

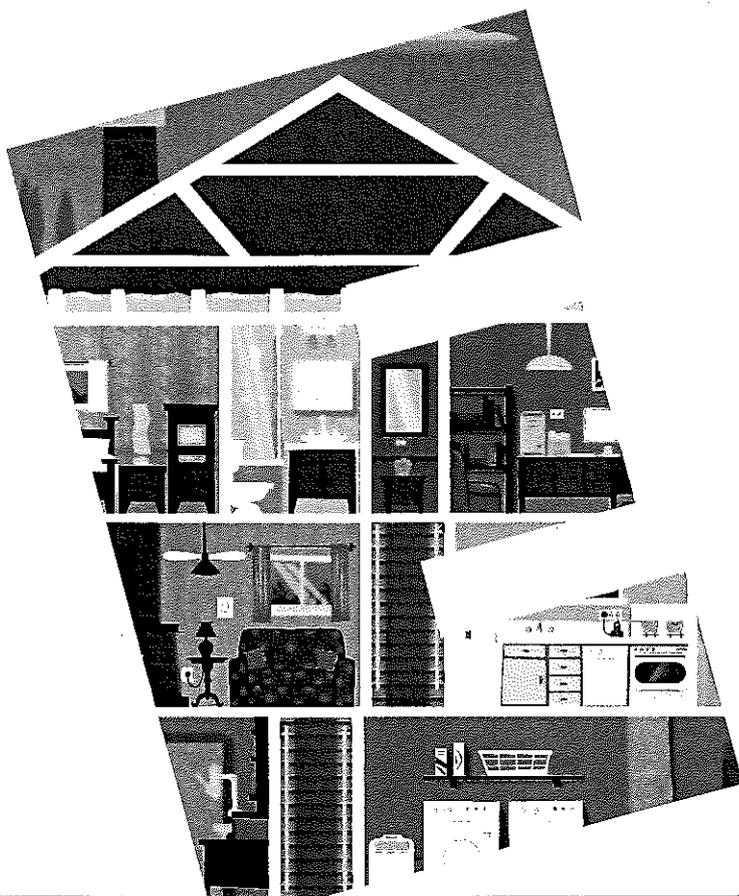


Dario Flaccovio Editore

Marco Filippi - Gianfranco Rizzo
Gianluca Scaccianoce

LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA PER L'EDILIZIA SOSTENIBILE

Efficienza, compatibilità ambientale, nuove tecnologie



- Strumenti normativi e incentivanti - Classificazione della qualità ambientale indoor ✓
- Fabbisogno energetico per garantire il comfort indoor - Tecnologie e strumenti ✓
- Compatibilità ambientale nella certificazione energetica ✓
- Strumenti per la certificazione ✓

Marco Filippi Gianfranco Rizzo Gianluca Scaccianoce
LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA PER L'EDILIZIA SOSTENIBILE
Efficienza – Compatibilità ambientale – Nuove tecnologie

ISBN 978-88-579-0252-4

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: maggio 2014

Filippi, Marco <1944->

La certificazione energetica per l'edilizia sostenibile : efficienza, compatibilità ambientale,
nuove tecnologie / Marco Filippi, Gianfranco Rizzo, Gianluca Scaccianoce. – Palermo : D.
Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0252-4

I. Edifici - Impianti termici - Risparmio energetico - Certificazione.
I. Rizzo, Gianfranco <1952->. II. Scaccianoce, Gianluca <1970->.
344.45046 CDD-22 SBN PAL0269286

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, maggio 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

- [13] Bozza A., *Analisi sperimentale su tessuti in canapa per rinforzo strutturale*, Master Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italy, 2009.
- [14] Nguyen T.T., Picandet V., Carre P., Lecompte T., Amziane S., Baley C., *Effect of compaction on mechanical and thermal properties of hemp concrete*, EUR J Environ CIV EN 2010;14:545-60.
- [15] Pervais M., *Carbon storage potential in natural fiber composites, Resources, conservation and Recycling*, vol. 39, no. 4, pp. 325-340, 2003.
- [16] EN 12664, *Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance*, European Committee For Standardization, Bruxelles, 2002.
- [17] Rizzo G., Federico G., *Le caratteristiche termofisiche dei materiali bioedili – Alcuni dati preliminari di laboratorio*, L'Edilizia, Building and Construction for Engineers, n. 154, Anno XVI, 2008, pp. 38-41, deLETTERA, Milano, 2008.
- [18] Ronchetti P., *Il cemento di calce e canapa: un promettente materiale e metodo di costruzione per l'edilizia sostenibile*, Forum Italiano Calce News 2009;10:5-11, 2009.
- [19] Zaccanti O., *Costruire con canapa, calce, legno*, Bioedilizia Italia Conference 3rd edition – Proceedings. CELID, Torino, 2009 (in Italian).
- [20] De Bruijn P.B., Jeppsson K.H., Sandin K., Nilsson C., *Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres*, Biosyst Eng 2009;103(4):474-9, 2009.
- [21] Benfratello S., Capitano C., Peri G., Rizzo G., Scaccianoce G., Sorrentino G., *Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite*, Construction and Building Materials, Volume 48, November 2013, pp. 745-754, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>.

4.7. Rassegna dei metodi di calcolo per la modellazione termica di coperture a verde

di Giorgia Peri, Giancarlo Sorrentino e Donato Di Stefano

4.7.1. Introduzione

Il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici è considerato uno degli elementi chiave al fine di contrastare le attuali problematiche energetiche e ambientali. Negli ultimi anni la legislazione energetica, sia a livello europeo che nazionale, ha subito una notevole evoluzione in questa direzione. Tra le direttive comunitarie più importanti al riguardo vanno certamente menzionate la Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia e la sua *recast*. In Italia, con il Decreto Legislativo n. 192 del 19 agosto 2005, è stata introdotta la certificazione energetica degli edifici, con l'obiettivo principale di regolamentare e promuovere gli interventi per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, considerando l'importante peso che tale comparto assume all'interno del quadro globale dei consumi energetici e delle emissioni di gas serra.

Tra le soluzioni tecnologiche riconosciute dagli esperti del settore come efficaci ai fini del miglioramento della sostenibilità energetica del parco immobiliare nazionale, vanno certamente citate le coperture a verde (o tetti verdi). Tale tipo di copertura, infatti, al di là dei benefici estetici che fornisce all'edificio (dal momento che adotta la vegetazione come elemento termoregolatore dell'involucro edilizio) consente una riduzione dei carichi termici, specialmente estivi. Ciò è dovuto principalmente all'effetto di ombreggiamento fornito dalle piante che previene il surriscaldamento del tetto in estate. In aggiunta, l'aria

all'interno dello strato di vegetazione che è mantenuta a una temperatura relativamente bassa per l'effetto di raffrescamento fornito dall'evapotraspirazione della vegetazione contribuisce a ridurre la temperatura superficiale del tetto (Theodosiou, 2003).

Oltre al conseguimento del risparmio energetico, l'impiego delle coperture a verde contribuisce a un miglioramento della prestazione ambientale complessiva degli edifici. Come riportato nella norma UNI 11235, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*, che introduce la definizione di copertura a verde e fornisce criteri utili per la loro progettazione e manutenzione (UNI 11235; 2007), la scelta di ricorrere a una copertura a verde può, infatti, essere legata non solo a esigenze di fruibilità della copertura per lo svolgimento di attività all'aperto, di fruibilità visiva e di variazione delle prestazioni ambientali interne dell'edificio con incremento delle prestazioni termiche e acustiche della copertura, ma anche a esigenze di variazioni delle condizioni di contesto ambientale esterno all'edificio in relazione alla capacità della copertura a verde di assorbire polveri, di costituire un eventuale elemento di assorbimento acustico, regolazione idrica, mitigazione della temperatura (attenuazione dell'effetto dell'isola di calore), e di compensazione ambientale.

