delle condizioni climatiche e meteorologiche del sito, inclusa la valutazione dei carichi variabili di neve e vento che si presume interesseranno l'elemento tecnico di copertura.
- 4) Scelta della classificazione funzionale della copertura (con / senza funzione di accumulo idrico; configurazione a tetto caldo / tetto rovescio / tetto sandwich) e definizione della successione degli strati funzionali.
- 5) Individuazione della specie vegetale da impiegare in base alle condizioni climatiche del sito, alle esigenze d'aspetto, all'onerosità ed alla frequenza delle azioni di manutenzione; tale scelta porta all'individuazione del suolo di coltura, ed influirà di conseguenza sui carichi agenti in copertura (peso della vegetazione

al suo massimo sviluppo atteso, carico permanente indotto dallo strato colturale nelle condizioni di saturazione) e sulla necessità di prevedere uno specifico impianto di irrigazione per la regolazione del contenuto d'acqua disponibile alla vegetazione.

- 6) Definizione delle prestazioni, dimensionamento degli strati funzionali e individuazione delle conseguenti caratterizzanti (resistenza a compressione, trazione, schiacciamento e punzonamento e stabilità dimensionale, resistenza agli agenti biochimici, tenuta all'acqua ed all'aria, volume d'acqua disponibile e controllo della capacità drenante, etc.). In questa fase devono essere altresì definiti gli accorgimenti specifici per la soluzione adottata (zavorramenti, ancoraggi, rompitratta, etc.).
- 7) Definizione della soluzione tecnologica, dei materiali e degli elementi tecnici da impiegare.
- 8) Valutazione delle prestazioni complessive dell'elemento tecnico e sua classificazione prestazionale.
- 9) Programmazione delle manutenzioni.

Nel caso di intervento di riqualificazione funzionale di una copertura esistente, devono essere valutate in modo particolarmente attento le prestazioni richieste allo strato portante, stimandone la capacità portante residua ai carichi agenti alla luce della vigente normativa in materia di sicurezza delle costruzioni.

2.4. Bibliografia

- Abram P., *Verde pensile in Italia e in Europa*, il Verde Editoriale, Milano, 2006. ISBN: 88-86569-24-6.
- Fiori M. (a cura di), *Coperture a verde. Ricerca, progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile*. Hoepli Editore, Milano, 2011. ISBN: 978-88-203-4159-6.
- Grosso M., Peretti G., Piardi S., Scudo G., *Progettazione ecocompatibile dell'architettura*. Sistemi Editoriali, Napoli, 2005. ISBN: 978-88-513-0286-3.
- Provincia Autonoma di Bolzano, *Linee guida per la gestione sostenibile delle acque meteoriche*, a cura di P. Kompatscher, 2008. Documento disponibile all'indirizzo www.provincia.bz.it/tutelaacque
- Strom S., Nathan K., Woland J., *Site engineering for landscape architects*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 5th edition, 2009. ISBN: 978-0-470-13814-4.
- UNI 11277:2008 "Sostenibilità in edilizia. Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione".

NOTE AL CAPITOLO 2

¹ La normativa tecnica UNI 8178 individua coperture continue e discontinue. Nella prima famiglia, il requisito di tenuta all'acqua è assicurato indipendentemente dalla pendenza conferita alla superficie, prevedendo opportuni elementi tecnici; nella seconda, il requisito è soddisfatto in funzione della pendenza della copertura in relazione alla tipologia di elemento tecnico impiegato.

² UNI 8627:1984 – *Edilizia. Sistemi di copertura. Definizione e classificazione degli schemi funzionali, soluzioni conformi e soluzioni tecnologiche*, par. 7.1.2.

³ UNI 11235:2007 – *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*.

⁴ UNI 11235, par. 6.

⁵ *Ibidem*.

⁶ UNI 8289:1981 – *Edilizia. Esigenze dell'utenza finale. Classificazione*.

⁷ UNI 8290:1983 parte 2 – *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Analisi dei requisiti*.

⁸ UNI 11277:2008 – *Sostenibilità in edilizia. Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione*.

⁹ Valore di variabili e/o di attributi, univocamente individuati, che definisce o delimita la risposta progettuale a una o più specificazioni di prestazione.

¹⁰ Espressione del requisito secondo valori di variabili e/o attributi univocamente determinati che definiscono l'obiettivo di qualità da perseguire attraverso il progetto.

¹¹ Fiori M., 2011, pag. 3.

¹² Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 “*Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*”.

¹³ Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 2 febbraio 2009 “*Istruzioni per l'applicazione delle <<Nuove Norme Tecniche per le costruzioni>> di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008*”.

¹⁴ UNI EN ISO 13788:2013 – *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia. Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale. Metodi di calcolo*.

¹⁵ Fiori M., 2011, pag. 9.

¹⁶ Si considerano quindi anche i contributi, frequentemente peggiorativi, delle aperture praticate in copertura e dei raccordi strutturali con le pareti perimetrali.

¹⁷ Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri 5 dicembre 1997 “*Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*”.

¹⁸ Si evidenziano anche i limiti più restrittivi per l'accesso alle detrazioni fiscali di cui al D.M. 26 gennaio 2010.

¹⁹ Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, “*Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*”.

²⁰ *Ivi*, art. 2.

²¹ UNI 11277, par. 5.10.

²² Provincia Autonoma di Bolzano, 2008, pag. 9.

²³ Strom S. et al, 2009, pag. 181.

Capitolo 3

Le prestazioni connotanti delle coperture verdi

Raul Berto, Giovanni Cechet, Carlo Antonio Stival

Per la realizzazione di una copertura verde è necessario porre particolare attenzione alla scelta ed al posizionamento degli strati funzionali che caratterizzano le diverse soluzioni tecnologiche. La sola scelta relativa allo strato colturale non assicura il corretto funzionamento alla copertura verde; al fine di evitare processi successivi di saturazione e siccità che porterebbero a condizioni di vita non accettabili per la vegetazione, è necessario che l'elemento tecnico di copertura disponga di acqua ed elementi nutritivi in quantità sufficienti, prevedendo l'allontanamento delle quantità eccedenti. Inoltre sono richieste precise prestazioni meccaniche quali la stabilità sotto l'azione del vento, il controllo dei carichi statici e la protezione dall'azione delle radici sugli strati sottostanti.

Individuati i requisiti pertinenti di una copertura verde, si procede in questo capitolo a individuare gli strati funzionali caratterizzanti le soluzioni conformi. Esse sono

caratterizzate da alcuni parametri tecnici derivanti dai requisiti connotanti individuati al capitolo precedente:

- 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, come ad esempio la completa 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 un impianto di irrigazione.

3.1. Soluzioni tecnologiche

Si riportano ora le soluzioni tecnologiche tipiche dei sistemi di copertura verde. Le soluzioni sono razionalizzate in un albero dei vari sistemi, risultato di una ricerca e sintesi dei sistemi di vari produttori presenti sul mercato.

Ogni soluzione tecnologica è identificata da un codice che ne sintetizza le caratteristiche, di cui si riporta la legenda nella tabella 3.1.

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

Tabella 3.1 – Legenda del sistema di nomenclatura dei sistemi di copertura verde riportati nell'abaco delle soluzioni tecnologiche.

3.1.1. *Sistema Es.A.Da.Is.*

Verde estensivo su copertura piana, strato di isolamento termico, drenaggio artificiale

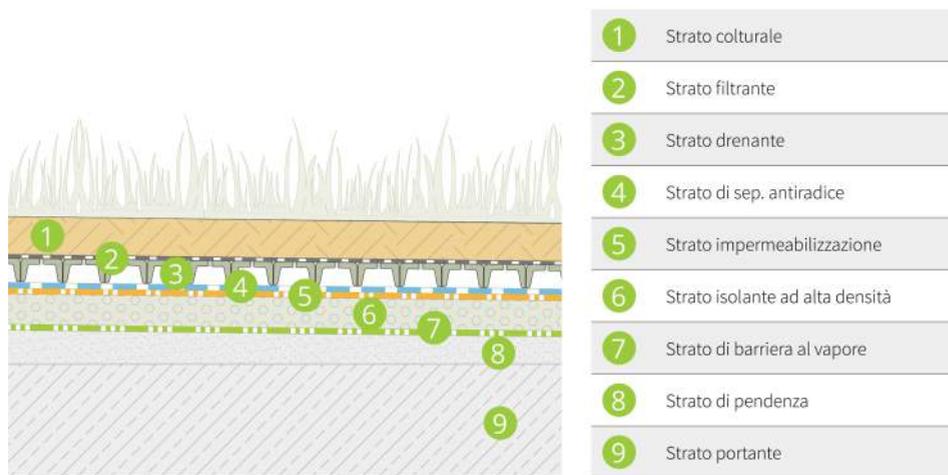


Figura 3.1 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde estensivo su copertura piana con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio in materiale artificiale.

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 impianto di irrigazione.



Figura 3.2 – Aspetto dello strato di vegetazione di una copertura verde estensiva (fonte www.daku.it).

3.1.1.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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

Tabella 3.1 – Caratteristiche tecniche del sistema verde estensivo piano (fonte www.daku.it).

3.1.1.2. Caratteristiche degli strati di finitura

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 di separazione antiradice		PVC

Tabella 3.2 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde estensivo piano (fonte www.daku.it).

3.1.1.3. Metodo di posa

1. Verifica integrità e tenuta all'acqua della stratigrafia termo-impermeabile,
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 risvoltato in verticale per altezza pari allo spessore del substrato;
4. realizzazione di protezione della stratigrafia impermeabile perimetrale mediante posa di ghiaia;
5. posa dello strato colturale dello spessore previsto e livellamento;
6. concimazione;
7. semina di miscela di sedum mediante spaglio delle talee e successivo interrimento manuale.

3.1.2. Sistema Es.B.Da.Is

Verde estensivo su copertura inclinata, strato di isolamento termico, drenaggio artificiale

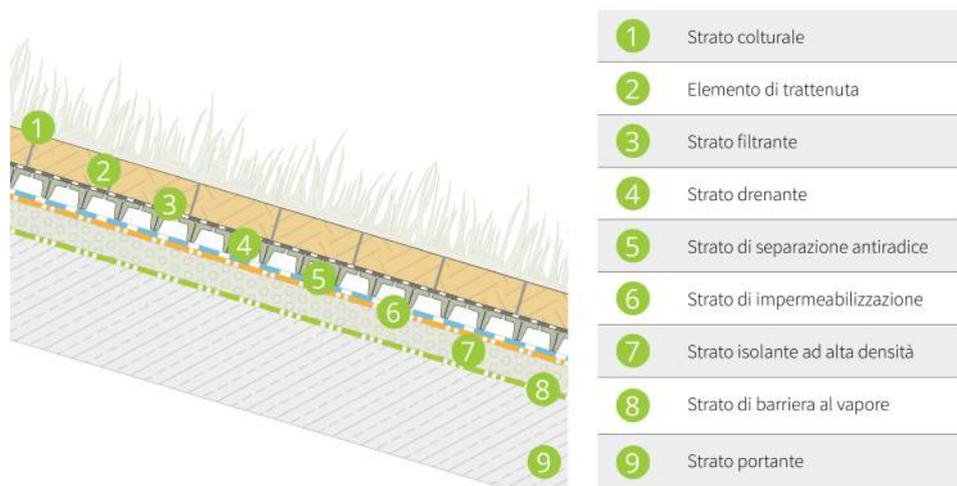


Figura 3.3 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde estensivo su copertura inclinata con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio in materiale artificiale.

Nel caso di coperture inclinate la realizzazione dell'inverdimento raggiunge un elevato grado di complessità con conseguente incremento degli oneri manutentivi. Infatti, al soddisfacimento dei normali requisiti del verde estensivo su coperture piane, si aggiungono le esigenze di stabilità e sicurezza del sistema, nonché di regolare smaltimento delle acque. Per questi motivi, in fase progettuale si dovrà prestare molta attenzione alle caratteristiche dei sistemi di trattenimento, al sistema di drenaggio in relazione alle dimensioni delle falde, e alla tipologia della vegetazione.

3.1.2.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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

Tabella 3.3 – Caratteristiche tecniche del sistema verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.2.2. Caratteristiche degli strati di finitura

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

Tabella 3.4 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.2.3. Metodo di posa

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.

3.1.3. Sistema Il.A.Dn.Is

Verde intensivo leggero, copertura piana, isolamento termico, drenaggio naturale



Figura 3.4 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura piana con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio naturale.

3.1.4. *Sistema Il.A.Dn.Ns*

Verde intensivo leggero, copertura piana, drenaggio naturale

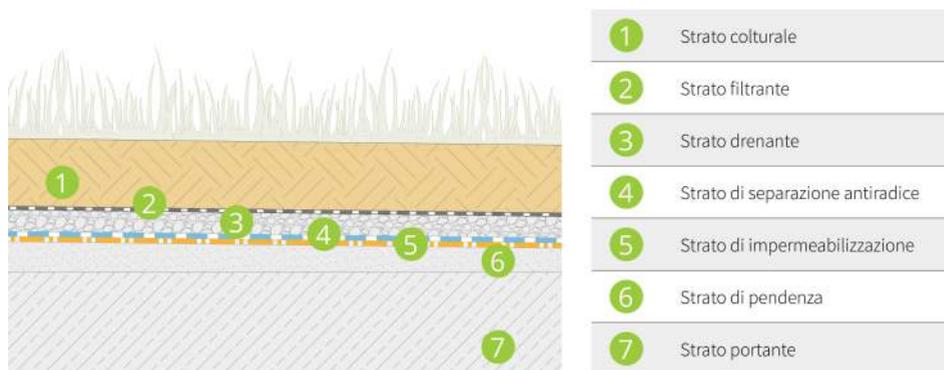


Figura 3.5 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura piana e strato di drenaggio naturale.

I sistemi a verde intensivo leggero appena riportati, i quali differiscono tra loro solo per la presenza o meno di uno strato d'isolamento termico nella soluzione tecnologica della copertura, 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 spessori e peso complessivo più elevati rispetto alle soluzioni precedentemente viste. La vegetazione è composta da una miscela di graminacee ma per spessori di substrato sempre maggiori, queste soluzioni sono in grado di ospitare anche arbusti e alberature, permettendo così un'integrazione paesaggistica molto efficace.



Figura 3.6 – Aspetto di una copertura verde intensiva piana (fonte www.daku.it).

3.1.4.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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	dipendente dalla vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

Tabella 3.5 – Caratteristiche tecniche sistema verde intensivo leggero piano (fonte www.daku.it).

3.1.4.2. Caratteristiche degli strati di finitura

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

Tabella 3.6 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.4.3. Metodo di posa

1. verifica integrità e tenuta all'acqua della stratigrafia termo-impermeabile.
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.

3.1.5. **Sistema Il.A.Da.Is**

Verde intensivo leggero, copertura piana, isolamento termico, drenaggio artificiale

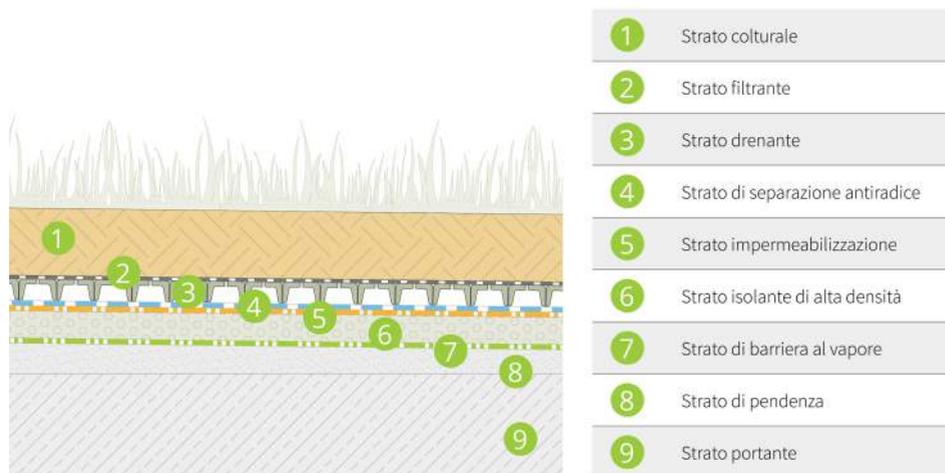


Figura 3.7 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura piana con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio artificiale.

3.1.6. **Sistema Il.A.Da.Ns**

Verde intensivo leggero, copertura piana, drenaggio artificiale

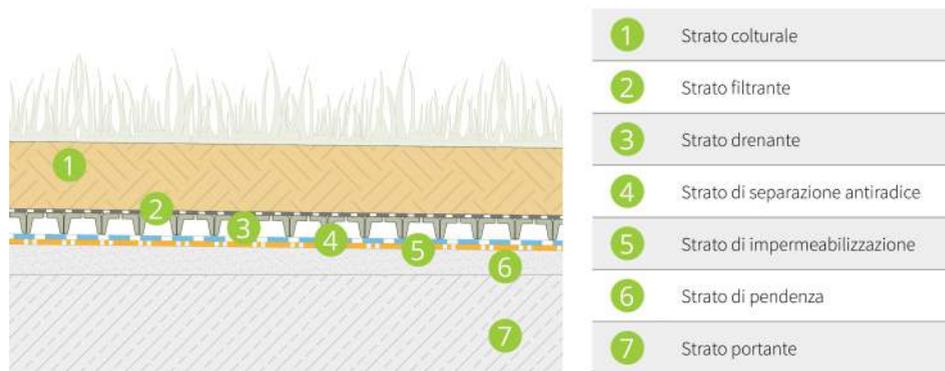


Figura 3.8 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura piana e strato di drenaggio artificiale.

Gli ultimi due sistemi di cui si sono appena riportate le soluzioni tecnologiche in Figura 3.7 e Figura 3.8, hanno caratteristiche del tutto analoghe alle precedenti trattate nei paragrafi 3.1.3 e 3.1.4, differiscono solamente per lo strato drenante, che in questi due casi è di tipo artificiale.

3.1.6.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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	dipendente dalla vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

Tabella 3.7 – Caratteristiche tecniche del sistema verde intensivo leggero piano (fonte www.daku.it).

3.1.6.2. Caratteristiche degli strati di finitura

n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	150÷250 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice)
2	strato filtrante	1,45 mm	geotessile
3	strato drenante naturale	62 mm	polistirene espanso sinterizzato
4	strato di separazione antiradice		PVC

Tabella 3.8 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.6.3. Metodo di posa

Il metodo di posa di questi due sistemi è del tutto analogo a quello trattato nei paragrafi paragrafi 3.1.3 e 3.1.4.

3.1.7. Sistema Il.B.Dn.Is

Verde intensivo leggero, copertura inclinata, isolamento termico, drenaggio naturale

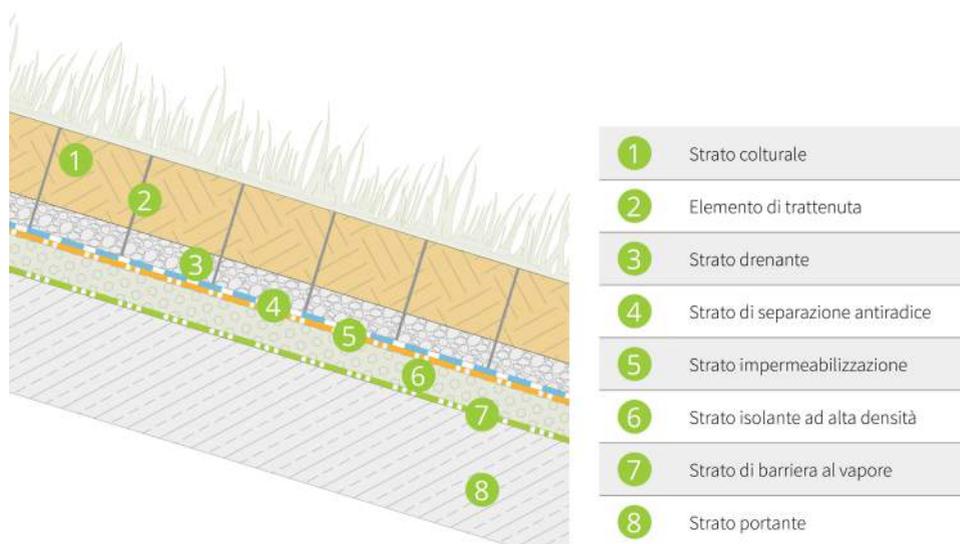


Figura 3.9 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura inclinata con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio naturale.

3.1.8. Sistema Il.B.Dn.Ns

Verde intensivo leggero, copertura inclinata, drenaggio naturale



Figura 3.10 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura inclinata e strato di drenaggio naturale.

I sistemi a verde intensivo leggero su copertura inclinata appena riportati, differiscono tra loro solo per la presenza o meno di uno strato d'isolamento termico nella soluzione tecnologica della copertura. 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.

3.1.8.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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	dipendente dalla vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

Tabella 3.9 – Caratteristiche tecniche del sistema verde intensivo leggero inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.8.2. Caratteristiche degli strati di finitura

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

Tabella 3.10 – Caratteristiche strati di finitura verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.8.3. Metodo di posa

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.

3.1.9. **Sistema Il.B.Da.Is**

Verde intensivo leggero, copertura inclinata, isolamento termico, drenaggio artificiale

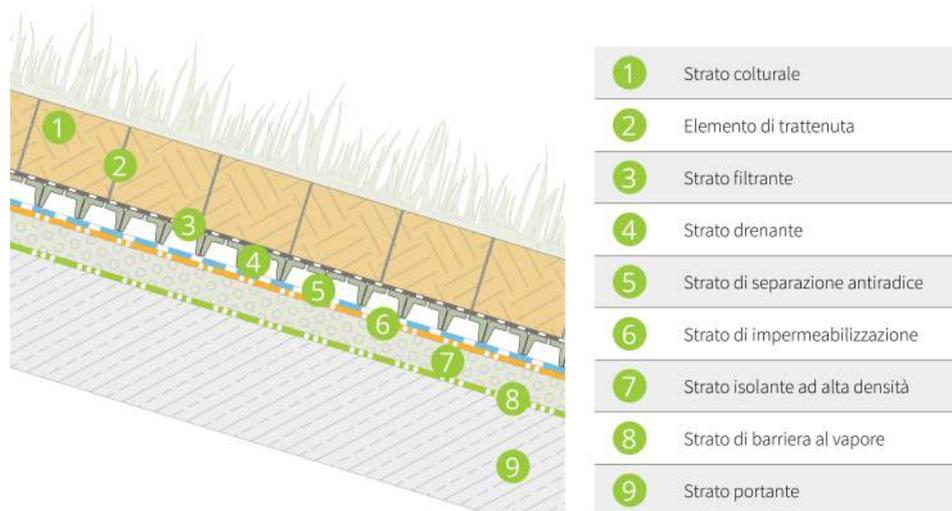


Figura 3.11 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura inclinata con presenza di strato di isolamento termico e strato di drenaggio artificiale.

3.1.10. **Sistema Il.B.Da.Ns**

Verde intensivo leggero, copertura inclinata, drenaggio artificiale

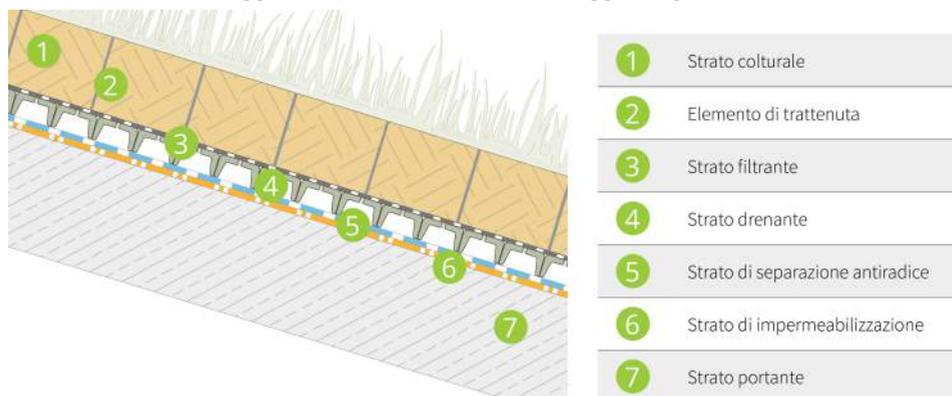


Figura 3.12 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo leggero su copertura inclinata e strato di drenaggio artificiale.

Gli ultimi due sistemi di cui si sono appena riportate le soluzioni tecnologiche in Figura 3.11 e Figura 3.12, hanno caratteristiche del tutto analoghe alle precedenti trattate nei paragrafi 3.1.7 e 3.1.8, differiscono solamente per lo strato drenante, che in questi due casi è di tipo artificiale.

3.1.10.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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	4÷12 l/m ²
Manutenzione	dipendente dalla vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

Tabella 3.11 – Caratteristiche tecniche del sistema verde intensivo leggero piano (fonte www.daku.it).

3.1.10.2. Caratteristiche degli strati di finitura

n.	descrizione	spessore	materiale
1	strato colturale	150÷250 mm	substrato di materiale vulcanico (lapillo, pomice)
2	strato filtrante	1,45 mm	geotessile
3	strato drenante naturale	62 mm	polistirene espanso sinterizzato
4	strato di separazione antiradice		PVC

Tabella 3.12 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde estensivo inclinato (fonte www.daku.it).

3.1.10.3. Metodo di posa

Il metodo di posa di questi due sistemi è del tutto analogo a quello trattato nei paragrafi 3.1.7 e 3.1.8.

3.1.11. Sistema Ip.A.Dn.Ns

Verde intensivo pesante, copertura piana, non isolata, drenaggio naturale

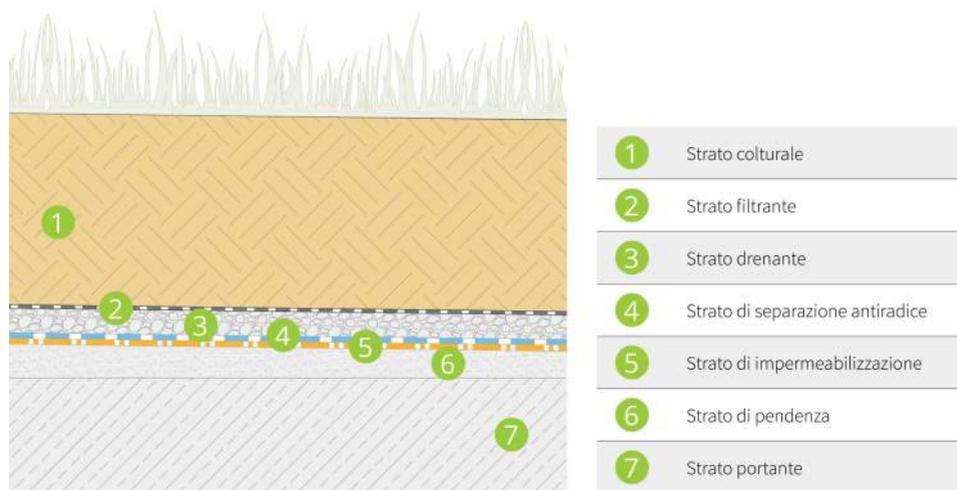


Figura 3.13 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo pesante su copertura piana e strato di drenaggio naturale.

3.1.12. Sistema Ip.A.Da.Ns

Verde intensivo pesante, copertura piana, non isolata, drenaggio artificiale



Figura 3.14 – Soluzione tecnologica tipo per un sistema di verde intensivo pesante su copertura piana e strato di drenaggio artificiale.

Queste soluzioni differiscono tra loro per la presenza di uno strato drenante naturale o artificiale. Non viene presa in considerazione l'ipotesi di una copertura isolata termicamente in quanto le soluzioni intensive pesanti vengono solitamente utilizzate sulle coperture della autorimesse interrata. Tali sistemi sono caratterizzati da spessori e

pesi elevati, nonché frequente e regolare manutenzione. Inoltre, non si prevede una riserva idrica in quanto la risalita capillare è più difficile rispetto a substrati leggeri di minor spessore.



Figura 3.15 – Aspetto di una copertura verde intensiva pesante (fonte www.daku.it).

3.1.12.1. Caratteristiche tecniche del sistema

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	dipendente dalla vegetazione
Impianto di irrigazione	necessario
Calpestabilità	ottima

Tabella 3.13 – Caratteristiche tecniche del sistema verde intensivo pesante (fonte www.daku.it).

3.1.12.2. Caratteristiche degli strati di finitura

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 naturale	50 mm	sassi e pietrisco
	strato drenante artificiale	47 mm	polistirene espanso sinterizzato
4	strato di separazione antiradice		PVC

Tabella 3.14 – Caratteristiche degli strati di finitura del sistema verde intensivo pesante (fonte www.daku.it).

3.1.12.3. Metodo di posa

1. verifica integrità e tenuta all'acqua della stratigrafia termo-impermeabile;
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.

3.2. Strati funzionali caratterizzanti le coperture verdi

Il complesso sistema tecnologico corrispondente ad una copertura verde, a partire dal 1980 circa, 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 a scala di singolo strato funzionale. Si evidenzia, a tal proposito, l'emanazione della norma tecnica UNI 11235 che costituisce, ad oggi in Italia, il principale riferimento tecnico per la progettazione, la realizzazione e la gestione delle coperture verdi.

Individuate le esigenze riferibili alle coperture verdi e la classificazione nelle categorie di verde estensivo e verde intensivo, si procede all'individuazione degli strati funzionali che permettono la definizione di soluzioni tecnologiche¹. La corrispondenza tra requisiti connotanti e strati funzionali non è diretta e biunivoca, in quanto le prestazioni offerte possono essere afferibili ad un singolo strato o all'interazione di più strati nella soluzione conforme, in dipendenza altresì della tipologia di copertura verde. Più di una prestazione, inoltre, può essere assolta da un singolo strato funzionale.

Seguendo lo schema proposto dalla norma UNI 11235, si individuano strati primari, strati secondari e strati accessori, tipici solo di alcune soluzioni di copertura verde.

Gli strati primari o fondamentali caratterizzanti una copertura verde, necessari a garantirne il corretto funzionamento sono così individuati, procedendo dall'esterno verso l'interno di una generica soluzione:

- 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.

Gli strati complementari in una copertura verde, che non necessariamente sono presenti in tutte le soluzioni, sono invece i seguenti:

- di ventilazione;
- di barriera al vapore;
- di continuità e regolarizzazione (in quantità anche superiore a uno);
- di pendenza;
- di supporto;
- di ripartizione dei carichi.

In aggiunta agli strati funzionali primari e secondari, sono da considerarsi anche i seguenti 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:

- strato o impianto di irrigazione;
- strato o impianto per lo smaltimento delle acque meteoriche;
- strati di ancoraggio per la vegetazione;
- strati per il trattenimento dello strato colturale;
- strati caratterizzati da comportamento antincendio.

La successione degli strati funzionali di una copertura verde deve innanzitutto permettere il soddisfacimento delle condizioni ideali allo sviluppo della vegetazione, in termini di adeguatezza meccanica a sostegno delle piante, di controllo del regime idrico dello strato colturale, di confinamento dell'apparato radicale sviluppato dalle specie vegetali (determinante in questi ambiti è il ruolo svolto dallo strato drenante), garantendo al contempo il soddisfacimento di quelle prestazioni che accomunano una copertura verde ad una di tipo "tradizionale".

La norma UNI 11235 definisce le tipologie più diffuse allo stato dell'arte; l'insieme di prestazioni da garantire è espresso in base a specifiche norme di riferimento, in cui sono descritte le procedure di determinazione dei livelli prestazionali richiesti. A proposito di

questo è importante sottolineare il ruolo svolto dal codice di buona pratica UNI 11235 nella progettazione e realizzazione di coperture verdi:

- definisce soglie di accettabilità funzionale e prestazionale delle coperture verdi, individuando le norme di riferimento per la determinazione dei requisiti minimi dei singoli strati funzionali, le corrette modalità di posa in opera e la progettazione degli elementi di dettaglio;
- è riferito al contesto italiano, e in tal modo permette di evitare l'adozione di soluzioni tecnologiche non adatte al contesto climatico e tecnologico del nostro Paese;
- costituisce utile riferimento in caso di eventuali controversie.

<p>STRATI FUNZIONALI PRIMARI O FONDAMENTALI</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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
<p>STRATI FUNZIONALI SECONDARI O COMPLEMENTARI</p>	<ul style="list-style-type: none"> • di ventilazione • di barriera al vapore • di continuità e regolarizzazione • di pendenza • di supporto • di ripartizione dei carichi
<p>STRATI FUNZIONALI ACCESSORI</p>	<ul style="list-style-type: none"> • impianto di irrigazione • impianto di smaltimento delle acque meteoriche • di ancoraggio per la vegetazione • per il trattamento dello strato colturale • di compartimentazione antincendio

Prospetto 3.2 – Individuazione di diversi aspetti riconducibili a specifiche classi di esigenza proprie della tecnologia delle coperture verdi.

<i>CLASSIFICAZIONE UNI 11235:2007</i>	<i>STRATO FUNZIONALE</i>	<i>MATERIALI IMPIEGABILI</i>	<i>CARATTERIZZAZIONE PROGETTUALE</i>
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 materiali geosintetici	prevenzione dell'occlusione dello strato di drenaggio necessaria resistenza al punzonamento e ad agenti biochimici
	DRENAGGIO E ACCUMULO IDRICO	aggregati naturali elementi preformati materiali geosintetici	dimensionato secondo la capacità drenante richiesta necessaria resistenza a trazione e compressione, agli agenti chimici e biologici
	ANTIRADICE	membrane bituminose ad armatura in PVC o metallica	integrato allo strato di tenuta 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 polistirene espanso fibra di sughero	necessaria buona resistenza a compressione 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

Tabella 3.15 – Strati funzionali primari e secondari di una copertura verde (adattamento e integrazione da UNI 11235, par. 5).

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

Tabella 3.16 – Strati funzionali accessori di una copertura verde (adattamento e integrazione da UNI 11235, par. 5).

3.2.1. Strati funzionali primari

3.2.1.1. Strato vegetale

Le finalità della progettazione dello strato di vegetazione sono volte a stabilire la natura – determinata in base al contesto climatico, alla tipologia di inverdimento, alla pendenza del manto ed agli eventuali aspetti funzionali –, la posizione e la densità, le condizioni di manutenzione delle specie vegetali. In particolare, vi è un rapporto diretto tra la vegetazione prescelta, lo strato colturale previsto e le modalità di irrigazione previste, in quanto è cruciale il comportamento dell'elemento tecnico nei confronti dell'elemento acqua, inteso sia quale mezzo di sostentamento degli apparati vegetali, sia quale strategia di controllo delle acque meteoriche.

Un altro aspetto che indirizza la scelta della vegetazione sono la tipologia e la frequenza degli interventi manutentivi da prevedere; ad esempio, una vegetazione di tipo arbustivo con portamento di tipo spogliante può richiedere diversi interventi manutentivi nella stagione fredda, con conseguente incremento degli oneri di gestione economica della copertura verde. La medesima situazione può profilarsi in merito agli interventi di sfalcio dei tappeti erbosi e successiva rimozione degli scarti verdi, che in estate devono avvenire con la frequenza di 2÷3 settimane².

Il contesto ambientale agisce su stato e salute della vegetazione in due ambiti:

- in merito al sito di installazione della copertura, devono essere considerate eventuali situazioni perturbanti l'aria esterna prossime all'installazione, quali ad esempio bocchette di espulsione di aria esausta o più gravemente inquinata, prevedendo quindi specie vegetali capaci di resistere in queste condizioni. Altresì, fenomeni di ombreggiamento netto e prolungato possono modificare i flussi radiativi precludendo alla vegetazione la possibilità di godere delle proprie condizioni di sviluppo più idonee;
- con riferimento al clima, stante la separazione della vegetazione rispetto al suolo naturale, è necessario privilegiare specie vegetali capaci di resistere alla siccità. Questa scelta è rafforzata da fenomeni quali l'accumulo di calore da parte dello strato colturale, l'esposizione all'irraggiamento solare riflesso, l'effetto disperdente del vento sulla ritenzione idrica dell'elemento tecnico. In particolari situazioni di forte ventosità è auspicabile provvedere alla protezione del manto vegetale mediante la disposizione di specie capaci di modulare i flussi d'aria, oppure ricorrendo ad elementi protettivi specificamente dedicati. Tali osservazioni valgono soprattutto nel primo periodo di installazione, quando gli apparati sono confinati nello strato colturale e non godono di solido vincolo allo strato drenante³.

La tipologia e la consistenza della vegetazione caratterizza l'aspetto visivo e la percezione sensoriale di una copertura verde; inoltre, la vegetazione previene lo smottamento e l'erosione dello strato colturale e fornisce sostentamento e protezione per diverse specie animali, soprattutto artropodi e uccelli.

Il sedum⁴ è la tipologia vegetale maggiormente impiegata nelle coperture verdi, sia di tipo estensivo sia in quelle intensive di tipo misto, grazie all'elevata autonomia idrica che lo rende capace di resistere ai periodi siccitosi e di svilupparsi con minime necessità manutentive. Inoltre tali specie succulente possono immagazzinare riserve idriche nei propri apparati fogliari, mantenendo un congruo livello di umidità.



Figura 3.16 – Copertura verde estensiva a sedum (fonte www.daku.it).

Le erbe tappezzanti offrono le migliori prestazioni di qualità visiva in contrasto con altre specie, incrementando la quota di biodiversità all'inverdimento; è molto significativa la sinergia con le specie succulente in quanto le tappezzanti possono godere dell'eccesso di umidità, senza il quale necessitano di irrigazione integrativa specialmente nei periodi estivi⁵. L'inverdimento estensivo è ottenibile con numerose piante erbacee perenni ed arbustive tappezzanti, alcune delle quali aromatiche.

SPECIE VEGETALE	INVERDIMENTO	SPESSORE COLT. [cm]	TIPOLOGIA	STAGIONALITÀ
SEDUM	estensivo	8÷10	tappezzante con fioritura	primavera/estate
TIMO		8÷10	tappezzante	estate
GERANIO		10÷15	fogliame con fiori	primavera
PEVERINA T.		10÷15	fogliame con fiori	tarda primavera
CARICE		10÷15	spighe	primavera
SALVIA	intensivo leggero	15	spighe	estate
GAROFANO		15	fiori	estate
FESTUCA		15	tappezzante	sempreverde
LAVANDA		15	aromatica	sempreverde
PHOTINIA F.		10÷15	cespuglio sempreverde	estate (fiori)
ACERO	intensivo	30÷50	foglia caduca	autunno (fiori)
PRUNUS		30÷40	foglia caduca / sempreverde	variabile

Tabella 3.17 – Relazione tra le caratteristiche di alcune specie vegetali e lo spessore dello strato colturale richiesto (adattamento da Consorti L., in Poli T., Verde in quota, in Modulo, n. 324, pagg. 786-791).

Nel clima mediterraneo, caratterizzato da un periodo secco nella stagione estiva, accompagnato da elevate temperature e notevoli apporti radiativi di origine solare, è necessario assicurare un adeguato sostentamento idrico alla vegetazione. In assenza di impianto d'irrigazione, è necessario conoscere la capacità di risposta delle piante a condizioni di stress idrico, individuando quindi nello strato colturale e nello strato drenante i componenti / elementi tecnici capaci di rendere disponibile l'acqua alla vegetazione, pur mantenendo contenuto il peso complessivo dell'elemento tecnico di copertura.

Il parametro botanico per valutare la resistenza di una specie allo stress idrico è la tensione intra-xilematica ψ_{50} (espressa in [MPa]) che causa il dimezzamento della capacità di trasporto dell'acqua nel fusto o nello stelo della pianta; tanto minore è tale valore, tanto maggiore è la capacità della specie di resistere a periodi, anche protratti, di stress idrico.

Nelle piante vascolari⁶, il trasporto dell'acqua dipende dal regime di gradienti di pressione idrostatica negativa presente nello xilema ed attivata dalla perdita d'acqua per traspirazione. La tensione ψ tipica della pianta dipende:

- dalla velocità di traspirazione (a sua volta dipendente da umidità e temperatura dell'aria, nonché dalla radiazione solare);
- dal contenuto d'acqua nello strato colturale;
- infine, dalla resistenza al passaggio dell'acqua da quest'ultimo, tramite lo stelo, fino all'apparato fogliare.

Poiché l'acqua presente nello strato colturale è anch'essa soggetta a gradienti negativi, il suo trasporto nella pianta è assicurato solo se la tensione nel suolo è superiore a quella nella pianta; un suolo disidratato, dunque, può mettere la pianta in condizioni tali da non poter più procedere all'assorbimento dell'acqua.

