

Comportamento igrometrico delle coperture in laterizio

La necessità di contenimento dei consumi energetici ha portato negli ultimi 30 anni a modifiche della stratigrafia delle coperture in laterizio. Per migliorare l'efficienza termica degli isolanti in particolare sono stati introdotti strati con funzione di controllo igrometrico (ventilazione e barriere continue di tenuta al vapore). Sulla necessità e sulla reale efficacia nel nostro clima di tali strategie tuttavia non esistono molti dati. Si riportano pertanto nel seguito una serie di sperimentazioni che ne evidenziano i limiti ed i campi di applicabilità

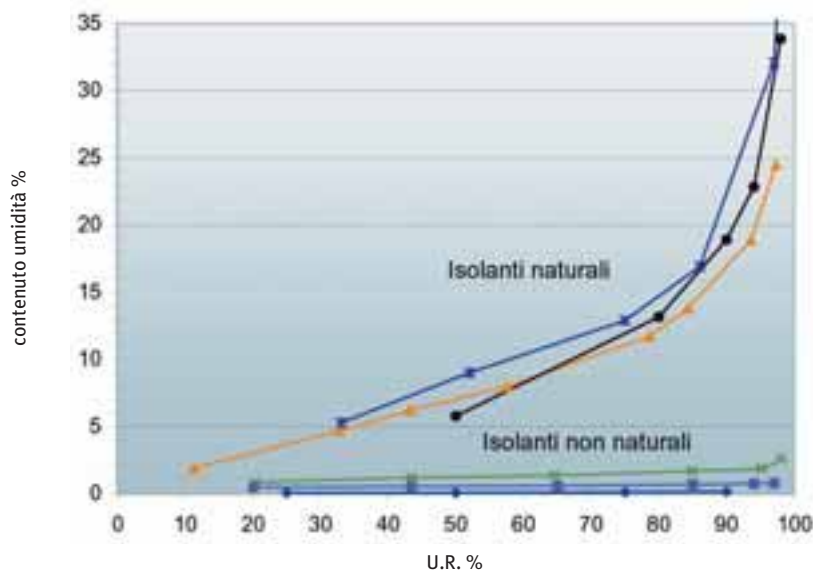
L'efficienza termica di una copertura, come noto, è fortemente connessa al comportamento igrometrico della stessa. Ciò dipende dal fatto che ogni materiale da costruzione, se posto in un ambiente ad alta UR%, può adsorbire parte del vapore acqueo contenuto nell'aria. Ne consegue che all'interno della struttura porosa del materiale può accumularsi acqua, anche in quantità rilevanti rispetto al peso del materiale stesso. L'acqua, per il fatto di avere conducibilità termica elevata, tende come conseguenza ad inficiare le proprietà termofisiche dei materiali da costruzione. Tale fenomeno, indagato già da diversi anni, ha assunto una estrema rilevanza nel momento in cui si sono cominciate a progettare e a realizzare strutture di copertura caratterizzate da bassissime trasmittanze. Infatti, mentre alla fine degli anni '80 i valori di trasmittanza di riferimento nella zona climatica di chi scrive erano dell'ordine di 0,7-0,8 W/m²K, oggi per le strutture di copertura (DLgs 192/05 e 311/06) vengono imposti valori massimi di trasmittanza pari a 0,46, 0,35, 0,32 W/m²K, in vigore rispettivamente dal 2006, 2008 e 2010 (zona D). Questi valori sono molto prossimi ai valori soglia (<0,3W/m²K) indicati da altri ricercatori [Hens,1994] quali valori limite sotto i quali l'influenza degli aspetti igrometrici sulle prestazioni termiche non può essere trascurata. In relazione a tali aspetti, è stata condotta una serie di sperimentazioni, che qui si riporta, volte a comprendere l'efficacia relativa di diverse strategie di controllo igrometrico per le coperture; in particolare, a seguito di una disamina sui comportamenti igrometrici dei materiali presenti in copertura, si sono verificati gli effetti:

- della ventilazione sottomanto;
- dell'impiego di barriere al vapore in coperture a tenuta.