La protezione termica offerta agli edifici dai tetti verdi è ampiamente riconosciuta nella comunità scientifica internazionale; è possibile rintracciare in letteratura diversi lavori di ricerca (Onmura et al., 2001; Takakura et al., 2000; Theodosiou, 2003; Niachou et al., 2001; Eumorfopoulou e Aravantinos, 1998; Santamouris et al., 2007; Wong et al., 2003; Lazzarin et al., 2005) che dimostrano che tali coperture sono in grado di ridurre i carichi termici applicati agli edifici. Va altresì rilevato che diversi modelli matematici sono stati proposti per la loro analisi termica.

Nel presente lavoro, dopo una breve descrizione della struttura tipica di un tetto verde e dei processi di scambio termico dominanti che in esso prendono luogo, è riportata una rassegna di alcuni dei più significativi modelli di calcolo utilizzati per l'analisi termica di tali componenti edilizi rintracciabili in letteratura. L'obiettivo di tale rassegna è illustrare come viene approcciata nella letteratura scientifica internazionale la modellazione termica di tali elementi dell'involucro edilizio.

4.7.2. Coperture a verde: tipologie e componenti

In generale è possibile distinguere due tipologie di inverdimento per il verde pensile: estensivo e intensivo. Nel primo caso, che rappresenta il sistema più semplice ed economico, gli spessori di substrato di coltivazione sono limitati (8 cm fino a un massimo di 15 cm) e gli oneri di manutenzione sono generalmente molto ridotti grazie all'utilizzo di specie vegetali caratterizzate da basse esigenze nutritive. Nel secondo caso, invece, sono richieste maggiori cure rispetto al precedente in quanto è prevista sia la messa a dimora di piante più esigenti nell'impianto e nella manutenzione, sia un più ampio impiego di tecnologie e materiali. In questo caso lo spessore del pacchetto destinato alla coltivazione può essere compreso tra 15 e 100 cm mentre il livello manutentivo potrà giungere a numerosi interventi, anche settimanali. Tale copertura ha soprattutto fini di fruibilità come spazio per attività all'aperto e fini estetici (Fiorina, 2004).

Un tetto verde, installato su coperture continue di forma e inclinazione variabili, è costi-

tuito dalla sovrapposizione di diversi strati, costituiti da precisi elementi tecnici (Lanza, 2009; UNI 11235: 2007). Il numero di strati può variare da caso a caso così come la loro disposizione, a seconda della tipologia e della complessità della copertura. La figura 4.57 illustra una tipica sequenza di strati di una copertura a verde.

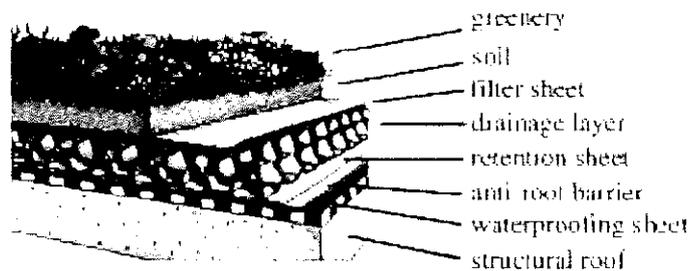


Figura 4.57
I diversi strati di un tetto
verde standard
(da Lazzarin et al., 2005)

Come si osserva dalla figura, gli strati tipicamente utilizzati in una copertura a verde includono:

- elemento portante (*structural roof*);
- elemento di tenuta all'acqua (*waterproofing sheet*);
- elemento di protezione dall'azione delle radici (*anti-root barrier*);
- elemento drenante (*drainage layer*);
- elemento filtrante (*filter sheet*);
- strato colturale (*soil*);
- specie vegetali (*greenery*).

Talvolta la funzione di protezione all'azione delle radici e di impermeabilizzazione è svolta da un unico strato. In certi casi viene inserito anche un elemento per l'accumulo idrico anche se, nella quasi totalità dei casi, tale funzione è svolta anche dall'elemento di drenaggio. La tabella 4.28 riporta i componenti del tetto verde appena menzionati con la rispettiva funzione svolta.

Sembra importante sottolineare che il substrato, comunemente utilizzato nei tetti verdi, non è il terriccio normalmente disponibile in natura, dal momento che la sua composizione è sostanzialmente differente (Sailor et al., 2008). Esso è, infatti, tipicamente un mix di aggregati inerti leggeri e di materiali organici, capace da un lato di trattenere acqua e dall'altro di consentire il drenaggio dell'acqua in eccesso. Esso è inoltre capace di fornire nutrienti per la crescita delle essenze vegetali e di ridurre la perdita di nutrienti nell'acqua di scorrimento. In altre parole, dunque, i substrati utilizzati in questi componenti edilizi sono dei terricci opportunamente progettati per supportare la crescita delle piante rispondendo, al contempo, ai requisiti del tetto.

Va altresì rilevato che la quantità di frazione organica presente in tali substrati è limitata, dal momento che la sua degradazione pone essenzialmente due problemi (Sailor et al., 2008): una riduzione in volume del substrato e la produzione di un refluo organico che interferirebbe con l'acqua di drenaggio del tetto, particolarmente in regioni umide. I principali responsabili della presenza di nutrienti nelle acque di *runoff* sembrerebbero infatti i compost e i fertilizzanti (Emilsson et al., 2007; Teemusk e Mander, 2007).

Tabella 4.28. La funzione principale svolta da ciascuno strato presente in un tetto verde

Strati tipici di una copertura a verde	Funzione e/o note
Strato di vegetazione (Canopy)	La scelta delle essenze vegetali da impiantare dipende essenzialmente dal contesto climatico e territoriale (Fiori, 2007), prediligendo generalmente le specie già presenti nello specifico territorio. Dipende altresì dagli obiettivi di progetto
Strato colturale (Substrato)	Supportare la crescita delle piante. Come indicato nella norma UNI 11235, la tipologia e spessore del substrato vanno scelti in funzione della vegetazione, delle caratteristiche della copertura, del contesto climatico e della strategia di irrigazione
Elemento filtrante	Impedire ai materiali a granulometria fine, contenuti nello strato colturale e trasportati dalle acque, di intasare gli strati sottostanti
Elemento di accumulo idrico	Accumulare l'acqua durante le precipitazioni meteoriche o le irrigazioni e cederla successivamente durante i periodi di necessità
Elemento drenante	Drenare l'acqua in eccesso, evitando la saturazione dei pori che può impedire un'adeguata ossigenazione delle radici
Elemento di tenuta all'azione delle radici	Proteggere la membrana impermeabilizzante dall'azione delle radici
Membrana impermeabilizzante	Proteggere il tetto da potenziale infiltrazione d'acqua
Supporto strutturale	Supportare l'intera sequenza di strati

Per ottenere uno schema di calcolo completo di un tale sistema di copertura per una valutazione del suo comportamento termico, è importante quindi che tutte le componenti del tetto verde sopramenzionate siano correttamente modellate.

La modellizzazione del comportamento termico di un tetto verde chiaramente non può prescindere da una conoscenza dettagliata dei processi di scambio termico che in esso prendono luogo. Per questo motivo, al fine anche di rendere più agevole la comprensione dei modelli selezionati e investigati nel presente lavoro (riportati nel paragrafo 4.7.4), si è ritenuto utile riportare di seguito una breve descrizione dei principali processi di scambio termico che prendono luogo in un tetto verde.