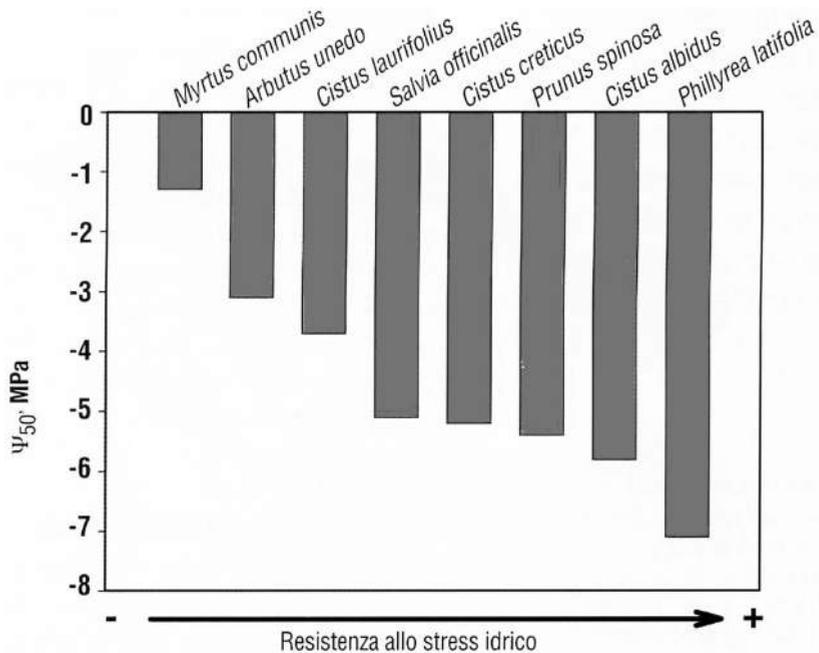


Figura 3.17 – Resistenza allo stress idrico riscontrabile in alcune specie vegetali tipiche dell'area mediterranea secondo l'indicatore di tensione intra-xilematica ψ_{50} . A valori maggiori in valore assoluto corrisponde una maggiore capacità resistente della specie a stress idrici intensi o prolungati (fonte Nardini A. et al., 2012).

È possibile definire curve di vulnerabilità delle specie vegetali che permettono di individuare il parametro Ψ_{50} . Tale parametro risulta significativo in quanto la relazione che lega la perdita di conduttività idraulica e il potenziale idrico dello xilema è di tipo sigmoidale⁷: fissando la perdita di capacità di trasporto al 50%, si individua la zona della curva in cui la derivata prima è massima, nella quale cioè si verificano non trascurabili perdite di conduttività idraulica pur mantenendo contenute le variazioni del potenziale idrico dello xilema. Attualmente il parametro Ψ_{50} è il più impiegato tra i criteri fisiologici per effettuare la selezione delle specie adatte a coperture verde.

In zona mediterranea, è necessario ricorrere a specie caratterizzate da valori critici di Ψ_{50} fortemente negativi (oltre i quali la pianta appassisce): queste specie utilizzano una maggiore quantità d'acqua proveniente dal suolo, sopportando nella stagione estiva i maggiori fenomeni traspirativi innescati dall'elevata temperatura o da una maggiore irradiazione solare.

Il parametro Ψ_{50} , dal punto di vista botanico, rappresenta un importante indicatore per l'individuazione delle specie vegetali candidabili alla realizzazione di installazioni verde pensile in zona mediterranea⁸.

3.2.1.2. Strato colturale

Lo strato colturale risponde primariamente al requisito di controllo della capacità agronomica.

Esso infatti garantisce l'attecchimento e la stabilità delle piante stesse, soddisfacendo il controllo della capacità agronomica (l'attitudine del sistema a mantenere le condizioni fisico-chimiche e biologiche ideali allo sviluppo corretto del manto di vegetazione). La scelta del substrato più idoneo dipende:

- dalla tipologia di vegetazione da piantumare;
- dalla geometria della copertura;
- dalla climatologia del sito;
- dall'eventuale presenza di un impianto d'irrigazione e/o di uno strato di accumulo.

Lo spessore dello strato e la sua composizione fisica e chimica risultano quindi strettamente correlati alle essenze scelte.

Lo strato colturale è caratterizzato da due principali set di parametri caratteristici:

- parametri fisici quali densità, granulometria, permeabilità all'acqua, volume d'acqua massimo che può essere trattenuto dal substrato e volume d'aria massimo presente in condizioni di saturazione;
- parametri chimici quali l'indice pH, la capacità di scambio cationico (CSC), la conducibilità elettrica, la quantità di sostanza organica, la presenza eventuale di macroelementi di potassio, azoto e fosforo.

Particolarmente controllato è il contenuto, nello strato colturale, di materiali estranei (frammenti di vetro, di tessuto, etc.) e di macroelementi nutritivi⁹ quali azoto minerale ed altri elementi solubili in acqua (potassio, fosforo, magnesio, sodio e calcio). Altri parametri connotanti la capacità agronomica si riferiscono al controllo del pH [¹⁰] e della

fitotossicità, mentre la frazione di sostanza organica è stabilità in funzione della densità dello strato e della tipologia di inverdimento. La fertilità chimica del terreno è invece definita mediante l'indice di capacità di scambio cationico, ossia la quantità di cationi che il terreno può trattenere per scambio ionico al fine di rendere disponibile agli apparati vegetali, quali calcio (Ca), magnesio (Mg), potassio (K₂O), azoto ammoniacale (N-NH₄).

<i>TIPO DI VEGETAZIONE</i>	<i>SPESSORE DELLO STRATO COLTURALE [cm]</i>
SEDUM	8
ERBACEE A PICCOLO SVILUPPO	10
GRANDI ERBACEE	15
TAPPETI ERBOSI	15
ARBUSTI DI PICCOLA TAGLIA	20
ARBUSTI DI GRANDE TAGLIA	30
ALBERI DI III GRANDEZZA (SVILUPPO < 10 METRI)	50
ALBERI DI II GRANDEZZA (SVILUPPO 10÷16 METRI)	80
ALBERI DI I GRANDEZZA (SVILUPPO > 16 METRI)	100

Tabella 3.18 – Spessori minimi dello strato colturale in funzione dell'essenza vegetale prevista (fonte UNI 11235, par. 5.5.10).

Con riferimento alle prestazioni idrauliche, devono essere considerate la curva di ritenzione idrica¹¹ e la permeabilità¹², garantendo una porosità non inferiore al 58% per inverdimenti intensivi e del 48% per inverdimenti estensivi¹³.

La composizione dello strato colturale differisce sostanzialmente da quella del terreno da giardinaggio a terra: i terricci impiegati per le coperture verde pensile sono costituiti principalmente da elementi minerali opportunamente frantumati, che conferiscono al materiale per verde pensile una minore densità apparente, una porosità totale sensibilmente più elevata (≈ 75%), una maggiore percentuale di sostanza organica (6÷12 %), un'elevata attitudine drenante in saturazione ed una facile aerabilità dello strato radicale.

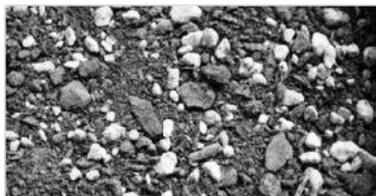


Figura 3.18 – Substrato AgriTERRAM® tipo TV per inverdimenti intensivi leggeri, costituito da una miscela di lapillo, pomice, perlite espansa, torba, corteccia, fibre di cocco, concimi organici e argille speciali (fonte www.perlite.it).



Figura 3.19 – Substrato Optigrün tipo I per inverdimenti estensivi, costituito da lapillo, pomice, laterizio trattato, humus di corteccia, compost vegetale (fonte www.optigrun.it).

In particolare, la granulometria deve presentare un'elevata percentuale di granuli a diametro 2÷4 mm per consentire un impianto di germogli e talee caratterizzato da un contatto più immediato dei peli apicali radicali con le particelle del substrato. Un ottimale substrato da impiegarsi in una copertura verde presenta un basso rapporto carbonio / azoto, elevata capacità di assorbimento delle sostanze nutritive, ridotto contenuto di sale e un limitato fattore di assestamento.

PARAMETRI FISICI	RIFERIMENTO NORMATIVO	U.D.M.	PRESTAZIONE RICHIESTA DALLA NORMA UNI 11235	
			ESTENSIVO	INTENSIVO
Densità apparente	UNI EN 13041	kg/m ³	350÷1000	
Permeabilità all'acqua	DIN 18035	mm/min	> 0,6	> 0,3
Granulometria	D.M. 13/9/1999 D.M. 11/5/1992	-	analisi fuso granulometrico	
Volume d'acqua a pF ₁ ⁽¹⁾	UNI EN 13041	% v/v	> 30	> 40
Volume d'aria a pF ₁ ⁽¹⁾	UNI EN 13041	% v/v	> 18	

⁽¹⁾ È COSÌ INDICATO CHE AL CAMPIONE DI STRATO COLTURALE È APPLICATA UNA PRESSIONE DI ESTRAZIONE DELL'ACQUA PARI A QUELLA DI UNA COLONNA D'ACQUA DI ALTEZZA 0,10 ml.

Tabella 3.19 – Parametri fisici caratterizzanti lo strato colturale (fonte UNI 11235:2007).

PARAMETRI CHIMICI	RIFERIMENTO NORMATIVO	U.D.M.	PRESTAZIONE RICHIESTA DALLA NORMA UNI 11235	
			ESTENSIVO	INTENSIVO
Conducibilità elettrica	UNI EN 13038	mS/m	< 50	
Presenza di macroelementi	UNI EN 13652	-	-	-
pH	UNI EN 13037	-	6,5 ÷ 8,0	5,5 ÷ 8,0
Capacità di scambio cationico	D.M. 11/5/1992	10 ⁻² · ·meq/g	> 8	> 12

Tabella 3.20 – Parametri chimici caratterizzanti lo strato colturale (fonte UNI 11235:2007).

Dato il notevole carico agente in copertura relazionabile al peso specifico ed allo spessore dello strato colturale, nelle zone ad elevato rischio sismico sono frequentemente adottati strati in materiale granulare, contenenti lapilli, pomici oppure laterizio frantumato, arrotondato e vagliato, proveniente dalla demolizione di coperture esistenti, così da ridurre il peso complessivo della copertura.

Con riferimento al sostentamento della vegetazione, a parità di peso specifico è opportuno privilegiare strati colturali capaci di garantire quantità d'acqua disponibile alla vegetazione superiori rispetto al suolo vegetale (valore guida 0,35 g·g⁻¹), oltre che un elevato contenuto d'acqua. Poiché è necessario contenere lo spessore dello strato colturale – al fine di ridurre i carichi agenti in copertura e i costi di installazione – si possono adottare elementi tecnici di accumulo di minor peso, facilmente accessibili dagli apparati radicali: al di sotto dello strato colturale sono disponibili tessuti in polimeri idrofili capaci di accumulare e detenere elevati volumi d'acqua, se rapportati al proprio peso a secco¹⁴.

3.2.1.3. Strato filtrante

Funzione dello strato filtrante è impedire che particelle solide lascino lo strato colturale e pervengano allo strato drenante per gravità occludendolo in parte o comunque riducendone le prestazioni, permettendo al contempo il passaggio degli apparati radicali ed anzi fornendo loro ancoraggio. Le principali tipologie disponibili sul mercato sono:

- aggregati granulari, quali argilla o perlite espansa, laterizi frammentati, composti naturali di origine vulcanica;
- geotessili, tessuti o non tessuti.

I principali parametri che caratterizzano lo strato filtrante sono la resistenza al punzonamento, la resistenza a trazione nelle due direzioni, la deformabilità ai carichi d'esercizio, la resistenza agli agenti biochimici dovuti all'inverdimento, infine la permeabilità all'acqua, valutata secondo passanti a filtri e setacci (per aggregati granulari tipicamente > 3 mm/sec), o in base all'apertura dei pori (per i geotessili solitamente > 1 mm/sec).

3.2.1.4. Strato drenante e di accumulo idrico

Lo strato drenante è preposto all'allontanamento delle acque meteoriche o d'eccesso d'irrigazione presenti nella copertura, in particolare al perimetro delle copertura stessa, interessato da un maggiore carico idrico. Inoltre questo strato funge da supporto strutturale agli strati soprastanti, consentendo la ventilazione ipogea degli apparati radicali e prevenendone l'asfissia. Per svolgere la propria funzione, è necessario che gli strati soprastanti possiedano una maggiore permeabilità all'acqua.

La portata d'acqua che uno strato drenante può allontanare è determinata in base alla legge di Darcy per cui, note la permeabilità sul piano orizzontale k_{hor} dello strato drenante, la sua pendenza i , l'area drenante A_{DR} (larghezza volte spessore), è:

$$Q_{DR} = k_{hor} \cdot i \cdot A_{DR} \left[\frac{m^3}{sec} \right]$$

Tale valore Q_{DR} deve essere superiore alla portata di progetto Q_{DES} , determinata conoscendo la piovosità massima annua j [mm/h] del sito, definita dall'altezza di pioggia h rapportata alla durata dell'evento meteorico t , con periodo di ritorno pari ad almeno 20 anni, si valuta la portata idraulica specifica q_{DES} per unità di area della copertura:

$$q_{DES} = 2,78 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{h}{t} = 2,78 \cdot 10^{-7} \cdot j \left[\frac{m^3}{sec \cdot m^2} \right]$$

Per metro lineare di scorrimento si avrà invece la seguente portata di progetto:

$$Q_{DES} = q_{DES} \cdot \cos \alpha \cdot f \cdot L \left[\frac{m^3}{sec} \right]$$

Nella precedente relazione α è l'angolo di inclinazione della copertura o della falda [°], L è la sua lunghezza [m] ed f è un coefficiente adimensionale di infiltrazione attraverso lo strato colturale, riferito alle necessità idriche di sostentamento dello strato vegetale; quest'ultimo coefficiente è dato dal rapporto tra la quantità d'acqua infiltrata nel substrato colturale e la quantità complessivamente gravitante sulla copertura.

La scelta dello strato drenante deriva dalla portata idraulica di progetto Q_{DES} e dal carico verticale specifico agente sullo stesso, in quanto in fase operativa si risconterà una compattazione (per strato drenante in aggregati naturali) o una deformazione (se

costituito da geotessile o prefabbricato in materiale plastico): l'individuazione del componente da capitolato dovrà quindi avvenire in base alla massima portata d'acqua drenabile sotto il carico di progetto¹⁵, comprendente i carichi permanenti e variabili in funzione della destinazione d'uso, a strato colturale saturo.

SPESSORE DELLO STRATO COLTURALE [cm]	COEFFICIENTE DI INFILTRAZIONE <i>f</i>	
	$\alpha < 15^\circ$	$\alpha \geq 15^\circ$
$S \leq 10$	0,60	0,65
$10 < S \leq 15$	0,45	0,50
$15 < S \leq 25$	0,35	-
$25 < S \leq 35$	0,25	-
$35 < S \leq 50$	0,20	-
$S > 50$	0,10	-

Tabella 3.21 – Valori del coefficiente *f* in funzione della pendenza α della falda (fonte Fiori M., 2011, pag. 11).

Si identificano due principali famiglie di materiali per la costituzione dello strato drenante:

- in aggregati naturali (materiale sciolto) quali perlite espansa, pietre di origine vulcanica, argilla espansa; questa tecnologia è considerata ormai obsoleta in quanto necessita di uno spessore di aggregati non inferiore a 10 cm; in alternativa è dovuta un'integrazione con una rete di tubazioni drenanti nel caso di coperture piane;



Figura 3.20 – Materassini di Igroperlite® in fase di realizzazione delle sistemazioni esterne dell'auditorium "Oscar Niemeyer" a Ravello (SA) (fonte www.perlite.it).

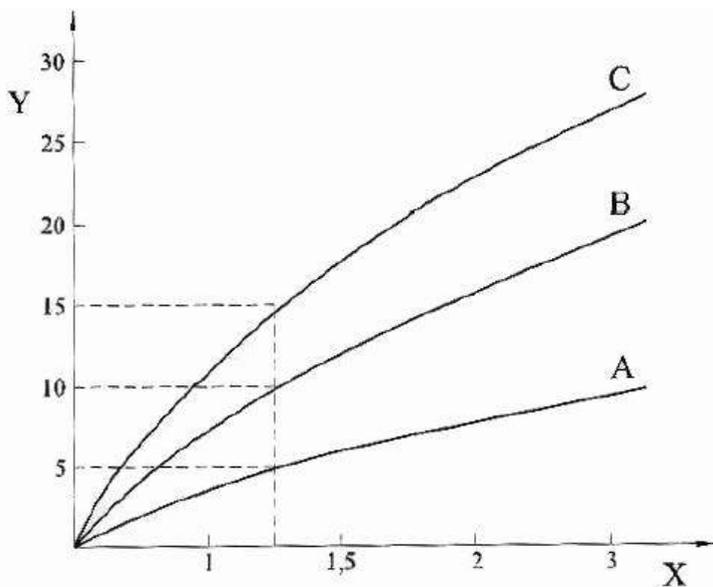


Figura 3.21 – Diagramma per il dimensionamento degli strati drenanti in aggregati naturali, i cui spessori sono indicati con le linee A (10 cm), B (20 cm) e C (30 cm): in ascissa la pendenza della falda [%], in ordinata la lunghezza della stessa [m] (fonte UNI 11235, par. 5.5.7.).

- in elementi preformati in materiale plastico, a cui può eventualmente essere conferita una specifica resistenza termica. Possiedono in genere uno spessore di 3 cm ed un peso di 20 kg/m², sensibilmente inferiore ad uno strato in aggregati naturali: data la buona resistenza a compressione, sono utilizzabili in inverdimenti intensivi;
- in materiale geosintetico, stampati secondo un profilo particolare, oppure geocompositi, in cui almeno un prodotto geosintetico è presente nel componente drenante. Per carichi ingenti, è possibile utilizzare georeti, derivanti dall'estrusione di polimeri termoplastici come il polietilene ad alta densità (HDPE).

In condizioni normali di esercizio (escludendo, ad esempio, le precipitazioni brevi e intense), il volume dello strato drenante deve essere riempito per almeno il 60% da aria, mantenendo uno spessore libero di aria tra il pelo libero dell'acqua e lo strato filtrante, non inferiore al 30% dello spessore dello strato drenante, al fine di preservare l'apparato radicale della vegetazione e prevenendone il deterioramento.

Il controllo della disponibilità di risorsa idrica avviene mediante lo strato di accumulo idrico, così da immagazzinare acqua durante eventi meteorici e renderla poi disponibile per periodi siccitosi. La riserva idrica presente nella copertura verde può altresì svolgere la funzione di controllo delle temperature sulla giacitura esposta maggiormente al sole estivo, responsabile di surriscaldamenti negli ambienti sottostanti la copertura stessa: la transizione di stato dell'acqua può infatti ridurre considerevolmente gli apporti solari.



Figura 3.22 – Elemento drenante ECODREN SD 5 - Perlite Italiana s.r.l. in geotessile tessuto non tessuto, accoppiato con una georete, da associare ad elemento di accumulo idrico (fonte www.perlite.it).



Figura 3.23 – Componente preformato per strato drenante e accumulo idrico in polietilene ad alta densità riciclato Optigrün FKD 6o BO (fonte www.optigrun.it).

PRESTAZIONE	NORMATIVA	
	SPECIFICA TECNICA	VALORE TIPICO
CAPACITÀ DRENANTE	UNI EN ISO 12958	0,1 ÷ 1,0 l/(m·sec) (in funzione della pendenza)
RESISTENZA A COMPRESSIONE	UNI EN ISO 9863	≤ 40 kN/ml a 20 kN
RESISTENZA A TRAZIONE	UNI EN ISO 10319	> 10% per geosintetici 7 kN/ml per elementi preformati
COMPORTAMENTO A FATICA	UNI EN 1897	variabile
RESISTENZA AGLI AGENTI MICROBIOLOGICI	UNI EN 12225	variabile

Tabella 3.22 – Schema tipo di dichiarazione di prestazione di uno strato drenante (adattamento da Fiori M., 2011, pag. 23).

I materiali costituenti lo strato di accumulo idrico sono, analogamente a quanto visto per l'elemento drenante:

- aggregati granulari, per i quali la capacità di accumulo è subordinata a specifiche condizioni di esercizio in termini di carico e resistenza al gelo;
- elementi preformati, in cui la capacità di accumulo idrico dipende dalla geometria del sistema: l'acqua può infatti essere accumulata in appositi incavi derivati dalla modellazione dei profili, rendendo possibile l'applicazione del componente anche in coperture inclinate.

La rete di raccolta ed allontanamento delle acque meteoriche¹⁶ deve essere dimensionata senza tenere conto dell'effetto di detenzione della copertura verde, in previsione di una possibile rimozione della copertura stessa e quale cautela contro eventi meteorici particolarmente intensi.

3.2.1.5. Strato di protezione antiradice

Lo strato di protezione alle azioni delle radici è sempre presente in una copertura verde, che può eventualmente essere integrato allo strato di tenuta all'acqua. L'assenza di un massetto in calcestruzzo, di difficile realizzazione su coperture inclinate, porta al diretto contatto tra il terreno e il manto impermeabile; inoltre, su coperture verdi già operative, si è riscontrato in alcuni casi l'attraversamento delle radici nelle zone di sormonto tra due diversi manti di protezione, con conseguente danneggiamento dello strato di supporto strutturale o della coibentazione termica. È quindi necessario uno strato protettivo caratterizzato sostanzialmente da:

- stabilità dimensionale¹⁷, proprietà di grande rilevanza fintantoché non viene posto in opera lo strato colturale: in questo frangente, infatti, lo strato di protezione antiradice – e lo strato impermeabilizzante, allo stesso modo – è soggetto ad elevate temperature a causa dell'irradiazione solare diretta e a conseguenti notevoli escursioni termiche nell'arco della stessa giornata. È quindi richiesto che lo strato di protezione possieda un valore massimo di stabilità dimensionale non inferiore all'1%;
- flessibilità a freddo¹⁸, indicatore della buona qualità dei materiali sintetici e bituminosi;
- resistenza ai carichi statici¹⁹, in modo che lo strato possa sopportare i carichi permanenti e accidentali su di esso gravanti con un opportuno margine di sicurezza;
- invecchiamento artificiale della membrana in seguito all'esposizione – per 16 settimane – ad elevate temperature²⁰, necessario ad assicurare che il materiale mantenga nel tempo le proprie prestazioni di flessibilità a freddo e stabilità dimensionale;
- resistenza agli agenti chimici e biologici²¹, dipendente dalla possibilità che lo strato vada a contatto con alcuni microorganismi presenti nel terreno;
- resistenza alla penetrazione delle radici²².

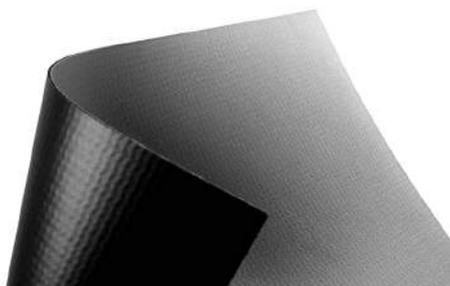


Figura 3.24 – Membrana di protezione antiradice in PVC rinforzata con griglia in fibra di vetro (fonte www.harpo-group.com/mantisintetici).

Le principali tipologie di materiale impiegate sono membrane flessibili in bitume polimero, elastomeriche e plastomeriche, di spessore tipico pari a 5 mm, ad armatura

continua realizzata in PVC o lamine metalliche; le membrane vengono trattate con additivi chimici così da garantire la continuità dello strato antiradice in corrispondenza delle necessarie sovrapposizioni. Altre membrane sintetiche (ad esempio poliolefiniche) sono considerate antiradice senza alcuna additivazione.

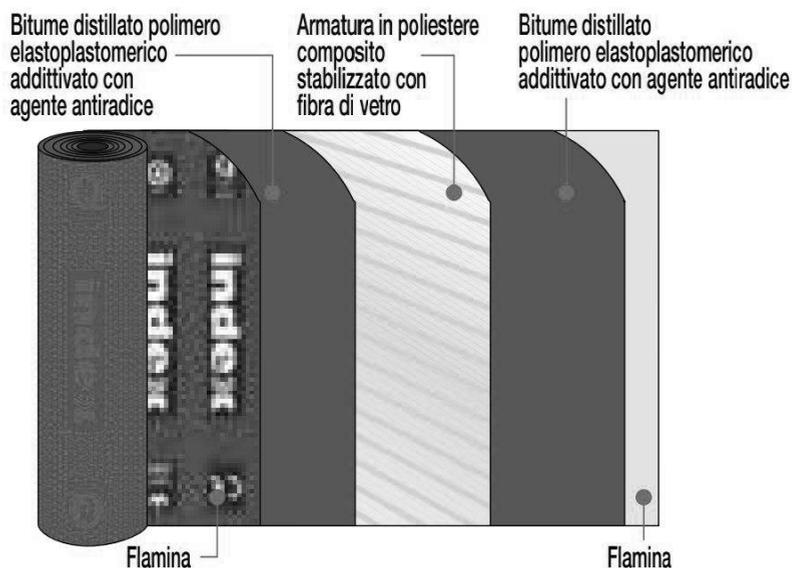


Figura 3.25 – Membrana antiradice a base d'additivo Phenoxo - Fatty Acid Ester contro l'intaccamento radicale alle direttrici di sovrapposizione (fonte INDEX s.p.a., Opuscolo illustrativo Defend Antiradice Poliestere).

PRESTAZIONE	NORMATIVA	
	SPECIFICA TECNICA	VALORE TIPICO
SPESSORE	UNI EN 1849	10÷12 mm
DIMENSIONI	UNI EN 1848	1 ml x 10 ÷ 12 ml
IMPERMEABILITÀ	UNI EN 1928	60 kPa
STABILITÀ DIMENSIONALE	UNI EN 1107	[-0,50 ÷ +0,30] %
FLESSIBILITÀ A FREDDO	UNI EN 1109	-15 °C
RESISTENZA AL PUNZONAMENTO STATICO	UNI EN 12730	15 ÷ 20 kg
RESISTENZA ALLE RADICI	UNI EN 13948	Verifica positiva
REAZIONE AL FUOCO	EN 13501	Variabile

Tabella 3.23 – Schema tipo di dichiarazione di prestazione di uno strato di protezione antiradice. Sono riportati gli aspetti di maggiore significatività per lo strato in oggetto.

L'impiego di un massetto in calcestruzzo, oltre che per l'incremento dei carichi statici e sismici in quota, è da evitarsi in quanto nel tempo può cedere per fatica ed essere attaccato dalle radici; inoltre risulta molto più difficoltoso espletare le operazioni di ordinaria manutenzione.

3.2.1.6. Strato di tenuta all'acqua

Requisito primario relativo a questa classe di esigenza è la tenuta all'acqua, assolto da uno strato avente specifica funzione, che deve possedere idonee caratteristiche di durabilità – in analogia allo strato di protezione antiradice – a causa dell'onerosità delle operazioni di manutenzione e di una successiva sostituzione, che obbligherebbero alla rimozione ed allo spostamento della vegetazione e dello strato colturale.

Le membrane che espletano la funzione di tenuta all'acqua e/o la protezione antiradice, devono essere munite di dichiarazione del produttore che ne certifichi l'idoneità all'installazione in una copertura verde; in questi elementi tecnici, l'elemento di tenuta svolge anche la funzione di controllo della permeabilità dell'aria.

Per quanto concerne i requisiti propri dello strato di tenuta all'acqua, si faccia riferimento al paragrafo inerente lo strato di protezione antiradice, che può esservi incorporato. Comunque, lo strato di tenuta all'acqua deve essere garantito contro le azioni graffianti e laceranti delle radici, pena la perdita di funzionalità dell'intero sistema di copertura.

Rispetto ad una copertura di tipo tradizionale, in cui tale strato si colloca direttamente all'esterno, oppure immediatamente al di sotto dello strato di finitura continua o discontinua, la tenuta all'acqua in una copertura verde è protetta dall'azione della radiazione solare, esplicitata in termini di variazione di temperatura e di irraggiamento ultravioletto, e degli altri agenti atmosferici, se non nel lasso di tempo antecedente la posa dello strato colturale. È invece soggetto all'azione di agenti chimici e biologici originatisi negli strati colturale e vegetale.

In caso di eventuali infiltrazioni, dunque, è necessario che il flusso dell'acqua al di sotto di questo strato sia impedito o perlomeno contenuto, permettendo di limitare il degrado e individuare i punti in cui è avvenuta l'infiltrazione. Nei tetti freddi, privi di isolamento termico, ciò è possibile ponendo la membrana di tenuta a diretto contatto con lo strato di supporto strutturale; in presenza di isolamento termico e di strati per il controllo del vapore acqueo, è tecnica efficace la suddivisione della copertura in compartimenti, di dimensione indicativa pari a 200 m², che permettono la manutenibilità della membrana assicurando continuità all'impermeabilizzazione [23]; tale valore deve essere ridotto in presenza di coperture di tipo intensivo (anche leggero) oppure per utenze o attività particolarmente sensibili.

3.2.1.7. Strato di protezione meccanica

Questo strato ha il compito di proteggere lo strato di tenuta, e viene quindi posato immediatamente al di sopra di quest'ultimo. È realizzabile in polistirene (resistente a compressione) o in materiali geotessili.

3.2.1.8. Strato di isolamento termico

Le caratteristiche dello strato di isolamento termico non sono esclusivamente determinate dalla resistenza termica integrativa che esso deve fornire alla copertura; essendo posto a ridosso dello strato portante, l'intero 'pacchetto' tecnologico della copertura verde grava su questo strato, che deve perciò possedere idonee prestazioni alla deformazione sotto il carico di progetto (lo strato colturale deve essere considerato saturo; i carichi variabili sono determinati dalla destinazione d'uso della copertura). Una deformazione eccessiva porta alla compressione del materiale isolante, incrementandone la conducibilità termica e riducendo l'efficienza energetica della copertura. La massima deformabilità ammessa è pari al 10%, secondo la norma tecnica UNI EN 1605 [24].

Nelle soluzioni tecnologiche a 'tetto rovescio', in cui lo strato termoisolante è posto al di sopra dello strato di tenuta all'acqua, dovrà essere garantito anche un assorbimento massimo d'acqua pari allo 0,5% del volume²⁵.

Seppure in assenza di norme tecniche, è necessario verificare che il materiale non risulti attaccabile dagli agenti chimici contenuti negli eventuali fertilizzanti presenti nello strato colturale.

La resistenza all'azione del gelo²⁶ è richiesta nell'eventualità (non frequente, vista l'azione dello strato colturale) in cui la temperatura dello strato colturale scenda al di sotto degli 0 °C nella stagione invernale.

I materiali più frequentemente impiegati per l'isolamento termico integrativo delle coperture verdi sono:

- lana di roccia. Pur presentando una conducibilità termica non bassissima – $0,039 \div 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – presenta vantaggi quali l'incombustibilità ed una buona resistenza a deformazione. Non deve essere impiegata nelle soluzioni a 'tetto rovescio' in quanto presenta un elevato assorbimento idrico;
- lana di vetro, di caratteristiche analoghe alla lana di roccia, esclusione fatta per la ridotta resistenza a deformazione;
- polistirene espanso. A una minore conducibilità termica – $0,035 \div 0,042 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – corrisponde una maggiore deformabilità ai carichi ed una resistenza al fuoco nulla. La conducibilità termica è ridotta di circa l'8% nel caso in cui il polistirene espanso sia stato soggetto a estrusione.
- fibra di sughero. Presenta una conducibilità termica maggiore rispetto ai precedenti, pari a circa $0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ed una maggiore deformabilità sotto carico. Va evidenziata poi una possibile controindicazione correlata alla possibile azione degli apparati radicali della vegetazione: il materiale, di natura fibrosa, potrebbe essere attaccato dalle radici e di conseguenza disarticolato.

Specifici componenti per coperture verdi sono realizzati in rotoli a cui sono incollate, già in fase di produzione, membrane di bitume distillato polimero per la protezione antiradice.

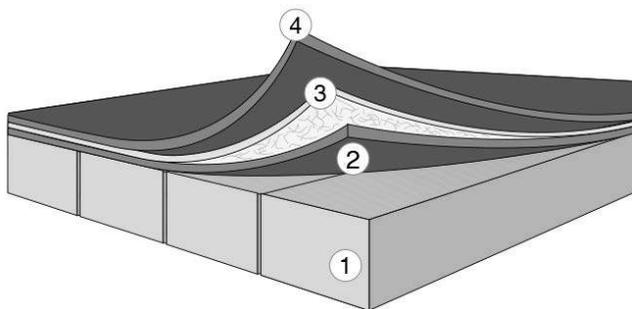


Figura 3.26 – Strato termoisolante in rotoli Thermobase - Index s.p.a., a base di polistirene espanso accoppiato (1) con doppia membrana impermeabilizzante in bitume polimerico (2, 4) e armatura in fibra di vetro (3) (fonte www.index-spa.it).

La separazione tra lo strato termoisolante e lo strato colturale è realizzata con uno strato di separazione traspirante e idrorepellente, al fine di garantire la durabilità della coibentazione: in questo ambito, materiali isolanti a cellule chiuse sono preferibili in quanto le eventuali perdite dallo strato drenante sono assorbite in quantità minori.

3.2.1.9. Strato portante

I livelli prestazionali richiesti allo strato portante sono definiti dalla normativa vigente (D.M. 14/01/2008, Circ. Min. 617/2009); si rimanda inoltre al capitolo 4 per un approfondimento relativo alla valutazione degli effetti di una copertura verde sul sistema strutturale.

I solai in laterocemento possono coprire luci fino a 7 ml e garantiscono, in genere, la risposta ai carichi statici indotti da una copertura verde; inoltre risultano facilmente individuabili le eventuali infiltrazioni d'acqua provenienti dagli strati superiori, in quanto possiede un'elevata permeabilità²⁷. Il peso totale dell'elemento tecnico così ipotizzato (strati funzionali specifici della copertura verde + strato portante, valutabile in $3,0 \div 3,5$ kN/m²) può portare all'esclusione delle soluzioni di copertura di maggior peso: questo carico permanente (*dead load* nella letteratura anglosassone) risulta applicato in sommità e genera le azioni più gravose in ambiente sismico. Osservazioni analoghe possono essere portate per le solette piene in calcestruzzo e per i solai in lastre *predalles*, evidenziando comunque che in quest'ultimo caso le luci possono superare i 10 ml e che il peso proprio, rispetto alla soluzione precedente, è maggiorato di 1,0 kN/m².

Altre soluzioni, ad esempio in lamiera grecata o in tegoli prefabbricati, possono sostenere in generale solo inverdimenti di tipo estensivo, a ridotto spessore, a meno di non disporre di irrigidimenti nel senso della luce. Per le soluzioni in lamiera grecata un sistema di travi secondarie è comunque necessario, in quanto il peso degli strati propri della copertura verde è sensibilmente superiore a quello dello strato portante ($\approx 0,2$ kN/m², oppure 2,0 kN/m² in presenza di getto integrativo di calcestruzzo). I sistemi a tegoli prefabbricati richiedono invece particolare cura nella posa dell'elemento di tenuta.

Di recente diffusione sono gli inverdimenti estensivi su coperture lignee, in cui lo strato portante è costituito da un solaio in legno lamellare a tavole incrociate di spessore 18÷20 cm. Su giacitura piana, l'inverdimento avviene applicando sul solaio una membrana impermeabilizzante con additivo antiradice, sulla quale viene posato lo strato di coibentazione termica (EPS, polistirene, etc.) sagomato per consentire il deflusso delle acque meteoriche; sui bordi laterali si applica invece una membrana impermeabilizzante ardesiata; le membrane da impiegarsi devono accompagnare, elasticamente, le dilatazioni a cui sono soggetti gli elementi strutturali lignei. Gli accorgimenti tecnici di separazione tra lo strato di accumulo idrico e lo strato portante sono estremamente importanti poiché quest'ultimo è estremamente sensibile all'azione dell'umidità.

È necessario evidenziare come i carichi indotti dal pacchetto tecnologico di inverdimento siano superiori al peso dell'elemento portante ligneo di un fattore 2,5÷3. L'installazione deve perciò essere limitata a solai caratterizzati da luci contenute, verificando in prima istanza la freccia dovuta al carico della copertura verde; nel caso di strato portante a travi secondarie e tavolato, è opportuno che l'interasse delle travi non sia superiore a 0,50 ml.

3.2.2. Strati funzionali secondari

3.2.2.1. Impianti di irrigazione

L'impianto di irrigazione sopperisce o integra le precipitazioni atmosferiche nel garantire alla vegetazione il quantitativo d'acqua necessario alla vita, in base allo stadio di sviluppo ed alle condizioni fitosanitarie della stessa e della disponibilità di acqua allo strato colturale²⁸: l'efficacia di un impianto di irrigazione è basata sulla distribuzione uniforme della risorsa idrica alla vegetazione.

Gli inverdimenti di tipo estensivo in genere non richiedono irrigazione, se non durante la prima fase successiva all'installazione (di durata approssimativa 4÷6 settimane). Le installazioni di tipo intensivo leggero, invece, ne necessitano solo dopo un periodo di 4 settimane di siccità. La predisposizione di un impianto irriguo, quindi, è una prerogativa essenzialmente riferibile alle coperture verdi intensive, in quanto le specie vegetali previste in queste installazioni necessitano di maggiori volumi d'acqua per il proprio sostentamento.

Questi complementi impiantistici dei manti di copertura verdi intensivi sono classificabili in tre principali tipologie:

- impianti per irrigazione a pioggia, o per aspersione, il cui effetto principale è l'abbattimento delle polveri presenti in aria (compensazione ambientale);
- impianti per irrigazione a goccia, posti a terra;
- impianti per sub-irrigazione, dal basso.

Un impianto del tipo ad aspersione ricalca le condizioni di approvvigionamento idrico tipiche delle precipitazioni atmosferiche; è costituito da erogatori fissi o parzialmente movibili che spruzzano acqua ad alta pressione, e ben si addice

all'irrigazione di ampie superfici nella fase di attecchimento della vegetazione o quale soccorso nei periodi siccitosi prolungati. Con tale configurazione non è però possibile controllare l'aspersione e ciò comporta un utilizzo non propriamente efficiente della risorsa idrica; inoltre, la presenza di gocce d'acqua sulla vegetazione può fungere da 'lente d'ingrandimento' per la radiazione solare e danneggiare gli apparati vegetali. Per ridurre gli effetti dei flussi d'aria sulle particelle asperse si possono prevedere irrigatori ad angolo d'uscita contenuto.

Impianti di irrigazione più moderni sono basati sulla tecnica di microirrigazione, che permette di erogare quantità d'acqua contenute direttamente all'apparato radicale della vegetazione, con portate e frequenze d'impulso prefissate. In questo modo la risorsa idrica non è resa disponibile allo sviluppo di specie infestanti o fungine e le perdite a causa dell'azione del vento sono rese trascurabili. I costi di installazione di questi sistemi è sensibilmente più elevata a causa del ridotto raggio d'azione degli ugelli disposti in una rete di distribuzione molto fitta; inoltre, risulta molto difficoltoso lo spostamento delle linee di adduzione acqua.

Una terza tipologia di installazione è di tipo ibrido ed è realizzata mediante microirrigatori a spruzzo, con ugelli posizionati sulla superficie dello strato colturale. Ad una maggiore facilità di manutenzione e di modifica della disposizione corrisponde una maggiore sensibilità ai flussi d'aria, in particolare se l'erogazione avviene mediante acqua nebulizzata.

3.2.2.2. Dettagli per specifiche soluzioni

L'inclinazione delle falde di copertura rende necessari modifiche locali / puntuali alla soluzione tecnologica di copertura.

Per coperture con pendenza superiore a 10° è spesso necessario impiegare uno strato secondario antierosione, in genere costituito da stuoie in fibre naturali, che previene la dispersione dello strato colturale sotto l'azione del vento o dell'acqua meteorica, con possibili rischi per l'incolumità delle persone. Per lo stesso motivo, nelle fasce perimetrali dovranno essere previste fasce di zavorramento – tipicamente in ghiaia – per evitare effetti di suzione originati dai flussi d'aria in quota. Per pendenze superiori a 20° è necessario ricorrere a degli elementi rompitratta per evitare che l'intera spinta del tetto lungo la giacitura gravi sull'ultimo elemento perimetrale; tali elementi devono comunque essere provvisti di piccole aperture per consentire il passaggio dell'acqua²⁹.

Inoltre devono essere controllate le prestazioni in alcuni punti singolari della copertura, in particolare:

- la continuità dello strato di tenuta all'acqua sull'intera copertura, in particolare sui risvolti verticali in corrispondenza dei parapetti perimetrali e di eventuali corpi emergenti (lucernari, vani corsa ascensore, camini, etc.);
- l'uniformità dello strato termoisolante, al fine di evitare l'insorgere di ponti termici;
- la continuità dello strato di protezione meccanica, in situazioni in cui possano manifestarsi carichi concentrati o punzonamenti;

- l'inserimento ai bordi perimetrali di materiali e componenti ad elevata capacità drenante.

3.3. Prestazioni delle coperture verdi

Le prestazioni complessive offerte da una soluzione di copertura verde sono tutt'ora oggetto di discussione sia in ambito accademico e scientifico, sia in ambito normativo e commerciale.

La molteplicità degli effetti portati dall'inverdimento delle coperture in diversi ambiti prestazionali, e la difficile dimostrazione scientifica di tali effetti, rendono complessa la misurazione di tali effetti al fine di dimostrarne i vantaggi ambientali, sociali ed economici. Ciononostante, nell'ambito della ricerca scientifica è convinzione diffusa che le tecnologie a verde pensile rendano possibile un notevole incremento del benessere percepito dall'utenza, se non altro perché è considerata efficace la compensazione tra la copertura verde e il terreno naturale sostituito dall'edificazione³⁰.