I risultati evidenziano come le problematiche igroscopiche appaiano significativamente rilevanti principalmente a carico degli isolanti naturali a struttura fibrosa, che oggi stanno prendendo piede per motivazioni legate all'“ecocompatibilità”, meno a carico degli isolanti di natura sintetica. Tra le strategie di attenuazione utilizzabili con l'impiego di materiali igroscopici, la ventilazione sembra avere una efficacia relativa e dipendente dalle condizioni climatiche locali. L'utilizzo di barriere al vapore come strategia alternativa appare, infine, utile solo per situazioni caratterizzate da altissima produzione di vapore interna agli ambienti ed in contesti climatici particolarmente freddi.

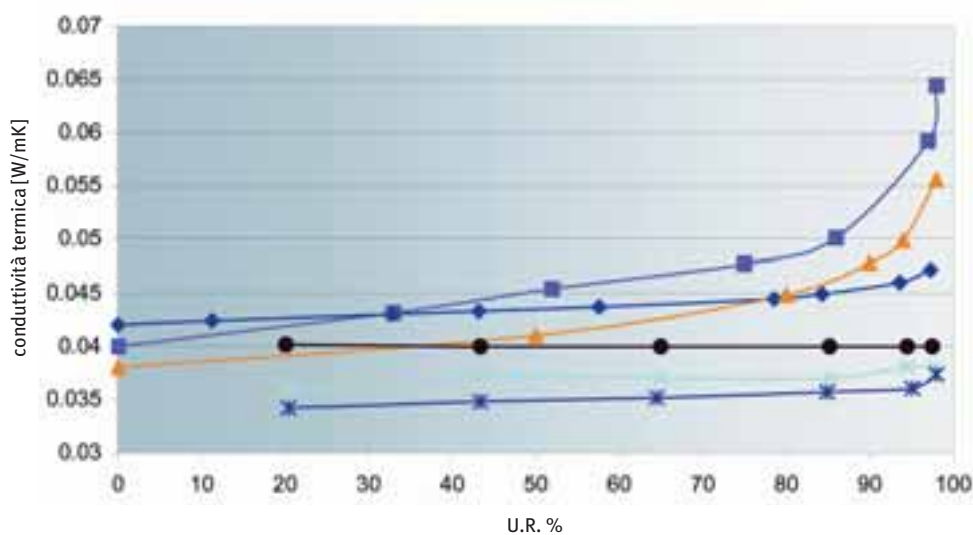
Le strategie di controllo igrometrico La necessità di limitare le problematiche igroscopiche nei materiali di copertura ha portato a sviluppare due tipi di strategie di controllo, basate su principi tra loro contrapposti.

La prima sfrutta le tecnologie di ventilazione sottomanto come mezzo di dissipazione per ridurre l'accumulo igroscopico a carico dei materiali; la seconda si affida invece all'impiego di barriere/freni al vapore e all'aria al fine di limitare gli scambi sia diffusivi, sia convettivi che possono portare alla condensazione superficiale o interstiziale in sistemi non ventilati. La ventilazione sottomanto, in particolare, si affida all'applicazione della teoria classica in materia alle coperture. Assumendo l'ipotesi che l'aria esterna abbia tenori di vapore sempre inferiori all'aria interna all'edificio e che quindi la migrazione del vapore sia costantemente diretta dall'interno verso l'esterno, ne deriva come conseguenza che tutti i sistemi volti a introdurre aria esterna nel pacchetto di copertura, e contemporaneamente ad estrarre l'aria interna, tendono a ridurre



1. Isotherme di adsorbimento igroscopico per alcune tipologie di isolante termico: le tre curve posizionate in alto sono quelle relative ai materiali caratterizzati sperimentalmente.

- lana di vetro
- lana di roccia
- ◆— polistirene
- ▲— fibra legno
- fibra cellulosa
- fibra canapa



2. Dipendenza della conduttività termica dall'U.R.% ambientale per alcune tipologie di isolante.

- cellulosa
- ◆— legno
- ▲— canapa
- ◆— polistirene
- ◆— lana di vetro
- lana di roccia