4.7.3. Cenni sulla termofisica delle coperture a verde

Nel presente paragrafo l'attenzione sarà rivolta soltanto ai processi di scambio termico che si verificano nei seguenti tre componenti:

- il supporto strutturale
- il substrato
- la *canopy* (o strato di vegetazione).

Ciò scaturisce dalla considerazione che generalmente l'analisi termica di tali componenti edilizi viene approcciata dai vari autori della letteratura scientifica semplificandone la tipica sequenza di strati in una che coinvolge soltanto questi tre componenti.

La figura 4.58 rappresenta questa tipica schematizzazione delle coperture a verde adottata in letteratura per la modellazione del loro comportamento termico e indica i vari fenomeni fisici che prendono luogo nei diversi strati (Peri et al., 2009).

Come si osserva dalla figura, il trasferimento del calore in questi tre elementi del tetto verde avviene secondo varie modalità: conduzione, convezione e irraggiamento e coinvolge scambi di calore sensibile e latente.

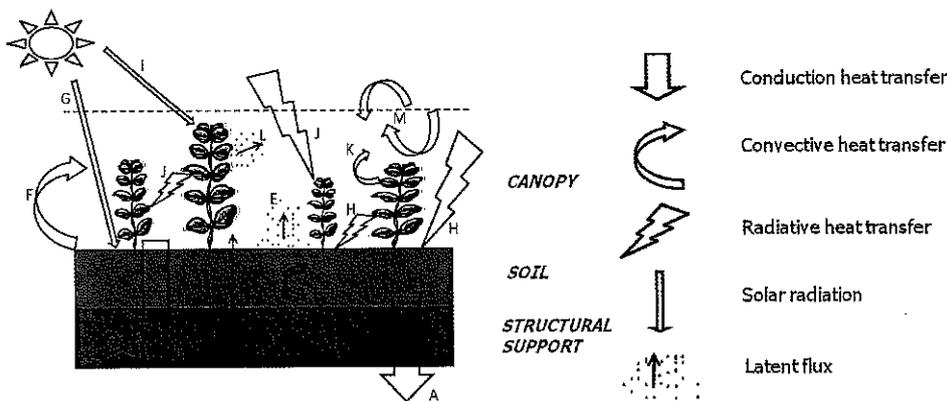


Figura 4.58. Fenomeni fisici che hanno luogo in un tetto verde (da Peri et al., 2009)

Di seguito si riportano, in funzione del componente fisico dove essi prendono luogo, i principali fenomeni fisici di trasmissione del calore coinvolti in un tetto verde.

SUPPORTO STRUTTURALE

Il supporto strutturale è generalmente uno strato omogeneo di materiale compatto con proprietà termo-fisiche costanti e impermeabile al vapore acqueo. Nel supporto strutturale il trasferimento di calore avviene, pertanto, per sola conduzione.

SUBSTRATO

Il substrato è un mezzo poroso in cui possono distinguersi tre fasi: la matrice solida (costituita da una frazione inerte e una organica), la fase liquida e la fase gassosa (aria e vapore acqueo). In substrati non saturi, si verificano sia scambi di calore sensibile per conduzione (nelle fasi liquida e solida) e per convezione (nelle fasi liquida e gassosa) che scambi di calore latente dovuti alla diffusione di vapore d'acqua nei pori. Chiaramente, anche lo scambio radiativo netto (solare e termico) tra superficie del substrato e ambiente circostante (cielo e foglie della *canopy*), lo scambio convettivo tra la superficie del substrato e l'aria all'interno della *canopy* e l'evaporazione dell'acqua sulla superficie del substrato contribuiscono alla definizione del suo stato.

CANOPY

Lo strato di vegetazione può essere considerato come un mezzo poroso la cui matrice solida è costituita da foglie e i cui pori sono ripieni di aria. I principali processi che contribuiscono a determinare lo stato termico delle foglie di una *canopy* sono:

- l'assorbimento della radiazione solare da parte delle foglie;
- gli scambi di radiazione termica tra foglie e ambiente circostante (cielo e superficie del substrato) e tra le foglie stesse;
- il trasferimento di calore convettivo tra foglie e aria nella *canopy*;
- gli scambi di calore latente per la traspirazione delle foglie.

Mentre i principali processi che contribuiscono a determinare lo stato termico dell'aria all'interno di una *canopy* sono:

- scambio di calore sensibile per convezione tra le foglie e l'aria nella *canopy* e tra la superficie del substrato e l'aria nella *canopy*;
- trasferimento di calore convettivo tra l'aria all'interno della *canopy* e l'aria libera.

Appare dunque chiaro come la modellizzazione dei fenomeni termici che hanno luogo in un tetto verde sia decisamente più complessa di quella relativa a un tetto tradizionale. Uno dei fattori determinanti è certamente rappresentato dalla presenza di una *canopy*; una descrizione matematica del solo assorbimento della radiazione solare da parte delle foglie, per esempio, richiederebbe una conoscenza precisa della distribuzione della radiazione solare all'interno della *canopy* e questa, a sua volta, richiederebbe una conoscenza dettagliata dell'architettura della *canopy*, della distribuzione angolare della radiazione incidente e delle proprietà ottiche delle foglie.

Va altresì rilevato che anche la presenza di un mezzo poroso insaturo, quale è per l'appunto il substrato, contribuisce a rendere la modellazione del tetto verde complessa in quanto, a differenza di un comune materiale edilizio, nel modellare i processi termici che in esso prendono luogo, risulta necessario considerare la variabilità delle sue proprietà termofisiche, quali ad esempio la conducibilità termica e la capacità termica, in funzione del contenuto d'acqua (Sailor et al., 2008).

Alla luce di quanto detto precedentemente, appare dunque chiaro che una modellazione esatta dei fenomeni termici che avvengono in un tetto verde è pressoché impossibile. Di seguito si riportano alcuni tra i più significativi modelli matematici (rappresentazioni semplificate) di coperture a verde, al fine di illustrare come viene approcciata nella letteratura scientifica internazionale la modellazione termica di tali componenti dell'involucro edilizio e quali semplificazioni la caratterizzano.

4.7.4. Rassegna di significativi modelli di calcolo per l'analisi termica delle coperture a verde

L'interesse per il tetto verde e per la sua modellazione termica è cresciuto nel corso degli ultimi anni, spingendo diversi autori ad avvicinarsi all'argomento sia attraverso approcci prettamente teorici sia mediante misure sperimentali, utili anche a verificare la validità dei modelli proposti.

Nel presente lavoro sono stati selezionati e analizzati i modelli matematici sviluppati da Palomo del Barrio (1998), Sailor (2008), Alexandri and Jones (2007) e Lazzarin et al. (2005). Tali modelli sono stati raggruppati in funzione del numero delle componenti di calcolo che li costituiscono, cioè si è distinto tra:

- modelli a 3 componenti di calcolo (quando sono considerati tutti e tre i componenti di figura 4.58);
- modelli a 2 componenti di calcolo (quando sono considerati solo due dei tre componenti di figura 4.58).

Il numero delle componenti di calcolo discende ragionevolmente dagli obiettivi delle analisi condotte dai vari autori: Palomo Del Barrio e Alexandri/Jones, per esempio, essendo interessati alla simulazione termica ed energetica di un tetto verde nella sua interezza per valutarne il potenziale di raffrescamento, hanno proposto dei modelli che prendono in considerazione quasi tutti i fenomeni fisici coinvolti. Lazzarin et al., invece, essendo interessati principalmente alla valutazione del ruolo dell'evapotraspirazione all'interno del substrato nel comportamento energetico del sistema, hanno proposto un modello che simula il comportamento del substrato e del supporto strutturale. Allo stesso modo Sailor, essendo interessato a investigare i potenziali benefici derivanti dall'aggiunta su un tetto di un substrato di coltivazione e di uno strato di essenze vegetali ha proposto un modello che considera solamente questi due componenti.