3.3.1. Prestazioni energetiche

Il comportamento energetico delle coperture a verdi è frequentemente il principale fattore d'interesse portato dalle utenze finali e dagli operatori di settore. Le prestazioni offerte dalle diverse tecnologie di verde pensile in merito all'efficienza energetica dell'involucro edilizio risultano efficaci nell'arco dell'intero anno (con riferimento quindi agli specifici requisiti di isolamento termico ed inerzia termica), sebbene non sia ancora possibile generalizzare i risultati ottenuti da diversi studi sperimentali al fine di ampliarne l'ambito di applicazione e di rapportare specifiche soluzioni tecnologiche alle prestazioni energetiche offerte.

I fattori che influenzano tali prestazioni sono in sostanza:

- il contesto climatico del sito d'installazione;
- la tipologia e le caratteristiche dei materiali impiegati, qui comprendendo le specifiche tecniche dello strato colturale e dello strato vegetale;
- i mutui rapporti tra l'elemento tecnico di copertura e l'edificio sul quale è intestato, in termini di superfici, volumi riscaldati, caratteristiche fisico-tecniche delle altre soluzioni d'involucro edilizio.

Una soluzione di copertura verde pensile, nell'ambito di una valutazione delle prestazioni energetiche, è un sistema ad elevata complessità, costituito da strati funzionali eterogenei nei quali varia il contenuto d'umidità³¹, coerentemente con le funzioni svolte in analogia ad un suolo naturale, ossia il sostentamento mediante elementi nutritivi, l'accumulo idrico, la traspirazione degli strati vegetale e colturale. Conseguentemente, le prestazioni di isolamento termico ed inerzia termica sono fortemente dipendenti, nell'arco di uno specifico periodo, dai fattori climatici quali intensità di precipitazioni, radiazione solare e 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.

La Tabella 3.24, basata su dati dedotti dalla letteratura e dalla normativa tecnica e riferita alla sola valutazione della conduttività termica di alcuni materiali da costruzione, mostra come un livello di resistenza termica conforme ai valori minimi richiesti dalla normativa italiana a partire dal 2010 sia ottenibile con spessori contenuti di materiali isolanti termici di origine artificiale, quali la lana di roccia o il polistirene espanso estruso o, con spessori leggermente maggiori, impiegando isolanti di origine naturale come sughero espanso in pannelli. I medesimi livelli prestazionali, in condizioni di media saturazione, sono ottenibili da un generico strato colturale solo prevedendo spessori ben superiori a 100 cm; in tali condizioni le applicazioni possibili sono ridotte, soprattutto a causa dell'elevato carico statico gravante sulla struttura portante.

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% (per la definizione si faccia riferimento alla nota 31 al presente capitolo).

Tabella 3.24 – Comparazione delle proprietà di isolamento termico di alcuni materiali raffrontati ad un generico strato colturale per coperture verdi.

Evidenziato che non è quindi possibile riferirsi al solo parametro di conduttività termica dello strato colturale per definire le proprietà di trasmissione del calore di una copertura verde nella stagione invernale, è altresì necessario sottolineare come, a differenza di soluzioni tecnologiche più 'tradizionali', il calcolo di tali proprietà in regime stazionario risulta fortemente approssimativo, in quanto gli strati funzionali di una copertura verde variano sensibilmente le proprie caratteristiche fisico - tecniche nel corso dell'anno.

La valutazione delle prestazioni energetiche delle coperture verdi risulta inoltre più complessa in quanto gli strati funzionali che maggiormente influenzano tali prestazioni

(lo strato colturale e lo strato drenante naturale – quest'ultimo nelle soluzioni in cui è previsto) sono quelli maggiormente soggetti, nel proprio volume, ad oscillazioni sensibili del contenuto di umidità.

Un semplice calcolo stazionario, basato sulle singole prestazioni degli strati funzionali, non risulta assolutamente indicativo delle prestazioni effettivamente fornite da una copertura verde, poiché risulta evidente la discrepanza tra questa modellazione e l'applicazione pratica; è quindi necessario tenere conto di altri meccanismi di trasferimento energetico di maggiore complessità. Una corretta soluzione tecnologica di copertura verde deve quindi essere valutata nella sue prestazioni complessive di efficienza energetica ed operativa al fine di ottemperare alle richieste esplicitate in fase di progettazione.

Una copertura verde, in sostanza, è un sistema complesso e non descrivibile attraverso schematizzazioni o modelli semplificati, in particolare a causa del fatto che è un sistema capace di autoregolarsi in funzione delle condizioni climatiche esterne. La combinazione di essenze vegetali, strato colturale, coibentazioni e supporto strutturale possono essere assunti quale uno strato materiale non omogeneo e non isotropo che opera come massa termica per raffrescamento evaporativo secondo proprietà fisico - tecniche variabili³².

A livello complessivo, sono contrastanti i risultati relativi alle prestazioni offerte da una copertura verde nel periodo invernale in climi mediterranei, in cui le condizioni al contorno sono sensibilmente diverse da quelle dei climi nordici, caratterizzati da periodi prolungati di freddo intenso, in cui la tecnologia del verde pensile ha avuto le prime significative applicazioni.

Il massimo beneficio energetico nell'area mediterranea, accettato in più larga misura, risulta essere quello inerente le prestazioni nella stagione estiva, riferibile quindi alle strategie di raffrescamento passivo dell'edificio; anche in questo caso, comunque, la letteratura scientifica offre risultati contrastanti in merito alla riduzione del carico termico agente in copertura dovuto all'evaporazione dell'acqua presente nello strato colturale, che è diversa per microclimi caratterizzati da periodi di siccità e in situazioni in cui non è previsto un idoneo impianto di irrigazione.

L'impiego su ampia scala di elementi di involucro verde, in particolare delle coperture a verde pensile, deriva quindi dalla generale sensibilizzazione verso specifiche tematiche di sostenibilità ambientale, che considerano l'inserimento di superfici verdi in contesti urbanizzati quale azione di compensazione ecologica, piuttosto che da risultati scientifici ed applicativi di univoca interpretazione inerenti l'efficacia di tali elementi tecnici nell'ambito delle prestazioni energetiche³³.

3.3.1.1. Influenza degli strati funzionali sulle prestazioni energetiche di una copertura verde

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.

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

TIPOLOGIA DI SCAMBI:
 ▲ CONDUTTIVO; ● CONVETTIVO; ■ RADIATIVO; ◆ LATENTE.

Tabella 3.25 – Relazioni intercorrenti tra gli strati funzionali responsabili degli scambi termici in una copertura verde, le tipologie di scambio e i relativi parametri significativi.

La progettazione dello strato vegetale, quale principale valore finale dal punto di vista architettonico ed estetico di una copertura verde, considera anche i diversi tipi di scambio termico ad esso afferenti:

- scambi termici radiativi, riferiti al controllo dell'irraggiamento solare proveniente dall'ambiente esterno (in dipendenza dell'essenza vegetale prevista) ed all'assorbimento all'interno dello 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, dipendente dal parametro di resistenza degli stomi.

Il principale parametro che influenza 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 proiettata sulla superficie e la superficie vegetata stessa³⁴ ed espresso in $[m^2/m^2]$: tale parametro costituisce un'ottima sintesi per misurare l'effetto dello strato vegetale sulle prestazioni complessive della copertura verde³⁵, specificamente sugli scambi evapotraspirativi e sul controllo della radiazione solare. I valori del LAI per i tetti verdi sono usualmente compresi nell'intervallo 0,5 ÷ 5,0; la percentuale di area di copertura protetta dagli apparati fogliari è un parametro connesso, ma non coincidente, con il LAI [36], e influisce sui flussi termici radiativi che interessano la superficie dello strato culturale.

La principale funzione dello strato vegetale nei confronti della radiazione solare consiste nella modulazione dell'incidenza di lunghezze d'onda diverse sulla giacitura della copertura verde, che quindi è caratterizzata da un comportamento sensibilmente diverso rispetto alle coperture 'tradizionali'. Il principale effetto avviene nei confronti della radiazione solare diffusa, per la quale il manto vegetale funge da schermatura con effetti variabili in funzione della giacitura delle foglie rispetto al piano della copertura. Inoltre, un manto vegetale presenta una ridotta emissione all'infrarosso rispetto ai materiali tradizionali in copertura, rendendo quindi possibile una riduzione della temperatura radiante della copertura stessa; nella stagione estiva, in particolare, la temperatura dell'apparato fogliare è prossima a quella dell'aria in essenze sviluppate³⁷.

	RADIAZIONE RIFLESSA	RADIAZIONE ASSORBITA	RADIAZIONE TRASMESSA
Valori medi	30	50	20
Stagione estiva (vegetazione latifoglia)	20	70	10
<i>di cui</i>		5	<i>fotosintesi</i>
		45	<i>calore latente per evapotraspirazione</i>
		20	<i>calore sensibile</i>

Tabella 3.26 – Comportamento generale delle coperture verdi in termini di controllo della radiazione solare (adattamento da Grosso M. et al, 2005, pag. 134 e Fiori M., 2011, pag. 89).

Lo scambio termico di tipo radiativo all'infrarosso si compone di due quote:

- la prima è relativa alla riflettanza, o albedo³⁸, che individua l'energia solare assorbibile in quanto ad un suo maggior valore corrisponde una riduzione dell'accumulo di calore;

- la seconda dipende dall'emissività delle essenze, la quale determina la rimissione in infrarosso ad onde lunghe ed è quindi prima responsabile dell'incremento di temperatura della copertura.

L'albedo delle superfici vegetali, in media compreso nell'intervallo $0,20 \div 0,35$, è un valore prossimo ai valori medi riferibili alle finiture superficiali degli organismi edilizi; questo valore medio aumenta, in specifiche condizioni, in base a specifiche condizioni climatiche (umidità e angolo di incidenza dei raggi solari) ma anche in base all'indice di area fogliare LAI [39] e all'intensità di colore delle essenze stesse, vale a dire parametri sui quali è possibile intervenire in fase progettuale. La quota di radiazione solare assorbita è, dunque, funzione dell'albedo e dell'indice di area fogliare, in quanto la forzante radiativa di origine solare sulla copertura diminuisce al crescere del LAI. Un incremento del LAI da 2 a 5 comporta una forte riduzione della trasmissione solare della vegetazione e ad un incremento della temperatura superficiale delle foglie (parametro considerato trascurabile)⁴⁰.

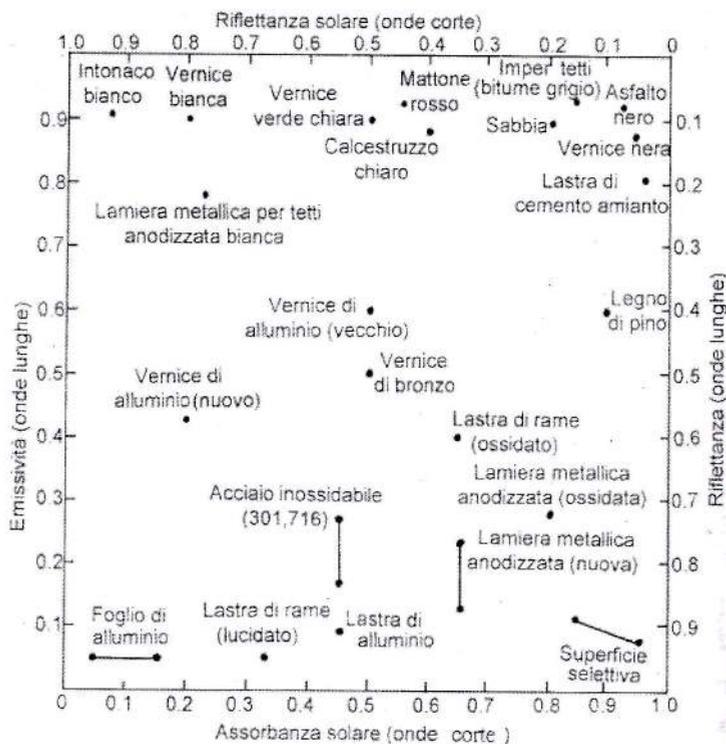


Figura 3.27 – Assorbanza e riflettanza solari (onde corte), emissività e riflettanza infrarossa (onde lunghe) di diversi materiali impiegati in edilizia (fonte Grosso M. et al., 2005, pag. 130).

A parità di albedo rispetto ai più frequenti materiali impiegati in edilizia, lo strato vegetale riduce l'effetto di accumulo termico con la dissipazione del calore che alimenta i fenomeni evapotraspirativi.

Gli scambi convettivi sono influenzati dalla temperatura superficiale dello strato vegetale, a sua volta dipendente dalla densità dell'apparato fogliare, e quindi dal LAI. I processi evapotraspirativi, di incidenza variabile in funzione dell'essenza vegetale, consentono di mantenere la temperatura dell'apparato fogliare prossima a quella esterna, evitando così gli effetti di surriscaldamento derivanti dall'incremento della temperatura superficiale tipico delle coperture di tipo tradizionale.

La componente di flusso termico latente dovuta ai processi evapotraspirativi svolge un ruolo assolutamente non trascurabile 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 di tipo tradizionale mediamente isolata, con i soli contributi riferibili all'albedo e all'assorbimento della vegetazione. In condizioni prossime alla saturazione, il flusso termico entrante può annullarsi o addirittura invertirsi, connotando la copertura verde come sistema di raffrescamento passivo innescato dall'evapotraspirazione.

Inoltre, al crescere del valore del LAI, è possibile evidenziare che:

- l'aria presente all'interno dello strato vegetale può presentare una temperatura sensibilmente inferiore a quella dell'aria ferma posta al di fuori dello strato stesso;
- l'ampiezza dell'escursione termica giornaliera si riduce di un fattore 2,5 [41];
- il coefficiente esterno di scambio termico per convezione, il cui inverso concorre a determinare la resistenza termica globale dell'elemento tecnico di copertura, assume valori inferiori a quelli di coperture 'tradizionali' ($0,10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ invece che $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) proprio a causa delle differenti condizioni termiche dell'aria all'interno dello strato vegetale⁴²; tale effetto benefico si riduce in contesti particolarmente ventosi.

Anche la dimensione verticale dello strato vegetale influenza i flussi termici che attraversano la copertura verde nel corso dell'intero anno; in particolare, nella stagione invernale, la presenza dello strato vegetale riduce la dispersione di calore per extraflusso radiativo verso la volta celeste⁴³.

L'essenza vegetale prescelta costituisce un fattore significativo nella definizione delle prestazioni estive della copertura: è stato dimostrato⁴⁴ che minori temperature superficiali allo strato colturale sottostante la vegetazione sono ottenibili prevedendo un inverdimento continuo in arbusti, i quali possiedono un LAI maggiore rispetto ad alberi di II e III grandezza ed a inverdimenti con tappezzanti. Tutte le tipologie di inverdimento comportano comunque un abbassamento di $15 \text{ }^\circ\text{C}$ della temperatura superficiale della copertura rispetto ad una soluzione 'tradizionale' o ad una soluzione a suolo priva dello strato vegetale. Questo fatto conferma il ruolo fondamentale svolto da quest'ultimo nella regolazione dei flussi termici in copertura, sia verso gli ambienti indoor sottostanti, sia inerenti il comfort termico necessario allo svolgimento di attività negli spazi esterni eventualmente previsti in copertura.

Lo strato colturale è responsabile di comportamenti energetici variabili in funzione innanzitutto del proprio spessore, dipendente dal tipo di installazione verde, e della

propria composizione materica. In particolare, i composti utilizzati per la realizzazione di strati vegetali nelle coperture verdi sono caratterizzati da una ridotta massa volumica ($800 \div 900 \text{ kg/m}^2$) e da una ridotta percentuale di materia organica, arricchita da una percentuale di sabbia maggiore rispetto al suolo naturale e dalla preponderanza di humus e di materiali a ridotta densità quali pomice frantumata o pozzolana: per questo motivo la conducibilità termica degli strati colturali è inferiore rispetto a quella del suolo naturale.

I principali effetti energetici correlati allo strato colturale sono inerenti la prestazione estiva della copertura, in quanto si riferiscono all'inerzia termica complessiva offerta dall'elemento tecnico. È stato misurato che la quota di radiazione solare riflessa dallo strato vegetale si discosta notevolmente da quella offerta da una copertura tradizionale: i valori di albedo sono rispettivamente pari a 0,23 e a 0,10, con conseguente riduzione della quota trasmessa verso gli strati massivi di copertura⁴⁵.

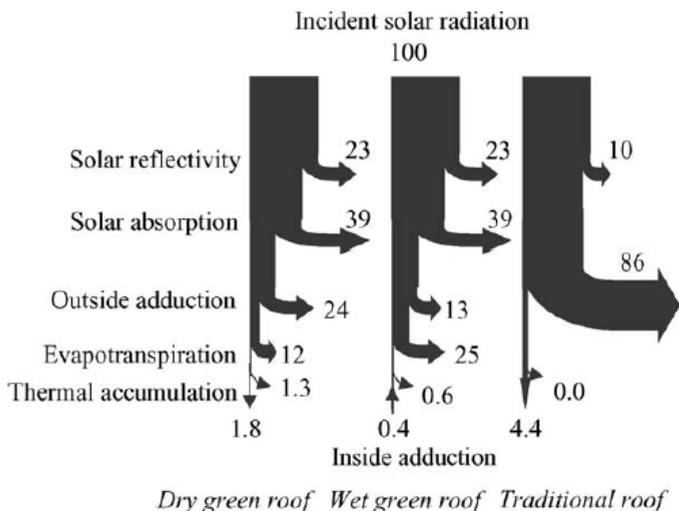


Figura 3.28 – Valutazione percentuale degli scambi energetici attraverso una copertura verde situata nel contesto climatico del Nord Italia, in condizioni estreme di saturazione dello strato colturale, rispetto a quelle di una copertura tradizionale (fonte Lazzarin R. M. et al., 2005, pag. 1265).

Le condizioni climatiche, in questo caso, giocano un ruolo decisivo nell'entità della prestazione inerziale: la porosità dello strato colturale e la variazione del grado di saturazione dei vuoti al suo interno incrementano la conducibilità termica dello strato, in quanto l'acqua è un conduttore termico migliore dell'aria, e riducono la sua diffusività termica; per quest'ultima ragione è possibile verificare una riduzione del flusso termico attraverso la coperture al crescere del contenuto volumetrico di umidità⁴⁶.

Misurazioni su coperture caratterizzate da strati colturali in pietra pomice e perlite mescolate con zeoliti, sia ad inverdimento estensivo che intensivo leggero, hanno permesso di individuare una relazione di tipo lineare tra la trasmittanza termica

complessiva delle diverse soluzioni e il contenuto volumetrico d'umidità dello strato colturale θ [47].

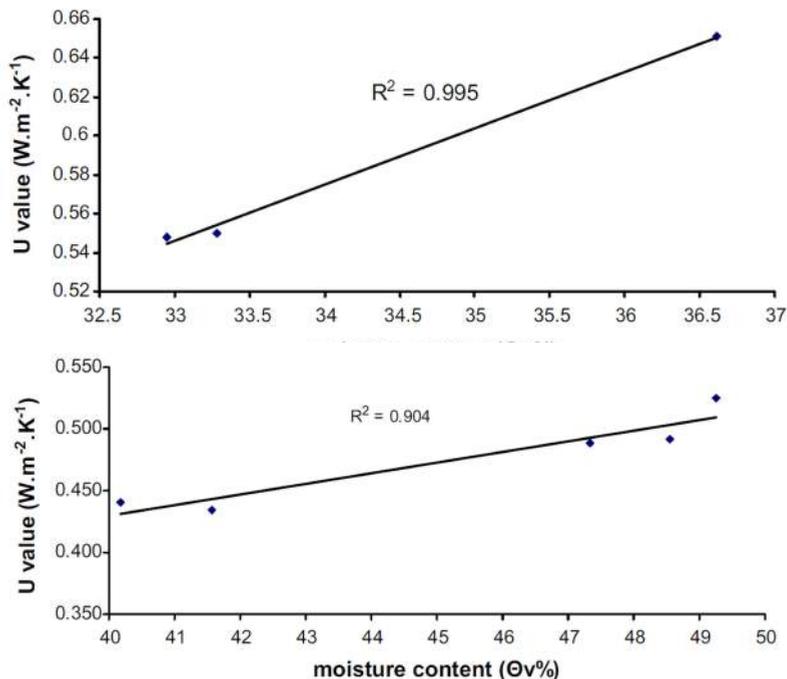


Figura 3.29 – Individuazione per regressione lineare della relazione intercorrente tra il contenuto d'umidità nello strato colturale (in ascissa) e la trasmittanza termica U complessiva (in ordinata) di una copertura verde: la sua struttura di base è costituita da una soletta in calcestruzzo di spessore 12 cm, doppia guaina bituminosa, geotessile non tessuto, strato drenante in HDPE con accumulo in perlite. La figura superiore si riferisce ad un inverdimento estensivo con strato colturale misto a base di perlite per uno spessore di 10 cm, quella inferiore ad uno analogo del tipo intensivo leggero per uno spessore dello strato colturale di 20 cm (fonte Kotsiris G. et al., 2012, pagg. 246-247).

GRADO DI SATURAZIONE DELLO STRATO COLTURALE S_w	TRASMITTANZA TERMICA U [W/(m ² ·K)] DELLA COPERTURA	
	SENZA ACCUMULO IDRICO	CON ACCUMULO IDRICO
0 %	0,42	0,38
20 %	0,46	0,41
80 %	0,53	0,48

Tabella 3.27 – Effetti del grado di saturazione dello strato colturale sulla trasmittanza termica di coperture verdi (fonte Alcazar S., Bass B., 2005).

Per tali motivi, non è corretto assumere costanti le caratteristiche fisico - tecniche dello strato colturale: nei calcoli in regime stazionario (peculiare della stagione invernale), per strati di spessore ridotto (inferiore a 6÷8 cm) è addirittura accettabile trascurarne la resistenza termica⁴⁸.

È possibile ricavare formule empiriche per esprimere la conducibilità termica λ [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] e il calore specifico c_p di uno strato colturale [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] in funzione del contenuto volumetrico di umidità θ nello stesso, espresso in [$m^3 \cdot m^{-3}$], secondo una dipendenza lineare⁴⁹:

$$\lambda = 1,13 \cdot \theta + 0,10 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$c_p = 4,75 \cdot \theta + 0,76 \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

La definizione di queste formule empiriche è estrapolata dai valori medi stagionali derivati da misurazioni di un provino di terreno inizialmente seccato in forno, al quale sono state successivamente aggiunte quantità controllate di acqua.

Uno strato di isolamento termico aggiuntivo, interposto tra lo strato portante e la soluzione a verde, incide notevolmente sul controllo dei flussi termici attraverso l'elemento tecnico, incrementando la resistenza termica complessiva nella stagione invernale; i livelli prestazionali minimi imposti dalla vigente normativa sull'efficienza energetica dell'involucro edilizio sono conseguibili solo implementando tale strato nell'elemento tecnico, che deve garantire una resistenza termica aggiuntiva tanto maggiore in presenza di un inverdimento di tipo estensivo⁵⁰. All'aumentare dello spessore dello strato termoisolante, l'effetto della copertura verde risulta sempre meno incisivo⁵¹, permettendo una riduzione dei consumi energetici annuali non superiore al 2% in coperture aventi una trasmittanza termica $U \approx 0,25 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ [52]. Rilevazioni strumentali confermano che in coperture mediamente isolate ($U \approx 0,75 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) non si verificano variazioni significative della temperatura superficiale esterna in presenza di inverdimento, mentre quest'ultimo fornisce riduzioni notevoli (misurate in 10 °C) per involucri privi di isolamento⁵³.

La trasmittanza termica periodica, assunta dalla vigente normativa quale specifica di prestazione per l'inerzia termica degli elementi d'involucro, è influenzata principalmente dal LAI e dallo spessore dello strato colturale; l'influenza di tali parametri, come evidenziato per la stagione invernale, decresce in presenza ed all'aumentare dello strato coibente⁵⁴. L'incidenza di tali parametri è ancora minore in coperture di tipo intensivo leggero⁵⁵. La composizione materica dello strato colturale risulta non trascurabile solo in assenza dello strato coibente.

I parametri di maggiore incidenza nella determinazione delle prestazioni estive di una copertura verde sono dunque il LAI e lo spessore dello strato colturale; a seguire, influenzano in modo sensibile Y_{IE} parametri specifici del terreno secco, quali la densità, la conducibilità termica ed il calore specifico, il contenuto di umidità.

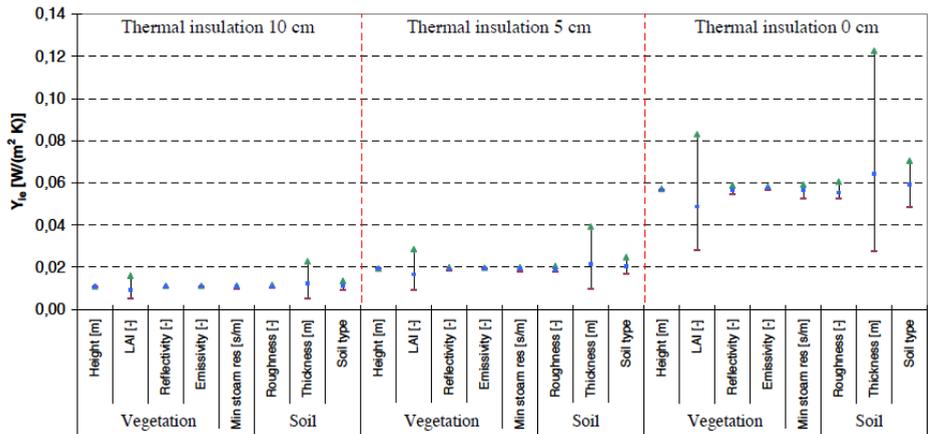


Figura 3.30 – Variazione della trasmittanza termica periodica di una copertura a verde di tipo estensivo su strato portante in laterocemento, in funzione di diversi parametri quali l'altezza dello strato vegetale, il LAI, la composizione e lo spessore dello strato colturale, al variare dello spessore dello strato di isolamento termico integrativo interposto tra la soletta e lo strato drenante (fonte Capozzoli A. et al., 2013).

L'efficacia di una copertura verde nel contribuire all'isolamento termico d'involucro è maggiore nei climi freddi, e la sua applicazione trova quindi una congrua giustificazione. I risultati relativi alla stagione invernale sono contrastanti, sebbene in inverni molto freddi e poco piovosi la temperatura al di sotto dello strato colturale si attesti a regime su valori superiori rispetto alla temperatura superficiale di soluzioni 'tradizionali': tali condizioni si verificano più frequentemente in climi più rigidi di quello italiano. Inverni particolarmente piovosi, causa di un maggiore contenuto d'umidità nello strato, possono portare ad un lieve peggioramento della prestazione energetica della copertura verde rispetto ad una priva di inverdimento⁵⁶.

L'impatto delle coperture verdi sulla temperatura interna degli ambienti posti immediatamente al di sotto della copertura è maggiore nei climi caldi: è stato provato che la riduzione di temperatura media portata da una copertura verde rispetto ad una tradizionale può raggiungere i 2,5 °C nei climi caldi ed a 1,5 °C nel contesto climatico nordeuropeo⁵⁷.

Nei climi temperati di tipo mediterraneo, i benefici sono quindi maggiori nella stagione estiva, in dipendenza dal peso complessivo della soluzione adottata⁵⁸ e della quota di superficie pertinente alla copertura rispetto all'intero involucro; in questo periodo la presenza di uno strato di accumulo idrico permette la dissipazione di energia per evaporazione dell'acqua ivi contenuta.

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

Tabella 3.28 – Prospetto riepilogativo degli effetti degli strati funzionali tipici delle coperture verdi nella determinazione delle prestazioni energetiche invernali ed estive per i climi mediterranei.

3.3.2. **Prestazioni di mitigazione del microclima nei contesti urbanizzati**

L'inverdimento delle coperture si configurano come sistemi tecnologici in grado di garantire la continuità del complesso sistema ecologico dei contesti urbani, costituito da flussi di energia, materiali e di informazioni correlati alla componente antropica e naturale, pur con sensibili trasformazioni sia alla scala del singolo edificio che a quella più ampia di insediamento. In particolare, le città rappresentano un sistema energivoro che porta ad alcuni effetti negativi sulla componente naturale, quali l'incremento della temperatura della chioma urbana, l'impermeabilizzazione delle superfici e la riduzione della biodiversità dell'ecosistema.

Alla scala di edificio, durante la stagione estiva 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), ed anche manti caratterizzati da una frazione assorbita minore possono presentare elevate temperature in giornate estive terse in cui è continuo l'irraggiamento, e l'effetto si può prolungare anche durante le ore notturne. La ridotta possibilità di reirraggiamento verso altre superfici portano altresì:

- al surriscaldamento dell'intero 'pacchetto' della copertura, con possibili situazioni di discomfort termico negli ambienti indoor;
- all'insorgere di fenomeni di dilatazione termica che possono generare stati tensionali anomali.

A scala urbana, si riscontra un forte legame tra l'ecosistema urbano e la qualità della vita umana all'interno delle città. Specifici indicatori ambientali, dei quali il verde è considerato uno dei più importanti già a partire dalla metà del XIX secolo, contribuiscono a definire piani per il controllo della qualità dell'ambiente urbano e a contrastare l'occupazione dei suoli. Le Corbusier introduce, con l'opera *Vers une Architecture* (1923) il principio di restituzione al suolo di parte delle superfici occupate dagli edifici. L'introduzione dei pilotis quale sistema di fondazione puntuale porta alla separazione fisica degli ambienti indoor dal terreno, permettendo una maggiore salubrità degli stessi e consentendo l'accesso di sole e luce agli spazi altrimenti edificati; il maggiore spazio destinato al giardino è inoltre incrementato dal tetto giardino, secondo punto chiave della teoria di Le Corbusier, che ne riconosce le potenzialità in termini di fruibilità e di protezione offerta alle strutture portanti – nella fattispecie al calcestruzzo armato – dalle forzanti climatiche e meteorologiche⁵⁹.

All'interno del dibattuto tema del *global warming* il fenomeno cosiddetto dell' 'isola di calore', ossia l'incremento sensibile della temperatura dell'aria al di sopra di insediamenti di medie e grandi dimensioni, rappresenta una problematica tipica dei contesti fortemente antropizzati che comporta, alla scala di microclima, un incremento della temperatura notevolmente superiore all'aumento riferibile al *global warming* stesso.

Le differenti caratteristiche morfologiche dei suoli urbani (clivometria, rugosità, colore superficiale), la mutata capacità termica di un oggetto antropico rispetto alle condizioni preesistenti di terreno naturale, gli agenti inquinanti immessi in atmosfera dalle attività umane (*in primis* traffico veicolare, impianti tecnici di condizionamento e ventilazione, installazioni industriali, etc.) comportano alterazioni ai flussi radiativi e di massa che caratterizzano un'atmosfera inalterata. 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 involuppa i volumi edificati si definisce *Urban Canopy Layer*.

Le caratteristiche di questo strato d'aria dipendono dalle quote energetiche di radiazione solare riflesse ed assorbite dalle superfici in esso comprese, dalla forma degli spazi urbani in rapporto all'accessibilità solare e dall'intensità delle attività umane. Le

superfici antropiche tendono a ridurre la componente di radiazione solare riflessa, l'albedo, condizione che comporta una maggiore quota energetica di assorbimento.

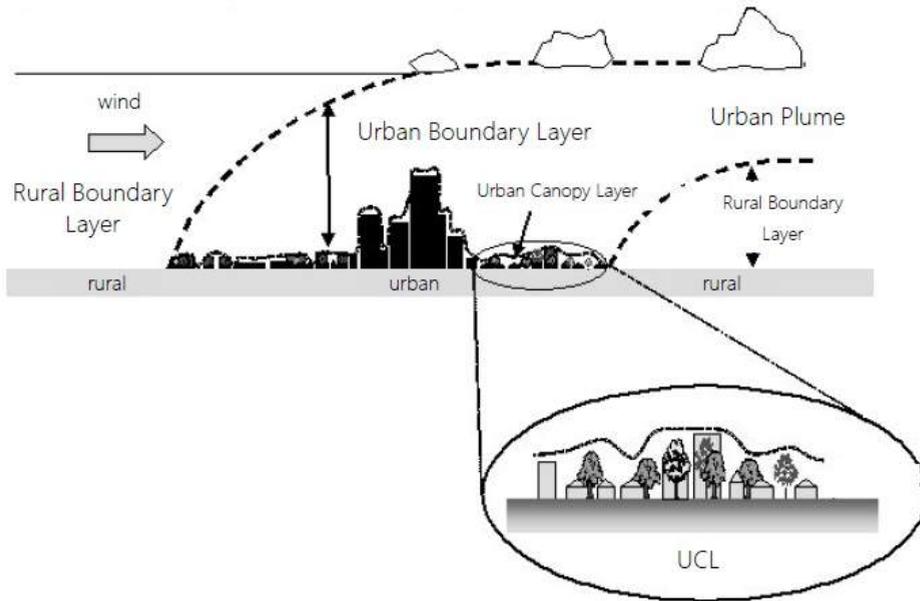


Figura 3.31 – Individuazione dell'Urban Canopy Layer ad involuppo dei volumi edificati in ambiti urbani ad elevata densità e suo rapporto con gli strati di atmosfera caratterizzanti la città (Urban Boundary Layer) e le zone rurali circostanti (Rural Boundary Layer) (adattamento da Oke T. R., 1995).

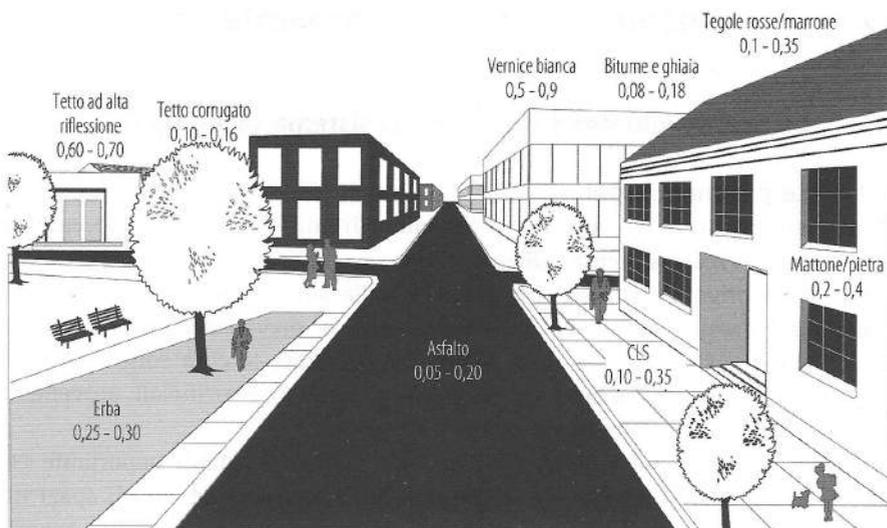


Figura 3.32 – Indicazione dell'albedo di alcuni materiali caratterizzanti le superfici in ambito urbano (fonte Dessì V., 2007, pag. 118).

L'albedo di una superficie vegetata, usualmente pari a $0,20 \div 0,30$, è inferiore all'albedo di alcuni materiali superficiali di ampia diffusione nei contesti di forte densità abitativa ed impiegati per la realizzazione delle finiture delle coperture, ad esempio l'asfalto ($0,04 \div 0,10$), ciottoli e pietre frantumate ($0,10 \div 0,15$), tegole e coppi in laterizio ($0,10 \div 0,30$), lamiera metallica ($0,10 \div 0,15$). È possibile affermare che, confrontando il bilancio termico di un sito urbano con un sito rurale analogo per dimensioni e posizione geografica, si osserva una drastica riduzione degli scambi di calore latente per evapotraspirazione ed un incremento dell'energia accumulata nelle strutture edilizie⁶⁰.

In aree urbane di grandi dimensioni, i canyon urbani – porzioni di atmosfera a livello del suolo comprese tra edifici alti – sono maggiormente protetti dall'effetto dissipante dei flussi d'aria e costituiscono una sorta di "trappola" per la radiazione solare. L'incremento di temperatura in questi e, di conseguenza, nell'*Urban Canopy Layer* che ne è il complessivo involuppo, è definito isola di calore: esso può assumere valori di $3 \div 4$ K nelle ore diurne ed accentuarsi fino a $8 \div 10$ K durante la notte⁶¹.

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

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

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 temperatura⁶².

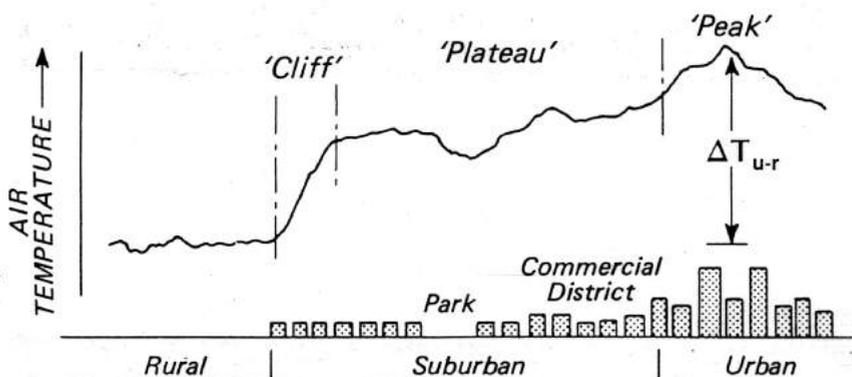


Figura 3.33 – Distribuzione delle temperature nell'isola di calore urbana. Si noti la locale riduzione della temperatura in corrispondenza di un'area verde inserita nel tessuto urbano (adattamento da Oke T. R., 1976).

All'interno dell'*Urban Canopy Layer*, quindi, la presenza di una zona verde, come un parco, porta ad una riduzione sensibile della temperatura dell'aria: l'efficacia di superfici

trattate a verde, comprese quelle poste in copertura agli edifici, e realizzate 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 è un obiettivo perseguibile operando a tre diverse scale⁶³:

- la pianificazione territoriale;
- la pianificazione a scala urbana, intesa come controllo dell'interazione tra le sollecitazioni ambientali e l'ambiente costruito;
- la progettazione architettonica, scala alla quale le coperture verdi rappresentano una possibile soluzione per la riduzione delle temperature superficiali e dell'aria compresa nell'*Urban Canopy Layer*⁶⁴.

Se la presenza di aree verdi in ambito urbano, anche poste in copertura ai volumi edificati, permettono di migliorarne il bilancio energetico, il contributo offerto non è però esaustivo: esso dovrebbe essere integrato alle scale più ampie, anche con una progettazione paesistica ottimizzata⁶⁵.

La radiazione solare è l'energia di attivazione del processo di fotosintesi con cui la pianta assorbe anidride carbonica ed acqua per ottenere carboidrati, necessari al proprio sviluppo, e ossigeno. Il secondo fenomeno di scambio di anidride carbonica che effettua la pianta è noto come respirazione e, come il primo, avviene in corrispondenza degli stomi⁶⁶; nella respirazione si inverte il senso della reazione generando anidride carbonica, acqua ed energia dalla combinazione di carboidrati e ossigeno. L'apertura degli stomi dipende dalla temperatura dell'aria esterna, dalla radiazione solare disponibile e dalla concentrazione di anidride carbonica nell'aria: in condizioni di stress idrico (massima traspirazione della pianta), gli stomi vengono chiusi dalle cellule di guardia inibendo i processi di fotosintesi e traspirazione.

Poiché tali fenomeni avvengono contemporaneamente nel corso di un'intera giornata, il tasso netto di fotosintesi ΔP è espresso come differenza tra il tasso di assimilazione dell'anidride carbonica P e il tasso della sua perdita per respirazione R . Il comportamento biochimico della pianta dipende proprio dal tasso di calore impiegato nel processo di fotosintesi ΔQ_P :

$$\Delta Q_P = \Phi \cdot \Delta P = \Phi \cdot (P - R)$$

relazione in cui Φ è il calore di assimilazione del carbonio. Il valore di ΔQ_P varia nel corso della giornata: positivo nelle ore diurne, in cui la pianta è un utilizzatore di anidride carbonica, negativo nelle ore notturne. Misurazioni sperimentali in situ e in laboratorio confermano che nei climi caldo-umidi la vegetazione di una copertura verde assorbe anidride carbonica durante il dì, in quantità notevolmente superiori al rilascio notturno⁶⁷. L'assorbimento di energia necessario ad alimentare il processo di fotosintesi si colloca nell'intervallo spettrale $0,4\div 0,7\mu\text{m}$, alle frequenze visibili; la radiazione compresa in questo intervallo, ossia l'energia impiegata per la crescita della pianta, è assorbita per circa l'80% e determina l'aumento della temperatura delle foglie. Al passaggio alla regione dell'infrarosso vicino, fino a $1,35\mu\text{m}$, si verifica un aumento della componente riflessa dalle foglie e la riduzione repentina dell'assorbimento: tale situazione comporta

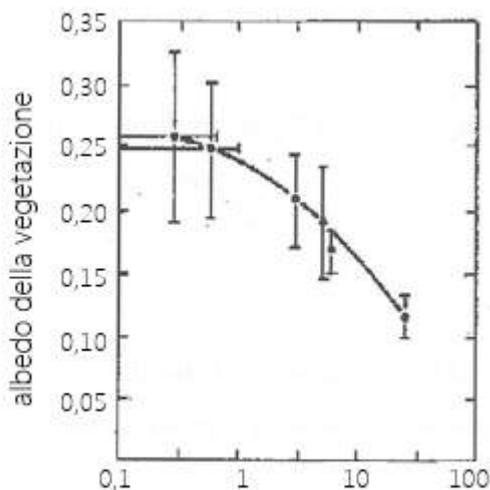


Figura 3.34 – La variazione dell'albedo in funzione dell'altezza media della specie vegetale piantumata (adattamento da Oke T. R., 1987).