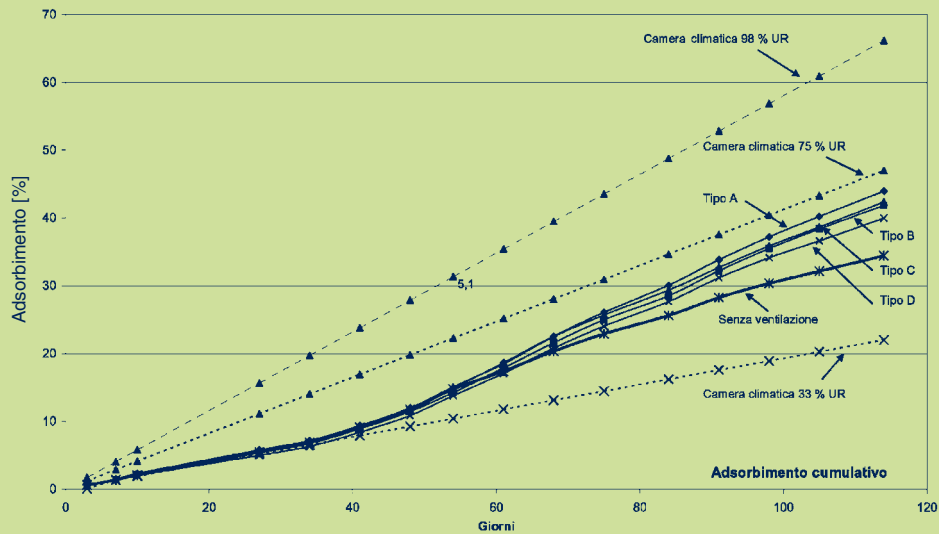
necessariamente il rischio di condensazione nelle zone che rischiano in fase invernale di trovarsi a basse temperature.

Tale assunto è stato tuttavia messo in crisi da numerose evidenze sperimentali che hanno dimostrato che l'ipotesi stessa su cui si basa la teoria classica della ventilazione, cioè la perfetta tenuta all'aria delle pareti del condotto, risulta errata tanto più il manto di copertura risulta discontinuo: caso appunto delle coperture in laterizio qui analizzate. Inoltre, la ventilazione viene considerata l'unico meccanismo di dissipazione dell'umidità accumulata quando invece i materiali costituenti il pacchetto possono dar luogo a dinamiche di accumulo e rilascio differiti nel tempo.

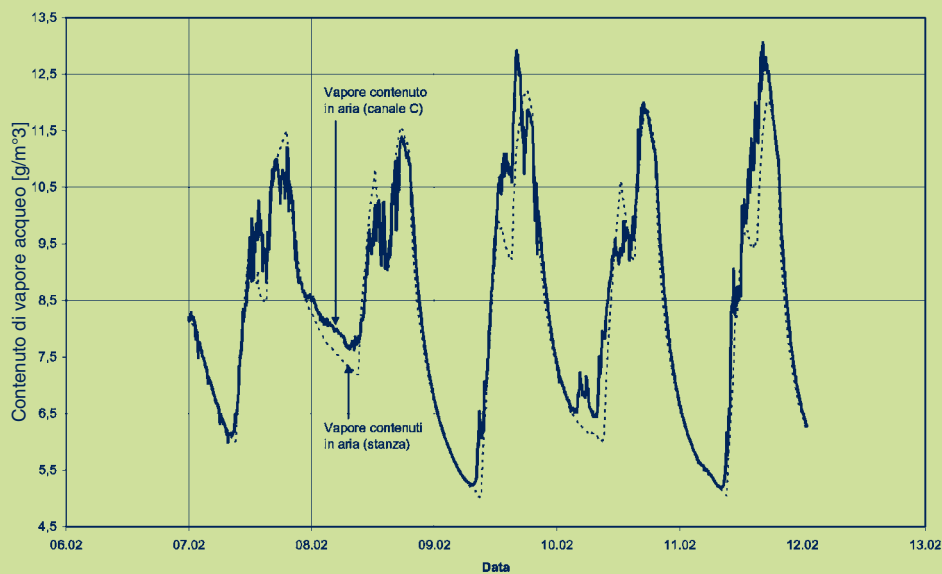
Il funzionamento delle barriere al vapore si basa su un principio opposto alla ventilazione ed in particolare sulla capacità di particolari membrane, poste sul lato caldo del coibente, di limitare o annullare del tutto il trasporto di vapore acqueo dall'interno verso l'esterno in ragione della loro ridotta permeabilità. Numerosi studi [Burch, 1995; Janssens, 1998], rispettivamente negli Stati Uniti e in Europa, si sono proposti di stabilire in quali particolari condizioni climatiche e di produzione

di vapore interna ai locali sia effettivamente necessario il ricorso alle barriere al vapore. I risultati confermano che in qualsiasi condizione climatica la barriera al vapore è efficace qualora non divengano predominanti gli altri meccanismi di trasporto (convezione e *wind washing*) causati da difetti di tenuta del pacchetto e dall'assenza comunque di una barriera all'aria. In funzione delle reali condizioni climatiche interne è comunque importante anche un'oculata scelta della barriera al vapore dotata di una corretta permeabilità.