4.7.4.1. Modelli a 3 componenti di calcolo

4.7.4.1.1. Approccio di Palomo Del Barrio

Palomo Del Barrio (1998) propone un modello matematico di copertura a verde ottenuto per semplice accoppiamento dei modelli matematici dei componenti che lo compongono. Gli strati presi in considerazione sono il sostegno strutturale, il substrato e la *canopy*. A ognuno di essi è associato quindi un modello matematico (riportato di seguito) con le relative condizioni al contorno, così da disaccoppiare il componente stesso dal resto del tetto.

MODELLO PER IL SOSTEGNO STRUTTURALE

Il modello proposto è rappresentato dall'equazione di bilancio energetico (4.26) di questo componente. Le ipotesi alla base di questo algoritmo sono che il supporto strutturale del tetto sia costituito da un materiale solido, compatto (la diffusione di vapore è trascurabile) con proprietà termofisiche costanti e che sia uno strato omogeneo (per cui i gradienti di umidità e termici in direzione orizzontale sono zero). Sotto queste ipotesi, l'equazione di bilancio energetico di questo componente assume questa forma:

$$\rho c_p \frac{\partial T_s(z,t)}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s(z,t)}{\partial z^2} \quad (4.26)$$

dove $T_s(z,t)$ rappresenta il campo di temperatura, ρ è la densità, c_p è il calore specifico, λ_s la conduttività termica del materiale.

Il termine a destra esprime il calore sensibile trasmesso per conduzione lungo la direzione verticale attraverso il supporto strutturale secondo la legge di Fourier della trasmissione del calore.

MODELLO PER IL SUBSTRATO

Il modello proposto per il substrato si riferisce alla teoria degli scambi termici nei mezzi porosi di Philip e de Vries (1957), de Vries (1958) e Luikov (1966). Nell'ipotesi di profilo di umidità del substrato costante nel tempo e nello spazio, l'equazione di bilancio energetico proposta è:

$$\rho c_p(\omega, T) \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left[\lambda(\omega, T) + \Lambda D_{vT}(\omega, T) \right] \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right\} \quad (4.27)$$

dove

- $\lambda(\omega, T)$ = conduttività termica effettiva (W/mK)
 $T(z, t)$ = temperatura locale nel dominio del mezzo poroso (°C)
 $\omega(z, t)$ = contenuto di umidità volumetrica locale sempre nello stesso dominio
 $\rho c_p(\omega, T)$ = capacità termica (J/m³K)
 Λ = calore latente di vaporizzazione (J/kg)
 $D_{vT}(\omega, T)$ = coefficiente di diffusività di vapore non isotermico (kg/m s K).

Tale algoritmo si basa sulle seguenti ipotesi: i gradienti di contenuto di umidità e termici in direzione orizzontale sono zero; la matrice solida è equivalente a un continuo omogeneo e isotropo, le fasi liquida e vapore sono sempre in equilibrio e i pori sono piccoli, i profili di umidità nel substrato sono costanti nel tempo e nello spazio.

Il primo termine sul lato destro esprime il flusso di calore sensibile che attraversa il substrato secondo la ben nota espressione di Fourier per la conduzione, dovuto a gradiente termico, mentre il secondo termine si riferisce al flusso di calore latente dovuto alla diffusione del vapore d'acqua nei pori.

Va rilevato che il modello tiene conto della dipendenza delle caratteristiche termofisiche del substrato dal contenuto di umidità e dalla temperatura.

MODELLO PER LA CANOPY

Lo strato di vegetazione viene considerato come un singolo strato di foglie, omogeneo orizzontalmente, di volume pari a $d \cdot LAI$ (d è lo spessore medio delle foglie), caratterizzato da un unico valore di temperatura delle foglie e un unico valore di temperatura e contenuto di vapore nell'aria. Questo strato è limitato al fondo dalla superficie del substrato e nella parte superiore da una superficie ideale, a sua volta omogenea. Tale tipo di approccio è comunemente conosciuto come *big leaf approach* (Monteith, 1963; Monteith, 1965; Penman, 1948). Il modello di canopy proposto è costituito da due equazioni di bilancio energetico, una per lo strato fogliare (4.28) e una per l'aria tra le foglie (4.29)¹⁰:

$$(\rho c)_p dLAI \frac{dT_p}{dt} = \varphi_{rad, sol} + \varphi_{rad, TIR} + \varphi_{conv, p-a} + \varphi_{trans, p-a} \quad (4.28)$$

$$(\rho c)_a L \frac{dT_a}{dt} = \varphi_{conv, a-p} + \varphi_{conv, a-g} + \varphi_{conv, a-\infty} \quad (4.29)$$

- T_p = temperatura delle foglie (mediata nel volume di controllo) in K
 T_a = temperatura dell'aria (mediata nel volume di controllo) in K
 $(\rho c)_p$ = capacità termica specifica delle foglie in J/m³K

¹⁰ Nel presente lavoro, l'equazione di bilancio di massa per il vapore d'acqua nell'aria della *canopy* non è stata riportata in quanto i bilanci di massa sono al di fuori degli scopi di questa rassegna.

- d = spessore delle foglie medio in m
 $(\rho c)_a$ = capacità termica specifica dell'aria in J/m^3K
 ρ_a = densità dell'aria in kg/m^3
 L = spessore dello strato di canopy in m
 LAI = indice di area fogliare.

Nell'equazione (4.28), il primo termine a destra esprime lo scambio radiativo netto delle foglie con il sole (W/m^2). Il secondo termine esprime invece lo scambio di radiazione termica netto delle foglie con l'ambiente circostante (cielo e substrato) (W/m^2). Il terzo termine si riferisce allo scambio di calore per convezione tra le foglie e l'aria tra le foglie (W/m^2), mentre il quarto termine tiene conto dello scambio di calore latente dovuto alla traspirazione delle foglie (W/m^2).

Nell'equazione (4.29), il primo termine a destra si riferisce al flusso di calore sensibile tra l'aria nella canopy e il fogliame ($\varphi_{conv,a-p} = -\varphi_{conv,p-a}$) (W/m^2). Il secondo termine esprime il flusso di calore sensibile tra l'aria nella canopy e la superficie del suolo (W/m^2), mentre il terzo termine si riferisce al flusso di calore sensibile tra l'aria nella canopy e l'aria all'esterno (W/m^2).

Come detto precedentemente, il modello del tetto verde è ricavato dall'accoppiamento di questi singoli modelli relativi a tre componenti del sistema, pertanto gli output del modello di tetto verde sono i seguenti: $T_{strutturale\ supporto}(z,t)$, $T_{substrato}(z,t)$, $T_{aria\ canopy}(t)$ (media nel volume di controllo), $T_{foglie}(t)$ (media nel volume di controllo).

4.7.4.1.2. Approccio di Alexandri e Jones

Lo schema logico alla base della costruzione del modello di tetto verde proposto da Alexandri e Jones (2007) è simile a quello sviluppato da Palomo del Barrio: il modello di tetto verde è ottenuto per semplice accoppiamento di sotto-modelli relativi al supporto strutturale, substrato e vegetazione. Tuttavia, a differenza di Palomo del Barrio, gli autori indicano anche un modello che descrive l'evoluzione termica dell'aria al di sopra dello strato di vegetazione. Tale modello non è riportato nel presente lavoro in quanto qui l'attenzione è rivolta a comprendere come sono trattati i processi termici che prendono luogo nei componenti di un tetto verde.