Considerando la pianta nella sua interezza, l'interazione tra le foglie in termini di geometria ed orientazione rende la definizione del bilancio energetico operazione di grande complessità. È possibile però affermare che, in termini generali, l'albedo globale della vegetazione diminuisca all'aumentare della sua altezza di sviluppo e con l'altezza apparente del sole nel cielo.

3.3.3. Prestazioni relative al controllo del ciclo idrico

La prestazione più efficace delle coperture verdi – se rapportata ad altre soluzioni tecnologiche di copertura – il controllo del deflusso delle acque meteoriche, è stato 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 e dalle strade verso i corpi ricettori ricorrendo ad un deflusso veloce. Questa linea è stata rivista in tempi recenti, quando si è manifestato appieno l'effetto negativo della cementificazione dei canali e della rettificazione dei corsi d'acqua⁶⁸. Le azioni di controllo tradizionale del deflusso a scala di edificio hanno quindi portato al sovraccarico dei sistemi di drenaggio delle acque meteoriche e delle fognature, con conseguenti rischi di allagamento dei corpi ricettori e possibile confluenza di agenti inquinanti nei ricettori naturali.

Una delle principali funzioni efficacemente espletate da una copertura verde, sistema tecnologico atto a garantire le condizioni di vita adatte di uno strato vegetale separato dal suolo, è quindi la gestione delle acque meteoriche ed una conseguente riduzione degli effetti negativi generati, nelle stesse condizioni al contorno, da una superficie impermeabile:

- controllo dello scorrimento superficiale;

- riduzione della portata di acqua meteorica convogliata verso il sistema di smaltimento, e di qui alla fognatura o ai corpi ricettori;
- riduzione dell'onda di picco dell'idrogramma, ossia della massima portata d'acqua istantanea gravitante sulla copertura;
- ritardo nella confluenza dell'onda di picco al sistema di smaltimento⁶⁹.

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

Tabella 3.29 – Portate di deflusso indicative al variare della finitura e dell'utilizzo del suolo (adattamento da Abram P., 2006, pag. 10, modifica da Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung, Edzard E. H., Hydropress Verlag, 2000).

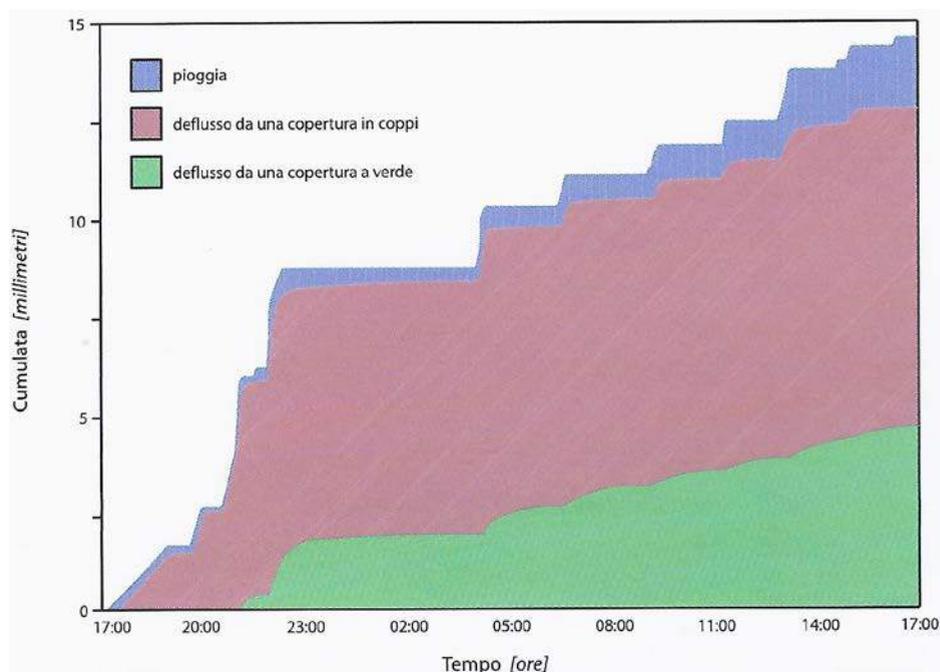


Figura 3.35 – Effetto di ritenzione di una copertura verde alla scala di singolo evento meteorico (fonte Mentés J., Raes D., Hermý M., Green roof as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century, in Landscape and Urban Planning, n. 77, 2006; elaborazione di Giacomello E., 2011, pag. 90).

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 [70], 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.

<i>SUOLO</i>	<i>NOTE</i>	<i>COEFFICIENTE DI DEFLUSSO ψ</i>
verde pensile estensivo ⁽¹⁾	strato colturale < 15 cm	0,45
verde pensile intensivo leggero ⁽¹⁾	strato colturale < 25 cm	0,35
verde pensile intensivo ⁽¹⁾	strato colturale < 35 cm	0,25
	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.

Tabella 3.30 – Valori del coefficiente di deflusso in alcune tipologie di copertura verde e confronto con altre tipologie di copertura (fonte www.comune.bolzano.it).

Una copertura verde, rispetto ad una copertura tradizionale impermeabilizzata, presenta un coefficiente di deflusso sensibilmente inferiore: rispetto ad una superficie impermeabile, per la quale $\Psi=0,95\div 1,00$, un inverdimento estensivo, caratterizzato da uno strato colturale di spessore pari a 10 cm, riduce il coefficiente di deflusso al valore $\Psi=0,40\div 0,45$. Strati colturali di 40÷50 cm, adatti all'inverdimento intensivo, presentano un valore $\Psi=0,10\div 0,15$ prossimo a quello del terreno vegetale incolto. Tale prestazione risulta di grande interesse se rapportata a quella di una copertura tradizionale ad elevate prestazioni energetiche: il coefficiente di deflusso rappresenta allora il parametro più efficace per evidenziare il contributo delle coperture verdi ai requisiti pertinenti alla classe di esigenza di salvaguardia ambientale, anche nell'ottica di predisposizione di eventuali meccanismi incentivanti.

Altre prove di laboratorio testimoniano che, in presenza di uno strato drenante in materiale plastico preformato, l'aumento dello spessore dello strato colturale comporti una riduzione del coefficiente di deflusso e del picco dell'idrogramma, sebbene tale relazione non sia di tipo direttamente proporzionale⁷¹; si evince inoltre che la percentuale di abbattimento del picco con strato drenante artificiale sia molto ridotta rispetto ad una soluzione con drenante naturale.

Infine, l'efficacia nel controllo del deflusso offerta dalle coperture verdi è molto ridotta per precipitazioni di forte intensità: se lo strato colturale si trova in condizioni prossime alla saturazione all'inizio di un evento meteorico, soltanto una quota ridotta del volume prodotto sarà ricevibile dai vuoti ivi presenti.

Alle scale temporali brevi (singolo evento meteorico) i fattori che influenzano la prestazione della copertura verde sono il contenuto di umidità dello strato colturale (capacità di campo⁷²) e l'altezza di pioggia prodotta dalla precipitazione: tali fattori incidono sul processo di ritenzione del volume complessivo di acqua meteorica immesso in rete dalla copertura, riducendo il picco dell'idrogramma e lo sfasamento del suo ingresso in rete.

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; a parità di spessore dello strato colturale e dell'intensità di pioggia, in coperture a maggiore pendenza si manifesta riduzione della capacità di ritenzione⁷³;
- lo sviluppo degli apparati fogliari della vegetazione; all'aumentare degli stessi, migliorano le prestazioni sul lungo periodo, poiché i fenomeni evapotraspirativi sono maggiori in presenza di LAI elevati.

Una copertura verde può fungere inoltre da elemento tecnico per la riduzione per assorbimento dei carichi inquinanti di cui le precipitazioni atmosferiche sono foriere in ambito urbano, solitamente originati dalla pulizia dei materiali frequentemente impiegati per la realizzazione di pluviali e canali di gronda (lamiere zincate, profili in

rame). Inoltre, considerando l'orizzonte temporale di un singolo evento meteorico, può temporaneamente trattenere ed inibire il relativo carico.

Si evidenzia comunque che la copertura verde può trasferire alla portata meteorica in uscita, attraverso gli strati ad elevata permeabilità, un carico di sostanze inquinanti aggiuntivo derivante dall'impiego di fertilizzanti. Infatti, il necessario apporto di nutrienti quali azoto, potassio, fosforo, porta all'alterazione del volume idrico addotto allo strato colturale, fenomeno più accentuato nelle installazioni di tipo estensivo.

I principali fattori che influenzano le prestazioni di trattamento dell'acqua di una copertura verde sono essenzialmente:

- la composizione dello strato colturale e le essenze vegetali impiegate;
- l'intensità delle azioni di manutenzione;
- l'età dell'installazione verde.

Per quanto concerne i parametri generali di caratterizzazione della qualità dell'acqua, risultati sperimentali⁷⁴ testimoniano un incremento dei valori di pH sia in riferimento alle precipitazioni tipiche degli ambiti urbani, sia a confronto con i valori misurati in acque meteoriche dilavate da coperture 'tradizionali'.

Nel periodo compreso tra maggio 2007 e giugno 2008, nel sito sperimentale realizzato presso l'Università di Genova⁷⁵ sono stati registrati – mediante una stazione di misura di precipitazioni, umidità dell'aria e portata effluente – i dati inerenti il ciclo e la qualità della risorsa idrica defluita da una installazione a verde pensile intensivo, costituita da uno strato drenante naturale in lapillo di origine vulcanica di spessore pari a 20 cm, sormontato da uno strato colturale in frammenti vulcanici di pari spessore e da uno strato vegetale a prato spontaneo.

Per alcuni eventi meteorici di modesta portata, preceduti da periodi secchi di durata prossima a 12 ore, il volume d'acqua ritenuto dalla copertura verde è stato pari a quello complessivamente gravitante sulla copertura (portata di deflusso nulla); all'opposto, valori di volume ritenuto minimi, nell'ordine del 4%, sono stati misurati nei periodi autunnali, in cui sono massime le precipitazioni e ridotti i fenomeni evapotraspirativi⁷⁶. L'abbattimento dell'onda di picco dell'idrogramma è influenzato in prevalenza dalle precipitazioni brevi e intense, manifestando valori del 40÷100%.

Si conclude che le prestazioni idrologiche offerte dal verde pensile in questa installazione sono notevoli anche considerando le prestazioni complessive sull'intero periodo di valutazione: le medie di ritenzione del volume idrico sono pari al 75%, quelle di abbattimento del picco dell'idrogramma pari al 90% [77].

Le coperture verdi, qualora impiegate ad una scala più ampia del singolo fabbricato, ossia a scala di quartiere o più propriamente di bacino di drenaggio, rappresentano una strategia efficace per il controllo delle precipitazioni atmosferiche anche se di notevole intensità, prevenendo quindi possibili fenomeni di allagamento e ripristinando il ciclo idrologico in contesti ad elevata densità edilizia: questo fatto sottolinea la potenzialità degli inverdimenti / conversioni a verde pensile se disciplinati nella pianificazione urbanistica.

3.4. Bibliografia

- Abram P., *Verde pensile in Italia e in Europa*, il Verde Editoriale, Milano, 2006. ISBN: 88-86569-24-6.
- Bengtsson L., *Peak flows from thin sedum-moss roof*, in *Nordic Hydrology*, n. 36, 2005.
- Capozzoli A., Gorrino A., Corrado V., *Thermal characterization of green roofs through dynamic simulation*, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, 26-28 agosto 2013.
- Ciaponi C., Papiri S., Sanfilippo U., Todeschini S. (a cura di), *Acque di prima pioggia nei sistemi di fognatura*. Hoepli Editore, Milano, 2014. ISBN: 9788820363222.
- Cleugh H. A., Oke T. R., *Suburban – rural energy balance comparison in summer for Vancouver (British Columbia)*, in *Building Layer Meteorology* n. 36, 1986.
- D’Orazio M., Di Perna C., Di Giuseppe e., *Green roof yearly performance: a case study in a highly insulated building under temperate climate*, in *Energy and Buildings* n. 55, 2012.
- Eumorfopoulou E., Aravantinos D., *The contribution of a planted roof to thermal protection of buildings in Greece*, in *Energy and Buildings* n. 27, 1998.
- Fioretti R., Palla A., Lanza L. G., Principi P., *Green roof technology and water related performance in the Mediterranean climate*, in *Building and Environment*, n. 45, 2010.
- Fiori M. (a cura di), *Coperture a verde. Ricerca, progetto ed esecuzione per l’edificio sostenibile*. Hoepli Editore, Milano, 2011. ISBN: 978-88-203-4159-6.
- Fiori M., Poli T., *Coperture a verde. Esempi di progettazione*. Maggioli Editore, Rimini, 2008.
- Giacomello E., *La copertura a verde come sistema di gestione delle precipitazioni atmosferiche: ricadute sull’ambiente urbano*, in *Il Progetto Sostenibile*, n. 30, 2011.
- Gnecco I., Palla A., Lanza L. G., *Il verde pensile: regimazione e depurazione delle acque meteoriche*, in *Ingegneria Ambientale*, n. 3/2009, pagg. 79-89.
- Grosso M., Peretti G., Piardi S., Scudo G., *Progettazione ecocompatibile dell’architettura*. Sistemi Editoriali, Napoli, 2005. ISBN: 978-88-513-0286-3.
- Jaffal I., Ouldboukhitine S., Belarbi R., *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*, in *Renewable Energy* n. 43, 2012.
- Kotsiris G., Androutsopoulos A., Polychroni E., Nektarios P.A., *Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs*, in *Energy and Buildings* n. 45, 2012.
- Kumar R., *Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings*, in *Building and Environment* n. 40, 2005.
- Lazzarin R. M., Castellotti F., Busato F., *Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*, in *Energy and Buildings* n. 37, 2005.

- Li J., Wai O. W. H., Li Y. S., Zhan J., Ho Y. A., Li J., Lam E., *Effect of green roof on ambient CO₂ concentration*, in *Building and Environment*, n. 46, 2010.
- Moody S. S., Sailor D. J., *Development and application of a building energy performance metric for green roof systems*, in *Energy and buildings*, n. 60, 2013.
- Nardini A., Savi T., Andri S., *Verde pensile mediterraneo. Un giardino per Pegaso*, in ACER Ricerca, n. 5/2012, il Verde Editoriale.
- Niachou A., Papakonstantinou K., Santamouris M., Tsangrassoulis A., Mihalakakou G., *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, in *Energy and Buildings* n. 33, 2001.
- Oke T. R., *Boundary Layer Climates*. Routledge, Cambridge, 1987. ISBN: 978-0415043199.
- Ooka R., *Recent development of assessment tools for urban climate and heat -island investigation especially based on experiences in Japan*, in *International Journal of Climatology*, n. 27, 2007.
- Palla A., Gnecco I., Lanza L. G., *Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs*, in *Water*, vol. 2, 2010.
- Palomo del Barrio E., *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*, in *Energy and buildings* n. 27, 1998.
- Sailor D. J., *A green roof model or building energy simulation programs*, in *Energy and Buildings*, n. 40, 2008.
- Santamouris M., *Analysis of the green roof thermal properties and investigation on its energy performance*, in *Energy and Buildings* n. 33, 2001.
- Scholtz-Barth K., *Green roofs, storm water management from the top down*, in *Environmental Design and Construction*, Jan/Feb 2001.
- Susca T., Gaffin s. R., Dell'Osso G. R., *Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs*, in *Environmental Pollution*, n. 159, 2011.
- Wong N. H. et al, *The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore*, in *Energy and Buildings* n. 35, 2003.

NOTE AL CAPITOLO 3

¹ La norma UNI 11235 definisce gli strati funzionali "elementi", ad esclusione dello strato culturale e dello strato di vegetazione.

² Fiori M., Poli T., 2008, pag. 19.

³ Baraldi R., Rapparini F., Salomoni M.T., *La progettazione del verde*, in Fiori M., 2011, pag. 69.

⁴ Genere di piante xerofile (quindi adatte a vivere in ambienti caratterizzati da periodi di siccità), appartenente alla famiglia *Crassulaceae*, a fusto eretto o pendente; alcune specie rustiche (*sedum acre*, *sedum maximum*) sono coltivabili all'aperto in tutta Italia, mentre altre specie più sensibili

vanno riparate in inverno. Il *sedum* cresce spontaneamente nei giardini rocciosi e nelle intercapedini delle pareti; essendo assai sensibili all'umidità, il terreno deve essere ben drenato per evitare l'insorgere di marciume.

⁵ *Green Roof Guidelines*, Life+ Fund, European Commission, disponibile all'indirizzo www.greenroofguidelines.co.uk.

⁶ Le piante vascolari sono accomunate dalla presenza di un sistema di vasi atti alla conduzione dell'acqua: sono quindi escluse da tale classificazione alghe e muschi. È condivisa la suddivisione delle piante vascolari in tre gruppi principali in base al grado evolutivo:

- Pteridofite, prive di infiorescenze, a riproduzione tramite spore;
- Gimnosperme, caratterizzate da infiorescenze primitive, a portamento arboreo o arbustivo;
- Angiosperme, caratterizzate da semi protetti e ricoperti da un frutto che ne facilita la dispersione.

⁷ Si definisce funzione sigmoidea una funzione che produce una curva con andamento ad "S" (sigmoide): ad esempio $f(x)=1/(1+\exp(-x))$.

⁸ Nardini A. et al., 2012, pagg. 38-39.

⁹ Norma tecnica di riferimento UNI EN 13652:2001 – *Ammendanti e substrati per coltura. Estrazione di nutrienti ed elementi solubili in acqua.*

¹⁰ Norma tecnica di riferimento UNI EN 13037:2012 – *Ammendanti e substrati di coltivazione. Determinazione del pH.*

¹¹ Norma tecnica di riferimento UNI EN 13041:2012 – *Ammendanti e substrati di coltivazione. Determinazione delle proprietà fisiche. Massa volumica apparente secca, volume d'aria, volume d'acqua, coefficiente di restringimento e porosità totale.*

¹² Norma tecnica di riferimento UNI EN 1097:2013 parte 6 – *Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati. Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua.*

¹³ Norma tecnica di riferimento UNI EN 13039:2012 – *Ammendanti e substrati di coltivazione. Determinazione della sostanza organica e delle ceneri.*

¹⁴ Nardini A. et al., 2012, pag. 40.

¹⁵ Norma tecnica di riferimento UNI EN 12958:2010 – *Geotessili e prodotti affini. Determinazione della capacità drenante nel piano.*

¹⁶ Norma tecnica di riferimento UNI EN 12056:2001 parte 3 – *Sistemi di scarico funzionanti a gravità all'interno degli edifici. Sistemi per l'evacuazione delle acque meteoriche, progettazione e calcolo.*

¹⁷ Norme tecniche di riferimento UNI EN 1107:2002 parte 1 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane bituminose per l'impermeabilizzazione delle coperture. Determinazione della stabilità dimensionale* e UNI EN 1107:2002 parte 2 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Determinazione della stabilità dimensionale. Membrane di materiale plastico e gomma per l'impermeabilizzazione delle coperture.*

¹⁸ Norme tecniche di riferimento UNI EN 1109:2002 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane bituminose per l'impermeabilizzazione delle coperture. Determinazione della flessibilità a freddo* e UNI EN 495:2002 parte 5 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Determinazione della piegabilità a basse temperature. Membrane di gomma e materiale plastico per l'impermeabilizzazione delle coperture.*

¹⁹ Norma tecnica di riferimento UNI EN 12730:2002 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane bituminose, di materiale plastico e di gomma per impermeabilizzazione delle coperture. Determinazione della resistenza al carico statico.*

²⁰ Norme tecniche di riferimento UNI EN 1296:2002 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane bituminose, di materiale plastico e gomma per impermeabilizzazione di coperture. Metodo di invecchiamento artificiale tramite esposizione a lungo termine ad elevate temperature* e UNI EN 1297:2005 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane di bitume, plastica e gomma per l'impermeabilizzazione di coperture. Metodo di invecchiamento artificiale tramite esposizione combinata di lunga durata alle radiazioni UV, alla temperatura elevata e all'acqua.*

²¹ Norma tecnica di riferimento UNI EN ISO 846:1999 – *Materie plastiche. Valutazione dell'azione dei microorganismi.*

²² Norma tecnica di riferimento UNI EN 13948:2007 – *Membrane flessibili per impermeabilizzazione. Membrane bituminose, di materiale plastico e di gomma per l'impermeabilizzazione delle coperture. Determinazione della resistenza alla penetrazione delle radici.*

²³ Fiori M., 2011, pag. 18.

²⁴ UNI EN 1605:2013 – *Isolanti termici per edilizia. Determinazione della deformazione in condizioni specificate di carico di compressione e di temperatura.*

²⁵ Norma tecnica di riferimento UNI EN 12087:2013 – *Isolanti termici per edilizia. Determinazione dell'assorbimento d'acqua per immersione per lungo periodo.*

²⁶ Norma tecnica di riferimento UNI EN 12091:2013 – *Isolanti termici per edilizia. Determinazione della resistenza al gelo - disgelo.*

²⁷ Fiori M., 2011, pag. 15.

²⁸ Norme tecniche di riferimento serie UNI EN 12484:2002 – *Tecniche di irrigazione. Sistemi di irrigazione automatica da prato.*

²⁹ Ivi, pagg. 28-29.

³⁰ Abram, 2006.

³¹ Si definisce contenuto d'umidità volumetrico θ (nella letteratura anglosassone *volumetric moisture content*) il rapporto tra il volume d'acqua presente nel terreno ed il volume totale, dato dalla somma del volume delle particelle solide e del volume dei vuoti:

$$\theta = \frac{V_W}{V_S + V_V} = \frac{V_W}{V_S + V_W + V_A}$$

Il grado di saturazione del terreno S_w (nella letteratura anglosassone *water saturation*) è invece definito come:

$$S_w = \frac{V_W}{V_V} = \frac{V_W}{\phi \cdot (V_S + V_W + V_A)} = \frac{\theta}{\phi}$$

in cui ϕ è la porosità del terreno. I valori teorici di S_w possono quindi variare nell'intervallo [0;1].

³² Moody S. S. et al. 2013, pag. 262.

³³ Arlunno R., *Ambiente ed energia*, in Fiori M., 2011, pag. 86.

³⁴ Tale definizione è riportata nello studio *Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models* di Myneni R. B., Nemani R. R., Running S. W., in *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, novembre 1997, per tener conto che alcune specie vegetali, ad esempio le conifere caratterizzate da aghi a sezione circolare, non permettono di valutare compiutamente la superficie di scambio per la fotosintesi.

³⁵ Arlunno R., *Ambiente ed energia*, in Fiori M., 2011, pag. 89.

³⁶ Sailor D. J., 2008, pag. 1468.

³⁷ Grosso M. et al., 2005, pag. 141.

³⁸ Quota di energia solare incidente potenzialmente oggetto di assorbimento da parte dei materiali.

³⁹ La maggiore quota assorbita al crescere del LAI è dovuta al fatto che l'apparato fogliare nel suo complesso ha un effetto maggiore che non quello reso possibile dalla somma delle superfici delle singole foglie.

⁴⁰ Palomo del Barrio E., 1998, pag. 188.

⁴¹ Kumar R., 2005, pag. 1510.

⁴² D'Orazio M. et al., 2012, pag. 444.

⁴³ Palomo del Barrio E., 1998, pag. 189.

⁴⁴ Wong N. H. et al., 2003.

⁴⁵ Lazzarin R. M. et al., 2005, pagg. 1264-1265.

⁴⁶ Palomo del Barrio E., 1998, pag. 190.

⁴⁷ Kotsiris G. et al., 2012, pagg. 246-247.

⁴⁸ Arlunno R., *Ambiente ed energia*, in Fiori M., 2011, pag. 92.

⁴⁹ Moody S. S. et al., 2013, pag. 264.

⁵⁰ Eumorfopoulou E. et al., 1998, pag. 35.

⁵¹ Santamouris M., 2001.

⁵² Niachou A. et al., 2001, pagg. 720-722.

⁵³ *Ivi*, pag. 728.

⁵⁴ D'Orazio M. et al., 2012, pag. 451.

⁵⁵ Capozzoli A. et al., 2013.

⁵⁶ Lazzarin R. M. et al., 2005, pag. 1267.

⁵⁷ Jaffal I. et al., 2012, pag. 163.

⁵⁸ In tale ambito si inserisce la classificazione proposta dalla norma tecnica UNI 11235 in merito alle prestazioni di inerzia termica.

⁵⁹ Inoltre le Corbusier avanza una proposta di soluzione tecnologica per la realizzazione del tetto giardino: uno strato di sabbia parzialmente ricoperto da blocchi in cemento secondo geometrie sfalsate, così da consentire la semina a prato e garantire un'adeguata inerzia termica alla copertura e la lenta filtrazione dell'acqua allo strato colturale.

⁶⁰ Cleugh H. A. et al., 1986, pag 355.

⁶¹ Oke T. R., 1987.

⁶² Susca T. et al., 2011, pag. 2120.

⁶³ Ooka R., 2007.

⁶⁴ Margelli F., Rossi S., Georgiadis T., Arlunno R., *Il clima urbano*, in Fiori M., 2011, pagg. 149-150.

⁶⁵ Ivi, pag. 157.

⁶⁶ Gli stomi sono le strutture porose presenti sulla superficie fogliare delle piante, in alcune solo sulla pagina inferiore, la cui funzione è provvedere allo scambio di anidride carbonica ed ossigeno con l'ambiente. Due cellule dette di guardia aprono o chiudono lo stoma, regolando questo processo di trasferimento.

⁶⁷ Li J. et al., 2010, pag. 2651.

⁶⁸ Abram P., 2006, pag. 9.

⁶⁹ Ciaponi C. et al., 2014, pag. 347.

⁷⁰ Bengtsson L., 2005, pagg. 269-280.

⁷¹ Scholtz-Barth K., 2001.

⁷² La capacità di campo è una costante idrologica del composto costituente lo strato colturale. Misurata in percentuale come l'umidità relativa, indica il contenuto d'acqua dello strato in corrispondenza del rapporto ottimale tra i volumi d'acqua e d'aria in esso presenti, ottenuto quando i micropori – di dimensione $< 8 \mu\text{m}$ – sono interamente occupati dall'acqua, mentre i macropori ne sono completamente privi.

⁷³ Gnecco I., Palla A., Lanza L. G., 2009, pag. 78.

⁷⁴ Palla A. et al., 2010, pag. 145.

⁷⁵ Il sito pilota è stato installato in collaborazione con il Comune di Genova e l'Associazione Italiana Verde Pensile (AIVEP).

⁷⁶ Ciaponi C. et al., 2014, pag. 348.

⁷⁷ Palla A., Gnecco I., Lanza L. G., *La gestione delle acque*, in Fiori M., 2011, pag. 179.

Capitolo 4

Valutazione delle implicazioni strutturali delle coperture verdi

Raul Berto, Carlo Antonio Stival

Nel presente capitolo verranno affrontati qualitativamente gli aspetti strutturali legati alla realizzazione di coperture verdi su edifici esistenti in sostituzione degli elementi tecnici originari. Saranno proposte alcune riflessioni derivanti dall'analisi dei carichi di alcune soluzioni tecnologiche riscontrabili negli elementi tecnici di copertura tipici degli anni '60 - '70, rapportate ai carichi indotti dagli strati funzionali tipici dell'inverdimento estensivo. L'analisi dei carichi proposta per ciascuna soluzione tecnologica permetterà di individuare la categoria di intervento più congrua, valutandone a grandi linee l'onerosità tecnica ed economica.

Per lo svolgimento di questa analisi, si definirà un oggetto edilizio di riferimento del quale si propone la riqualificazione dell'elemento tecnico di copertura. L'edificio di riferimento sarà riproposto, e più compiutamente descritto, nel successivo capitolo, in

cui si effettuerà una valutazione della convenienza economica delle coperture verdi. Per le finalità di questo capitolo, ne verrà considerato il solo sistema strutturale, con l'obiettivo di impostare l'analisi dei carichi.

4.1. Le prestazioni richieste allo strato portante e le verifiche a scala locale

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:

- locale, per la quale si richiede che la struttura portante di copertura sia capace di resistere alle sollecitazioni derivanti del sovraccarico indotto dagli strati funzionali, che si presume sia già più rilevante nelle coperture verdi estensive rispetto a soluzioni tecnologiche più 'tradizionali';
- globale, alla quale è richiesta l'eventuale, nuova, verifica della prestazione complessiva del subsistema strutturale, ed è quindi principalmente riferita alle strutture in elevazione ed al sistema di fondazione che trasferisce i carichi indotti dall'edificio al terreno.

A scala locale la condizione che vincola la possibilità e la tipologia di inverdimento è la capacità portante residua dello strato portante di copertura; tale condizione si esplicita direttamente per strutture prefabbricate, mentre è espressa in modo implicito per sistemi strutturali tradizionali:

- differenza tra momento resistente e momento sollecitante per coperture a falda;
- differenza tra gli sforzi assiali resistente e sollecitante per le strutture a capriata.

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.

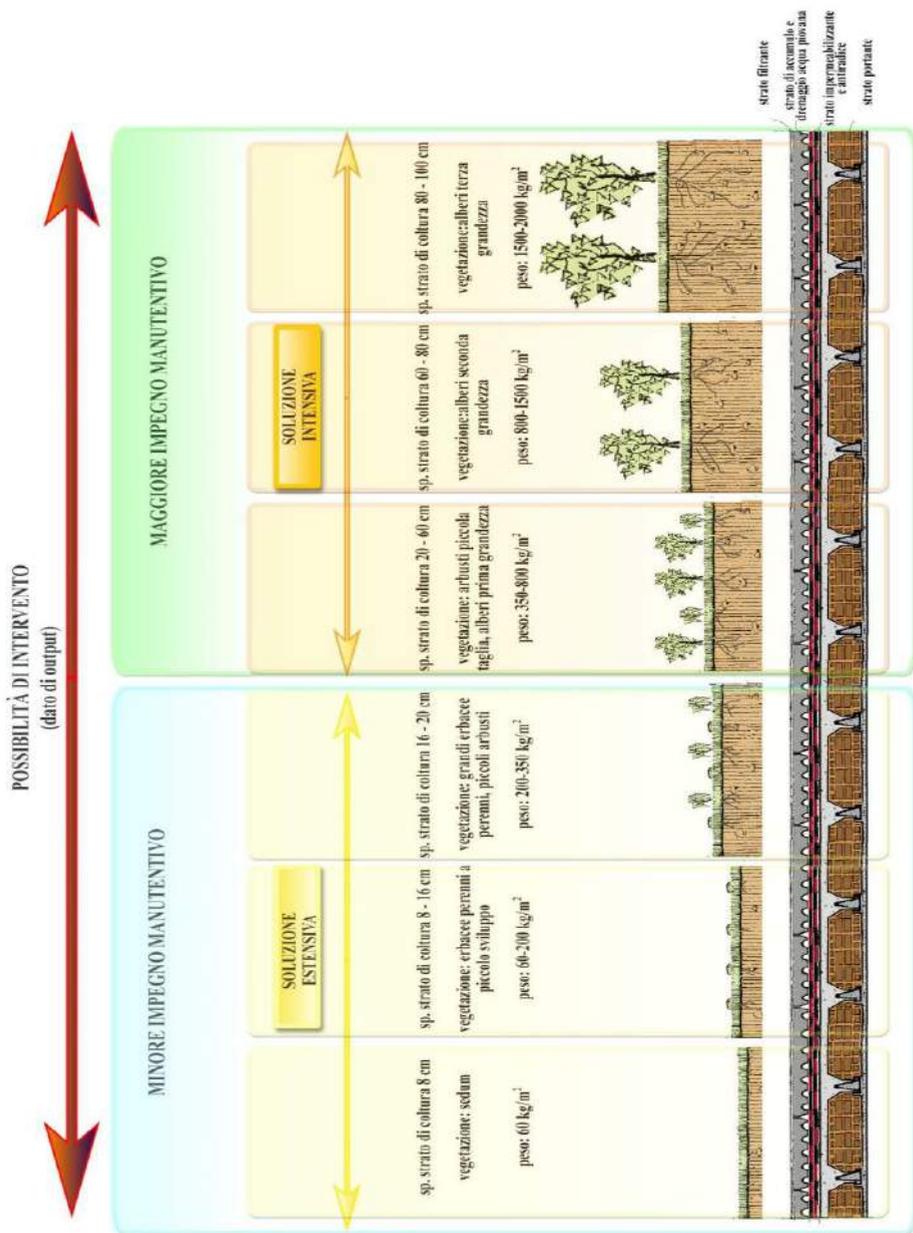


Figura 4.1 – Rappresentazione della variazione delle specie vegetali, dei pesi e degli spessori nelle diverse tipologie di copertura verde (fonte Olaf Simonettig, "Coperture pensili estensive: tecnologie e prestazioni. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. ing. C. A. Stival, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

Eventuali regolamenti prescrittivi locali in tema di coperture verdi dovrebbero considerare l'istituto della deroga al fine di perseguire gli obiettivi di protezione e salvaguardia della vita, delle attività umane e del patrimonio edilizio nell'ambito della sicurezza nelle costruzioni.

4.2. L'approccio agli interventi su edifici esistenti nel D.M. 14/01/2008

Riferendosi al comportamento globale dell'edificio, la vigente normativa tecnica italiana (nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, di cui al D.M. 14 gennaio 2008) individua le seguenti categorie di intervento su edifici esistenti:

1. interventi di adeguamento atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle norme tecniche stesse;
2. interventi di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle norme tecniche stesse;
3. riparazioni o interventi locali che interessino elementi tecnici isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

La normativa vigente impone la valutazione della sicurezza e l'eventuale adeguamento della costruzione dei casi di:

- sopraelevazione della costruzione;
- ampliamento della costruzione mediante 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%; resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;
- interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

Degli interventi di miglioramento fanno parte tutti gli interventi finalizzati all'accrescimento della capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate. Gli interventi di riparazione, o interventi locali, riguardano singoli parti e/o elementi della struttura e interessano porzioni limitate della costruzione. In questo caso *“il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati e documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non siano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.”*

Per gli interventi di realizzazione di coperture a verde pensile è necessario valutare che sussistano o meno i vincoli specificati per gli interventi di adeguamento. Si ritiene,

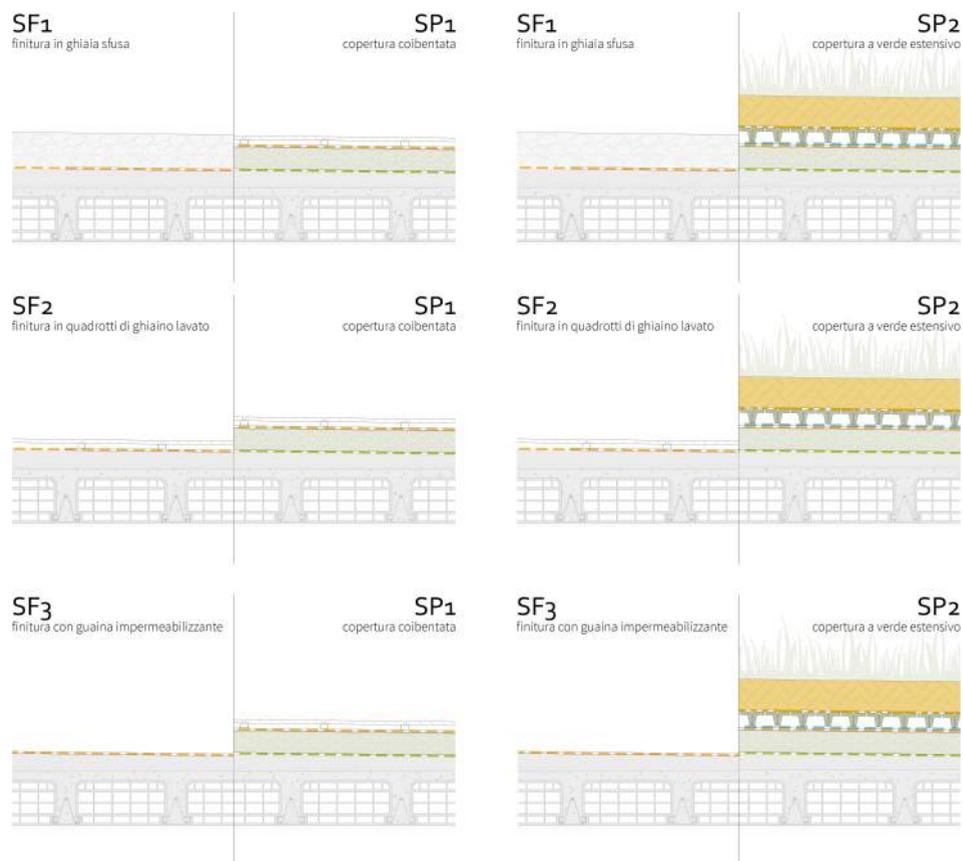
infatti, che non sussistano le condizioni per cui l'installazione di coperture a verde pensile possano essere considerate interventi di miglioramento o interventi locali. Questo perché tale tipologia di interventi non comporta un miglioramento globale o locale delle caratteristiche strutturali della costruzione.

Di seguito si valuterà la necessità o meno, in accordo con le NTC, di valutare la sicurezza strutturale globale dell'edificio.

4.3. Le soluzioni tecnologiche considerate

Si considera un edificio di riferimento di tre piani fuori terra per un'altezza di 12 ml, avente pianta a forma quadrata di dimensioni 28 ml x 28 ml ed altezza netta d'interpiano pari a 3,50 ml.

Il sistema strutturale è del tipo lineare a telai tridimensionali in c.a., solai d'interpiano del tipo Omnia Bausta di altezza $H=(24+4)$ cm, fondazioni lineari a trave rovescia. Le pareti perimetrali, considerato lo schema funzionale lineare del sistema strutturale, sono realizzate per tutta l'altezza dell'edificio in blocchi forati in laterizio di spessore 25 cm.



Prospetto 4.1 – Definizione degli scenari di intervento sulla copertura dell'edificio di riferimento.

L'elemento tecnico di copertura, analogo nella consistenza strutturale agli altri orizzontamenti, ha giacitura piana, condizione preliminare ottimale per l'installazione di una copertura verde. Nella definizione complessiva delle possibili soluzioni tecnologiche, se ne sono ipotizzate tre per lo stato di fatto, pertinenti all'edificio esistente (denominate SF1, SF2 e SF3), riferibili con una certa sicurezza al patrimonio edilizio degli anni '70 e caratterizzate da una scadente qualità energetica. È quindi ipotizzata la loro sostituzione con due soluzioni tecnologiche di progetto che contribuiscano alla riqualificazione dell'edificio: una prima "tradizionale", che prevede la coibentazione della copertura e la protezione dagli agenti atmosferici (SP1), ed una con inverdimento estensivo, che possa preliminarmente essere attribuita ad un edificio esistente (SP2). A ciascuna soluzione di stato di fatto corrisponderà, in un'analisi dei carichi a scenario, una soluzione di progetto.

4.3.1. *Stato di fatto*

In termini di soluzioni conformi, tutte riferibili allo schema funzionale di copertura piana, le tre varianti considerate allo stato di fatto sono caratterizzate dalla stessa successione, dallo strato più interno verso il più esterno:

1. strato di finitura interna;
2. strato portante;
3. strato di collegamento e pendenza;
4. strato di impermeabilizzazione;
5. strato di finitura esterna.

Alla scala di soluzione tecnologica, è stata variata la tipologia e la consistenza degli strati di finitura esterna, considerando l'eventuale sostituzione dello strato di impermeabilizzazione e individuando complessivamente tre soluzioni, delle quali si riporta di seguito l'individuazione dei parametri :

- la prima caratterizzata da uno strato di finitura in ghiaia sfusa (SF1);
- la seconda, considerata calpestabile, con finitura discontinua in quadrotti di ghiaio lavato (SF2);
- infine, la terza avente una finitura in guaina impermeabilizzante al di sopra dello strato di pendenza (SF3).

4.3.1.1. Soluzione SF1



Figura 4.2 – Rappresentazione strati funzionali soluzione SF1 – strato di finitura in ghiaia sfusa.

Descrizione	Spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
strato di ghiaia	0,100
totale	0,424

Tabella 4.1 – Caratteristiche strati funzionali soluzione SF1 – strato di finitura in ghiaia sfusa.

4.3.1.2. Soluzione SF2



Figura 4.3 – Rappresentazione strati funzionali soluzione SF2 – strato di finitura in quadrotti.

Descrizione	Spessore [m]
Intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
quadrotti in ghiaino lavato	0,040
Totale	0,364

Tabella 4.2 – Caratteristiche strati funzionali soluzione SF2 – strato di finitura in quadrotti.

4.3.1.3. Soluzione SF₃

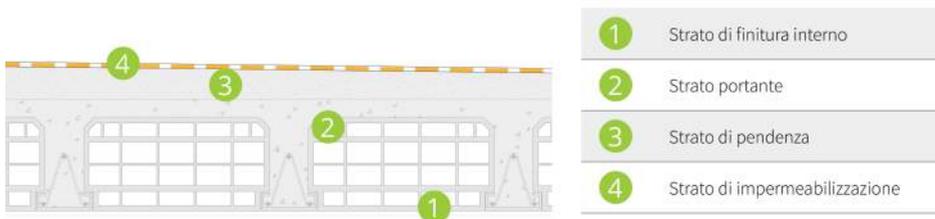


Figura 4.4 – Rappresentazione strati funzionali soluzione SF₃ – strato di finitura in quadretti.