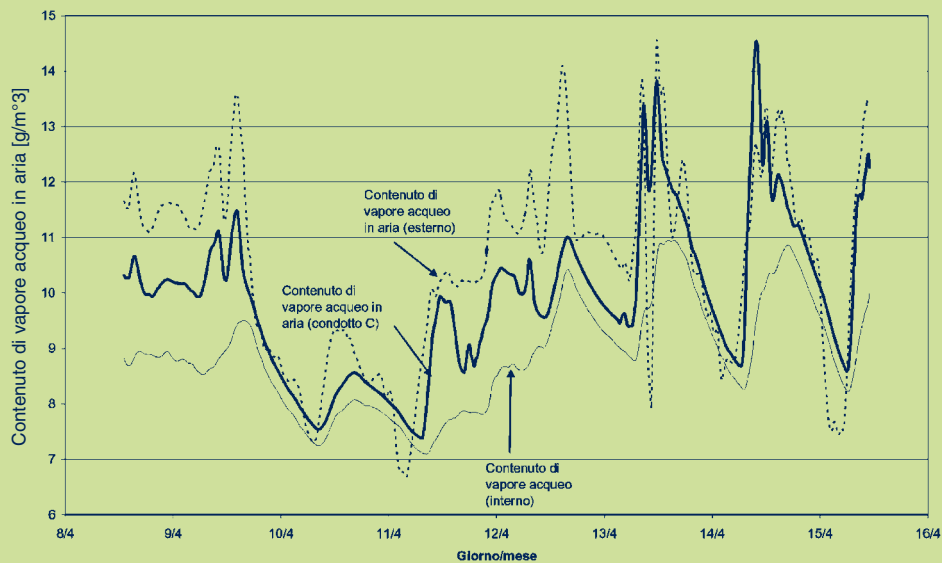
Il comportamento igrometrico dei materiali isolanti La prima fase della ricerca è consistita nella caratterizzazione igrometrica e conseguentemente nella determinazione della variazione della conducibilità termica degli isolanti in relazione ai contenuti d'acqua presenti negli stessi. In generale, la funzione che descrive il fenomeno di scambio di vapore acqueo fra l'aria ambiente ed il materiale poroso è rappresentata dalla sua curva di adsorbimento igroscopico che è stata ricavata sperimentalmente per tre tipologie di isolanti naturali impiegate più comunemente – la fibra di cellulosa, la fibra di le-



3. Accumulo progressivo di umidità nelle sonde utilizzate. Le linee continue sono relative alle sonde poste all'interno del sistema di copertura mentre le linee tratteggiate corrispondono al comportamento ottenuto da sonde identiche in una camera climatica a UR % costante (33%; 75%; 95-98%).



4. Andamento del contenuto d'acqua in aria in un giorno di febbraio.



5. Contenuto di vapore nell'aria (esterno, interno e condotto C) in aprile.

gno e la fibra di canapa – e da letteratura per il polistirene espanso e per gli isolanti in fibra di vetro e lana di roccia, che sono i coibenti termici non naturali oggi maggiormente diffusi (fig. 1). Gli isolanti fibrosi di origine vegetale sperimentati arrivano ad assorbire quantità di umidità 10-15 volte superiori rispetto agli isolanti non naturali. Fra i tre isolanti sperimentati, la fibra di cellulosa presenta un maggiore accumulo in tutto il range igroscopico (30%-95% di U.R.), seguita dalla fibra di canapa e dalla fibra di legno. La conseguenza della marcata capacità di accumulo igroscopico a carico degli isolanti naturali sta nel fatto che per tali materiali si pongono reali problemi di variazione della conduttività termica.

Ipotizzando una semplice dipendenza lineare della conduttività termica in funzione del contenuto d'acqua normalizzato, la relazione diagrammata in fig. 2 può essere espressa come segue:

$\lambda(w) = \lambda_s \cdot (1 + b \cdot w/\rho_s)$ in cui:

- $\lambda(w)$ è la conduttività termica del materiale umido;
- λ_s è la conduttività termica del materiale secco;
- ρ_s è la densità del materiale secco;
- b è un supplemento percentuale di conduttività termica indotto dalla presenza di umidità: nel caso della fibra di cellulosa $b = 1$ mentre per gli altri due isolanti $b = 0.5$;
- w è il contenuto d'acqua del materiale in kg/m^3 .