MODELLO PER IL SOSTEGNO STRUTTURALE

Il modello proposto è rappresentato dall'equazione di bilancio energetico di questo componente. L'algoritmo proposto si basa sulle stesse ipotesi su cui è fondato il modello proposto da Palomo del Barrio anche se un'ulteriore ipotesi consiste nel considerare capillarmente poroso il materiale di cui è costituito il supporto strutturale. Per cui, il modello proposto si riferisce alla teoria sugli scambi termici nei mezzi capillarmente porosi di Luikov (1961). Secondo queste ipotesi e assumendo trascurabile la diffusione di vapore dovuta alla conduzione termica molecolare, l'equazione di bilancio energetico di questo componente (4.30) assume quindi una forma leggermente diversa da quella proposta da Palomo del Barrio. In dettaglio, essa consiste di due termini, uno che esprime il calore sensibile trasmesso per conduzione lungo la direzione verticale attraverso il supporto

strutturale secondo la legge di Fourier della trasmissione del calore (presente nell'algoritmo di Palomo) e l'altro che esprime lo scambio di calore latente dovuto all'esistenza di un gradiente di contenuto di acqua all'interno del supporto strutturale non costante nello spazio e nel tempo.

$$\frac{dT}{dt} = a_c \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\varepsilon \lambda}{c_c} \frac{\partial q_c}{\partial t} \quad (4.30)$$

dove

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = a_m \frac{\partial^2 q_c}{\partial z^2}$$

T = temperatura (K)

a_c = coefficiente di diffusività del materiale (m^2/s)

λ = calore latente di vaporizzazione dell'acqua (J/kg)

ε = rapporto tra il coefficiente di diffusione del vapore e il coefficiente di diffusione del contenuto d'acqua totale o numero di evaporazione del materiale edilizio

c_c = capacità termica specifica del materiale (J/kg K)

q_c = contenuto di umidità del materiale edilizio (kg di sostanza/kg di corpo asciutto).

MODELLO PER IL SUBSTRATO

Il modello riportato è simile a quello proposto da Palomo del Barrio, anche se si basa su un'ulteriore ipotesi rappresentata dall'assenza di diffusione di vapore tra i pori (condizione invece contemplata da Palomo del Barrio). L'equazione di bilancio energetico proposta è, infatti, la seguente:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho_g c_G} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.31)$$

dove

$\rho_g c_G$ = capacità termica del substrato ($J/m^3 K$)

T = temperatura locale nel dominio del mezzo poroso (K)

K_s = conducibilità termica del substrato (W/mK).

Come si osserva, il termine relativo al trasporto di calore latente proporzionale al coefficiente di diffusività di vapore non isotermico del substrato manca.

Va rilevato che, anche se non esplicitamente indicato nella formula, il modello tiene conto della dipendenza delle caratteristiche termofisiche del substrato dal contenuto di umidità e dalla temperatura.

MODELLO PER LA CANOPY

Come Palomo del Barrio, anche Alexandri e Jones sembrano riferirsi al *big leaf approach*. Per cui, nel loro lavoro si fa riferimento a un unico valore di temperatura delle foglie e a un unico valore di temperatura dell'aria tra le foglie.

Il modello di canopy proposto è costituito da due equazioni di bilancio energetico, una per lo strato fogliare (4.32) e una per l'aria tra le foglie (4.33)¹¹:

$$\rho_1 c_{p1} \Delta x \frac{dT_1}{dt} = \frac{\rho_a c_{pa}}{r_{aH}} (T_a - T_1) - \frac{\rho_a c_{pa}}{\gamma} \frac{e_s(T_1) - e_a}{r_a + r_s} + \left[I(1 - \alpha_s)(1 - \alpha_1) + \sigma T_{sky}^4 + \sigma \varepsilon_s T_s^4 - 2\sigma \varepsilon_1 T_1^4 \right] \cdot \exp(-k_o LAI) \quad (4.32)$$

dove

- ρ_1 = densità del tessuto della foglia (kg/m^3)
- c_{p1} = capacità termica specifica del tessuto della foglia (J/kgK)
- T_1 = temperatura della foglia (K)
- T_a = temperatura dell'aria (K)
- ρ_a = densità dell'aria (kg/m^3)
- c_{pa} = capacità termica specifica dell'aria a pressione costante (J/kgK)
- r_{aH} = resistenza convettiva (s/m)
- r_a = resistenza aerodinamica (s/m)
- r_s = *total stomatal resistance* della canopy (s/m)
- $e_s(T_1)$ = pressione di vapore a saturazione alla temperatura della foglia (Pa)
- e_a = pressione di vapore nella *bulk air* (Pa)
- α_1 = albedo della foglia
- α_s = albedo del substrato
- T_{sky} = temperatura del cielo (K)
- T_s = temperatura superficiale del substrato (K)
- k_o = coefficiente di estinzione ricavato sperimentalmente
- LAI = indice di area fogliare.

La seconda equazione è la seguente:

$$\frac{dT_a}{dt} = a_a \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} + \frac{1}{r_{aH}} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 - \frac{c_1 - c_2}{c_{pa}} D_a \frac{\partial q_d}{\partial z} \frac{\partial T_a}{\partial z} \Big|_a \quad (4.33)$$

dove

- a_a = coefficiente di diffusività termica dell'aria (m^2/s)
- D_a = coefficiente di diffusione binario dell'aria (m^2/s)
- c_1 e c_2 = calore specifico a pressione costante del componente 1 (umidità) e 2 (aria) rispettivamente (J/kgK).

Nell'equazione (4.32), il primo termine a destra esprime lo scambio di calore per convezione tra le foglie e l'aria tra le foglie (W/m^2). Il secondo termine fa riferimento allo scambio di calore latente tra le foglie e l'aria dovuto alla traspirazione delle foglie (W/m^2). Il terzo termine esprime lo scambio radiativo netto (*shortwave* e *longwave*) delle foglie con l'ambiente circostante (W/m^2).

¹¹ Nel presente lavoro, l'equazione di bilancio di massa per il vapore d'acqua nell'aria della *canopy* non è stata riportata in quanto i bilanci di massa sono al di fuori degli scopi di questa rassegna.

Come detto precedentemente, il modello del tetto verde è ricavato dall'accoppiamento di questi singoli modelli, pertanto gli output del modello di tetto verde sono i seguenti: $T_{strutturale\ supporto}(z,t)$, $T_{substrato}(z,t)$, $T_{aria\ canopy}(t)$ (media nel volume di controllo), $T_{foglie}(t)$ (media nel volume di controllo) e $T_{aria\ sopra\ la\ canopy}(t)$.

4.7.4.2. Modelli a 2 componenti di calcolo

4.7.4.2.1. Approccio di Lazzarin et al.

Sembra interessante rilevare sin da subito che la logica alla base della costruzione del modello proposto da Lazzarin et al. (2005) è diversa da quella finora descritta: nei precedenti due modelli sostanzialmente si indaga prima il contributo proveniente da ciascun componente del tetto, e poi quello dell'intero sistema è ottenuto ipotizzando una sorta di sovrapposizione degli effetti di ciascun fenomeno fisico.