Descrizione	spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
totale	0,324

Tabella 4.3 – Caratteristiche strati funzionali soluzione SF₃ – strato di finitura in guaina.

4.3.2. Stato di progetto

La soluzione di progetto SP1 consiste in una copertura coibentata, non ventilata, con interposizione di uno strato di materiale coibente protetto dagli agenti atmosferici.

4.3.2.1. Soluzione SP1

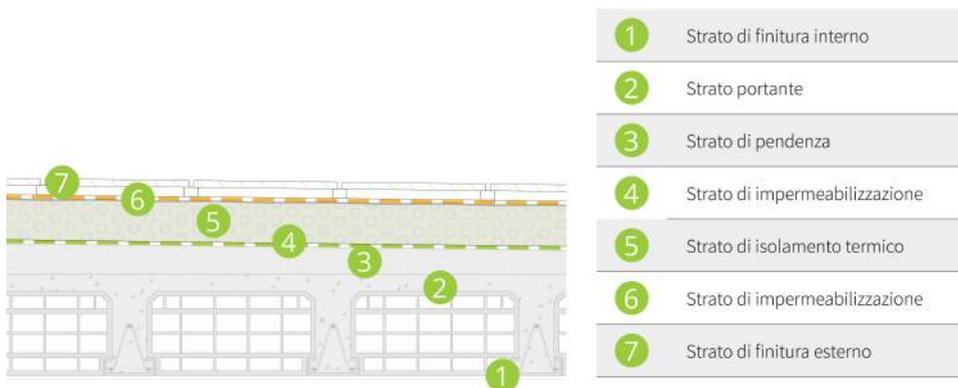


Figura 4.5 – Rappresentazione strati funzionali soluzione SP1 – copertura coibentata e finitura in quadretti di ghiaio lavato.

Descrizione	Spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
isolamento termico	0,140
guaina di impermeabilizzazione	0,004
totale	0,468

Tabella 4.4 – Caratteristiche strati funzionali soluzione SP1 - copertura coibentata e finitura in quadrotti di ghiaino lavato.

Per quanto invece concerne le tipologie di coperture verdi come illustrate nei capitoli precedenti, si considera una soluzione tecnologica di progetto SP2 a verde estensivo: una soluzione a verde intensivo, con le premesse della presente ricerca, non è infatti ritenuta applicabile ad un edificio esistente a causa del notevole spessore di terreno da imporre in sommità all'edificio stesso; tale situazione comporta sin da questa primissima valutazione un notevole aggravio dei carichi statici e sismici agenti sull'edificio, e costituisce quindi una notevole criticità.

4.3.2.2. Soluzione SP2

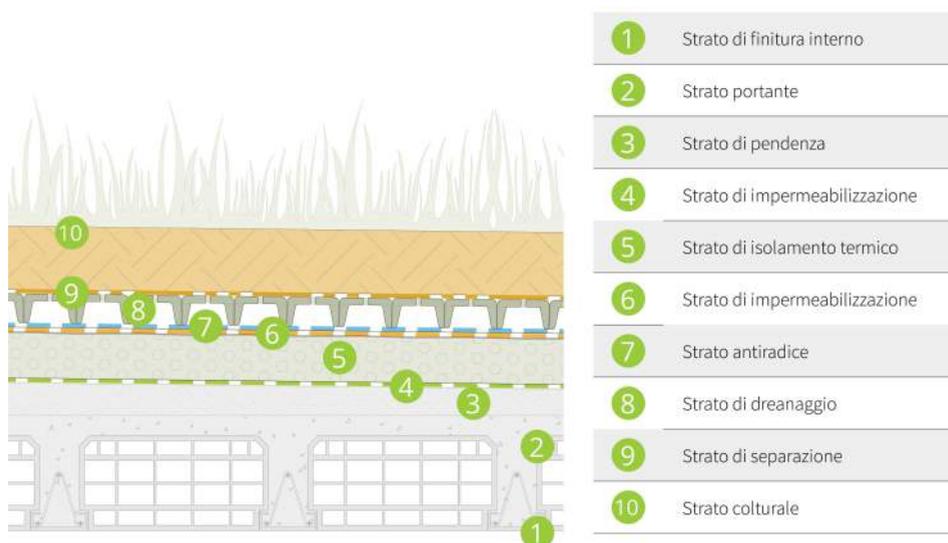


Figura 4.6 – Rappresentazione strati funzionali costituenti la soluzione SP2 – copertura verde estensiva coibentata.

Descrizione	Spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
isolamento termico	0,100
guaina di impermeabilizzazione	0,004
elemento di stoccaggio e drenaggio	0,005
acqua di accumulo	0,025
geotessile	0,001
strato colturale	0,100
essenze vegetali	/
totale	0,559

Tabella 4.5 – Caratteristiche strati funzionali soluzione SP2 – copertura verde estensiva.

4.4. Analisi dei carichi delle soluzioni considerate

Per ciascuna delle soluzioni identificate per lo stato di fatto, partendo dagli spessori degli strati e dalla tipologia di materiale di ciascuno, si è identificato il peso per unità di superficie, in modo da poterlo relazionare con le soluzioni tecnologiche proposte in seguito nello stato di progetto.

Descrizione	spessore [m]	peso unità di volume [kN/m ³]	peso unità di superficie [kN/m ²]
intonaco	0,020	18,000	0,360
solaio strutturale	0,250	/	4,000
massetto alleggerito	0,050	16,000	0,800
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
strato di ghiaia	0,100	17,000	1,700
totale	0,424		7,160

Tabella 4.6 – Analisi dei carichi soluzione tecnologica SF1 – strato di finitura in ghiaia sfusa.

Descrizione	spessore [m]	peso unità di volume [kN/m³]	peso unità di superficie [kN/m²]
intonaco	0,020	18,000	0,360
solaio strutturale	0,250	/	4,000
massetto alleggerito	0,050	16,000	0,800
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
quadrotti in ghiaio lavato	0,040	20,000	0,800
totale	0,364		6,260

Tabella 4.7 – Analisi dei carichi soluzione tecnologica SF2 – strato di finitura in quadrotti.

Descrizione	spessore [m]	peso unità di volume [kN/m³]	peso unità di superficie [kN/m²]
intonaco	0,020	18,000	0,360
solaio strutturale	0,250	/	4,000
massetto alleggerito	0,050	16,000	0,800
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
totale	0,324		5,460

Tabella 4.8 – Analisi dei carichi soluzione tecnologica SF3.

Nella realizzazione di una copertura verde su un edificio esistente si devono necessariamente prendere in considerazione gli effetti sulla struttura dovuti all'aumento dei carichi. Nel presente studio, quindi, si è determinato l'incremento dei carichi in copertura sia per la soluzione di progetto che prevede il solo strato isolante, che per quella che prevede la copertura verde estensiva. Mentre per lo strato isolante non occorre tener conto di altro che il peso dello stesso, per la copertura verde l'analisi risulta più complessa.

Si deve infatti tener conto dell'accumulo di acqua, con conseguente aumento di peso, a seguito di eventi meteorici. Il peso del terreno in condizioni di saturazione risulta ben diverso dalla condizione di terreno secco, per questo nell'analisi dei carichi si è ritenuto opportuno considerare la situazione più gravosa, ovvero quella di terreno completamente saturo (S=100%), oltre che la presenza di uno strato d'acqua pari a 2,5 cm.

Si riportano di seguito le tabelle riassuntive dei valori determinati secondo le precedenti ipotesi.

Descrizione	spessore [m]	peso unità di volume [kN/m ³]	peso unità di superficie [kN/m ²]
intonaco	0,020	18,000	0,360
solaio strutturale	0,250	/	4,000
massetto alleggerito	0,050	16,000	0,800
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
isolamento termico	0,140	1,250	0,175
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
totale	0,468		5,935

Tabella 4.9 – Analisi dei carichi soluzione tecnologica SP1 – copertura coibentata con finitura in quadrotti di ghiaio lavato.

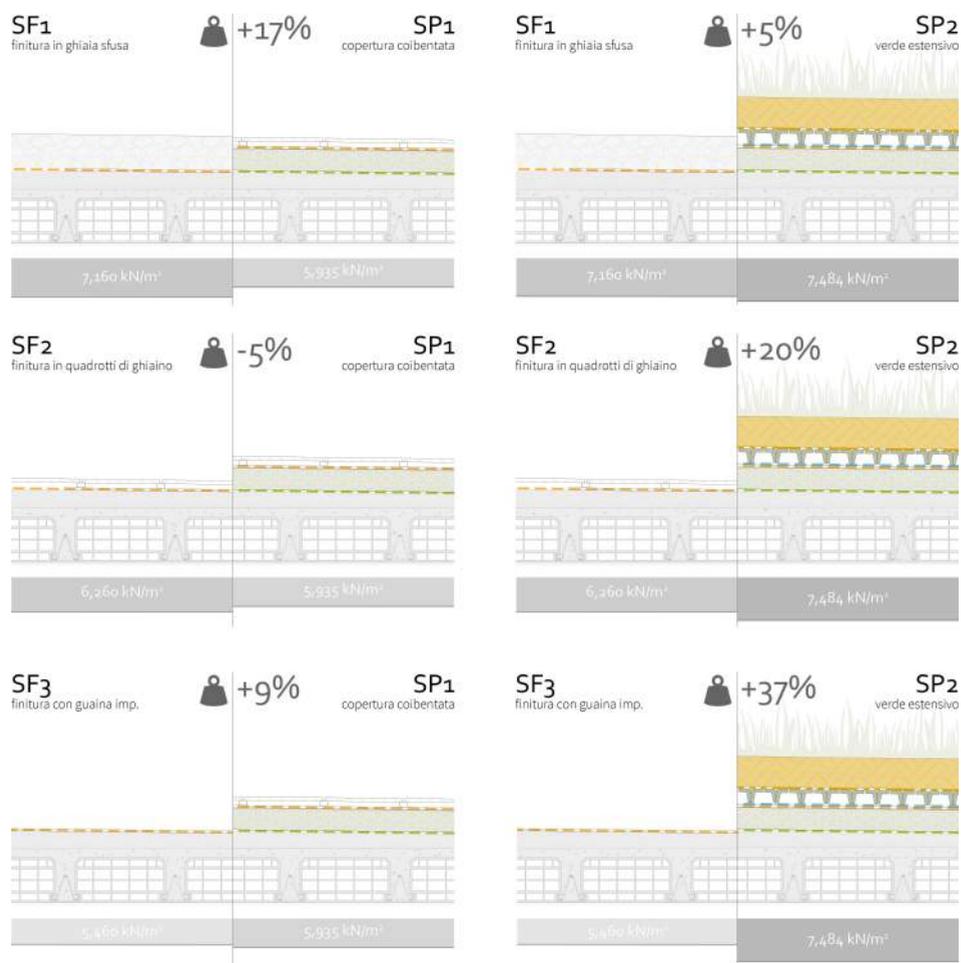
Descrizione	spessore [m]	peso unità di volume [kN/m ³]	peso unità di superficie [kN/m ²]
intonaco	0,020	18,000	0,360
solaio strutturale	0,250	/	4,000
massetto alleggerito	0,050	16,000	0,800
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
isolamento termico	0,100	1,250	0,125
guaina di impermeabilizzazione	0,004	75,000	0,300
elemento di stoccaggio e drenaggio	0,005	9,800	0,049
acqua di accumulo	0,025	10,000	0,250
geotessile	0,001	0,010	0,000
strato colturale (saturazione=1)	0,100	13,000	1,300
essenze vegetali	/	/	/
totale	0,559		7,484

Tabella 4.10 – Analisi dei carichi soluzione tecnologica SP2 – copertura verde estensiva – condizioni di saturazione dello strato colturale.

Risulta importante, ai fini del rispetto dei parametri fissati dalla normativa vigente, mettere a confronto le condizioni statiche delle diverse soluzioni di stato di fatto rispetto alle diverse soluzioni di progetto. Nello specifico si sono ottenuti le variazioni di carico riepilogate nella Tabella 4.11.

Condizione		Δg_k
1	SP1/SF1	-17%
2	SP1/SF2	-5%
3	SP1/SF3	+9%
4	SP2/SF1	+5%
5	SP2/SF2	+20%
6	SP2/SF3	+37%

Tabella 4.11 – Variazione dei carichi in copertura tra le diversi soluzioni considerate.



Prospetto 4.2 – Rappresentazione degli scenari di riferimento confrontati secondo le variazioni di carico nelle diverse soluzioni considerate.

Come illustrato all'inizio del capitolo, le vigenti norme tecniche per le costruzioni obbligano di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, all'adeguamento della costruzione, nei casi di:

- a) sopraelevazione della costruzione;
- b) ampliamento della costruzione mediante opere strutturalmente connesse alla costruzione;
- c) variazioni di classe e/o di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%;
- d) effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

In riferimento a tali casi, si pone l'attenzione sul punto c), poiché gli altri punti non si ritengono significativi nel caso di realizzazione di coperture verde su edifici esistenti. In particolare, non essendoci variazione di classe e/o destinazione d'uso della costruzione oggetto d'intervento, da un'interpretazione letterale del passo della norma non ci sarebbe l'obbligo di verificare il limite di aumento dei carichi in fondazione. Tuttavia, a favore di sicurezza, e adottando un approccio più ingegneristico, si procede comunque alla verifica dell'aumento dei carichi globali.

Per tale valutazione si esegue una verifica quantitativa sull'edificio utilizzato come caso studio nella presente trattazione.

A favore di sicurezza si sommano tutti i carichi permanenti strutturali e non strutturali dell'edificio. Per semplificazione si assume la struttura costituita da pilastri quadrati di sezione $45 \times 45 \text{ cm}^2$ e altezza totale 11 m. Le strutture in elevazione orizzontale, compresa la chiusura superiore, sono in tutto tre, di superficie ciascuno 800 m^2 . Di seguito si determinano i carichi permanenti strutturali e non strutturali agenti in fondazione.

$$G_{sol} = G_{1,sol} + G_{2,sol} = 4 \text{ kN/m}^2 \times 800 \text{ m}^2 \times 3 = 9600 \text{ kN}$$

$$G_{elev} = G_{1,elev} + G_{2,elev} = 0,2025 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 11 \text{ m} \times 50 = 2780 \text{ kN}$$

$$G = G_{sol} + G_{elev} = 12380 \text{ kN}$$

Si calcola quindi l'incremento di carichi massimo ammissibile in copertura:

$$10\% \text{ di } G = 1238 \text{ kN}$$

Richiamando Tabella 4.11 l'incremento di carico dovuto alla realizzazione della copertura verde può essere approssimato a $2,3 \text{ kN/m}^2$, senza considerare la rimozione dello strato di finitura prima dell'installazione del verde pensile. In questo caso l'aumento di carico complessivo è pari a:

$$2,3 \text{ kN/m}^2 \times 800 \text{ m}^2 = 1840 \text{ kN} > 10\% \text{ di } G = 1238 \text{ kN}$$

Si evince, dunque, che la verifica non è soddisfatta.

Come detto prima, sebbene l'interpretazione letterale della norma prevede di procedere alla valutazione della sicurezza nel caso in cui vi sia una variazione di classe e/o destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%, nel caso specifico l'aumento dei carichi non è dovuto alla variazione di classe e/o destinazione d'uso bensì alla variazione di soluzione tecnologica. Adottando un approccio ingegneristico e di buon senso, al di là dei dettami normativi, si ritiene che nell'esempio riportato l'aumento dei carichi comporti la necessità di valutazione della sicurezza.

Si nota come la necessità di procedere alla valutazione della sicurezza della struttura di un edificio esistente oggetto di intervento per la realizzazione di coperture verdi, ed il suo eventuale adeguamento strutturale, sia fortemente dipendente dalla tipologia edilizia dell'edificio stesso. Infatti, per gli edifici aventi un elevato numero di piani e una superficie in pianta ridotta, l'obbligo di valutazione della sicurezza e dell'eventuale adeguamento è meno probabile rispetto a edifici aventi un limitato numero di piani, una superficie in pianta elevata. Inoltre anche la tipologia strutturale influisce in tal senso: nel caso di strutture pesanti l'aumento dei carichi in copertura sarà meno incidente rispetto alla globalità dei carichi agenti in fondazione; discorso contrario per edifici caratterizzati da strutture leggere.

Sulla base di queste considerazioni si propone di seguito la Tabella 4.12, in cui, in funzione della tipologia edilizia, si segnala la maggiore o minore probabilità di dover procedere alla valutazione della sicurezza e all'eventuale adeguamento strutturale per la realizzazione di interventi di installazione di coperture a verde pensile su edifici esistenti. Alcuni degli elementi che sono stati presi in considerazione per la predisposizione della Tabella 4.12, sono:

- forma e caratteristiche del piano tipo, planimetria;
- numero di piani, altezza;
- numero di alloggi.

Tipologia edilizia	Probabilità di dover procedere a valutazione sicurezza
Tipo "in linea"	alta
Tipo "a blocco"	media
Tipo "a schiera"	alta
Tipo "a torre"	bassa
Tipo "a ballatoio"	alta
Tipo "isolato monofamiliare"	alta
Tipo "bifamiliare"	alta

Tabella 4.12: Probabilità di dover procedere alla valutazione della sicurezza per la realizzazione di una copertura verde in funzione nella tipologia edilizia.

4.5. Bibliografia

- Decreto ministeriale 14/01/2008, “*Norme Tecniche per le Costruzioni*”
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, *Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.*

Capitolo 5

Valutazione della convenienza economica delle coperture verdi

Paolo Rosato, Carlo Antonio Stival, Giovanni Cechet

In questo capitolo ci si propone di valutare l'incidenza economica della realizzazione e gestione di una copertura verde installata su un edificio esistente a destinazione d'uso produttiva.

Questo contesto risulta di estremo interesse poiché, a differenza di una realizzazione *ex novo*, è possibile confrontare le condizioni di gestione economica dell'immobile a monte e a valle dell'intervento stesso, verificando così l'efficacia di questa innovativa soluzione rispetto ad una copertura isolata di tipo 'tradizionale', comunque volta a contenere i consumi energetici in fase operativa.

Per condurre l'analisi, è necessario individuare e definire un edificio di riferimento al quale applicare diversi scenari di intervento. Si ritiene, infatti, poco significativo condurre l'analisi economica su una chiusura superiore non relazionata ad un edificio modello, in quanto alcuni obiettivi prefissati – *in primis*, la valutazione delle performance energetiche offerte dalle soluzioni tecnologiche di copertura nell'arco di un intero anno – rendono necessario definire un contesto concreto. Nell'analisi economica seguente, si considerano soddisfatti positivamente i criteri di sicurezza statica successiva all'intervento sull'edificio affrontati nel capitolo 4, che sono da considerarsi prioritari nella valutazione di fattibilità per l'installazione una copertura verde in un edificio esistente, e si definirà con maggiore precisione l'oggetto introdotto in precedenza per l'analisi dei carichi.

L'edificio di riferimento nello stato di fatto presenterà tre diverse soluzioni tecnologiche di copertura, alternative tra loro ed energeticamente non efficienti; saranno successivamente proposte due possibili soluzioni tecnologiche alternative per lo stato di progetto, così da definire gli scenari d'intervento che saranno poi valutati dal punto di vista economico.

5.1. L'edificio di riferimento

L'edificio a destinazione d'uso produttiva assunto come modello, sito in una zona industriale nella città di Trieste, che può rappresentare un ragionevole set di edifici, possiede le seguenti caratteristiche, alcune delle quali già descritte nel Capitolo 4:

- pianta di forma quadrata di dimensioni pari a 28,00 ml x 28,00 ml;
- tre piani fuori terra, per un'altezza totale approssimativa pari a 12,00 ml, variabile in funzione delle soluzioni tecnologiche di copertura previste nei diversi scenari e caratterizzate da spessori diversi. A ciascun piano compete una zona termica, ed in particolare la zona posta al secondo piano sarà oggetto di analisi energetica in quanto contigua all'elemento tecnico di copertura;
- altezza netta d'interpiano di 3,50 ml per i piani terra e primo, 3,45 ml per il secondo ed ultimo piano;
- copertura piana a giacitura orizzontale, ottimale ai fini della possibile installazione di una copertura verde di tipo estensivo.

È opportuno anticipare la scelta dell'edificio negli ambiti della valutazione economica svolta e dello schema funzionale scelto per la copertura. Risulta infatti di maggiore semplicità, nella predisposizione del modello economico, ipotizzare l'installazione di una copertura verde estensiva su una giacitura piana orizzontale, piuttosto che su coperture inclinate, seppure queste soluzioni risultino piuttosto frequenti. Altri fattori di valenza architettonica rafforzano tale ipotesi, come la diffusione dello schema funzionale a copertura piana negli edifici realizzati negli anni '70 ed '80, in genere di minor valore e quindi teoricamente più adatti ad un intervento che ne incrementi il valore di mercato complessivo senza ledere la qualità architettonica del fabbricato.

Gli edifici realizzati in tale periodo storico, inoltre, sono spesso risultato di una progettazione finalizzata preminentemente alla minimizzazione dei costi di realizzazione, fatto che comporta la mancanza di soluzioni capaci di garantire un adeguato livello di prestazione energetica, conformemente con i livelli prestazionali previsti nell'epoca di realizzazione. Questa problematica è diffusa sul territorio nazionale e grava non solo sugli elementi tecnologici di copertura, ma su tutte le parti concorrenti a formare l'involucro edilizio.

Si ritiene dunque ragionevole che, quando si affrontano interventi di efficientamento energetico su questi edifici, sia possibile implementarli, oltre che con soluzioni 'tradizionali', anche con coperture verdi.

L'involucro edilizio è univocamente definito in tutta l'analisi, ad eccezione dell'elemento tecnico di copertura che ne rappresenta la variabile. Gli scenari previsti per la copertura sono descritti nel paragrafo 5.1.2.; di seguito si delineano brevemente le caratteristiche degli altri elementi dell'edificio.

5.1.1. *Il sistema edificio – impianto*

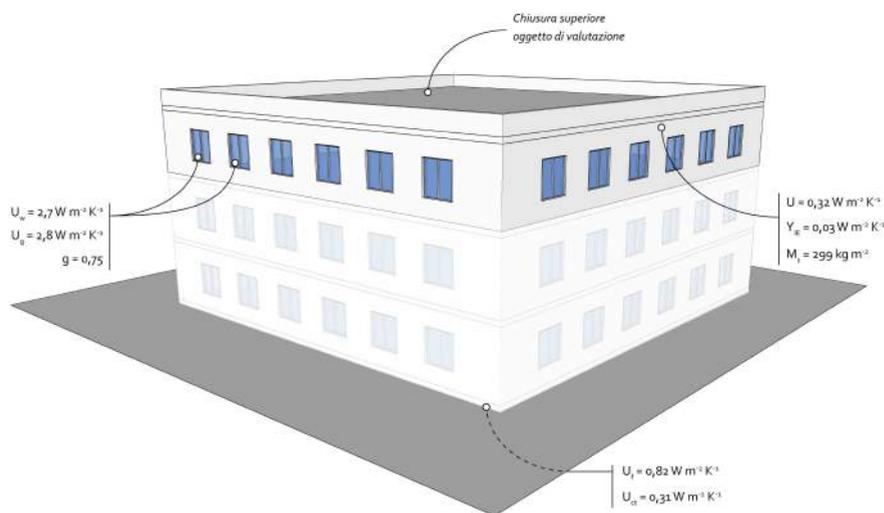


Figura 5.1 – Schema di riferimento dell'edificio modello.

Le pareti perimetrali, considerato lo schema funzionale lineare del sistema strutturale, sono realizzate per tutta l'altezza dell'edificio in blocchi forati in laterizio di spessore 25 cm e controparete interna in laterizi forati di spessore 8 cm, intonacature in calce e sabbia. La parete è isolata sia esternamente con sistema 'a cappottino' in polistirene espanso estruso di spessore 2 cm, sia in intercapedine con 4 cm di poliuretano espanso.

La chiusura inferiore è del tipo a contatto diretto sul terreno, priva di vespaio, a struttura in c.a., strato di ripartizione in conglomerato alleggerito con polistirolo,

massetto in calcestruzzo e finitura lignea. Gli orizzontamenti presentano una struttura del tipo Omnia Bausta H = (24+4), strato di ripartizione in conglomerato cementizio alleggerito, massetto e finitura in piastrelle.

Le chiusure trasparenti (aventi superficie complessiva pari a 380 m², corrispondenti al 23,5% del totale delle facciate ed al 13,6% della superficie disperdente totale dell'edificio) sono del tipo a singolo serramento, con superfici trasparenti a doppia lastra di vetro float, rivestimento basso emissivo e intercapedine riempita con gas argon. Non sono previsti ombreggiamenti significativi né sulle facciate, né in copertura.

L'impianto di condizionamento invernale ed estivo a servizio dell'edificio, ed in particolare della zona termica sottostante la copertura prevede l'acqua come fluido termovettore ed è ipotizzato del tipo a due tubi, quindi collegato al generatore di calore e ad una pompa di calore funzionante primariamente nel periodo estivo. Il generatore per il servizio di riscaldamento è del tipo tradizionale ad alto rendimento, di potenza al focolare stimata in 250 kW e rendimento a pieno carico non inferiore al 90%. La pompa di calore per il condizionamento estivo è del tipo condensata ad alta efficienza, a compressori scroll per la potenziale parzializzazione della potenza frigorifera erogata, con potenza nominale in raffrescamento pari a 220 kW, potenza elettrica assorbita 85 kW e coefficiente di prestazione energetica EER=2,30 nelle condizioni nominali di riferimento.

La rete di distribuzione è ipotizzata a sviluppo prevalentemente orizzontale, a montanti di distribuzione in partenza dalla centrale termica sita al piano terra, collettori primari di piano e collettori secondari a gruppi di terminali per la ripartizione delle portate di progetto ed il bilanciamento dei circuiti. La rete di distribuzione è dotata di coibentazione conformemente ai valori limiti di legge previsti dal D.P.R. 412/1993 per il servizio di riscaldamento e dalla norma tecnica UNI 12241 per prevenire la formazione di condensa nella stagione estiva.

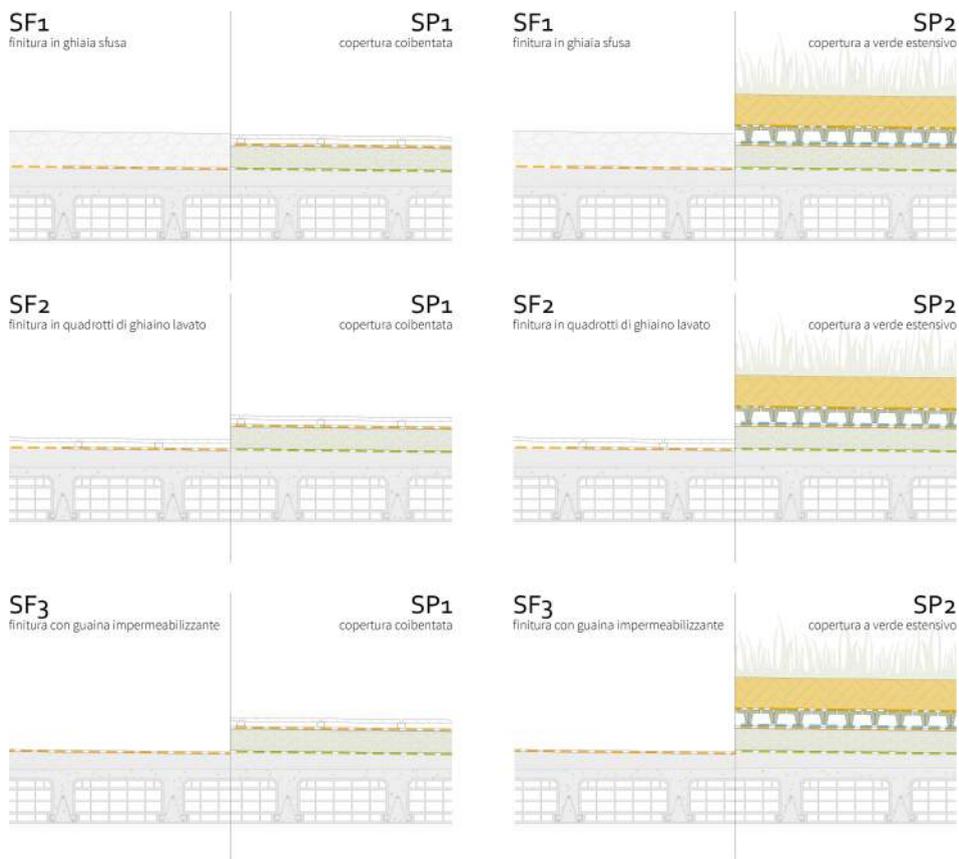
Il sistema di emissione è costituito da fan-coil funzionanti in regime invernale ed estivo. Non è previsto un condizionamento ad aria integrativo per bilanciare i carichi latenti: la potenza estiva latente richiesta dai locali è indirettamente soddisfatta, in ragione di un indice di affollamento degli stessi non particolarmente elevato (0,08 persone/m²).

La regolazione di zona al circuito primario avviene mediante sonda climatica esterna e valvola miscelatrice servocomandata agente sulla temperatura di mandata ai circuiti; sono inoltre previsti regolatori di zona e termostati elettronici a mobiletto per il controllo dei cicli di accensione e spegnimento degli emettitori.

5.1.2. *Le soluzioni tecnologiche per la copertura*

Le soluzioni tecnologiche della chiusura orizzontale superiore, di tipo piano a giacitura orizzontale, sono state introdotte nel capitolo 4, con la suddivisione in soluzioni di stato di fatto (denominate SF1, SF2 e SF3), caratterizzate da una scadente qualità energetica, e di stato di progetto (denominate SP), caratterizzate da più elevate prestazioni energetiche: la soluzione SP1 è di tipo 'tradizionale' coibentata, la soluzione

SP2 è a tetto verde estensivo, che si attende essere efficace soprattutto nella stagione estiva. Analogamente alla valutazione strutturale, sono complessivamente definiti sei scenari di valutazione.



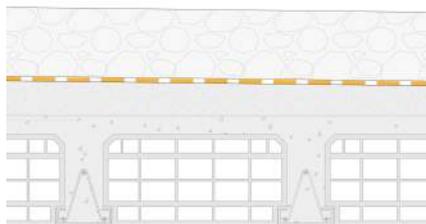
Prospetto 5.1 – Rappresentazione degli scenari di intervento sulla copertura dell'edificio di riferimento.

Le soluzioni tecnologiche attinenti allo stato di fatto offrono scadenti prestazioni energetiche, in quanto non sono efficacemente corrisposti i requisiti di isolamento termico – peculiare della stagione invernale e valutato in regime stazionario – e di inerzia termica nella stagione estiva. Tali soluzioni, infatti, sono caratterizzate da elevate dispersioni termiche per trasmissione e, considerando il parametro di trasmittanza termica periodica Y_{IE} [1], non consentono un'adeguata attenuazione della sollecitazione termica estiva, che comporta elevati carichi da asportare per condizionamento dell'aria ambiente. Inoltre, l'elevata trasmittanza termica non consente di escludere, in alcuna

delle soluzioni prospettate, il rischio di formazione di muffe per condensa superficiale all'intradosso della copertura.

SF1

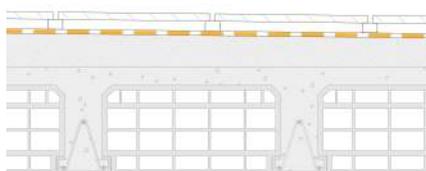
finitura in ghiaia sfusa



Trasmittanza termica	$U = 1,403 \text{ W/m}^2\text{K}$
Trasmittanza termica periodica	$Y_{IE} = 0,414 \text{ W/m}^2\text{K}$
Verifica condensa superficiale	NEGATIVA
Verifica condensa interstiziale	POSITIVA

SF2

finitura in quadretti di ghiaio lavato



Trasmittanza termica	$U = 1,451 \text{ W/m}^2\text{K}$
Trasmittanza termica periodica	$Y_{IE} = 0,610 \text{ W/m}^2\text{K}$
Verifica condensa superficiale	NEGATIVA
Verifica condensa interstiziale	POSITIVA

SF3

finitura con guaina impermeabile



Trasmittanza termica	$U = 1,589 \text{ W/m}^2\text{K}$
Trasmittanza termica periodica	$Y_{IE} = 0,755 \text{ W/m}^2\text{K}$
Verifica condensa superficiale	NEGATIVA
Verifica condensa interstiziale	POSITIVA

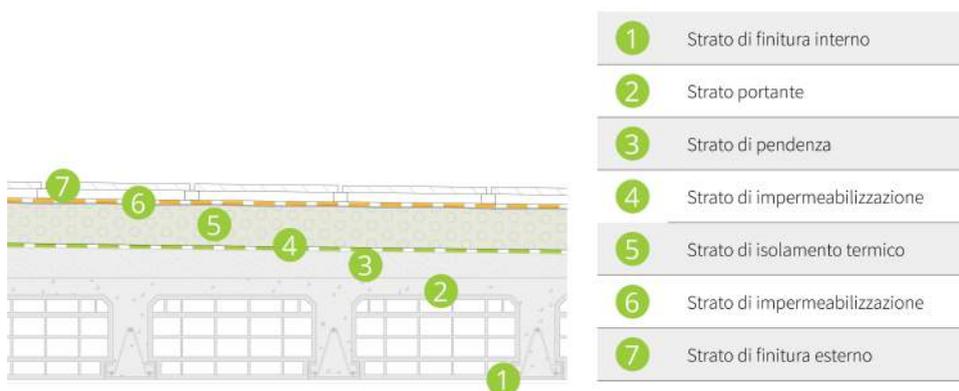
Prospetto 5.2 – Prospetto riassuntivo delle prestazioni energetiche delle soluzioni di progetto.

Si propongono dunque soluzioni tecnologiche per il rifacimento parziale della copertura – con il mantenimento dello strato di supporto strutturale – al fine di incrementarne le prestazioni termiche nell'arco dell'intero anno. Individuata la necessità di intraprendere un intervento di adeguamento tecnologico sulla copertura dello stato di fatto, si fissa l'obiettivo preliminare di garantire i livelli prestazionali prescritti dal D.P.R. 59/2009 per gli interventi di riqualificazione energetica degli elementi d'involucro; avendo però intrapreso un percorso di riqualificazione energetica dell'elemento tecnico di chiusura, si ritiene interessante riferirsi alle prestazioni minime di isolamento termico per accedere alle detrazioni fiscali introdotte dalla L.N. 296/2006, attualmente regolamentate dall'art. 1, comma 47 della L.N. 190/2014. Tali requisiti minimi sono stati inizialmente fissati dal D.M. 19/02/2007 e successivamente resi più restrittivi dal D.M. 26/01/2010.

ZONA CLIMATICA	STRUTTURE OPACHE VERTICALI	STRUTTURE OPACHE ORIZZONTALI O INCLINATE		CHIUSURE APRIBILI O ASSIMILABILI
		COPERTURE	PAVIMENTI	
A	0,54	0,32	0,60	3,7
B	0,41	0,32	0,46	2,4
C	0,34	0,32	0,40	2,1
D	0,29	0,26	0,34	2,0
E	0,27	0,24	0,30	1,8
F	0,26	0,23	0,28	1,6

Tabella 5.1 – Valori di trasmittanza termica, espressi in $[W/(m^2 \cdot K)]$, applicabili a partire dal 1° gennaio 2010 per elementi opachi e trasparenti d’involucro ai sensi del D.M. 26 gennaio 2010, All. B.

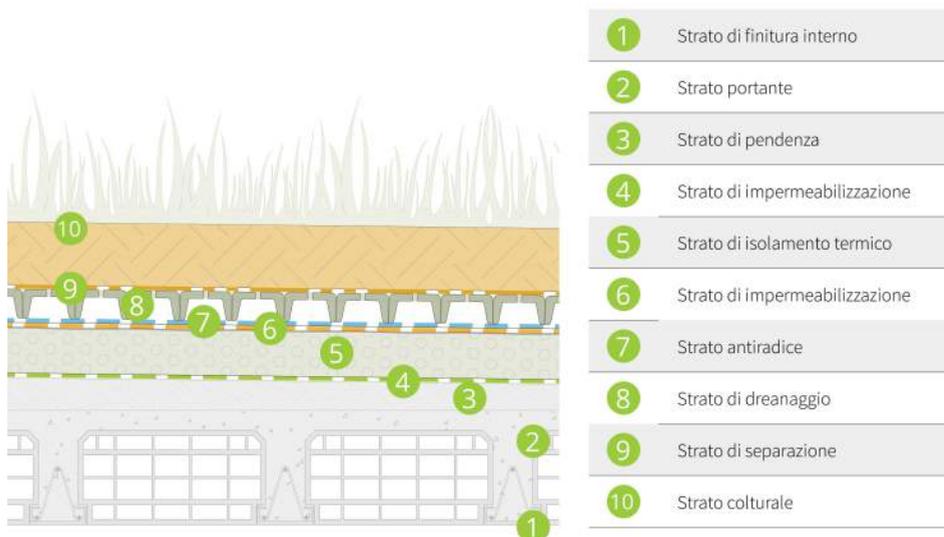
Il valore individuato per l’accesso alle detrazioni fiscali per interventi sulla copertura in un edificio sito a Trieste è dunque pari a $0,24 W/(m^2 K)$. Le due soluzioni di progetto prospettate consentono entrambe la riqualificazione energetica della copertura ipotizzata nello stato di fatto con accesso al regime di agevolazione.



Descrizione	Spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
isolamento termico	0,140
guaina di impermeabilizzazione	0,004
totale	0,468

Figura 5.2 – Rappresentazione e definizione degli strati funzionali costituenti la soluzione SP1.

La soluzione di progetto SP1, come visto, consiste in una copertura coibentata, non ventilata, in cui l'elemento termoisolante è protetto dagli agenti atmosferici. Per quanto concerne, invece, le tipologie di coperture verdi, si considera una soluzione tecnologica di progetto SP2 a verde estensivo, poiché quella a verde intensivo, come illustrato nel capitolo precedente, risulta difficilmente applicabile ad un edificio esistente.



Descrizione	Spessore [m]
intonaco	0,020
solaio strutturale	0,250
massetto alleggerito	0,050
guaina di impermeabilizzazione	0,004
isolamento termico	0,100
guaina di impermeabilizzazione	0,004
elemento di stoccaggio e drenaggio	0,005
acqua di accumulo	0,025
geotessile	0,001
strato colturale	0,100
essenze vegetali	/
totale	0,559
intonaco	0,020

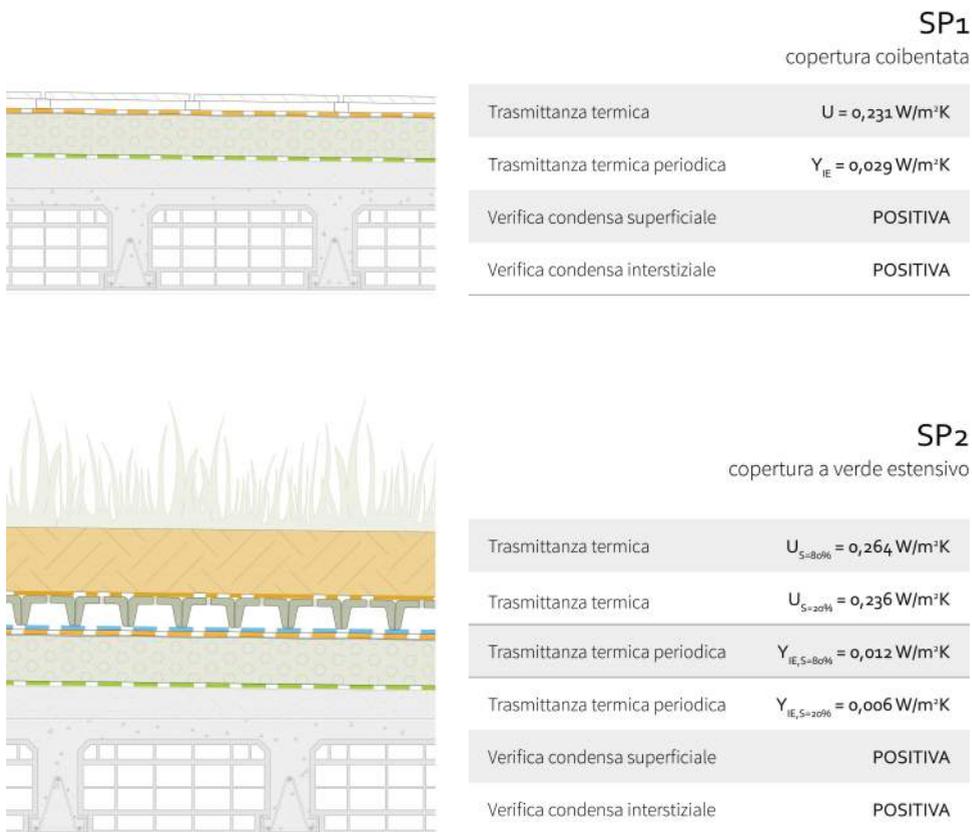
Figura 5.3 – Rappresentazione e definizione degli strati funzionali costituenti la soluzione SP2.