I risultati raccolti evidenziano due aspetti:

- la conduttività termica dei materiali naturali sperimentati è, nel range 0-60% di U.R.%, dal 20% al 30% superiore a quella di un isolante termico come il polistirene: ciò significa che per ottenere pari resistenza termica occorre impiegare spessori, di coibente fibroso naturale, superiori a 5-6 cm;
- oltre il 70-75% di U.R.% si incrementa la conduttività termica in termini esponenziali fino ad arrivare a valori doppi rispetto al materiale di natura sintetica.

In conclusione, gli isolanti termici fibrosi di origine vegetale esibiscono, rispetto all'accumulo di umidità, un comportamento che potrebbe scoraggiare un loro impiego in soluzioni tecnologiche di copertura già di per se stesse sensibili alle problematiche di umidità. L'accumulo di umidità a carico degli elementi di copertura nei contesti climatici nazionali potrebbe tuttavia non raggiungere mai, se non per ridotti periodi di tempo, valori tali da inficiare tanto la prestazione termica quanto la durabilità del "pacchetto" di copertura.

Efficacia della ventilazione Accertata la presenza di problematiche igroscopiche significative a carico di taluni materiali isolanti, si è avviata la seconda fase della ricerca, volta a verificare l'efficacia della ventilazione come mezzo per ridurre i tenori di umidità in questi materiali nella fase invernale.

A tal fine, dopo aver realizzato una struttura di copertura idonea alla sperimentazione, si è analizzato il comportamento igroscopico di 4 tipi di coperture ventilate a confronto con una copertura non ventilata.

In tabella 1 sono riportati i sistemi analizzati nello svolgimento della ricerca.

La prima considerazione riguarda il fatto che non sempre la ventilazione appare efficace nel ridurre l'umidità specifica dell'aria nel condotto.

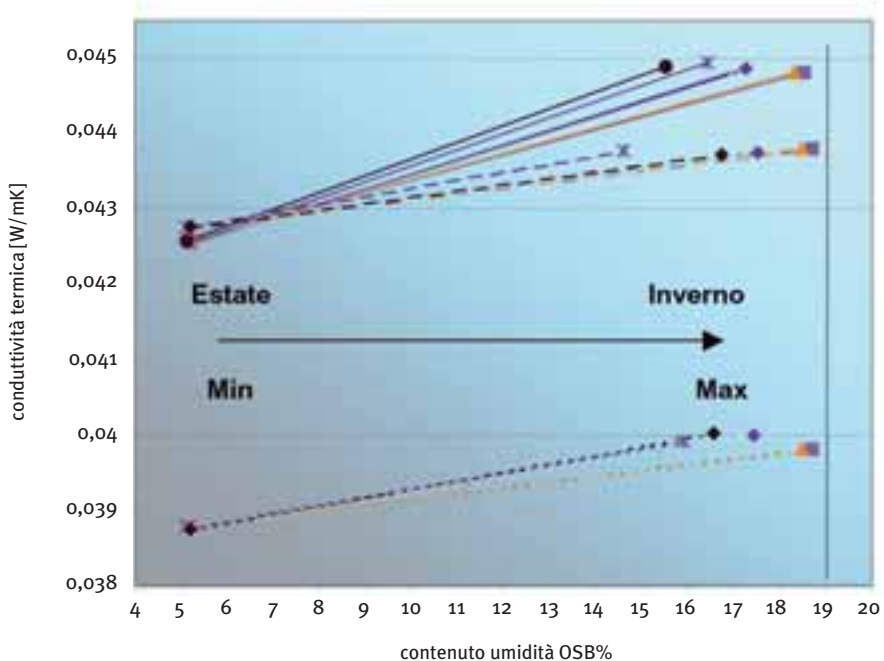
La fig. 3, in particolare, riporta i differenti comportamenti dell'aria (in termini di capacità di trasporto e/o dissipazione dell'umidità) nei condotti in relazione alla dimensione del canale di ventilazione, di solito assunto essere l'unico parametro importante per l'efficienza della ventilazione stessa. Si evidenzia l'estrema limitatezza delle differenze rilevate tra i 4 sistemi analizzati.