Nel lavoro di Lazzarin et al., invece, il calcolo della prestazione termica del tetto verde viene approcciato adottando il metodo alle differenze finite, monodimensionale in regime dinamico (Castellotti, 2003). In dettaglio, il modello proposto per l'intero tetto verde consiste di un'equazione di bilancio energetico che viene applicata ai vari nodi rappresentativi del tetto verde. In altre parole, la copertura a verde viene suddivisa in intervalli nel cui mezzo si suppone concentrata tutta la massa e quindi la capacità termica. I componenti del tetto verde considerati sono il supporto strutturale, l'elemento impermeabilizzante, lo stato di drenaggio e il substrato. Gli altri elementi sono trascurati per la massa limitata. Ognuno di questi elementi è descritto da un certo numero di nodi (figura 4.59):

- il substrato è descritto con tre nodi (I, II e III);
- lo strato di drenaggio è descritto da un nodo (*d*);
- l'elemento di impermeabilizzazione è definito da un nodo (*g*);
- il calcestruzzo strutturale del tetto è descritto da un nodo (*c*).

Il confine superiore è l'aria ambiente mentre quello inferiore è l'ambiente sottostante. Tale schema è riportato in figura 4.59 dove ET_i rappresenta il flusso termico dovuto al processo di evapotraspirazione del nodo generico *i*, $G_{i,j}$ è il flusso di conduzione tra due nodi adiacenti, C_i è l'accumulo termico di ciascun nodo, θ è il flusso di acqua, A_e e A_i indicano i flussi di adduzione esterni e interni dati dalla somma dei flussi radiativi e di convezione. Le linee continue indicano i flussi energetici (radiazione solare netta R_n , adduzione A , evapotraspirazione ET , conduzione G , accumulo termico C) mentre le linee a tratti si riferiscono ai flussi idrici.

L'equazione di bilancio energetico proposta e applicata a ciascuno dei nodi precedentemente descritti è la seguente (nodo I):

$$R_n + A_e + ET_{II} = G_{I,II} + ET_I + C_I \quad (4.34)$$

Pertanto, per il nodo I, per esempio, il bilancio in termini di flussi specifici, in W/m^2 , prevede che la somma di radiazione netta, flusso di adduzione esterno e flusso di evapotraspirazione proveniente dal nodo II sia uguale alla somma del flusso di conduzione tra i nodi I e II, dell'evapotraspirazione in uscita dal nodo I e dell'accumulo termico al nodo I.

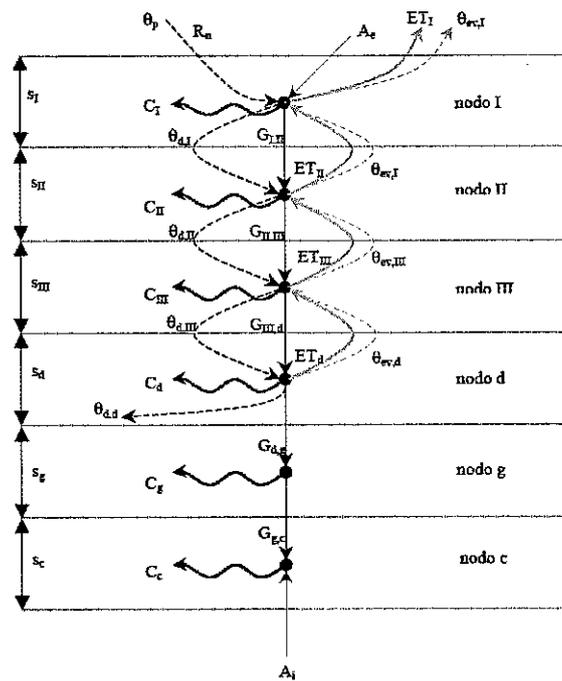


Figura 4.59
Schema del modello
alle differenze finite
del sistema fisico proposto
da Lazzarin et al.
(da Lazzarin et al., 2005)

Come si osserva dall'equazione (4.34) e dalla figura 4.59, il modello prende in considerazione solamente l'interazione della radiazione solare con la canopy, trascurando gli scambi di radiazione termica di questa con l'ambiente circostante. In particolare, il flusso di radiazione solare che entra nel sistema, R_n , che rappresenta la radiazione solare al top della canopy al netto della parte riflessa e assorbita dalle piante, è definito da una legge esponenziale funzione del LAI dell'intera canopy, (pari al rapporto tra area fogliare e area di suolo sottostante) e del coefficiente di estinzione della radiazione solare k_s :

$$R_n = R_e^{-k_s LAI} \quad (4.35)$$

I flussi termici convettivi e radiativi del substrato con l'ambiente esterno sono tenuti in conto all'interno del flusso di adduzione esterno A_e definito come prodotto tra il coefficiente di adduzione della superficie esterna α_e e la differenza tra la temperatura dell'aria esterna $t_{a,e}$ e quella della superficie esterna $t_{s,e}$:

$$A_e = \alpha_e (t_{a,e} - t_{s,e}) \quad (4.36)$$

Il flusso conduttivo tra il nodo I e II è:

$$G_{I,II} = \frac{t_I - t_{II}}{\frac{s_I}{2\lambda_I} + \frac{s_{II}}{2\lambda_{II}}} \quad (4.37)$$

dove s e t indicano rispettivamente lo spessore dello strato e la temperatura del generico nodo. Come si osserva dall'equazione (4.38), il modello tiene dunque in conto la dipendenza della conducibilità termica (λ) del substrato dal suo contenuto di acqua.

L'accumulo termico in ogni strato è calcolato come segue:

$$C_I = c_I \rho_I s_I \frac{t_I - t_{II}'}{\Delta \tau} \quad (4.38)$$

Anche in questo caso il modello prende in considerazione la dipendenza della capacità termica dal contenuto di acqua.

Per quanto riguarda infine il calcolo del flusso termico dovuto al processo di evapotraspirazione del nodo I (W/m^2) (va sottolineato che con questo termine gli autori si riferiscono non allo scambio di calore latente dovuto alla perdita di acqua per evaporazione dalle foglie, bensì al flusso di calore latente all'interno del substrato dovuto alla diffusione di vapore nei pori) due diversi approcci sono proposti dagli autori. Uno è il seguente:

$$ET_I = \theta_{ev,I} \cdot r \quad (4.39)$$

dove

r = calore latente di evaporazione (J/kgK)

$\theta_{ev,I}$ = flusso di acqua dal nodo I (kg/m^2s).

L'altro è un metodo empirico in cui l'evapotraspirazione reale ET (W/m^2) è valutata in funzione di un coefficiente culturale K_c derivato sperimentalmente e dell'evapotraspirazione massima ET_0 (W/m^2) relativa a una vegetazione in crescita e ben irrigata.

4.7.4.2.2. Approccio di Sailor

Il modello si riferisce al modello di substrato vegetato FASST (*Fast All Season Soil Strenght*) sviluppato da Frankenstein e Koenig (2004), il quale, a sua volta, è basato sui modelli di *plant canopy* BATS (Dickinson et al., 1993) e SiB (Sellers et al., 1986).

Il modello proposto da Sailor (2008) consiste di due equazioni di bilancio energetico: una per il fogliame e una per la superficie del substrato.

MODELLO PER LO STRATO FOGLIARE

Come Palomo del Barrio e Alexandri/Jones, anche Sailor sembra riferirsi al *big leaf approach*. Tuttavia, distingue la superficie del tetto in due aree: una interamente coperta dalle foglie, che occupa una frazione del tetto pari a σ_f e un'area completamente esposta al sole che occupa la restante parte cioè $1 - \sigma_f$. Il bilancio energetico per la vegetazione è dato dunque da:

$$F_f = \sigma_f \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{tr}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (4.40)$$

dove

F_f = flusso di calore netto nella vegetazione (W/m^2)

σ_f = copertura vegetativa frazionaria¹²

¹² Rappresenta la frazione di superficie del tetto che è direttamente coperta da uno o più foglie. Essa si ottiene come rapporto tra la superficie di suolo adombrata e quella totale.