Con le soluzioni tecnologiche di progetto SP1 (intervento “tradizionale” di riqualificazione energetica) e SP2 (riqualificazione con copertura verde estensiva) è possibile effettuare un confronto di tipo economico che includa le agevolazioni fiscali e permetta di verificare la convenienza economica della soluzione a verde pensile rispetto ad una soluzione più tradizionale.

Per quanto concerne la soluzione SP2, la valutazione delle prestazioni energetiche offerte deve tener conto di tre diverse possibili condizioni dello strato colturale in riferimento al suo grado di saturazione dei vuoti:

- terreno saturo (S=80%), condizione individuata con il codice SP2.1;
- terreno umido (S=50%), individuata con SP2.2;
- terreno secco (S=20%), individuata con SP2.3.

In ciascuna delle situazioni prospettate si è considerata la presenza di parziale accumulo idrico nello strato drenante solo in condizione di terreno saturo; nella condizione di terreno umido, invece, si è ipotizzata la presenza di un semplice ‘velo’ d’acqua.



Prospetto 5.3 – Prospetto riassuntivo delle prestazioni energetiche delle soluzioni di progetto.

In tutte le condizioni prospettate, la verifica a condensazione superficiale ed interstiziale ed i valori di trasmittanza termica U e trasmittanza termica periodica Y_{IE} soddisfano i livelli prestazionali minimi imposti dalla normativa vigente. Con specifico riferimento alla soluzione SP2, al relativo calcolo delle prestazioni energetiche ed alla valutazione economica dei costi di gestione, la valutazione nell'arco dell'intero anno delle prestazioni energetiche è stata effettuata tenendo conto di tre diversi gradi di saturazione dello strato culturale relazionando le condizioni di saturazione alle condizioni meteorologiche nelle diverse stagioni.

Dall'analisi effettuata si evince come il contributo offerto dalla copertura verde (soluzione SP2) sia principalmente riferibile alle prestazioni in regime dinamico caratterizzanti la stagione estiva. La massa di terreno incrementa notevolmente l'inerzia termica della copertura (elemento tecnico sensibile al carico termico estivo di origine solare a causa del rapporto tra la sua giacitura e l'altezza solare media nei mesi più caldi) e garantisce uno sfasamento dell'onda termica classificabile come ottimo ai sensi della normativa vigente² indipendentemente dalla condizione di saturazione dello strato culturale.

5.2. Definizione dei parametri dell'analisi economica

Ci si propone ora di valutare economicamente l'intervento di installazione di un tetto verde in sostituzione della copertura di un edificio esistente a destinazione d'uso produttiva, quale alternativa all'efficientamento energetico secondo una soluzione tecnologica energeticamente efficiente di tipo 'tradizionale'. Lo scopo finale dell'analisi economica è individuare forme incentivanti per incrementare la diffusione delle coperture verdi.

Si intende determinare l'entità dei costi correlati alla dismissione della copertura esistente ed alla sua sostituzione con una energeticamente efficiente fino alla sua avvenuta obsolescenza: al termine di questo periodo, stimato in circa 40 anni, si procederà alla sostituzione con analogo elemento tecnico.

L'analisi economica è condotta sulla base delle soluzioni tecnologiche già introdotte in precedenza, considerando un edificio il cui stato di fatto sia rappresentato dalle tre soluzioni tecnologiche SF1, SF2 e SF3, con le relative spese di gestione tecnica (oneri manutentivi della copertura) e di gestione energetica della zona termica sottostante la copertura stessa (quantitativi di combustibili necessari a mantenere una temperatura di comfort all'interno della zona termica nel corso dell'intero anno).

Si valuta successivamente l'intervento di ristrutturazione di tale elemento, ricorrendo alle due soluzioni tecnologiche di progetto indicate con SP1 e SP2 e considerando, in particolare, i costi di rimozione di alcuni strati funzionali della copertura esistente, l'intervento di coibentazione e impermeabilizzazione della copertura esistente (SP1) o, in alternativa, l'installazione di una copertura verde (SP2) comprensiva di idonei strati funzionali. Per ciascuno scenario sarà valutato il momento economicamente ottimale per la sostituzione della copertura.

Gli scenari ipotizzati sono dunque sei, individuati da due cifre, la prima delle quali identifica la soluzione tecnologica dello stato di fatto (1, 2, 3) e la seconda quella dello stato di progetto (1, 2). Così, lo scenario $S_{3,2}$ identificherà la sostituzione della guaina di impermeabilizzazione in copertura con un elemento tecnico a inverdimento estensivo.

5.2.1. Definizione dell'orizzonte temporale dell'analisi economica

I momenti progressivi della timeline di analisi sono esplicitabili come segue:

- momento 0 decisionale, in cui si valutano le opportunità di intervento sulla copertura ed in cui si effettua l'analisi economica;
- momento M, al quale si effettua l'intervento di sostituzione degli strati funzionali della copertura esistente e di installazione della nuova copertura;
- momento i generico impiegato per definire i diversi costi;
- momento D, termine del periodo di agevolazione fiscale nazionale – in funzione della collocazione temporale del momento M – eventualmente associata all'installazione di una copertura ad elevate prestazioni (copertura verde o copertura tradizionale energeticamente più efficiente);
- momento F, tempo finale in cui si provvede alla sostituzione della nuova copertura ad elevate prestazioni per sua raggiunta obsolescenza.

Al tempo M si collocano di costi $C_{RIM,P}$ relativi alle azioni di rimozione e smontaggio dei componenti della copertura esistente ed i costi $C_{INST,P}$ relativi all'installazione della nuova copertura ad elevate prestazioni.

Nei diversi anni si collocano i costi di manutenzione della copertura $C_{op,i}$ ed i costi di gestione energetica legati alla copertura $C_{gen,i}$, ossia i costi del combustibile primario necessario a mantenere la temperatura indoor prefissata nei vani afferenti alla copertura sia nella stagione invernale (20 °C) che in quella estiva (26 °C). Entrambi i termini $C_{op,i}$ e $C_{gen,i}$ devono essere definiti per lo stato di fatto e per lo stato di progetto.

Il costo $C_{REF,P}$ si colloca al tempo F e considera i costi di sostituzione della copertura nuova per raggiunta obsolescenza funzionale.

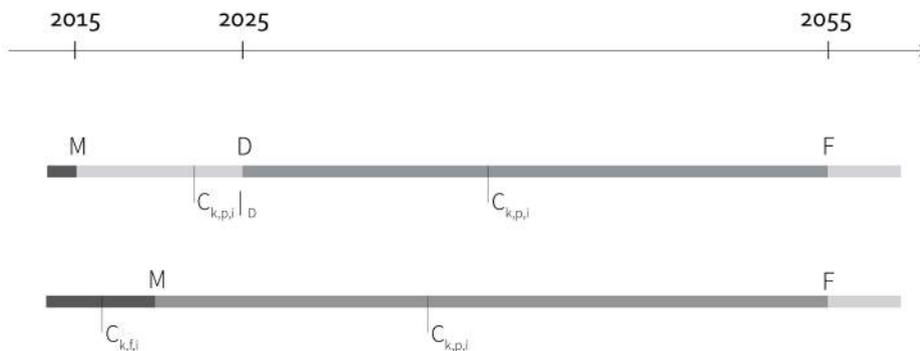


Figura 5.4 – Schema riassuntivo dell'orizzonte temporale dell'analisi, in cui sono indicate la timeline per interventi in regime di detrazioni fiscali (sopra) e in assenza di agevolazioni (sotto). I costi annuali, indicati genericamente con C_k , sono assunti costanti in ciascuna annualità i ; con i pedici f e p si identificano, rispettivamente, lo stato di fatto e lo stato di progetto.

5.2.2. **Determinazione del saggio di sconto**

Il saggio di sconto si assume pari al costo medio ponderato del capitale WACC (dalla letteratura anglosassone, *weighted average cost of capital*), pari alla media ponderata tra il costo del capitale proprio ed il costo del capitale di debito.

Il WACC è il valore minimo del tasso che un'azienda deve assumere come rendimento dei propri investimenti per la remunerazione degli attori che concorrono alla formazione del capitale; alle diverse fonti di capitale corrispondono diversi ritorni attesi, a seconda del peso di ciascuna fonte nella struttura del capitale. Il WACC applicato ad un'azienda consiste nel ritorno complessivo atteso, ed è quindi utilizzabile per determinare la fattibilità economica degli interventi; inoltre, è utilizzabile come tasso di attualizzazione per i flussi di cassa aventi un rischio simile a quello a cui è soggetta l'azienda nel suo complesso.

Il costo medio ponderato del capitale è definito secondo la formula seguente:

$$WACC = \frac{C_E}{C_E + C_D} \cdot K_E + \frac{C_D}{C_E + C_D} \cdot K_D \cdot (1 - t)$$

in cui con K_E e K_D sono indicati i tassi di rendimento attesi del capitale proprio e del capitale di debito, rispettivamente, e t è l'aliquota fiscale applicata al reddito d'azienda. Il termine C_D rappresenta il capitale a debito, C_E il valore di mercato del capitale proprio; la somma di questi termini rappresenta il capitale complessivo investito nell'azienda.

Il costo del capitale proprio, pari al suo rendimento atteso, si determina con la formula seguente, secondo il modello CAPM (dalla letteratura anglosassone *Capital Asset Pricing Model*) che stima il premio per il rischio di un investimento in capitale confrontandone il rendimento atteso con quello dell'intero mercato azionario:

$$K_E = K_{RF} + \beta \cdot (K_M - K_{RF})$$

in cui K_{RF} è il rendimento dei titoli a rischio nullo (risk free), β è il coefficiente di rischio sistemico, K_M il rendimento medio sul mercato. La differenza ($K_M - K_{RF}$) è detta, per l'appunto, *Market Risk Premium* (MRP), ossia l'incremento atteso rispetto ad attività prive di rischio.

Il rendimento risk free K_{RF} relativo alle attività prive di rischio si assume pari al rendimento medio annuo composto dei Buoni Poliennali del Tesoro rilevati dalla Banca d'Italia³, valutato sul periodo 1984-2014. Si assume dunque che $K_{RF} = 7,6\%$.

La determinazione del MRP avviene sulla base dei rendimenti storici del mercato azionario, rapportato ai Titoli di Stato, considerati privi di rischio. Il rendimento di mercato medio annuo composto dei titoli azionari, valutato sul periodo 1984-2014 (oppure a partire dalla data di prima quotazione di un titolo alla Borsa Italiana, se successiva al 02/01/1984), è pari a $K_M = 16,1\%$ [4].

Il Market Risk Premium è quindi pari a:

$$MRP = (K_M - K_{RF}) = 8,5\%$$

Il coefficiente β definisce il rischio sistematico secondo il principio per cui il premio di rischio di un'attività è proporzionale al premio di rischio di mercato, misurando la reattività del rendimento dell'attività nei confronti del mercato stesso. Al crescere di β cresce il rendimento atteso dell'attività, in quanto presenta un maggior grado di rischio non diversificabile, implicito in un investimento nell'attività finanziaria in oggetto. La determinazione di β è cruciale per l'individuazione di un saggio di sconto corretto per la determinazione del valore attuale netto (VAN) di un'attività.

La determinazione del coefficiente β , e quindi la definizione di una misura significativa di rischio, dipende:

- dall'avvenuta quotazione della società in borsa; la determinazione di β è di maggiore complessità per le società non quotate, per le quali non è ricavabile un β derivante dal mercato azionario;
- dalla dimensione della società; il coefficiente β sarà più alto per piccole e medie società;
- dal livello concorrenziale del settore di riferimento nel mercato, da cui la distinzione in aziende leader e follower, con queste ultime caratterizzate da un β maggiorato di 0,1÷0,2 punti rispetto alle prime;
- dal livello di indebitamento, a cui il coefficiente β risulta direttamente legato.

Considerando un livello di leva finanziaria medio per settore, si assume un valore del coefficiente β stimato pari a 1,30 per aziende follower operanti nel settore dei media⁵.

Volendo operare con un valore del coefficiente β più basso, esso è stato ricavato da database relativi al mercato azionario europeo relativi al settore Computer Services, valore pari a 0,83 [6].

Si ipotizzano dunque due valori del tasso di rendimento atteso del capitale proprio, derivanti dall'assunzione di $\beta_1 = 0,83$ (rischio dell'azienda inferiore al rischio medio del mercato azionario) e di $\beta_2 = 1,3$ (rischio superiore):

$$K_{E,1} = K_{RF} + \beta_1 \cdot (K_M - K_{RF}) = 7,6 + 0,83 \cdot (8,5) = 14,65 \%$$

$$K_{E,2} = K_{RF} + \beta_2 \cdot (K_M - K_{RF}) = 7,6 + 1,30 \cdot (8,5) = 18,65 \%$$

Con riferimento al tasso di rendimento del capitale a debito K_D , si assume il tasso d'interesse praticato alle imprese appartenenti al settore di mercato già individuato.

Il valore del tasso è stato desunto con le seguenti assunzioni⁷:

- tasso attivo sui finanziamenti per cassa al settore produttivo;
- tipologia di operazione a scadenza;
- durata originaria del tasso pari a 5 anni o superiore;
- localizzazione in Italia Nord-Orientale;
- classe di grandezza del finanziamento inferiore a 250.000 €, stimata in base all'onerosità degli scenari di intervento prospettati.

Su queste basi, si ricava un tasso d'interesse praticato all'impresa pari al 5,19%.

Considerando, invece, l'attività economica dell'azienda, senza considerare la localizzazione geografica, ad una durata superiore a 5 anni corrisponde, per le operazioni

in scadenza, un tasso per le attività di commercio ancora pari al 5,19%. Tale valore viene dunque assunto quale tasso d'interesse applicato ai finanziamenti.

L'aliquota fiscale t è assunta pari all'attuale aliquota dell'Imposta sul reddito delle società (IRES), attualmente pari al 27,50% [8].

Si riporta in seguito l'andamento del WACC in base ai parametri già determinati e tenendo conto della variazione del coefficiente β , variando il rapporto tra capitale proprio della società e capitale totale da 0 a 1.

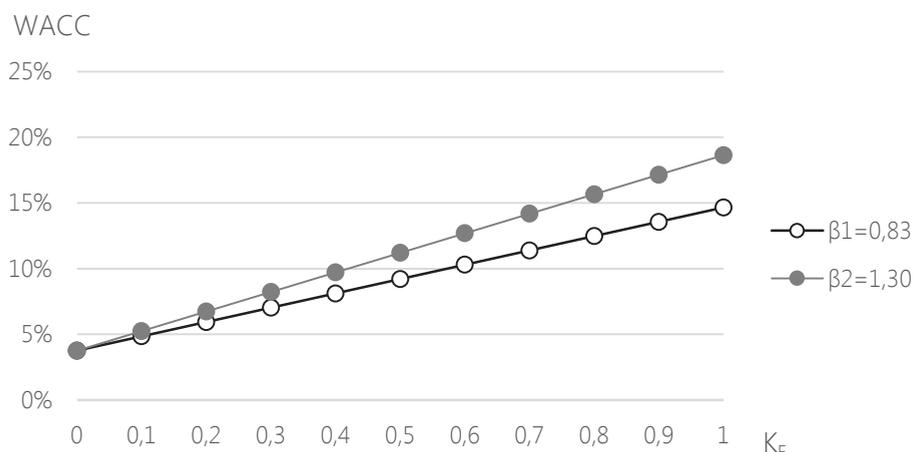


Figura 5.5 – Valori assunti dal Weighted Average Capital Cost al variare del rapporto tra il capitale proprio ed il costo totale dell'investimento.

Per la determinazione del WACC si assume che il capitale proprio eguagli il capitale a debito, ossia che l'intervento sia finanziato per il 50% con il capitale dell'azienda e per il rimanente 50% con capitale a debito:

$$C_E = C_D \rightarrow \frac{C_E}{C_E + C_D} = \frac{C_D}{C_E + C_D} = 0,5$$

da cui si desumono per le successive analisi i valori:

$$WACC_{\beta_1} = 8,21 \%$$

$$WACC_{\beta_2} = 10,21 \%$$

Poiché l'analisi economica verrà svolta a prezzo costante, si compensa l'effetto dell'inflazione riducendo i saggi di una quota che ne tenga conto: vista l'attuale situazione economica, si assume un tasso di inflazione pari all' 1% medio annuo. I valori sopra indicati riportano il costo medio ponderato del capitale già ridotto della percentuale di inflazione. L'analisi economica proposta in seguito considererà entrambi i valori del costo medio del capitale pesato in funzione del profilo di rischio dell'azienda.

5.2.3. Valutazione dei costi

5.2.3.1. Costo di rimozione delle soluzioni dello stato di fatto

I costi di rimozione degli strati funzionali di finitura delle soluzioni tecnologiche definite per lo stato di fatto sono stati determinati in base al prezziario della Regione Friuli Venezia Giulia per l'anno 2013:

- il costo per la rimozione di guaina di impermeabilizzazione, pari a 12,55 €/m², riferibile a tutte le tre soluzioni;
- il costo per la rimozione di strato di ghiaia in quota, pari a 15,50 €/m², pertinente alla soluzione SF1;
- il costo per la rimozione di quadrotti in ghiaio lavato, 18,13 €/m², riferibili alla soluzione SF2.

SOLUZIONE DI STATO DI FATTO	COSTO UNITARIO DI RIMOZIONE [€/m ²]	COSTO DI RIMOZIONE C _{RIM, F} [€]
SF1	28,05	21.888,26
SF2	30,68	23.940,52
SF3	12,55	9.793,14

Tabella 5.2 – Costi di rimozione degli strati funzionali di finitura per ciascuna soluzione tecnologica di stato di fatto.

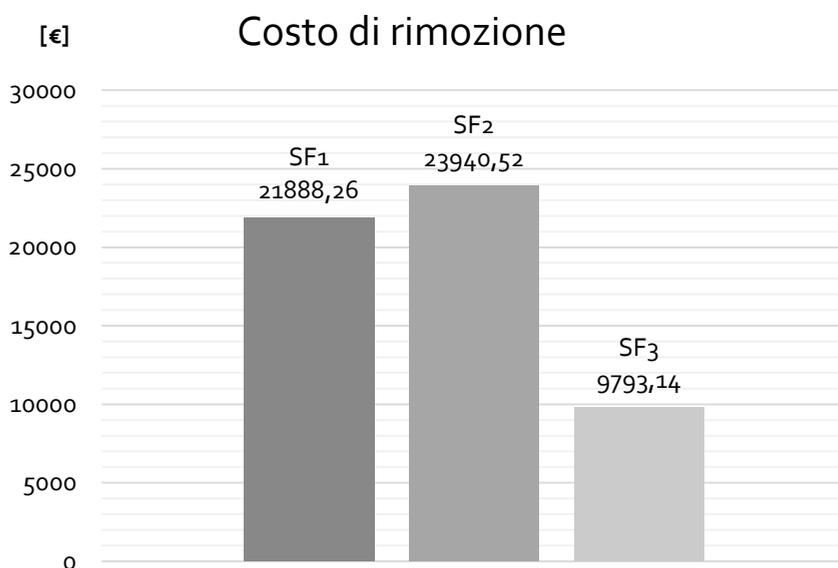


Figura 5.6 – Costi di rimozione degli strati funzionali di finitura per le soluzioni di stato di fatto.

5.2.3.2. Costo di installazione delle soluzioni dello stato di progetto

La determinazione del costo di installazione della copertura 'tradizionale' isolata è stata effettuata in base al prezzario della Regione Friuli Venezia Giulia per l'anno 2013. Si sono assunti i seguenti costi:

- fornitura e posa in opera di una prima guaina di impermeabilizzazione a protezione dello strato strutturale, pari a 14,08 €/m²;
- fornitura e posa in opera di isolamento termico in polistirene in due strati di spessore 8 cm e 6 cm, pari complessivamente a 56,83 €/m²;
- fornitura e posa in opera della guaina di impermeabilizzazione di finitura per coperture a vista, esposta agli agenti atmosferici, a protezione dello strato coibente, pari a 31,86 €/m².

Il costo di installazione della soluzione di copertura verde è stato invece determinato in base ad una valutazione di mercato che ha considerato i prezzi di alcune aziende operanti nel settore della realizzazione, della manutenzione e della consulenza progettuale delle coperture verdi.

Si sono considerati i seguenti costi relativi alla fornitura e posa in opera degli strati funzionali primari e secondari di una copertura verde di tipo estensivo a sedum, partendo dallo strato di supporto strutturale:

1. strato di barriera al vapore in polietilene a bassa densità, realizzato su strato di compensazione in geotessile, di costo unitario pari a 4,20 €/m²;
2. strato di isolamento termico in polistirene espanso sinterizzato di spessore pari a 10 cm, con protezione superiore in feltro tessuto non tessuto, per un costo unitario di 10,40 €/m²;
3. membrana di impermeabilizzazione con funzione antiradice in PVC rinforzata con fibra di vetro, avente costo unitario di 32,00 €/m²;
4. elemento di accumulo e protezione meccanica in feltro;
5. elemento di drenaggio ed aerazione munito di telo filtrante, per un volume di accumulo pari a circa 30 l/m²;
6. strato colturale per installazioni di tipo estensivo, il cui costo unitario, comprendente anche i punti 4 e 5, è valutato in 50,20 €/m²;
7. vegetazione a sedum, costo unitario pari a 7,00 €/m².

A questi strati funzionali si aggiungono elementi tecnici accessori per garantire il sostentamento delle specie vegetali ed un'efficace impermeabilizzazione dell'elemento tecnico di copertura:

8. raccordi a parete dello strato di impermeabilizzazione con contestuale fissaggio, di costo unitario pari a 40,30 €/ml;
9. raccordi perimetrali per il drenaggio dell'acqua meteorica, di costo pari a 75,50 €/ml;
10. elementi profilari per il contenimento e la protezione meccanica dello strato di impermeabilizzazione, costo 52,00 €/ml;
11. pozzetti di controllo per gli scarichi in copertura, da installarsi ogni 100 m² di copertura, di costo pari a 190 € cadauno;

12. impianto di irrigazione a collettori e tubazioni di alimentazione ai diversi erogatori di settore, dotato di impianto di scarico – operativo nella stagione invernale – a disattivazione elettronica in periodi di elevata piovosità, per un costo pari a 12,00 €/m².

Si riassumono nella Tabella 5.3 i costi unitari e totali considerati nell'analisi.

<i>SOLUZIONE DI STATO DI PROGETTO</i>	<i>COSTO UNITARIO DI INSTALLAZIONE [€/m²]</i>	<i>COSTO DI INSTALLAZIONE C_{INST, P} [€]</i>
SP1	102,77	80.194,51
SP2	141,83	110.675,81

Tabella 5.3 – Costi di installazione degli elementi tecnici di copertura riferiti alle soluzioni di progetto SP1 e SP2.

La differenza di costo per l'installazione delle due diverse soluzioni è dunque di poco superiore ai 30.000 €, con l'attesa maggiore onerosità della copertura verde.

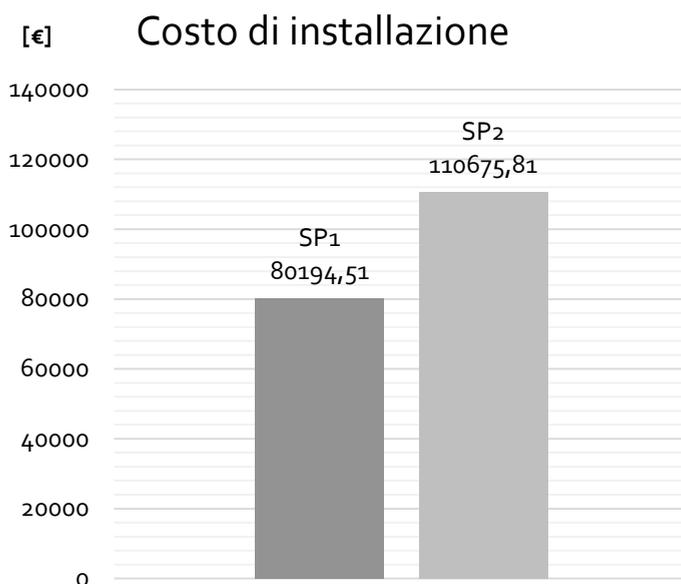


Figura 5.7 – Costi di installazione degli elementi tecnici di copertura riferiti alle soluzioni di progetto SP1 e SP2.

5.2.3.3. Costi relativi ai consumi energetici C_{EN}

I costi annui inerenti ai consumi energetici sono stati valutati secondo un modello di calcolo stazionario, considerando i servizi di riscaldamento e raffrescamento sui quali incide la riqualificazione energetica della copertura: in particolare, gli effetti della soluzione di progetto concernente la copertura verde si manifestano nella stagione estiva.

I consumi energetici sono stati valutati per la zona dell'edificio di riferimento posta al di sotto della copertura, variando esclusivamente la stratigrafia di tale elemento tecnico. In ciascuno degli scenari di riferimento, inoltre, sono ipotizzate le medesime caratteristiche dell'impianto di condizionamento dell'aria, come descritto nel paragrafo introduttivo al caso studio.

Le prestazioni della copertura verde in termini di isolamento termico ed inerzia termica, nello scenario SP2, tengono conto delle proprietà termofisiche dello strato vegetativo e dello strato colturale in funzione della stagione e, in particolare, del grado di saturazione dello strato di terreno; la piovosità nei diversi mesi ha influito, inoltre, sul riempimento dello strato con funzione drenante e di accumulo idrico, ed è stata considerata nei limiti operativi di una valutazione con calcolo stazionario.

Considerando le serie storiche delle precipitazioni rilevate a Trieste⁹ nel periodo 1994-2014, si è rilevato come i giorni con precipitazioni superiori a 5 mm si concentrino negli ultimi quattro mesi dell'anno, con valori minimi a febbraio ed all'inizio dell'estate. Inoltre, i valori relativi alle piogge cumulate evidenziano come, negli ultimi vent'anni, i mesi di settembre e novembre risultino caratterizzati dalle precipitazioni più intense e prolungate. Sulla base di questi dati, si è ipotizzato che la copertura verde individuata con SP2 presenti le prestazioni diversificate in funzione dell'acqua meteorica caduta con le seguenti scansioni temporali.

<i>SOLUZIONE DI PROGETTO SP₂</i>	<i>MESI DI APPLICAZIONE</i>
SP2.1 – Grado di saturazione 20%	feb, giu, lug
SP2.2 – Grado di saturazione 50%	gen, mar, apr, mag, ago
SP2.3 – Grado di saturazione 80%	set, ott, nov, dic

Tabella 5.4 – Mesi di applicazione delle varianti della soluzione SP2 in funzione del grado di saturazione dello strato colturale ai fini della modellazione dell'edificio in regime stazionario.

Per quanto concerne i consumi invernali, sono state considerate le quote di gas e di energia elettrica consumate nella zona termica in oggetto al variare dello scenario e secondo una ripartizione basata sull'energia utile richiesta; per la copertura verde, si sono considerate le prestazioni energetiche delle tre diverse varianti per i mesi in cui se ne è ipotizzata l'applicazione. L'energia elettrica consumata è riportata nella Tabella 5.5, relativa ai consumi energetici della stagione estiva.

Per la stagione estiva sono considerate le quote di energia elettrica necessarie al funzionamento dell'impianto di condizionamento alimentato dalla pompa di calore. La ripartizione dei consumi avviene in base alle quote millesimali relative al fabbisogno energetico d'involucro; in analogia a quanto svolto per la stagione invernale, per la copertura verde sono considerate le prestazioni delle tre diverse varianti.

Nella Tabella 5.6 sono riportati anche i consumi di energia elettrica relativi alla stagione invernale, necessari all'azionamento dei dispositivi ausiliari dell'impianto termico.

SOLUZIONE TECNOLOGICA	MILLESIMI	CONSUMO TOTALE GAS [m ³]	CONSUMO GAS ZONA [m ³]
SF1	590	13664	8065
SF2	616	14507	8941
SF3	611	14320	8749
SP1	370	9297	3444
SP2	382	9466	3612

Tabella 5.5 – Consumi di gas metano per il servizio di riscaldamento nell'edificio oggetto di studio e nella zona termica sottostante la copertura. Le quote millesimali sono riferite all'energia termica utile delle tre zone termiche dell'edificio.

SOLUZIONE TECNOLOGICA	MILLESIMI	CONSUMO TOTALE ENERGIA ELETTRICA [kWh]	CONSUMO DI ZONA ENERGIA ELETTRICA [kWh]	CONSUMO INVERNALE AUSILIARI [kWh]
SF1	270	37044	10002	1923
SF2	232	35940	8338	2134
SF3	278	37283	10365	2087
SP1	370	35782	8123	813
SP2	213	32898	7007	855

Tabella 5.6 – Consumi di energia elettrica per il servizio di raffrescamento e di riscaldamento (funzionamento degli ausiliari elettrici) nell'edificio oggetto di studio e nella zona termica sottostante la copertura. Le quote millesimali sono riferite al fabbisogno energetico estivo d'involucro.

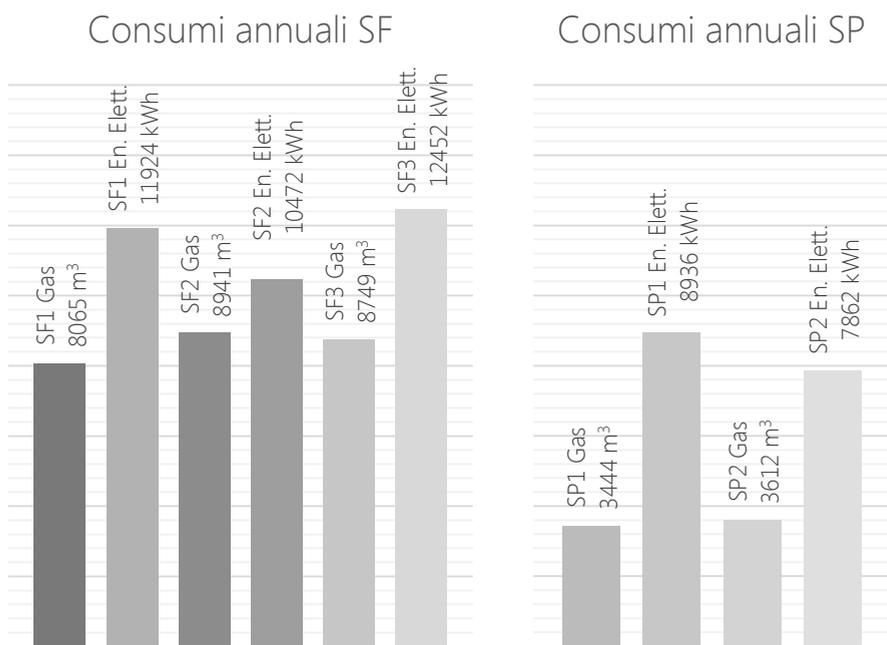


Figura 5.8 – Riassunto dei consumi energetici della zona termica in funzione della soluzione tecnologica di copertura.

Determinati i consumi energetici della zona termica sottostante l'elemento tecnico di copertura, si individuano i costi dei combustibili, determinati in base alle diverse soglie di costo riferite ai consumi stessi; i costi delle forniture si riferiscono all'area di Trieste per utenze non domestiche, con erogazione di energia elettrica in bassa tensione.

COMBUSTIBILE	UNITÀ DI MISURA U.D.M.	COSTO COMBUSTIBILE [€/U.D.M.]	
GAS METANO	m ³	C < 120 m ³	0,381360
		120 m ³ < C < 360 m ³	0,480381
		360 m ³ < C < 1080 m ³	0,459277
		1080 m ³ < C < 3440 m ³	0,455114
		C < 3440 m ³	0,435542
ENERGIA ELETTRICA	kWh	0,193882	

Tabella 5.7 – Costi dei combustibili impiegati nell'analisi; il costo del gas metano dipende dalle soglie di consumo.

Si perviene quindi alla determinazione dei costi di gestione energetica della zona termica sottostante la copertura verde, differenziati per gli stati di fatto e di progetto.

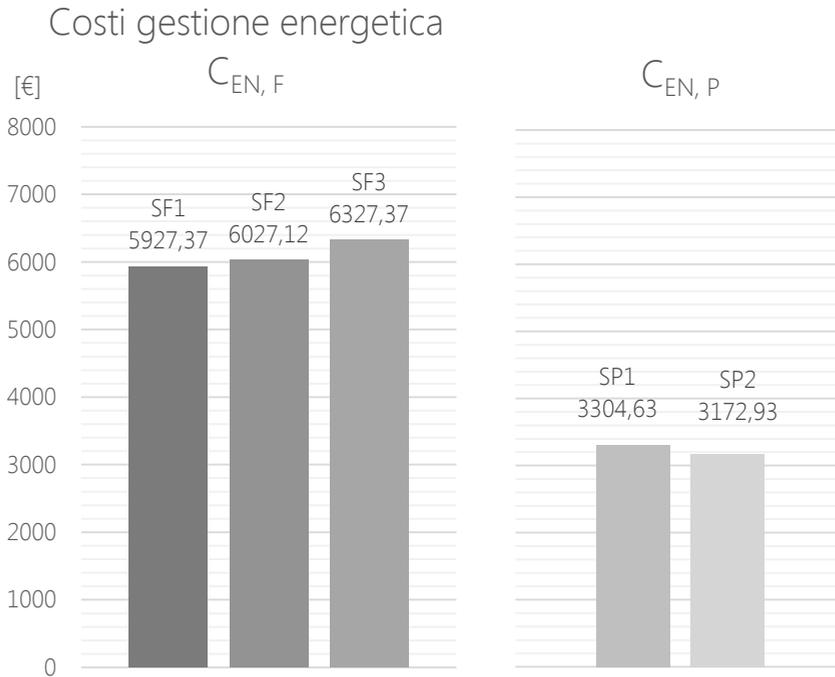


Figura 5.9 – Costi di gestione energetica della zona termica afferente all'elemento tecnico di copertura al variare della soluzione tecnologica della copertura stessa.

La gestione energetica della zona termica sottostante la copertura risulta così praticamente dimezzata (si ricorda che sono stati mantenute le caratteristiche energetiche degli altri elementi d'involucro, la configurazione dell'impianto di condizionamento e le specifiche di utilizzo da parte degli utenti). La copertura verde risulta più efficiente nella misura del 4%, in virtù di una migliore prestazione energetica nella stagione estiva. Va evidenziato, comunque, che al fine di garantire l'accesso al regime delle detrazioni fiscali vigente a livello nazionale per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, è stato necessario prevedere nella copertura verde un congruo strato di isolamento termico.

5.2.3.4. Costi di manutenzione

I costi di manutenzione delle soluzioni tecnologiche di copertura dello stato di fatto e della soluzione tecnologica di progetto SP1 sono stati determinati in base ai costi della manodopera per operaio specializzato previsti dal prezzario 2013 della Regione Friuli Venezia Giulia, pari a 32,10 €/ora. Si ipotizza, in particolare, che:

- la soluzione SF1 richiede l'opera di due tecnici specializzati per 10 ore annuali ciascuno, per complessive 20 ore all'anno;
- la soluzione SF2 richiede l'opera di tecnici specializzati per complessive 35 ore annuali;
- la soluzione SF3, per 16 ore annuali;
- la soluzione di progetto SP1 richiede complessivamente 24 ore annuali.

I costi di manutenzione della soluzione con inverdimento estensivo SP2 sono stati determinati utilizzando la classificazione UNI 11235 relativa agli interventi in fase operativa, utilizzando un rapporto tra il costo totale annuo della manutenzione ordinaria ed il costo di costruzione della copertura verde pari all' 1,2 %.

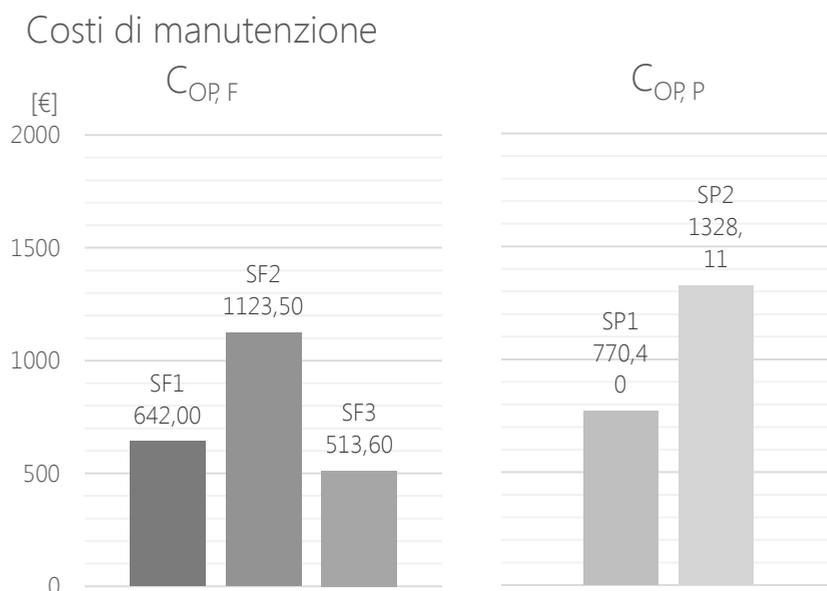


Figura 5.10 – Costi di manutenzione ordinaria delle diverse soluzioni tecnologiche di copertura.

5.2.3.5. Detrazioni fiscali previste a livello nazionale

L'ammontare delle detrazioni fiscali inerenti gli interventi di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente¹⁰ sono state determinate sulla base degli importi complessivi dei lavori di sostituzione della copertura verde, sommando il costo delle rimozioni ed il costo delle nuove installazioni. L'importo delle detrazioni fiscali, calcolato in ragione del 65% della spesa complessivamente sostenuta, è stato ripartito in 10 rate annuali di pari importo come previsto dalla normativa vigente.

È importante evidenziare come tale incentivo, di segno discorde rispetto agli altri in quanto comporta una riduzione del costo complessivo da valutare, è considerato effettivo solo nel caso in cui l'intervento di sostituzione della copertura avvenga nell'anno 2015. Poiché la recente Legge di Stabilità ha prorogato fino al 31 dicembre 2015 questa

forma incentivante, si assume che gli interventi effettuati in seguito a questa data non godano di tale beneficio fiscale. Le analisi del costo totale della copertura si riferiranno dunque a due situazioni con riferimento a questo contributo:

- intervento di sostituzione nell'anno 2015, accesso alle detrazioni fiscali per le soluzioni tecnologiche dello stato di progetto;
- intervento di sostituzione nell'anno 2016, senza alcuna detrazione fiscale riconosciuta.

IMPORTO ANNUALE ONERI DEDUCIBILI $C_{INST, P}$ [€]

SOLUZIONE DI STATO DI PROGETTO	SOLUZIONE DI STATO DI FATTO		
	SF1	SF2	SF3
SP1	-1.824,73	-1.861,41	-1.608,53
SP2	-2.369,58	-2.406,27	-2.153,38

Tabella 5.8 – Quota annuale dell'importo degli oneri deducibili per l'anno 2015 relativa agli interventi di rimozione delle soluzioni dello stato di fatto SF e nuova installazione della copertura per le soluzioni di progetto SP1 e SP2.

5.2.4. **Costo globale attualizzato negli scenari prospettati**

Nelle pagine successive sono illustrati, anche attraverso opportuni ingrandimenti, gli andamenti del costo globale attualizzato per ciascuno degli scenari prospettati, secondo una scala logaritmica, al variare di:

- costo medio ponderato del capitale WACC, variabile in funzione di β e ridotto di un punto percentuale per tener conto dell'inflazione;
- periodo in cui si colloca l'intervento sulla copertura, variabile che permette di considerare l'incidenza della deducibilità degli oneri per la riqualificazione energetica previste a livello nazionale (considerate per la sostituzione della copertura nel 2015 ed escluse per la sostituzione nel 2016).