La quantità di acqua adsorbita nel tempo dalle sonde poste nei quattro condotti di ventilazione appare simile a quella adsorbita dalla sonda posta in camera climatica con $\text{UR}\% = 75\%$. Le leggere differenze che si notano nella quantità di acqua adsorbita dalle sonde poste nei 4 canali di ventilazione dimostra come vi sia una correlazione positiva tra sezione di ventilazione e quantità di acqua adsorbita. Tale comportamento, in contrasto con l'idea che maggiori ventilazioni, grazie all'introduzione di aria meno umida dall'esterno, garantiscano minori accumuli di umidità nei materiali di copertura, è stato confermato dalle misure effettuate ed appare dipendere dal fatto che non sempre l'aria esterna ha evidenziato tenori di vapore inferiori a quelli interni, come peraltro già rilevato in precedenti rilevazioni [Hens, 1999; Rode Pedersen, 1999]. Il fenomeno sopra descritto è spiegabile osservando la situazione rilevata in diversi periodi dell'anno (figg. 4 e 5).

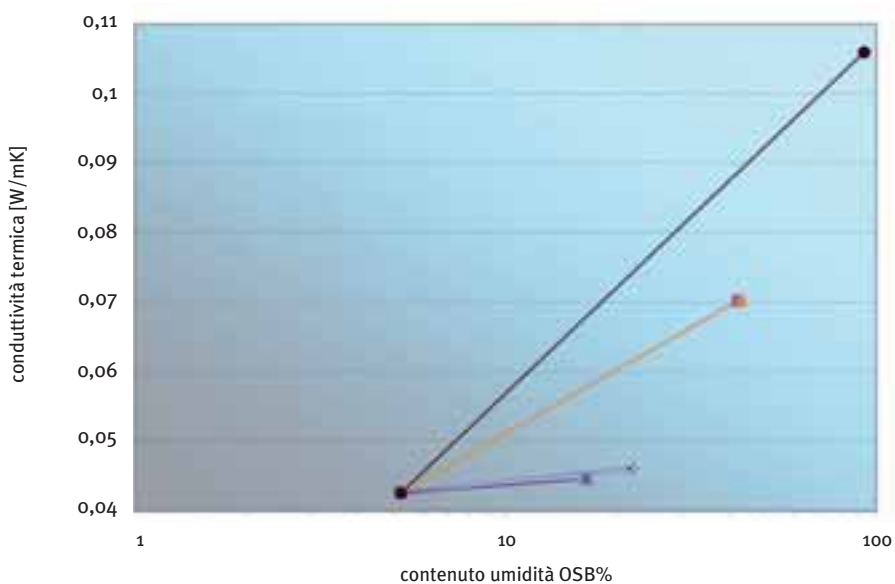
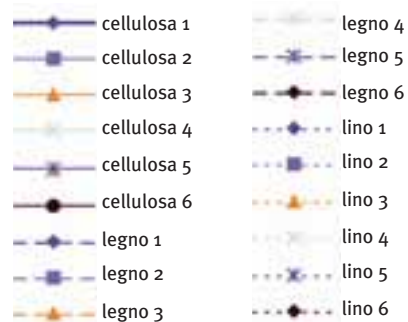
Si registra quindi una immissione nei condotti di ventilazione di aria esterna che appare avere contenuti di vapore maggiori di quelli dell'aria interna.