- I_s^\downarrow = radiazione a onde corte totale in ingresso (W/m^2)
 α_f = albedo (riflettanza a onde corte) della canopy
 ε_f = emissività della canopy
 ε_g = emissività della superficie del suolo
 ε_1 = quantità ($\varepsilon_g + \varepsilon_f - \varepsilon_g \varepsilon_f$)
 I_{ir}^\downarrow = radiazione a onde lunghe totale in ingresso (W/m^2)
 σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
 T_f = temperatura nel fogliame (K)
 T_g = temperatura della superficie del suolo (K).

L'espressione a destra è costituita da 4 termini: il primo e il secondo termine esprimono lo scambio radiativo netto delle foglie con l'ambiente circostante. In maggior dettaglio, il primo termine esprime il bilancio tra i flussi di radiazione (*shortwave* e *longwave*) entranti e i flussi di radiazione (*shortwave* e *longwave*) uscenti e, come tale, fornisce la radiazione netta assorbita dal fogliame. In questo termine è trascurata la presenza del substrato. Si tiene in considerazione la radiazione termica emessa dal substrato nel secondo termine, che rappresenta l'equazione utilizzata comunemente per lo scambio radiativo tra due superfici piane infinite parallele (Çengel Y.A., 2003). In altre parole, esprime lo scambio radiativo tra le foglie e il substrato. Il terzo termine esprime il flusso di calore sensibile tra la vegetazione e l'aria all'interno della canopy (W/m^2). Il quarto termine esprime il flusso di calore latente dovuto alla traspirazione della vegetazione (W/m^2).

MODELLO PER IL SUBSTRATO

Il bilancio energetico alla superficie del substrato proposto è dato da:

$$F_g = (1 - \sigma_f) \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (4.41)$$

dove tutti i termini che compaiono assumono lo stesso significato visto nel caso del bilancio per la vegetazione, ma qui sono riferiti al substrato e non più alla vegetazione. Infatti, il pedice g sta per *ground*. L'ultimo termine dell'equazione esprime la conduzione del calore all'interno del substrato del suolo.

Come si osserva, il bilancio energetico per la superficie del substrato è influenzato principalmente dalle proprietà termiche del suolo, dal grado di copertura fogliare e dall'umidità del suolo.

In tale bilancio l'autore, come Alexandri e Jones, non considera il calore rilasciato o guadagnato per effetto dei cambiamenti di fase dell'acqua nel suolo, né il flusso di calore della precipitazione, né il flusso di calore dovuto al trasporto verticale dell'acqua nel suolo. Per quanto riguarda il calore trasmesso per conduzione, se da un lato il calcolo è semplificato dall'assunzione di uniformità in direzione orizzontale, è dall'altro complicato dal prendere in considerazione la variazione delle proprietà termiche del substrato (capacità termica, conducibilità termica, albedo) al variare del suo contenuto di umidità.

Gli output del modello complessivo di tetto verde sono quindi: $T_{\text{superficie del suolo}}$ e T_{fogliame} .

4.7.5. Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati descritti alcuni dei più significativi metodi di calcolo rintracciabili in letteratura per la modellazione termica delle coperture a verde, evidenziandone gli approcci e le principali semplificazioni adottate dai rispettivi autori.

L'analisi di questi modelli ha messo in evidenza, tra le altre cose, come talvolta le semplificazioni adottate per modellare il comportamento termico di un tetto verde, specialmente quelle relative alla canopy, siano piuttosto consistenti. La canopy, infatti, piuttosto che con modelli multistrato (che trattano la canopy come una successione di strati di foglie (Wenguan and Russell, 2005; Baldocchi et al., 1987) che permetterebbero chiaramente una descrizione più dettagliata e precisa degli scambi termici che in essa prendono luogo, viene approcciata dai vari autori con modelli di calcolo estremamente semplificati riconducibili all'approccio comunemente conosciuto come *big leaf approach*.

Va tuttavia rilevato che l'utilizzo di questo tipo di approccio che tratta l'intera canopy come una singola foglia o strato presenta alcune criticità (Wang e Leuning, 1998).

Certamente, l'analisi dello stato dell'arte della modellazione esistente riguardante i tetti verdi rappresenta un utile punto di partenza verso la definizione di nuovi modelli di tetto verde, anche ai fini dell'ottimizzazione della progettazione di tale sistema e della stima dei risparmi energetici conseguibili attraverso tale soluzione per l'edilizia. Va tuttavia messa in evidenza l'importanza e la necessità di rilevare, attraverso campagne sperimentali di misura, i parametri necessari alla modellazione del tetto verde, specialmente della canopy che sembra per l'appunto costituire un punto debole della modellistica inerente le coperture a verde.

Al riguardo, si fa notare che presso il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici (DEIM) della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Palermo si sta realizzando una copertura a verde che prevede tra l'altro il monitoraggio di dati concernenti la canopy. Quest'installazione consentirà da un lato di rilevare i parametri necessari alla modellazione della canopy e dall'altro di validare, per confronto con dati sperimentali, i modelli di coperture a verde.

4.7.6. Riferimenti bibliografici

Alexandri E., Jones P., *Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results*, Building and Environment 42 (2007), 2835-2849, 2007.

Baldocchi D.D., Hicks B.B., Camara P., *A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces*, Atmospheric Environment 21, 91-101, 1987.

Castellotti F., *Studio sperimentale degli effetti energetici di un green roof sugli edifici (Experimental analysis of the energy effects of a green roof on buildings)*, Ph.D. Thesis, Department of Management and Engineering, University of Padova, 2003.

Çengel Y.A., *Heat Transfer, a Practical Approach*, McGraw-Hill Higher Education, New York, 2003.

De Vries D.A., *Trans. Am. Geophys. Union* 39, 1958.

Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., Kennedy P.J., *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model*, Climate and Global Dynamics Division of National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, NCAR/TN-387 +STR, 1993.

Emilsson T., Berndtsson J.C., Mattsson J.E., Rolf K., *Effect of using conventional and controlled release*

- fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems*, *Ecol. Eng.* 29, 260-271, 2007.
- Eumorfopoulou E., Aravantinos D., *The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece*, *Energy and Buildings* 27: 29-36, 1998.
- European Parliament and Council, *Directive 2002/91 on the energy performance of buildings*, Official Journal of the European Communities L1/65, 04/01/2003.
- European Parliament and Council, *Directive 2010/31 on the energy performance of buildings (recast)*, Official Journal of the European Union, L153/13, 18/06/2010.
- Fiori M., *Coperture verdi*, in *Specializzata edilizia*, n. 161, Febbraio 2007.
- Fiorina F., *Scegliere una copertura a verde oltre la "moda" del momento*, in *Tetto & pareti*, Giugno 2004.
- Frankenstein S., Koenig G., *Fast all-season soil strength (FASST)*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Special Report SR-04-01, 2004a.
- Frankenstein S., Koenig G., *FASST Vegetation Models*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Technical Report TR- 04-25, 2004b.
- Lanza L.G., *Coperture a verde e ambiente urbano sostenibile*, in *IA – Ingegneria ambientale*, anno XXXVIII, n. 3, marzo 2009.
- Lazzarin R.M., Castellotti F., Busato F., *Experimental measurements and numerical modelling of a green roof*, *Energy and Buildings* 37, 1260-1267, 2005.
- Luikov A.V., *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*, Pergamon Press, Oxford, 1961.
- Luikov A.V., *Heat and mass transfer in capillary porous bodies*, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- Monteith J.L., *Gas exchange in plant communities*, in *Environmental Control of Plant Growth*, edited by L.T. Evans, pp. 95-112, Springer, New York, 1963.
- Monteith, J.L., *Evaporation and the environment*, in *The State and Movement of Water in Living Organisms*, Symp. Soc. Exp. Biol. Ser., vol. 19, edited by G.E. Fogg, pp. 205-234, Springer, New York, 1965.
- Niachou A., Papakonstantinou M., Santamouris M., Tsangrassoulis A., Mihalakakou G., *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance*, *Energy and Buildings* 33: 719-729, 2001.
- Onmura S., Matsumoto M., Hokoi S., *A study on the evaporative cooling effect of roof lawn gardens*, *Energy and buildings*, 33, 653-666, 2001.
- Palomo Del Barrio E., *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*, *Energy and Buildings* 27 (1998), 179-193, 1998.
- Parlamento Italiano, *Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*, Gazzetta Ufficiale n. 222 del 23 settembre 2005, suppl. ord. n. 158, 2005.
- Penman H.L., *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*, *Proc. R. Soc. London A*, 193, 120-146, 1948.
- Peri G., Rizzo G., Scaccianocce G., Sorrentino G., *New sustainable technologies for buildings: the use of green roofs*, Proceedings of "e.nova" Internationaler Kongress Null Emissions Gebäude, pp. 81-88, Fachhochschul Studiengänge, Pinkafeld, 2009.
- Philip J., De Vries D.A., *Trans. Am. Geophys. Union* 38, 1957.
- Sailor D.J., Hutchinson D., Bokovoy L., *Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S.*, *Energy and Buildings*, 40: 1246-1251, 2008.
- Sailor D.J., *A green roof model for building energy simulation programs*, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 1466-1478, 2008.

- Santamouris M., Pavlou C., Doukas P., Mihalakakou G., Synnef A., Hatzibiros A., Patargias P., *Investigating and analyzing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece*, Energy 32: 1781-1788, 2007.
- Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalchjer A., *A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models*, Journal of Atmospheric Sciences 43 (1986) 505-531, 1986.
- Takakura T., Kitade S., Goto E., *Cooling effect of greenery cover over a building*, Energy and Buildings, 31: 1-6, 2000.
- Teemusk A., Mander Ü., *Rainwater runoff quantity and quality performance from a green roof: the effects of short term events*, Ecol. Eng. 30, 271-277, 2007.
- Theodosiou Theodore G., *Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique*, Energy and Buildings, 35, 909-917, 2003.
- UNI 11235, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde*, 2007.
- Wang Y.-P., Leuning R., *A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I: Model description and comparison with a multi-layered model*, Agricultural and Forest Meteorology, 91, 89-111, 1998.
- Wenguang Z., Russell J. Qualls, *A multiple-layer canopy scattering model to simulate shortwave radiation distribution within a homogeneous plant canopy*, Water resources research, vol. 41, W08409, DOI:10.1029/2005WR004016, 2005.
- Wong N.H., Chen Y., Ong C.L., Sia A., *Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment*, Building and Environment, 38, 261-270, 2003.

4.8. Dati climatici per gli edifici sostenibili

di Maria La Gennusa, Gianluca Scaccianoce e Giancarlo Sorrentino

4.8.1. Introduzione

Una parte fondamentale nella valutazione dell'efficienza energetica degli edifici spetta ai dati climatici. In particolare i dati climatici rappresentano un dato di ingresso importante nella procedura di calcolo del consumo di energia primaria di un edificio. La qualità del dato influenza in maniera non trascurabile il risultato finale della procedura di calcolo e, pertanto, si riportano alcune considerazioni sulle principali banche dati di dati climatici oggi disponibili e su alcune metodologie di calcolo dell'anno tipo. Infine si riporta un esempio che evidenzia le discordanze nei risultati che si hanno cambiando la banca dati e/o la metodologia di calcolo dell'anno tipo.

4.8.2. Premessa sui dati meteorologici

Le informazioni sul clima possono essere considerate a tre differenti livelli: macroclimatico, mesoclimatico e microclimatico (Goulding et al., 1982; Butera, 1985). I dati macroclimatici vengono raccolti nelle stazioni meteorologiche e descrivono il clima generale di una regione, dando dettagli riguardo la radiazione solare, temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità e direzione del vento e precipitazioni atmosferiche. I dati mesoclimatici, sebbene qualche volta più difficili da ottenere, riguardano le modificazioni del macroclima causate dalle caratteristiche topografiche della località con-



Marco Filippi - Gianfranco Rizzo - Gianluca Scaccianoce

LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA PER L'EDILIZIA SOSTENIBILE

Efficienza, compatibilità ambientale, nuove tecnologie

Il cospicuo e crescente *corpus* normativo nazionale e comunitario europeo spinge verso un incremento dell'efficienza energetica ma continua a non affrontare con la necessaria decisione il ruolo che le nuove tecnologie edilizie possono giocare in questo contesto. Questo tema è stato specificatamente esaminato in uno studio di "rilevante interesse nazionale" (PRIN) – coordinato dall'Università degli Studi di Palermo, con la partecipazione delle università di Torino, Venezia, Pisa e Reggio Calabria – i cui risultati sono stati raccolti nel presente testo.

Il volume, dopo un'attenta disamina delle principali normative in materia di efficienza energetica, affronta:

- a) la classificazione della qualità ambientale indoor nell'ambito del nuovo panorama normativo e di standard per il comfort;
- b) l'influenza sui consumi energetici degli edifici del livello di comfort degli occupanti, anche con riferimento ai modelli di simulazione che analizzano il comportamento termico degli edifici in regime estivo;
- c) l'analisi delle nuove tecnologie oggi disponibili per un'edilizia sostenibile, con riferimento agli impianti ad alta efficienza, alle facciate ventilate, alle coperture a verde, ecc.;
- d) la compatibilità ambientale nel processo di certificazione, anche con riferimento all'istituendo marchio Ecolabel per gli edifici e agli strumenti utilizzabili per la certificazione e l'autovalutazione di tali innovativi edifici.

Marco Filippi è professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Politecnico di Torino e dirige la Scuola nazionale di Fisica Tecnica. Nel Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino guida il gruppo di ricerca Technology Energy Building Environment TEBE. È direttore del centro di ricerca Indoor Environment and Energy Management (IEEM). È autore di oltre quattrocento pubblicazioni a carattere scientifico, didattico e divulgativo.

Gianfranco Rizzo è professore ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università degli Studi di Palermo. Ha svolto attività di ricerca presso l'Università di Berkeley e di docenza presso la Facoltà di Ingegneria di Luanda (Angola). Ha coordinato due progetti di rilevante interesse nazionale (PRIN) su tematiche legate alle prestazioni energetiche degli edifici. È autore di oltre trecento pubblicazioni scientifiche, didattiche e divulgative.

Gianluca Scaccianoce è professore associato di Fisica Tecnica Ambientale presso l'Università degli Studi di Palermo. È stato membro dei comitati di organizzazione di convegni internazionali e nazionali. È autore di più di cento pubblicazioni scientifiche. I suoi principali campi di ricerca riguardano le condizioni termoigrometriche e di qualità dell'aria degli ambienti chiusi, l'efficienza energetica degli edifici e l'utilizzo dei materiali naturali in edilizia.

● ENERGIE

ISBN 978-88-579-0252-4



9 788857 902524

DF 0252 € 45,00