Andamento costi annuali sostituzione 2015

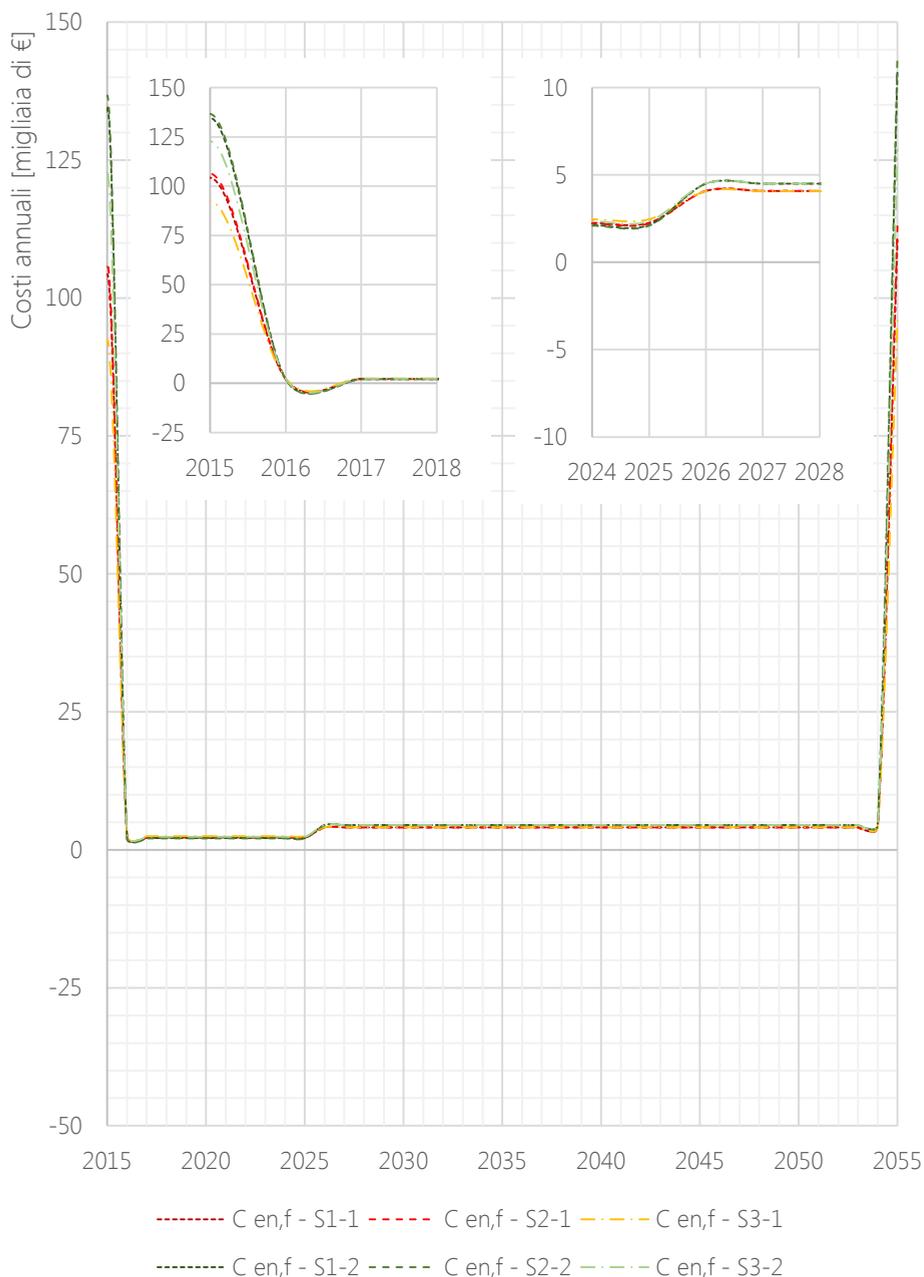


Figura 5.11 – Andamento dei costi annuali nel periodo 2015-2055 per ciascuno scenario, con le ipotesi: WACC=9,21% ridotto di un punto percentuale per inflazione, sostituzione della copertura nel 2015 e conseguente accesso alle agevolazioni fiscali nazionali.

Andamento costi annuali sostituzione 2016

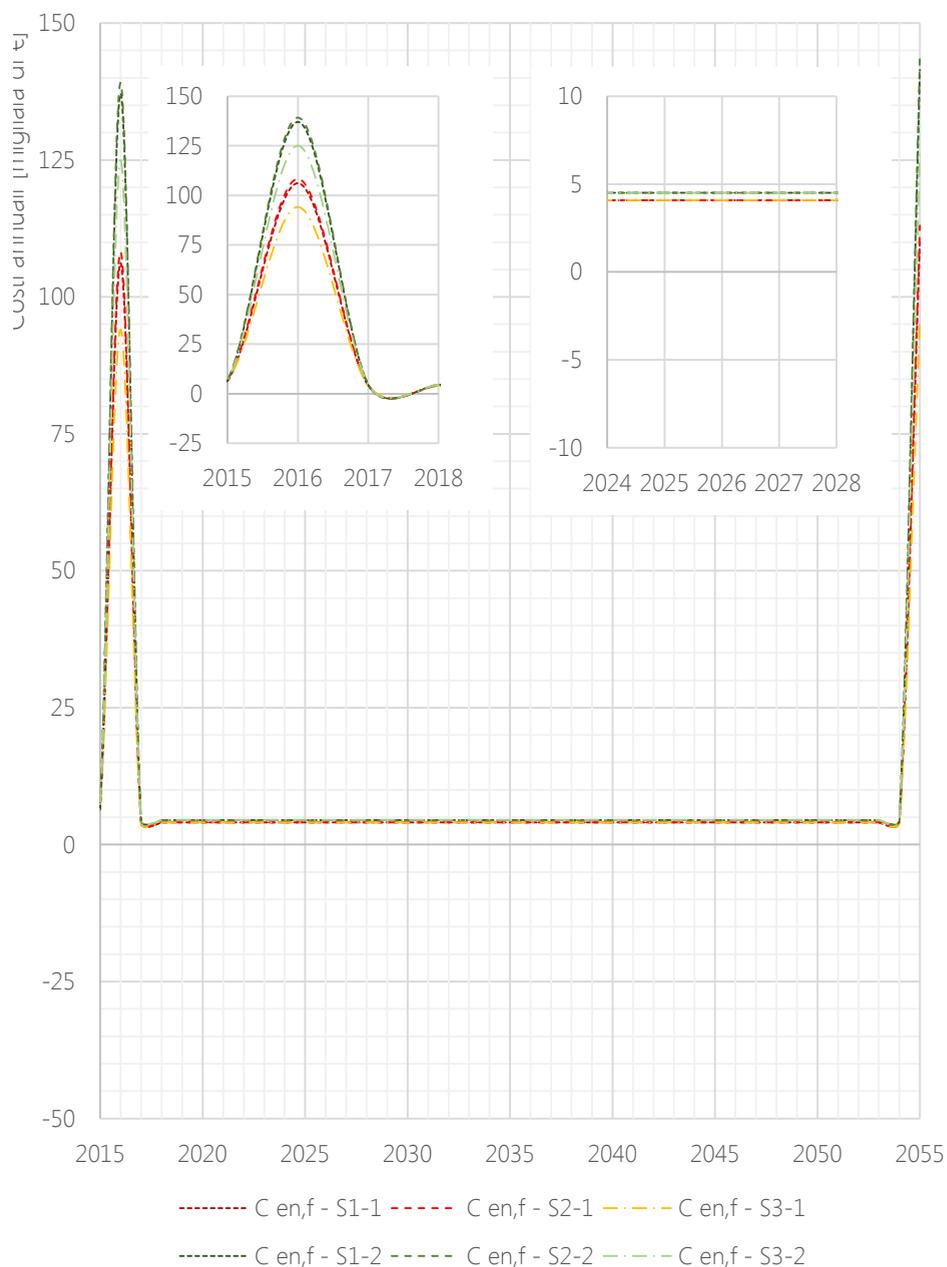


Figura 5.12 – Andamento dei costi annuali nel periodo 2015-2055 per ciascuno scenario, con le ipotesi: WACC=9,21% ridotto di un punto percentuale per inflazione, sostituzione della copertura nel 2016 senza accesso alle agevolazioni fiscali nazionali.

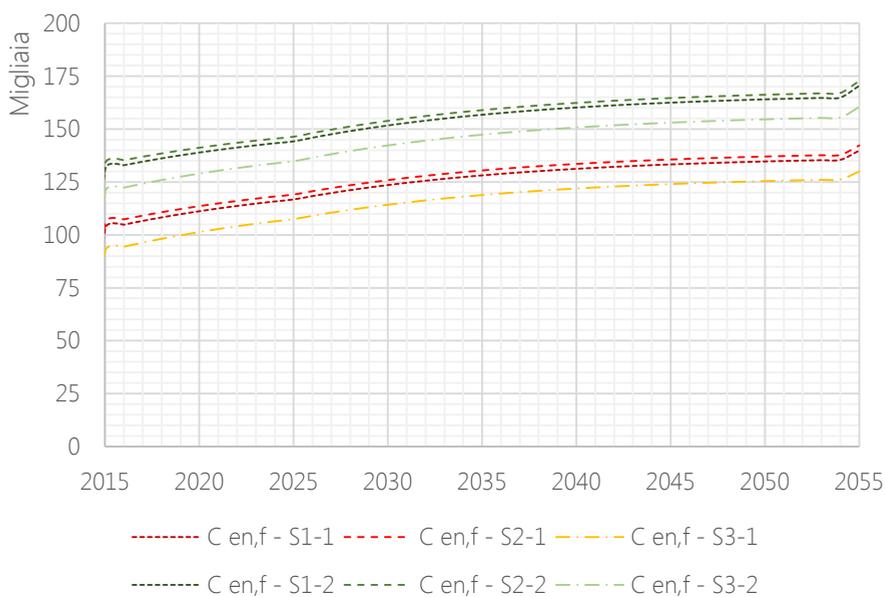


Figura 5.13: Esposizione finanziaria per la sola componente dei costi nel periodo 2015-2055 per ciascuno scenario, con WACC=9,21% ridotto di un punto percentuale per inflazione, sostituzione della copertura nel 2015 e conseguente accesso alle agevolazioni fiscali nazionali.

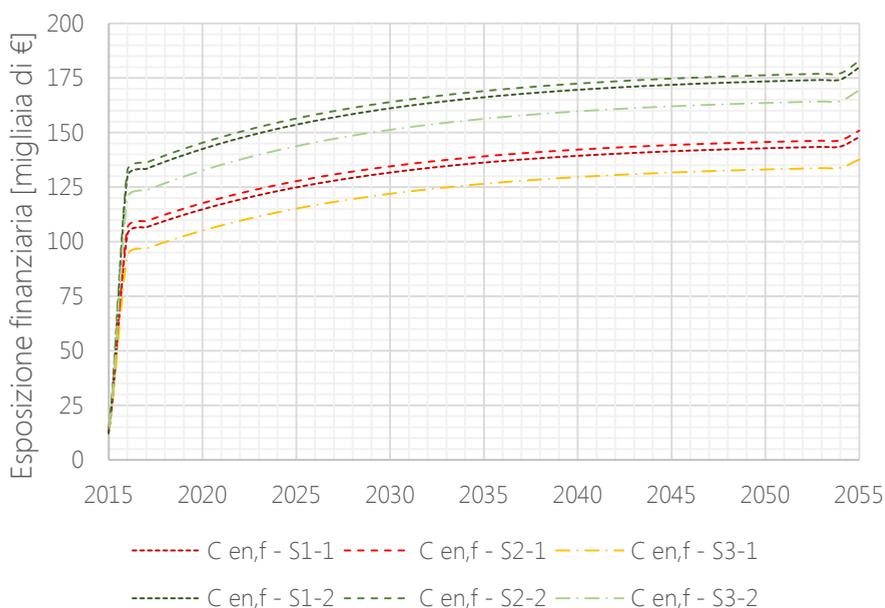


Figura 5.14 – Esposizione finanziaria per la sola componente dei costi nel periodo 2015-2055 per ciascuno scenario, con WACC=9,21% ridotto di un punto percentuale per inflazione, sostituzione della copertura nel 2016 senza accesso alle agevolazioni fiscali nazionali.

Dall'analisi dei costi globali attualizzati si evince innanzitutto che l'accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica rappresenta un indubbio incentivo per il contenimento dei costi totali dell'intervento di rifacimento della copertura: la sostituzione con accesso alle agevolazioni – da effettuarsi nel 2015, stanti le vigenti leggi – permette una riduzione media del costo che si attesta al 4,75% al variare degli scenari. In particolare:

- la sostituzione con copertura isolata 'tradizionale' comporta una riduzione media del 4,91%;
- la sostituzione con copertura verde, invece, porta ad una riduzione media del 4,56%.

Al variare del coefficiente β , rapportando due situazioni di rendimento atteso dell'attività, il costo globale attualizzato risulta mediamente maggiore per condizioni di basso rendimento ($\beta = 0,83$) con un valore del 8,60%, con leggera variazione tra elemento tecnico rinnovato di tipo tradizionale (8,80%) e copertura verde (8,40%).

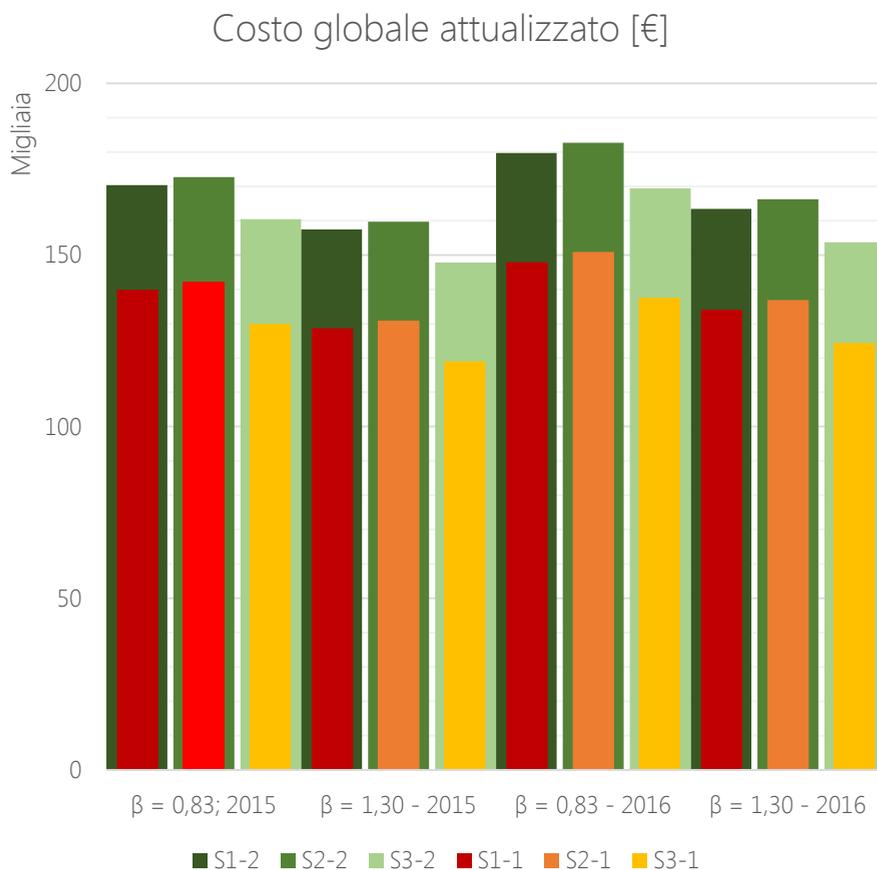


Figura 5.15 – Costo globale attualizzato dei diversi scenari di intervento, al variare del coefficiente β e dell'eventuale accesso alle detrazioni fiscali.

La combinazione dei due parametri determina quattro possibili differenze di costo globale attualizzato tra la soluzione tecnologica di progetto a copertura verde e quella “tradizionale”.

ANNO INTERVENTO	COEFFICIENTE θ	DIFFERENZA DI COSTO GLOBALE ATTUALIZZATO [€]
2015	0,83	+ 30.504
	1,30	+ 28.816
2016	0,83	+ 31.824
	1,30	+ 29.374

Tabella 5.9 – Differenza di costo globale attualizzato, al variare del coefficiente θ e dell'eventuale accesso alle detrazioni fiscali, tra gli scenari di installazione della copertura verde e quelli relativi alla copertura isolata 'tradizionale'.

Questo consente di valutare l'entità del contributo che rende l'intervento di installazione della copertura verde economicamente indifferente rispetto alla nuova copertura isolata di tipo tradizionale.

Ipotizzando dunque che la committenza ammetta quale unico criterio di scelta la convenienza economica privata, ci si propone di valutare natura e congruità di un possibile meccanismo di agevolazione a scala locale, ipotizzando che esso si sommi alle eventuali agevolazioni già in vigore a livello nazionale.

5.3. Le coperture verdi nei regolamenti locali italiani: norme prescrittive e meccanismi incentivanti

L'approccio normativo al tema dell'integrazione delle coperture a verdi negli edifici è diverso alla scala locale rispetto a quella nazionale: questa situazione deriva dall'attuale mancanza di una normativa tecnica di respiro europeo che definisca gli standard generali di progettazione, realizzazione e manutenzione delle coperture verdi nei singoli Stati membri.

La Legge 14 gennaio 2013, n. 10 "*Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani*" si propone, tra gli altri obiettivi, di incentivare la realizzazione di infrastrutture verdi in ambito urbano.

In particolare, l'art. 6 disciplina le iniziative locali per lo sviluppo di spazi verdi in ambito urbano, riconoscendone la promozione a regioni, province e comuni, nell'ottica di perseguire i seguenti obiettivi generali:

- risparmio ed efficienza energetica;
- abbattimento delle polveri sottili presenti in atmosfera;

- riduzione dell'effetto "isola di calore" nella stagione calda;
- controllo e raccolta delle acque meteoriche.

Questi obiettivi si esplicitano, tra le altre, con azioni di inverdimento delle coperture, delle quali si evidenziano le prestazioni in materia di contenimento dei consumi energetici e si suggerisce l'applicazione a lastrici solari per la loro trasformazione (ed inoltre l'applicazione del verde verticale alle pareti degli edifici): in questo modo, il verde in copertura permette di restituire, almeno parzialmente, al suolo già impiegato nuove, diverse, funzioni.

In Italia alcune pubbliche amministrazioni hanno quindi riconosciuto che tali tecnologie possono essere positivamente impiegate per mitigare gli impatti dei processi di trasformazione edilizia che interessano sia i contesti non costruiti, sia edifici esistenti da riqualificare, in un ambito pluridisciplinare che coinvolge aspetti giuridici, la regolamentazione energetica, la disciplina urbanistica e la normativa inerente la salvaguardia ambientale

È stata dunque considerata la necessità di rendere disponibili strumenti economici ed urbanistici che favoriscano ed incentivino la realizzazione di queste misure di compensazione architettonica; in alcuni contesti, invece, la previsione in progetto di quote di copertura destinate a verde avviene in forma obbligatoria o vincolante.

5.3.1. **Regolamenti locali prescrittivi**

5.3.1.1. L'esperienza di Berlino

A partire dal 1994, a seguito di una prima fase di sperimentazione, le attività edilizie a Berlino sono regolamentate – a scala di quartiere – dall'indice BFF (*Biotopflaechenfaktor*, traducibile dal tedesco come fattore biotopico dell'area, Biotope Area Factor – BAF – nella letteratura anglosassone) che prelude al raggiungimento di specifiche soglie di compatibilità ambientale, espresso dal rapporto tra il valore ecologico delle superfici e la superficie totale dell'area¹¹.

A ciascuna tipologia di superficie è assegnato un valore compreso tra 0 e 1, che vi assegna diversa importanza in funzione della permeabilità e dell'implementazione di tecnologie "verdi". Gli estremi sono infatti rappresentati da una superficie sigillata in asfalto o cemento (valore 0) e da una superficie non edificata con vegetazione su suolo naturale (valore 1).

Gli obiettivi minimi da raggiungere sono distinti in base a:

- tipologia di intervento (nuova costruzione o ristrutturazione);
- destinazione d'uso. Ad esempio, la realizzazione di nuovi edifici residenziali e pubblici devono soddisfare la condizione $BFF > 0,60$, il valore limite più restrittivo tra quelli previsti;
- indice edificatorio permesso nella zona (residenziale, commerciale, terziario, pubblico, scolastico), in caso di intervento di ristrutturazione.

<i>TIPOLOGIA DI SUPERFICIE</i>	<i>VALORE PONDERALE ATTRIBUITO</i>
Superfici sigillate	0,0
Superfici non inverdite parzialmente sigillate	0,3
Vegetazione discontinua rispetto al terreno	0,5
Vegetazione continua al terreno	1,0
Facciate a verde verticale di altezza < 10 ml	0,5
Coperture verdi	0,7

Tabella 5.10 – Valori del coefficiente attribuito, nella città di Berlino, alle diverse tipologie di superficie in funzione del loro valore ecologico e del contributo al ripristino del ciclo idrologico.

Con il BFF si è inteso fissare, in modo vincolante, la superficie minima del lotto che debba fornire prestazioni ecologiche e, in genere, essere destinata a verde.

5.3.1.2. L'esperienza di Bolzano

L'introduzione dell'indice di Riduzione dell'Impatto Edilizio (R.I.E.) nel territorio comunale di Bolzano parte dalla necessità di ridurre gli effetti negativi sul microclima urbano derivanti dall'impermeabilizzazione dei suoli, che causa un innalzamento della temperatura delle superfici antropizzate – riconducibile alla rimozione dei processi di evapotraspirazione tipici del suolo naturale – ed un più rapido deflusso delle acque meteoriche verso i corpi recettori.

Proprio con questo obiettivo, il Comune di Bolzano ha commissionato nel 2002 uno studio volto a determinare possibili misure di compensazione ambientale da inserire nel regolamento edilizio comunale. Tale studio ha predisposto l'indice R.I.E. quale modello per valutare la riduzione degli impatti di origine antropica, parametro di facile applicazione ed elevata versatilità, per poi applicarlo su 24 aree campione e prevederne un'applicazione sperimentale su alcune richieste di rilascio di concessione edilizia. L'approvazione del Consiglio Comunale ed il relativo inserimento della procedura definitiva negli strumenti urbanistici sono stati conclusi nel febbraio 2004 ^[12]; le aree campione sono state utilizzate dall'amministrazione comunale per definire, nelle singole zone del territorio comunale:

- gli obiettivi da raggiungere con gli interventi di modifica del tessuto urbano esistente, per i quali (ristrutturazione parziale o totale) l'indice R.I.E. ottenuto allo stato di progetto deve essere superiore al valore preesistente allo stato di fatto;
- le prestazioni minime da garantire nelle zone di nuova edificazione, pari a 1,5 per le zone del Piano Urbano Comunale a destinazione d'uso produttiva e a 4,0 per le zone residenziali. Nel caso in cui l'indice R.I.E. allo stato di fatto sia

maggiore dell'indice previsto per una specifica zona del PUC, il primo non deve ridursi.

Con tale procedura, divenuta esecutiva con deliberazione della Giunta Provinciale del 12 febbraio 2007, si è inteso individuare interventi da incentivare o penalizzare in funzione della prestazione parametrica offerta.

L'indice R.I.E. è definito in prima approssimazione come rapporto tra l'area di superfici trattate a verde S_V e l'area di superfici non trattate a verde S_I . Nella definizione entrambi i termini sono comprese le superfici permeabili, impermeabili e sigillate:

$$R.I.E. = \frac{S_V}{S_I} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{v,i} \cdot \frac{1}{\psi_i}) + S_e}{\sum_{i=1}^n S_{v,i} + \sum_{j=1}^m (S_{j,i} \cdot \psi_j)}$$

TIPOLOGIA DI SUPERFICIE	COEFFICIENTE DI DEFLUSSO ψ	
Coperture tradizionali	0,90 ÷ 1,00 per inclinazione $\geq 3^\circ$	
	0,80 per inclinazione $< 3^\circ$	
	0,70 se presente uno strato di finitura in ghiaia	
Coperture verdi con inclinazione $< 15^\circ$	spessore strato colturale	ψ
	> 50 cm	0,10
	> 25 cm	0,20
	> 15 cm	0,30
	> 10 cm	0,40
	< 10 cm	0,50
Coperture verdi con inclinazione $\geq 15^\circ$	spessore strato colturale	ψ
	> 10 cm	0,50
	< 10 cm	0,60

Tabella 5.11 – Valori del coefficiente di deflusso ψ assunti per diverse tipologie di copertura nell'ambito del calcolo dell'indice R.I.E. nel Comune di Bolzano.

Nella formula, sono considerati i coefficienti di deflusso ψ_i e ψ_j delle superfici trattate a verde e non trattate a verde e le superfici S_e equivalenti delle essenze arboree¹³, in funzione dell'appartenenza alle tre classi di grandezza individuate dalla norma tecnica UNI11235; i coefficienti ψ assumono dunque la funzione di ponderazione delle diverse categorie di superficie.

Al crescere del parametro R.I.E. corrisponde una migliore gestione del territorio nell'ambito della regimazione delle acque meteoriche e del reintegro delle falde acquifere sottosuolo.

Ad esempio:

- R.I.E. = 0 fa riferimento a superfici totalmente impermeabilizzate e prive di aree verdi;
- R.I.E. = 4 è un valore intermedio che si riferisce ad aree mediamente urbanizzate;
- R.I.E. = 10 è un valore caratterizzante aree non urbanizzate e prive di superfici impermeabili, tipicamente aree agricole, corsi d'acqua e bacini idrici naturali.

In seguito al primo periodo di applicazione della procedura R.I.E. (18 mesi), tra i diversi risultati, si è ottenuto un notevolissimo incremento delle coperture verdi installate: se la superficie complessiva allo stato di fatto era pari a circa 7500 m², dopo questo primo periodo era circa decuplicata (72500 m² di coperture verdi installate).

5.3.2. Misure locali di incentivo per le coperture verdi

5.3.2.1. Comune di Torino

Nell'ambito della salvaguardia del patrimonio vegetale, il Regolamento Edilizio del Comune di Torino considera le coperture verdi sia come strategia progettuale che concorre alla definizione di prestazioni minime di tipo prescrittivo¹⁴, sia come soluzione da incentivare per perseguire obiettivi di qualità energetica ed ambientale negli edifici¹⁵.

È previsto infatti che in ogni intervento edilizio sull'esistente che comporti una variazione volumetrica debba essere previsto un inverdimento in piena terra, con alberi a medio o alto fusto, per almeno il 20% della superficie del lotto non interessata da costruzioni di altezza superiore a 1,50 ml. Se metà di tale quota non può essere garantita, devono essere adottate soluzioni compensative contemplanti la realizzazione di facciate verdi o l'incremento delle superfici minime stabilite dal Piano Regolatore Generale da destinare a verde pensile; le superfici di compensazione devono avere area doppia rispetto a quella in piena terra non realizzata.

Le coperture verdi, inoltre, sono esplicitamente considerate quale requisito connotante per il contenimento dei consumi energetici, e quindi oggetto di riduzione percentuale del contributo commisurato all'incidenza delle opere di urbanizzazione¹⁶. Il requisito richiede che:

- sia presente una copertura verde conforme ai criteri della norma tecnica UNI 11235;
- la sua superficie sia superiore a quella minima prevista dal P.R.G.;
- la copertura sia posta in diretta corrispondenza degli ambienti riscaldati.

Se tali condizioni sono soddisfatte, all'intervento sono attribuiti 5 punti.

L'agevolazione derivante dall'installazione di una copertura verde è determinata assegnando una riduzione del 5% del contributo richiesto; l'agevolazione massima

prevista dal Regolamento per l'applicazione dei requisiti volontari incentivanti (riduzione dell'1% per ciascun punto ottenuto) è fissata al 50%.

5.3.2.2. Comune di Collegno (TO)

Per la salvaguardia del verde nel territorio comunale, è previsto che in ogni intervento che comporti una significativa variazione volumetrica deve essere prevista una sistemazione a verde del tipo a piena terra con alberature, corrispondente almeno al 50% della superficie permeabile; se tale percentuale non può essere garantita, le soluzioni compensative da adottare devono essere del tipo a verde pensile¹⁷.

L'incentivo comunale nell'ambito delle prestazioni dell'involucro edilizio non evidenzia esplicitamente il ruolo delle coperture verdi: analogamente alle coperture di tipo tradizionale, il maggiore spessore degli orizzontamenti ed i maggiori volumi e superfici necessari all'incremento delle prestazioni di isolamento termico e acustico ed inerzia termica non sono computati nella determinazione di volumi e superfici, per la quota eccedente i 30 cm di spessore e fino ad un massimo di 25 cm. Per scomputare tali volumi, superfici, rapporti di copertura, l'intervento deve possedere un indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale inferiore del 10% al limite previsto dal D. Lgs. 311/2006 e s.m.i.

5.3.2.3. Comune di Bereguardo (PV)

Nel Comune di Bereguardo (PV), riconosciuta l'incidenza delle aree urbane pavimentate sigillate sull'incremento della temperatura all'interno della "chioma urbana" e sul regime di deflusso superficiale, si è ritenuto di rivedere il modello di sviluppo urbano nelle aree ad elevata densità abitativa agevolando l'inserimento di elementi tecnologici 'verdi' sia su terrazze e coperture, sia sulle facciate¹⁸. La Commissione per il Paesaggio si riserva la possibilità di decidere per l'adozione di elementi tecnologici a verde al fine di incrementare la qualità ed il pregio estetico dei progetti.

Negli edifici a copertura piana, in particolare, vige la prescrizione di prevedere coperture verdi corredate da impianto di irrigazione, siano esse praticabili o meno. Tali opere, ivi comprese i volumi delle comunicazioni verticali di accesso alla copertura stessa, non sono conteggiate ai fini delle verifiche urbanistiche; inoltre, la superficie inverdita in copertura non è considerata nel conteggio del contributo al costo di costruzione.

5.3.2.4. Comune di Venezia

Il Comune di Venezia, a seguito dell'individuazione di interventi e tecnologie costruttive che permettono l'incremento della qualità ambientale e del comfort delle utenze, sia afferenti ad opere di urbanizzazione primaria e secondaria che a opere edili propriamente intese, promuove e incentiva tali accorgimenti progettuali correlandoli a specifici parametri e punteggi.

Sono dunque promosse le riduzioni della quota di contributo agli oneri di urbanizzazione – con un massimo del 30% – e della quota di contributo al costo di costruzione – nella misura massima del 50% [19], previa verifica positiva a due prerequisiti cogenti inerenti il consumo energetico unitario (definito da una Commissione Scientifica per la Riduzione degli Oneri) e l'utilizzo prevalente di prodotti con certificazione di ecocompatibilità, in base al loro valore economico.

<i>INTERVENTO</i>	<i>CARATTERISTICHE SINTETICHE</i>	<i>PUNTI (su 100)</i>
Soleggiamento lotto	accesso solare non ostruito per gli edifici retrostanti al solstizio invernale	5
Esposizione a Sud	± 30° rispetto al Sud, superfici vetrate irraggiate almeno al 50% al solstizio invernale	10
Configurazione passante	possibilità di ventilazione trasversale	5
Conformazione edificato	controllo dei flussi d'aria	5
Strutture di ventilazione	sfruttamento dell' 'effetto camino'	10
Solai in legno	ad esclusione del piano terra	5
Esclusione di specifici materiali	legno tropicale salvo certificazione FSC	5
Tetto verde	per almeno 80% delle coperture di progetto	20
Microclimi esterni al lotto	strategie di comfort termico delle aree esterne	10
Recupero acque meteoriche	Impianto di raccolta (min 50 l/m ² copertura) per usi idrici compatibili con acqua non potabile	25

Tabella 5.12 – Quote assegnate alle diverse 'azioni' per l'architettura sostenibile al fine della riduzione degli oneri di urbanizzazione (fonte Delibera n. 64/2006 del Consiglio Comunale di Venezia).

Il 'tetto verde', che contribuisce con 20 punti ai 100 totali relativi alla riduzione massima ammessa degli oneri di urbanizzazione, è definito come un elemento tecnico installato su coperture piane orizzontali o sub-orizzontali, anche di piani interrati o coperture di corpi di fabbrica separati, per una quota non inferiore all'80% delle coperture in progetto.

La riduzione dei contributi al costo di costruzione fa invece riferimento a strategie progettuali che comprovino l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto.

5.3.2.5. Comune di Pordenone

Il Comune di Pordenone, nel proprio Regolamento Edilizio²⁰, prevede alcuni incentivi nell'ambito della realizzazione di interventi di risparmio energetico con utilizzo di fonti

rinnovabili. Con riferimento alla coibentazione dell'involucro edilizio e ai valori limite di trasmittanza termica previsti dal D. Lgs. 311/2006 e s.m.i., sono individuate due tipologie di incentivazione:

- di tipo urbanistico, che prevede la riduzione del contributo di costruzione;
- in termini volumetrici e di deroga ai parametri edilizi.

Nella prima tipologia è richiesto il rispetto dei valori limite di trasmittanza termica previsti a livello nazionale ridotti del 10%; la prestazione conforme della copertura deve necessariamente essere associata ad una prestazione analoga da parte delle pareti perimetrali²¹. La riduzione del contributo di costruzione è stabilita annualmente in misura non inferiore al 5% dell'importo dovuto.

Nella seconda tipologia sono previste deroghe a distanze e altezze ed uno sconto di tipo volumetrico nella realizzazione di edifici a basso consumo energetico: tra gli interventi sono espressamente citati i 'tetti verdi'. Le disposizioni su deroghe e sconti volumetrici fanno riferimento a valori limite desunti dall'All. C. al D. Lgs. 311/2006 ridotti del 20%.

5.3.2.6. Comune di Reggio Emilia

Il Comune di Reggio Emilia prevede un Allegato al Regolamento Edilizio inerente l'architettura sostenibile²², che definisce requisiti volontari e forme di incentivazione per contenere l'uso delle risorse idriche ed energetiche negli interventi di nuova costruzione, demolizione con ricostruzione, ampliamento, ristrutturazione edilizia.

Per gli interventi di nuova costruzione l'accesso agli incentivi è vincolato al raggiungimento di requisiti prestazionali (compresi nella certificazione comunale "ECO") inerenti l'inerzia termica complessiva, l'applicazione di strategie per il risparmio idrico e il fabbisogno complessivo di energia primaria: il raggiungimento di prestazioni via via migliori quest'ultimo requisito permette di ottenere lo scorporo delle murature perimetrali nel calcolo della superficie utile e successivamente un bonus della stessa superficie fino ad un massimo del 5%.

Soddisfatti i requisiti della certificazione "ECO", è possibile ottenere i bonus della più restrittiva certificazione comunale "BIO" se è previsto l'impiego di materiali bioecologici (isolamenti, elementi lignei, malte ed impregnanti) ed è soddisfatta almeno una delle seguenti condizioni:

- installazione di impianto solare termico;
- installazione di impianto solare fotovoltaico;
- realizzazione di coperture verdi per almeno il 50% della superficie lorda di copertura dell'edificio;
- installazione sistema di recupero delle acque meteoriche.

A seconda del numero di requisiti soddisfatti, si ottiene uno scomputo degli oneri di urbanizzazione variabile dal 20 al 50%.

L'inserimento delle coperture verdi quale parte del meccanismo incentivante non è prevista per gli interventi di ristrutturazione e manutenzione ordinaria, per i quali è invece presente un contributo percentuale ai costi di costruzione.

CERTIFICAZIONE	NUOVA COSTRUZIONE AMPLIAMENTO	RISTRUTTURAZIONE MANUTENZIONE STRAORDINARIA
ECO	scorporo pareti perimetrali + bonus superficie utile	contributo costi di costruzione ristrutturazione (0÷4%) manut. straordinaria (8÷14%)
BIO	scomputo oneri urbanizzaz.	(non prevista)

Tabella 5.13 – Struttura dei meccanismi incentivanti per interventi energeticamente efficienti e sostenibili nel Comune di Reggio Emilia (fonte Regolamento Edilizio Comunale, dicembre 2006).

5.3.2.7. Comune di Faenza (RA)

Il Consiglio Comunale di Faenza, tra il 1999 ed il 2008, ha approvato una serie di atti volti ad integrare nel Regolamento Edilizio prescrizioni ed incentivi per la promozione di strategie di architettura sostenibile²³. È stata dedicata specifica attenzione agli edifici con destinazione d'uso produttiva, individuando strategie agevolmente applicabili atte ad incrementare il benessere ambientale nei luoghi di lavoro, compatibilmente con le prestazioni garantite dal subsistema strutturale.

Nel caso di realizzazione di tetti giardino²⁴ in edifici industriali di nuova costruzione, i vani di accesso al tetto giardino ed i locali connessi alla fruizione della copertura verde – non autonomi funzionalmente, non eccedenti in superficie il 50% della copertura e dotati di chiusure trasparenti per almeno il 75% del proprio perimetro, non sono computati ai fini della cubatura, della superficie utile lorda e delle altezze massime regolamentate dalle Norme Tecniche di Attuazione del Piano Regolatore Generale.

5.3.2.8. Comune di Catania

Il vigente Regolamento Edilizio prevede attualmente, quale misura di deroga, lo scomputo dai volumi i maggiori spessori, fino ad un massimo di 40 cm in aggiunta ad altre eventuali deroghe, necessari alla realizzazione di coperture verdi, anche se non poste in sommità all'edificio²⁵. In merito all'obiettivo di tutela dell'ambiente, le coperture verdi sono richiamate quale strumento per perseguire l'invarianza idraulica del territorio, prevedendo specie vegetali capaci di sostenersi esclusivamente con l'apporto idrico delle acque meteoriche²⁶.

Nell'aprile 2014 il Consiglio Comunale di Catania ha approvato una nuova versione del Regolamento edilizio contenente Linee Guida per l'Efficienza Energetica e la Bioedilizia. Queste Linee Guida definiscono i requisiti prescrittivi e le forme incentivanti previste per la promozione della sostenibilità ambientale nel settore edilizio²⁷. Sono quindi previste delle riduzioni degli oneri connessi dovuti (in termini di riduzione percentuale alle quote di incremento dei costi di costruzione), a somma con gli eventuali incentivi economici previsti dalla vigente legislazione, in proporzione al punteggio totale risultante dal conseguimento di uno, o più, requisiti volontari. Le coperture verdi, inserite

nell'Area Tematica 1 "Prestazioni dell'involucro", sono premiate con il punteggio massimo previsto per i singoli requisiti volontari, ossia 15 punti. La sola adozione di una copertura verde, associata al requisito obbligatorio di prestazione energetica di classe A, consente una riduzione dell'incremento delle aliquote del costo di costruzione pari al 5% per interventi di nuova costruzione e del 10% per interventi di ristrutturazione e manutenzione straordinaria. Il bonus è elevato al 40% in concomitanza con interventi di messa in sicurezza sismica dell'edificio.

5.4. Possibili incentivi supplementari a livello locale

Dopo aver determinato la differenza di costo globale attualizzato della riqualificazione energetica con la soluzione tradizionale e con quella a verde estensivo, si indagano i possibili strumenti per incentivare l'installazione della soluzione della copertura verde. Si suppone, quindi, che non siano valutati dalla committenza i vantaggi pubblici (compensazione architettonica, riduzione della portata di deflusso delle acque meteoriche, incremento della qualità visiva, etc.) portati dall'inverdimento in copertura. Per tale ragione la differenza di costo globale dovrà essere bilanciata da adeguate agevolazioni a livello locale che privilegino questa soluzione, poiché le agevolazioni fiscali per la riqualificazione energetica del patrimonio esistente si applicano ad entrambe le soluzioni tecnologiche dello stato di progetto.

Si valuteranno due possibili forme di incentivo supplementari da prevedere a livello locale:

- la riduzione delle imposte locali sugli immobili;
- la concessione di bonus volumetrici.

5.4.1. Riduzione dell'imposizione locale sugli immobili

Dal 2014 è in vigore l'imposta unica comunale (IUC) basata sui presupposti impositivi del possesso dell'immobile e alla fruizione di specifici servizi comunali: l'imposta si determina sulla base di due componenti:

- la prima relativa ai servizi, articolata in tassa sui rifiuti (TARI) e tributo per i servizi indivisibili (TASI);
- la seconda di natura patrimoniale dovuta dal proprietario, detta imposta municipale propria (IMU) che sarà oggetto della valutazione.

La determinazione dell'importo dell'IMU avviene innanzitutto determinandone la base imponibile, moltiplicando la rendita catastale rivalutata del 5% per un preciso coefficiente dipendente dalla classificazione catastale dell'immobile. Tale coefficiente, nel Comune di Trieste, è stabilito pari a 65 per i fabbricati a destinazione d'uso produttiva. Per la stessa categoria nel comune di Trieste è stata fissata, per l'anno 2014, l'aliquota definitiva del 7,6 %^[28].

Ipotizzando una rendita catastale pari a 6100 €, si determina l'importo annuale dell'IMU:

$$I_{IMU} = (1,05 \cdot 6100) \cdot 65 \cdot 0,0076 = 3164 \text{ €}$$

Per determinare la quota di riduzione dell'IMU volta ad annullare la differenza di costo globale attualizzato, si suppone che l'imposta sia vigente annualmente sull'immobile per l'intero periodo di valutazione (fino al 2055). L'IMU viene assunta quale ulteriore voce di costo I_{IMU} gravante sull'immobile, computata annualmente e soggetta ad attualizzazione in funzione del saggio di sconto sia negli scenari che prevedono l'installazione della copertura verde, sia negli scenari che contemplano un intervento di sostituzione con la copertura isolata 'tradizionale'.

Indicando con κ gli scenari relativi allo stato di fatto e con 1, 2 la soluzione tecnologica isolata 'tradizionale' e la soluzione a copertura verde, rispettivamente, si impone dunque la relazione

$$C_{GL,S(i;2)} + \sum_{ATT} I_{IMU} = C_{GL,S(i;1)} + \sum_{ATT} (\kappa \cdot I_{IMU})$$

dove si è indicata con κ 100% l'aliquota annuale di riduzione dell'IMU che eguaglia i membri dell'equazione. Perciò:

$$\kappa = 1 - \frac{C_{GL,S(i;2)} - C_{GL,S(i;1)}}{\sum_{ATT} I_{IMU}}$$

Si riportano nella Tabella 5.14 i valori assunti da κ al variare del coefficiente β e dell'eventuale accesso alle detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica previste a livello nazionale.

ANNO INTERVENTO	COEFFICIENTE β	$\sum_{ATT} I_{IMU}$ [€]	κ [%]
2015	0,83	40.190	24,10
	1,30	33.590	14,21
2016	0,83	40.190	20,82
	1,30	33.590	12,55

Tabella 5.14 – Determinazione dell'aliquota κ di riduzione annuale dell'imposta municipale unica (IMU) in presenza o meno di detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica e al variare del coefficiente β .

Come si evince dai risultati, l'aliquota annuale di riduzione dell'IMU richiesta per rendere economicamente indifferente le opzioni tecnologiche di intervento è influenzata

soprattutto dal coefficiente β e, in misura meno significativa, dall'anno di installazione della nuova copertura: il coefficiente κ presenta valori maggiori per l'anno 2015 (con deducibilità degli oneri) in quanto, a parità di denominatore $\sum_{ATT} I_{IMU}$ è maggiore la differenza dei costi globali attualizzati tra gli scenari S_{i-2} e S_{i-1} .

La riduzione dell'Imposta Municipale Unica per favorire l'installazione di coperture verdi è dunque una soluzione di non semplice attuazione, anche a causa del fatto che l'IMU rappresenta un importante finanziamento per le amministrazioni comunali.

5.4.2. *Concessione di bonus volumetrici*

Il secondo strumento incentivante analizzato riguarda il bonus volumetrico premiante l'intervento di riqualificazione energetica ottenibile con l'inverdimento estensivo della copertura.

Per valutare economicamente il bonus, si attribuisce un valore unitario al volume oggetto dell'ampliamento del fabbricato. Il valore di mercato di riferimento per edifici siti in aree a destinazione d'uso produttiva, per il comune di Trieste, è stimato in 700 €/m², per immobili in condizioni normali di manutenzione²⁹; dato che si considera un intervento di nuova costruzione, tale valore è incrementato del 30%, ed assunto pari a 910 €/m².

Il costo di costruzione di un nuovo fabbricato ad uso produttivo nella medesima zona è assunto pari 500 €/m² [30]; si considera inoltre l'incidenza degli oneri concessori (+10%), delle spese tecniche (+5%), delle spese generali ed imprevisti (+3%). Si assume, dunque, un valore del costo pari a 590 €/m².

Si impone dunque che la differenza di costo globale attualizzato tra gli scenari S_{i-2} e S_{i-1} sia bilanciata dalla possibilità di disporre di un bonus volumetrico determinato attribuendo ad 1 m³ di ampliamento il valore unitario di

$$C_{AMP} = \frac{(910 - 590) \text{ €/m}^2}{5,00 \text{ m}} = 36,20 \text{ €/m}^3$$

dove è indicata in 5,00 ml l'altezza indicativa di un possibile ampliamento dell'edificio.

Il volume da assoggettare a bonus, indicati rispettivamente con $C_{GL, S(i;2)}$ e $C_{GL, S(i;1)}$ i costi globali attualizzati relativi all'installazione di una copertura verde e di una copertura 'tradizionale' isolata, sarà quindi pari a

$$V_{BONUS} = \frac{C_{GL, S(i;2)} - C_{GL, S(i;1)}}{C_{AMP}}$$

che, rapportato al volume esistente dell'edificio, fornisce il valore percentuale di bonus volumetrico w_{BONUS} da concedere.

Anche in questo caso i valori del parametro incentivante sono determinati in caso di accesso (o mancato accesso) alle detrazioni fiscali nazionali per la riqualificazione energetica e in funzione del coefficiente β .

ANNO INTERVENTO	COEFFICIENTE β	V_{BONUS} [m^3]	W_{BONUS} [%]
2015	0,83	477	5,09
	1,30	450	4,81
2016	0,83	497	5,31
	1,30	459	4,90

Tabella 5.15 – Determinazione del bonus volumetrico per premiare l’installazione di una copertura verde in fase di riqualificazione energetica di un fabbricato ad uso produttivo, rispetto ad una soluzione che contempra una nuova copertura ‘tradizionale’ isolata, in presenza o meno di detrazioni fiscali per la riqualificazione energetica e al variare del coefficiente β .

Come si evince dall’analisi, questo strumento incentivante è maggiormente praticabile rispetto alla riduzione percentuale dell’IMU. Negli scenari in cui è garantito l’accesso alle detrazioni fiscali nazionali, il bonus volumetrico calcolato sull’edificio esistente oscilla al 4÷5%, valore prossimo a quello impiegato in alcuni regolamenti locali (es. Reggio Emilia). Si sottolinea inoltre che il valore unitario medio dei fabbricati produttivi può essere considerato uno dei più contenuti, rapportato a quelli associati alle altre destinazioni d’uso: per gli edifici a destinazione d’uso residenziale o direzionale, a titolo d’esempio, si stima che i bonus volumetrici precedentemente individuati potrebbero essere ridotti del 50÷60% circa.

È possibile, infine, sviluppare una proposta di applicazione per associare l’installazione di una copertura verde ad un sistema di crediti edilizi eventualmente previsti dall’amministrazione comunale nell’ambito di un piano di perequazione³¹ e compensazione urbanistica. Per la realizzazione di tale strategia devono innanzitutto essere individuate delle aree di trasformazione urbanistica. L’individuazione dei comparti può avvenire in due modalità:

- definizione di comparti continui, nei quali la capacità edificatoria del comparto è concentrata su una specifica area individuata dal piano. Sono quindi individuate, nel medesimo comparto, un’area di compensazione urbanistica ed una di concentrazioni delle volumetrie secondo i criteri individuati dal piano stesso;
- individuazione di comparti discontinui, applicabile qualora alcune aree non possano ricevere nuove edificazioni. In questo caso il valore economico della potenziale edificazione avviene con il trasferimento del diritto su un’altra area, in cui la trasformazione urbanistica è possibile. L’opzione è attivabile anche nel caso in cui l’amministrazione non ritenga opportuno lo sviluppo edificatorio in una determinata area.

Per instaurare un mercato di crediti edilizi è necessario che sia effettivamente possibile impiegare i crediti nelle aree a trasformazione urbanistica, ossia che ad un’area

che fornisce crediti corrisponda una capace di riceverli. Il valore attribuito ai crediti, in quanto liberamente commerciabili, deve essere commisurato al valore del suolo dell'area che li riceve.

L'effetto dei crediti edilizi sugli interventi di riqualificazione energetica è la riduzione del tempo in cui il risparmio energetico ripaga l'investimento: si riducono infatti i costi a carico dei proprietari nella realizzazione dell'intervento, che sono parzialmente coperti dalla cessione dei crediti in base al loro valore di mercato, e al contempo si genera un nuovo mercato per imprese edili e aziende operanti nei servizi energetici. Nelle aree di 'atterraggio' dei crediti edilizi, invece, si realizza uno strumento di controllo delle nuove edificazioni, consentendo interventi di ampliamento a costi comunque accettabili.

Volendo esplicitare una condizione incentivante per l'installazione di una copertura verde a sostituzione di un elemento tecnico energeticamente non efficiente, in luogo di una tradizionale isolata, la condizione da porre alla base della modulazione dei crediti deve evidenziare un contributo specifico della soluzione tecnologica SP2 rispetto a quella SP1, o una combinazione di contributi.

Ad una condizione di base che preveda, a titolo di esempio, il miglioramento della prestazione energetica globale del volume edificato (riferita a indici di prestazione quali la riduzione di una classe energetica, una riduzione percentuale del fabbisogno di energia primaria, etc.), dovrebbe essere evidenziata una prestazione peculiare della copertura verde. Si esaminano quindi tecnicamente le possibili prestazioni da analizzare per l'attribuzione dei crediti edilizi e i relativi indicatori di prestazione:

- incremento dell'inerzia termica, indicando quale indicatore di prestazione la trasmittanza termica periodica Y_{IE} . È opportuno evidenziare però che valori efficaci di tale indicatore possono essere raggiunti sia dotando l'elemento tecnico di elevata massa termica, sia incrementandone la resistenza termica; perciò la trasmittanza Y_{IE} può in alcuni casi risultare un indicatore inefficace al fine della diffusione delle soluzioni di copertura verde, a maggior ragione in presenza di chiusure superiori caratterizzate da strati portanti pesanti, tipici degli edifici realizzati negli Anni '60 - '70;
- incremento dell'albedo rispetto alla copertura originaria. Tale indicatore risulta di difficile applicazione in quanto le coperture verdi, caratterizzate da valori di albedo intermedi tra le superfici massive di colore scuro e le superfici chiare, premierebbe proprio soluzioni di copertura 'tradizionali';
- temperatura superficiale della copertura nel mese di massima irradianza media giornaliera. L'indicatore, sempre riferibile all'esigenza di mitigazione dell'effetto isola di calore, risulta più efficace rispetto all'albedo, ma necessita di un metodo di calcolo univoco che contempi condizioni al contorno univocamente determinate;
- riduzione delle emissioni di anidride carbonica. L'indicatore potrebbe includere l'effetto relativo all'assorbimento del carbonio che alimenta il processo di fotosintesi, contributo che eleva la prestazione di una copertura verde rispetto a quella offerta da una copertura tradizionale isolata. È

- necessario, però, circoscrivere alla superficie dell'elemento tecnico di copertura il contributo alla riduzione del gas climalterante;
- la riduzione del coefficiente di deflusso delle acque meteoriche in copertura. Tale prestazione evidenzia le maggiori prestazioni di controllo del ciclo idrico da parte di una copertura verde rispetto ad una soluzione tradizionale, in quanto capace di garantire un effetto di ritenzione ben superiore a quello di uno strato di finitura di copertura che, per il requisito di tenuta all'acqua ed agli agenti atmosferici, dovrà presentare congrue caratteristiche di impermeabilità.

SPECIFICA	INDICATORI DI PRESTAZIONE				
	Y_{IE}	<i>albedo</i>	$t_{sup, luglio}$	$\Delta kg_{CO_2, eq}$	ψ
peculiarità	2	1	2	2	4
efficacia	2	2	3	3	3
facilità di calcolo	3	4	1	3	3

GIUDIZIO QUALITATIVO NELL'OTTICA DI DIFFUSIONE DELLE COPERTURE VERDI:
 4 = ELEVATO / FACILE
 3 = BUONO
 2 = DISCRETO / MEDIO
 1 = INDIFFERENTE O PENALIZZANTE / COMPLESSO

Tabella 5.16 – Giudizio qualitativo su possibili indicatori di prestazione per la definizione di un meccanismo incentivante basato sui crediti edilizi che premi le coperture verdi.

Dall'analisi effettuata, si ritiene che la trattazione del coefficiente di deflusso ψ , peraltro già impiegato nel Comune di Bolzano per la determinazione della riduzione dell'impatto edilizio, risulta la modalità tecnica più efficace per la definizione di un meccanismo di crediti edilizi volto a favorire la diffusione delle coperture verdi.

5.5. Bibliografia

- Borsa Italiana - London Stock Exchange Group, *Guida alla valutazione*, luglio 2014. Documento disponibile all'indirizzo www.borsaitaliana.it.
- Comune di Bereguardo, Regolamento Edilizio, approvato con deliberazione del Consiglio Comunale n. 17/2006, art. 40.

Comune di Bolzano, Regolamento Edilizio, Deliberazione del Consiglio Comunale n. 11 del 10 febbraio 2004.

Comune di Catania, Regolamento Edilizio.

Comune di Catania, Regolamento Edilizio 2014, atto di pianificazione non ancora vigente, disponibile all'indirizzo <http://www.comune.catania.it/amministrazione-trasparente/pianificazione-e-governo-del-territorio/>

Comune di Collegno (TO), Regolamento Edilizio ed Allegato Energetico - Ambientale, Delibere del Consiglio comunale n. 33/2003 (approvazione) e n. 87/2009 (modifiche).

Comune di Faenza, Norme per l'applicazione degli incentivi per interventi di bioedilizia e di qualità ambientale, testo coordinato degli Atti n. 4602/300 del 28/07/1999, n. 3485/264 del 12/07/2001, n. 1659/150 del 03/04/2003, n. 3329/184 del 01/07/2005 e n. 1706/90 del 23/04/2008 ad integrazione del Regolamento Edilizio.

Comune di Pordenone, Regolamento Edilizio, Deliberazione del Consiglio Comunale n. 7/2011, in vigore dal 19/03/2011.

Comune di Reggio Emilia, Regolamento Edilizio Comunale, approvato dal Consiglio Comunale in data 21/04/1970 e modificato con le deliberazioni consiliare n. 13927/124 del 03/10/2003 e n. 23690/280 del 15/12/2006.

Comune di Torino, Regolamento Edilizio, Delibera del Consiglio comunale n. 302/2004 di data 20/12/2004 e s.m.i.

Comune di Torino, Allegato energetico-ambientale al Regolamento Edilizio, Deliberazione del Consiglio comunale n. 2010-08963/38.

Comune di Torino, Regolamento in materia di disciplina del contributo di costruzione, Delibera del Consiglio Comunale 2005-02356/038 approvato il 13/02/2006.

Comune di Trieste, Deliberazione consiliare n. 32 del 29/07/2014.

Comune di Venezia, Delibera n. 64, seduta del 02/05/2006, P.D. 2005.3576.

Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2009 *Linee Guida per la certificazione energetica degli edifici*.

Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59, *Regolamento di attuazione dell'art. 4, comma 1, lettere a) e b) del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.

Decreto del Presidente della Regione Friuli Venezia Giulia 20 gennaio 2012, n. 018/Pres *Regolamento di attuazione della legge regionale 11 novembre 2009, n. 19 "Codice regionale dell'edilizia"*.

Ufficio Studi Mediobanca s.p.a., *Indici e dati relativi ad investimenti in titoli quotati*. ISSN: 1722-4543, disponibile all'indirizzo www.mbres.it

NOTE AL CAPITOLO 5

¹ D.P.R. 59/2009, art. 4, comma 18.

² D.M. 26/06/2009, Allegato A, par. 6.

³ Fonte Ufficio Studi Mediobanca s.p.a.

⁴ *Ibidem*.

⁵ Fonte J. P. Morgan M&A Research, dicembre 2003, in Borsa Italiana, 2014.

⁶ Fonte: <http://people.stern.nyu.edu/adamodar/>, topic *Discount Rate Estimation*, European Regional Datasets for "levered, unlevered and pure play betas by industry", a cura del prof. A. Damodaran.

⁷ Banca d'Italia, Bollettino statistico III trimestre 2014, ISSN 2281-3977, disponibile all'indirizzo www.bancaditalia.it.

⁸ Legge 24 dicembre 2007, n. 244, art. 1, comma 33, lettera e).

⁹ Fonte ARPA FVG, struttura OSMER, stazione di rilevamento di Trieste Molo Bandiera.

¹⁰ Introdotta dalla L. N. 244/2007, art. 1, comma 344, come recentemente integrata dalla L.N. 190/2014.

¹¹ Fonte <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/>.

¹² Regolamento Edilizio del Comune di Bolzano, art. 19 bis.

¹³ A titolo di esempio:

- per un albero di I grandezza (altezza superiore a 16 ml), $S_e = 115 \text{ m}^2$;
- per un albero di II grandezza (altezza compresa tra 10 ml e 16 ml), $S_e = 65 \text{ m}^2$;
- per un albero di III grandezza (altezza inferiore a 10 ml), $S_e = 20 \text{ m}^2$.

¹⁴ Città di Torino, Regolamento Edilizio, art. 30.

¹⁵ Città di Torino, Allegato energetico-ambientale al Regolamento Edilizio.

¹⁶ Città di Torino, Regolamento in materia di disciplina del contributo di costruzione.

¹⁷ Città di Collegno (TO), Regolamento Edilizio e Allegato Energetico - Ambientale, art. 30.

¹⁸ Comune di Bereguardo, Regolamento Edilizio, art. 40.

¹⁹ Comune di Venezia, Delibera n. 64/2006.

²⁰ Comune di Pordenone, Regolamento Edilizio.

²¹ Il Regolamento Edilizio del Comune di Pordenone individua quattro tipologie di edifici:

- Edificio Sostenibile, in cui la riduzione del 10% dei valori limite di cui all'All. C al D. Lgs. 311/2006 e s.m.i., inerenti pareti perimetrali, coperture, divisori tra unità abitative, solai verso vani non riscaldati o terreno, infine chiusure trasparenti, è accompagnata da ulteriori criteri di sostenibilità quali l'assenza di impianti alimentati a fonti energetiche fossili, assenza di coibentazioni di tipo sintetico, assenza di impregnanti chimici per gli elementi lignei, assenza di vernici contenenti solventi sintetici, impianti per il recupero di acqua piovana. Per questa tipologia è previsto anche un bonus volumetrico del 5% nel

caso di nuova costruzione e di 50 m³ per interventi di ampliamento con adeguamento igienico - funzionale.

- Edificio di Tipologia 1 in cui, rispetto al punto precedenti, non sono previsti ulteriori criteri;
- Edificio di Tipologia 2, in cui è richiesta la verifica della trasmittanza solo per le pareti perimetrali e per le coperture;
- Edificio di Tipologia 3, in cui è richiesta la verifica della trasmittanza per le sole pareti perimetrali.

Come si evince dal prospetto, la coibentazione della copertura per la riduzione del contributo di costruzione deve essere concomitante ad analoga coibentazione delle pareti perimetrali.

²² Comune di Reggio Emilia, Regolamento Edilizio Comunale.

²³ Comune di Faenza, Norme per l'applicazione degli incentivi per interventi di bioedilizia e di qualità ambientale.

²⁴ Il documento di cui alla nota precedente definisce 'tetto giardino' una copertura a giardino pensile praticabile e fruibile, visibile dal prospetto stradale, caratterizzata da una fascia perimetrale per il possibile inserimento di specie arbustive e da una quota rimanente centrale a inverdimento estensivo o destinata ad accogliere percorsi pedonali.

²⁵ Comune di Catania, Regolamento Edilizio, art. 59.

²⁶ *Ivi*, art. 85.

²⁷ Comune di Catania, Regolamento Edilizio 2014.

²⁸ Comune di Trieste, Deliberazione consiliare n. 32/2014.

²⁹ Fonte: Osservatorio del Mercato Immobiliare a cura dell'Agenzia delle Entrate, <http://www.agenziaentrate.gov.it/wps/content/Nsilib/Nsi/Documentazione/omi/Banche+dati/Quotazioni+immobiliari/>

³⁰ DEI Tipografia del Genio Civile, Prezzi informativi dell'edilizia - Nuove Costruzioni - Agosto 2014. ISBN: 884969408.

³¹ Si intende per perequazione urbanistica l'equa ripartizione dei diritti edificatori e dei relativi oneri tra tutti i proprietari delle aree ed edifici interessati da un intervento da realizzare unitariamente.

Capitolo 6

Aspetti sociali correlati alle coperture verdi

Edino Valcovich, Giovanni Cechet

Gli effetti sociali propri di un'installazione con copertura verde si possono suddividere in base all'area di interesse, identificando:

- effetti a scala locale;
- effetti a scala urbana.

I primi riguardano sostanzialmente la fruizione, in senso esteso, della copertura da parte degli abitanti dell'edificio in cui viene installato il manto erboso. I secondi invece riguardano le esternalità, in genere positive, prodotte da una o più coperture verdi su scala urbana, se si parla di abitato esteso, o comunque su un territorio più vasto rispetto al singolo edificio, come nel caso di coperture verdi realizzate in zone rurali.

SCALA LOCALE	SCALA URBANA
coibentazione termica	riduzione effetto isola di calore
fruibilità diretta della copertura	fruibilità visiva della copertura
aumento albedo	formazione corridoio ecologico
	aumento biodiversità
	effetto volano idraulico
	assorbimento polveri sottili
	diminuzione impatto paesaggistico
	riduzione effetti consumo di suolo

Tabella 6.1 – Riepilogo di effetti su scala locale e urbana.

6.1. Effetti a scala locale

In precedenza si sono già ampiamente analizzati gli impatti positivi dal punto di vista tecnologico, con attenzione particolare all'efficientamento energetico, sul singolo edificio. Risulta ragionevole l'estensione di tali impatti positivi sul singolo individuo messo in relazione con l'edificio, sia nella fruizione dell'edificio stesso che in fase di trattativa di compravendita o locazione del bene.

Si può affermare, infatti, come un risparmio economico sulle spese necessarie al condizionamento dei locali o la maggiore durabilità dell'elemento di copertura, si riversino in un generale risparmio economico nella gestione dell'immobile. L'economia che ne consegue partecipa dunque ad un miglioramento della qualità di vita dell'individuo.

Un'indagine svolta su un campione degli studenti di ingegneria e architettura dell'Università di Trieste ha evidenziato come l'elemento copertura verde, in fase di compravendita di un unità immobiliare, venga percepita come un elemento che contribuisce ad un apprezzamento del bene, in particolare se la copertura verde risulta direttamente fruibile¹.

Anche la potenziale fruizione diretta della copertura, in particolare in installazioni di tipo intensivo, apre a scenari innovativi nella fruizione dell'edificio stesso. La copertura, tradizionalmente vista solo come elemento tecnico necessario alla definizione dell'involucro dell'organismo edilizio, si trasforma in uno spazio da vivere. In abitazioni singole diventa spazio collettivo ma ristretto a inquilini e eventuali ospiti, mentre in organismi plurialloggio può rappresentare uno spazio utilizzabile dalla collettività, partecipando alla rigenerazione di quelle dinamiche sociali che sempre più vanno a disperdersi negli agglomerati urbani.

Si può quindi affermare che, in generale, la copertura verde permette di bilanciare l'occupazione del suolo conseguente alla crescente urbanizzazione.

6.2. Effetti a scala urbana

Anche in questo si può far riferimento agli aspetti tecnologici ed ambientali già analizzati nei precedenti capitoli.

Si sono identificate le esternalità positive generate dalla presenza di manufatti con copertura verde sia negli agglomerati urbani:

- riduzione effetto isola di calore;
- fruibilità visiva della copertura;
- formazione corridoio ecologico;
- aumento biodiversità;
- effetto volano idraulico;
- assorbimento polveri sottili;

ed in aggiunta ai precedenti, gli effetti positivi propri delle zone rurali:

- diminuzione impatto paesaggistico;
- riduzione degli effetti dovuti al consumo di suolo.

Tutti gli aspetti sopra riportati, vanno a formare un set di esternalità positive proprie degli edifici dove è presente una copertura verde.

Ragionando sugli aspetti appena riportati, si possono estendere le esternalità positive riportandole in un ambito sociale.

La collettività a seguito, ad esempio, di una diminuzione dell'effetto isola di calore, così come l'assorbimento delle polveri sottili, se opportunamente informata, può riconoscere nelle coperture verdi uno strumento atto ad un miglioramento generale della propria qualità di vita in ambito urbano.

Allo stesso modo, in ambito rurale, si possono accettare più facilmente manufatti che vanno inevitabilmente a gravare sul paesaggio, in quanto una copertura verde adeguatamente progettata può contribuire ad una continuità del terreno e una diminuzione dell'impatto paesaggistico.

6.3. Intervento di Housing Sociale con copertura verde

Si riporta parte del progetto delineato nella stesura della tesi "*Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia: una proposta operativa*" dove, oltre ad un'analisi dell'*Housing Sociale* in Italia e in particolare nella Regione Friuli Venezia Giulia, si è approfondita la soluzione del verde estensivo per l'intervento oggetto di progetto.

Il termine *Housing Sociale* deriva da una traduzione parziale del termine inglese *Social Housing*, letteralmente tradotto in "Alloggio Sociale". Al termine *Housing Sociale* si attribuisce un significato più ampio rispetto all'identificazione dell'oggetto edilizio in se, ampliando a tutta l'attività di sviluppo e gestione immobiliare di un insieme di alloggi e servizi, destinati a un determinato gruppo di soggetti che non riescono a soddisfare il proprio bisogno abitativo sul libero mercato.

In una visione più ampia, è obiettivo dell'*Housing Sociale* creare un'offerta abitativa sostenibile in termini economici, energetici e ambientali, ma, soprattutto, anche sociali.

Risulta necessario, quindi, individuare un approccio integrato che consideri la centralità dell'alloggio, ma che superi l'oggetto fisico, per elevarsi al bene abitazione.

Nel contesto specifico italiano, la trasposizione più adeguata² del termine *Social Housing* sembra essere *Edilizia Residenziale Sociale (ERS)*, che ricorda la più conosciuta *Edilizia Residenziale Pubblica (ERP)*, ovvero la cosiddetta edilizia popolare.

I soggetti beneficiari possono essere identificati, in generale, come particolari gruppi familiari che presentano una situazione economico - sociale che impediscono loro di poter accedere agevolmente all'offerta di mercato e, allo stesso tempo, alle graduatorie per l'accesso all'Edilizia Residenziale Pubblica, ovvero alle cosiddette case popolari.



Figura 6.1 – Vista fotorealistica d'insieme dell'intervento di housing sociale proposto (fonte Giovanni Cechet, "Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. prof. P. Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

Nella definizione di Alloggio sociale³, si fa riferimento alle caratteristiche che tale oggetto edilizio deve soddisfare, ovvero:

- essere adeguato, salubre, sicuro e costruito nel rispetto delle caratteristiche tecnico-costruttive;
- avere un numero di vani abitabili tendenzialmente non inferiore ai componenti del nucleo familiare, e comunque non superiore ai cinque, oltre ai vani accessori quali bagno e cucina;
- essere costruito secondo i principi di sostenibilità ambientale e di risparmio energetico, utilizzando fonti energetiche alternative.

Tra le caratteristiche si evidenzia l'importanza data a tematiche di sostenibilità ambientale ed energetica.

Oltre che alla sostenibilità ambientale ed energetica, risulta importante, per la natura finanziaria dell'intervento, tenere in opportuna considerazione la sostenibilità economica, rappresentata da tutte quelle attività atte a rendere sostenibile, da un punto di vista economico e finanziario, l'iniziativa ERS.



Figura 6.2 – Vista fotorealistica della comunità alloggio per anziani inserita nell'intervento di Housing Sociale (fonte Giovanni Cechet, "Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. prof. P. Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

Il territorio di riferimento per il progetto dell'intervento di ERS è il comune di Pordenone. L'analisi delle dinamiche insediative di lungo periodo rappresenta un elemento strategico necessario alla delineazione di politiche urbanistiche e residenziali.

Nel territorio provinciale, si rileva⁴ come, seppur a fronte di una crescita della popolazione non troppo elevata, la domanda abitativa deve scontare una discontinuità rispetto al passato, e quindi all'offerta presente.

Recentemente si assiste ad un crescente rientro dei residenti dalle aree periferiche alle aree centrali, in controtendenza al trend storico precedente.

La tipologia insediativa è diffusa ed a bassa densità, mentre il patrimonio edilizio esistente, considerata l'elevata crescita nell'immediato secondo dopoguerra, presenta un elevato grado di vetustà.

Il rapporto tra la domanda e l'offerta di abitazioni nel pordenonese va analizzato con particolare attenzione in tutti i suoi aspetti. Nell'ultimo decennio è stato realizzato un numero di abitazioni in eccesso rispetto all'esigenza della domanda. Questo fenomeno ha portato ad un aumento delle abitazioni non utilizzate e non occupate.

Contestualmente a questo fenomeno, si registra una tendenza in antitesi sul numero di sfratti, che dal 2004 al 2010 sono aumentati e risultano attualmente in crescita.

I due fenomeni appena trattati descrivono un crescente disagio abitativo nella provincia, dove l'elevata domanda non è supportata dall'offerta, elevata ma evidentemente non adeguata.

Dalle considerazioni appena esposte, risulta motivata la scelta di progettare un'iniziativa ERS nel comune di Pordenone.

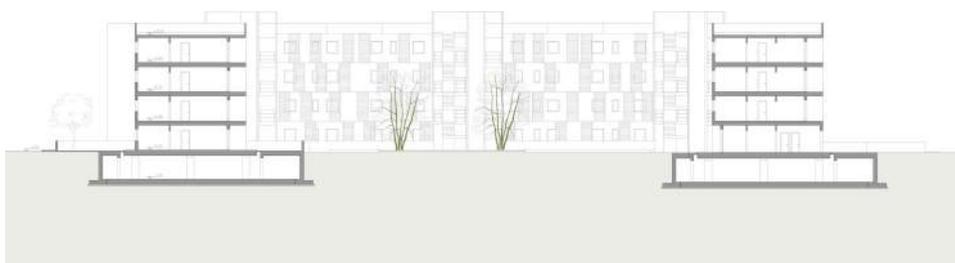


Figura 6.3 – Sezione longitudinale della proposta di intervento (fonte Giovanni Cechet, "Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. prof. P. Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

Il lotto di intervento è sito nell'immediata periferia del comune di Pordenone, nelle vicinanze di Via Grazia Deledda e alla zona fieristica di Pordenone. La zona risulta adeguatamente servita per quel che riguarda i trasporti, in particolare in relazione all'uscita dell'Autostrada A28 Pordenone – Conegliano. Pur trattandosi di una zona periferica, il centro storico del capoluogo di provincia si trova a pochi chilometri di distanza.

La viabilità progettata segue il perimetro del lotto, mentre per quel che riguarda i posti auto, quelli di pertinenza degli alloggi sono disposti nell'interrato, mentre quelli di relazione sono posizionati a raso secondo il percorso veicolare.

Considerata la dimensione dell'intervento e l'afferenza sociale del progetto, si sono previsti ampi spazi comuni, suddivisi tra uno spazio lastricato centrale, verde pubblico, più o meno attrezzato, ed uno spazio di aggregazione sociale coperto.

La disposizione planimetrica degli edifici risulta definita anche in relazione alla destinazione d'uso degli stessi: Residenziale (predominante), Commerciale, Sociale e Residenza per anziani. La Residenza per anziani è stata inserita per riprendere parte della destinazione originaria del lotto, in particolare si è optato per la progettazione di una Comunità alloggio.

Per quanto concerne la tipologia edilizia adottata, si è sviluppata una tipologia ibrida che unisce caratteristiche peculiari della tipologia a ballatoio con quella in linea. La tipologia scelta e la disposizione planimetrica sono anche risultato di una progettazione bioclimatica.

Nella scelta delle soluzioni tecnologiche, si sono preferiti tecniche e materiali che garantissero la migliore sostenibilità ambientale e efficienza energetica.



Figura 6.4 – Vista fotorealistica d’insieme della proposta di intervento di Housing Sociale (fonte Giovanni Cechet, "Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. prof. P. Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

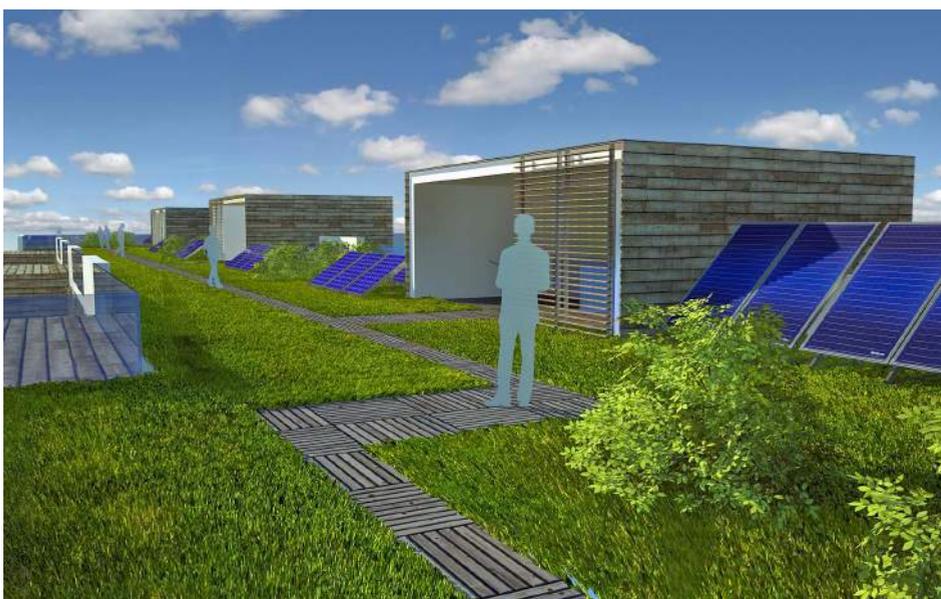


Figura 6.5 – Vista fotorealistica della copertura verde estensiva, con percorsi pedonali per la fruizione della copertura, prevista nella proposta di intervento di Housing Sociale (fonte Giovanni Cechet, "Housing Sociale in Friuli Venezia Giulia. Una proposta operativa", Tesi di Laurea Specialistica in Architettura Tecnica, rel. prof. E. Valcovich, corr. prof. P. Rosato, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, A.A. 2012/2013).

L'involucro e la struttura portante prevede l'uso del legno strutturale: pannelli di legno a strati incrociati di tipo X-Lam (CLT) opportunamente coibentati con materiali ecosostenibili (panelli isolanti in fibra di legno), così da garantire ottime prestazioni in termini di efficienza energetica. Infatti tutti gli alloggi progettati rispettano i parametri necessari per rientrare nella Classe energetica A+.

Per la chiusura superiore si è optato per una soluzione di copertura verde estensiva. Parte della copertura, è destinata all'installazione di un impianto fotovoltaico affiancato da un impianto solare termico.

Il manto erboso chiaramente non risulta praticabile in quanto si tratta di una soluzione a verde estensivo, ma la fruibilità della copertura verde è garantita dalla presenza di passerelle pedonali, utili anche per la manutenzione degli impianti tecnologici presenti in copertura.

6.4. Bibliografia

Blank R., *Il bello di essere pianta*, Bollati Boringhieri, Italia, 2008, ISBN: 8833919056.

Corrado M. (a cura di), *Il manuale del verde in architettura. Progettazione, realizzazione e manutenzione del verde tradizionale e tecnico in architettura.*, Wolters Kluwer, Italia, 2012, ISBN: 9788867500451.

Gisotti G., *Ambiente Urbano. Introduzione all'ecologia urbana*, Diario Flaccovio Editore, Palermo, 2007. ISBN: 9788877587220.

NOTE AL CAPITOLO 6

¹ P. Rosato, L. Rotaris, *La scarsa diffusione delle coperture verdi in Italia: bassa disponibilità a pagare o poca informazione?*, in *Valori e Valutazioni. Teorie ed esperienze*, n. 13, Società Italiana di Estimo e Valutazione (SIEV), Roma, 2014.

² F. Lungarella, *Social Housing, una definizione inglese di "Edilizia Residenziale Pubblica"*, in *Istituzioni del Federalismo – Politiche sociali e diritto alla casa*, n. 3/4, maggio/agosto 2010.

³ D.M. 22 aprile 2008, art. 1, comma 2, *Definizione di alloggio sociale ai fini dell'esenzione dall'obbligo di notifica degli aiuti di Stato, ai sensi degli articoli 87 e 88 del Trattato istitutivo della Comunità europea*.

⁴ "Quaderno 01 - Le politiche abitative in Provincia di Pordenone - Analisi, strumenti e strategie per il nuovo osservatorio provinciale" in "I quaderni dell'osservatorio a cura della Provincia di Pordenone - Assessorato alla Pianificazione Territoriale e alle Politiche Abitative".

Conclusioni

Nella prima parte di questo lavoro, attraverso l'analisi funzionale, sono state evidenziate le esigenze, i requisiti e le prestazioni connotanti delle coperture verdi. Un aspetto che caratterizza tale tipologia di coperture è la capacità di offrire buone prestazioni sotto molteplici punti di vista: contenimento del consumo energetico, mitigazione del microclima nei contesti urbanizzati e controllo del ciclo idrico.

Per quanto concerne le prestazioni energetiche, le coperture verdi garantiscono il miglior risultato durante la stagione estiva, mentre in quella invernale la loro efficienza è fortemente influenzata dal contenuto d'acqua presente nello strato colturale. Per questo motivo, dal punto di vista delle prestazioni energetiche durante la stagione invernale, non risulta evidente il vantaggio delle coperture verdi rispetto ad una copertura tradizionale coibentata, cosa che invece accade nella stagione estiva.

Passando agli effetti di mitigazione climatica, la capacità dei tetti verdi di modificare i flussi radiativi permette un efficace contrasto dell'effetto isola di calore con conseguente mitigazione del microclima urbano. Questo aspetto è forse uno dei più rilevanti ed è oggetto ancora oggi di progetti dimostrativi atti a valutare e quantificare l'effettiva diminuzione della temperatura superficiale del tetto nelle diverse condizioni ambientali in cui può trovarsi.

Dal punto di vista del ciclo idrologico, essendo i *green roof* superfici permeabili hanno la capacità di ridurre la portata d'acqua verso gli impianti di smaltimento diminuendo il tempo di corrivazione della rete. Anche questo è un aspetto di non poco conto, che ben si inserisce nella discussione accademica relativa alle modalità con cui gli ambienti urbani si stanno trasformando per far fronte ai cambiamenti climatici in corso.

Considerando le caratteristiche climatiche della maggior parte delle regioni italiane (clima mediterraneo) e le diverse tipologie di soluzioni a verde disponibili (estensivo, intensivo leggero e pesante), si ritiene che ci siano delle buone potenzialità per l'implementazione di questa tecnologia nel contesto urbano nazionale. In particolare modo, sebbene gli edifici di nuova costruzione risultano essere i più adatti ad accogliere tale soluzione in copertura, gli edifici esistenti esprimono la gran parte delle potenzialità, soprattutto perché si crede che un aspetto principale dei concetti di salvaguardia ambientale sia la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente.

D'altro canto, come esposto nel corso della trattazione, nell'ambito degli interventi sull'esistente sono diversi gli aspetti che devono essere affrontati al fine di valutare la fattibilità della realizzazione di una copertura verde. In particolare modo si fa riferimento agli aspetti economici, strutturali ed architettonici. A ciascuno di questi è stato dedicato uno spazio di approfondimento attraverso il quale si è cercato di delineare i confini all'interno dei quali trattare il problema.

Dal punto di vista degli aspetti strutturali, ci si è concentrati nel definire in termini qualitativi quali sono le possibilità di intervento connesse alla realizzazione di copertura verde, in riferimento alla normativa tecnica italiana, con particolare interesse per la soluzione estensiva e in funzione della tipologia edilizia. In buona sostanza si è potuto affermare che per edifici costituiti da un elevato numero di piani e superficie in pianta ridotta, l'obbligo di valutazione della sicurezza strutturale è meno probabile rispetto ad edifici aventi un ridotto numero di piani e una maggiore superficie in pianta. Inoltre, anche la tipologia costruttiva e quindi la massa dell'edificio gioca un ruolo fondamentale in tal senso: le strutture pesanti saranno influenzate dai nuovi carichi indotti dall'inverdimento delle coperture rispetto alle strutture leggere. Si può concludere a tale riguardo che oltre a quanto espresso è difficile determinare dei criteri generali adatti per valutare la fattibilità strutturale degli interventi in oggetto, fatto salvo fornire delle indicazioni di massima che possano in ogni caso risultare utili in fase di valutazione preliminare.

L'analisi economica svolta ha permesso di valutare la convenienza di una copertura verde nell'ambito di un intervento di riqualificazione energetica di un edificio a destinazione d'uso produttiva. I risultati dell'analisi hanno espresso una maggiore onerosità delle coperture verdi rispetto a coperture tradizionali coibentate. Si sono

quindi proposti dei metodi di incentivazione dell'utilizzo di queste coperture al fine di consentirne una maggiore diffusione, nonostante il più alto aggravio economico. Il sistema degli incentivi, oltre alla compensazione economica dell'intervento, può avere anche lo scopo di diffondere la bontà dell'intervento e far avvicinare gli attori del mercato delle costruzioni a questa tipologia di soluzione. Infatti, gli interventi che godono di incentivi sono generalmente interventi per i quali è riconosciuto un qualche beneficio ambientale, sociale o relativo alla sicurezza delle persone. Si ritiene, in definitiva, che l'annoverare tra gli interventi incentivabili anche quelli di realizzazione delle coperture verdi, oltre che essere un buon meccanismo di compensazione economica è anche un buon modo per diffondere la consapevolezza dei benefici nei diversi ambiti ad essi collegati.

Per quanto riguarda gli aspetti sociali, sono stati valutati gli effetti generati dalle coperture verdi sia a scala di edificio che a scala urbana. È stata svolta un'indagine su un campione di studenti del Dipartimento di Ingegneria e Architettura i cui esiti hanno evidenziato come i *green roof* vengano percepiti come elemento di apprezzamento dell'immobile, soprattutto se si tratta di copertura fruibile. L'aspetto della fruibilità della copertura, infatti, apre a nuovi scenari di utilizzo della stessa, divenendo spazio collettivo di rigenerazione delle dinamiche sociali.

Nell'ambito del presente lavoro di ricerca si è cercato di affrontare ciascuno degli aspetti che possono riguardare le coperture verdi anche allo scopo di gettare le basi per lavori futuri che approfondiscano maggiormente le questioni trattate. La necessità di argomentare quanto emerso in questo lavoro attraverso la valutazione su uno o più edifici esistenti scelti come casi di studio, rappresenta un obiettivo che si intende perseguire. Inoltre, risulta di grande interesse trattare anche il tema del verde verticale inteso come elemento delle chiusure verticali opache che si integra nell'involucro edilizio a completamento delle soluzioni di copertura. La ricerca di una maggiore continuità tra ambiente naturale e ambiente antropizzato è un'affascinante sfida in capo a tutti gli attori della disciplina dell'architettura e della tecnica in un'ottica di raggiungimento degli obiettivi di salvaguardia ambientale.

In definitiva, si ritiene che ci siano ampi spazi di ricerca attorno a questo tema e che la diffusione di tali soluzioni di copertura possa rappresentare un elemento chiave del processo di qualificazione edilizia e urbana.