1 Dati caratteristici dei sistemi di ventilazione messi a confronto nella sperimentazione.

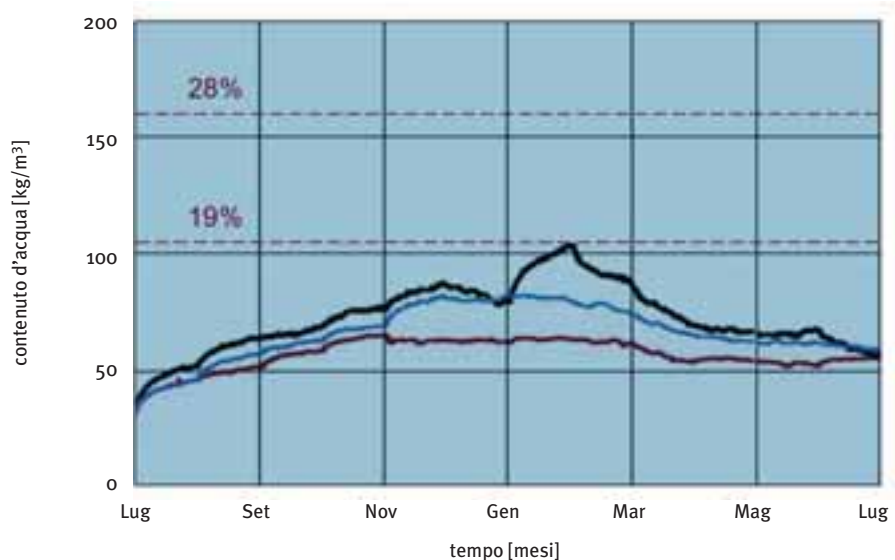
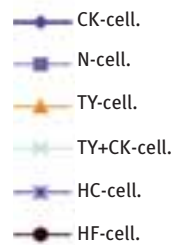
Copertura	Tipologia tavolato [mm]	H tot. coibente [mm]	H. tot. gronda cm^2/m	Sezione falda cm^2/m	Sezione colmo cm^2/m	Sezione
A	Culla di alloggiamento	50	40	140	310	300
B	Culla di alloggiamento	50	40	290	443	300
C	Distanziatori	50	40	214	615	300
D	Appoggio	50	40	214	410	300
M	Appoggio e fissaggio con malta	50	40	0	0	0



6. Soluzioni a confronto al variare della tipologia di isolante. Le rette non rappresentano qualitativamente l'andamento reale di accumulo nell'arco temporale di un anno, ma si può ritenere che in inverno si attinga al valore massimo mentre in estate a quello minimo.



7. Soluzioni a confronto per i sistemi isolati con fibra di cellulosa in condizione di produzione di vapore interno ai locali estrema.



8. Accumulo igroscopico a carico del pannello di OSB (*Oriented Strain Board*) in differenti contesti climatici. I risultati si riferiscono alla soluzione CK isolata con fibra di cellulosa.



2 Dati caratteristici dei sistemi di copertura messi a confronto nella simulazione.

Copertura	Varianti costruttive	Tavolato interno compensato [$\mu = 700$]	Tavolato esterno OSB [$\mu = 700$]	H tot. isolante [mm]	Freno vapore [μ]
1-CK	carta kraft (lato caldo)	s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	3000
2-N	niente	s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	–
3-TY	poliolefine imperm. trasp. (lato freddo)	s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	20
4-TY+CK	poliolefine imperm. trasp. + carta kraft	s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	–
5-HC	barriera al vapore dinamica (lato caldo)	s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	–
6-HF	barriera al vapore dinamica (lato freddo) s = 1 cm	s = 1 cm	4 cm	–	–



Tipologie di isolante:

- polistirene
- fibra di cellulosa
- fibra di legno
- fibra di lino/canapa

Efficienza dell'uso di barriere al vapore su coperture a tenuta

L'ultima fase della sperimentazione è consistita nella valutazione dell'efficacia della strategia alternativa e cioè nella realizzazione di coperture a perfetta tenuta d'aria con barriere capaci di assolvere le funzioni di freno all'aria e al vapore.

In particolare, sono state messe a confronto, attraverso una campagna di simulazioni, di medio-lungo periodo, sei varianti tipologiche di copertura, simili a quelle verificate sperimentalmente con la ventilazione, ma a tenuta e con diverse tipologie di isolante. Le varianti sono riportate in tabella 2.

La prima verifica effettuata riguarda la durabilità del solaio ligneo. In tutti i casi esaminati (fig. 6), durante il periodo invernale, il tavolato non accumula una quantità di umidità tale da poter innescare fenomeni di degrado (contenuto in massa sempre minore del 19%). Anche per gli isolanti vale un discorso affine: gli accumuli igroscopici a carico di isolanti di natura sintetica sono molto limitati, mentre sono più rilevanti per gli isolanti naturali, ma non tali da comportare un aumento sostanziale della conduttività termica in condizioni di esercizio. Le fluttuazioni sono più accentuate per la fibra di cellulosa (la maggiore pendenza delle rette conferma la maggiore igroscopicità).

Quanto all'ideoneità delle soluzioni stratigrafiche, si evince che anche in assenza di barriera al vapore (N) questi sistemi costruttivi, qualunque sia l'isolante, non presentano problematiche di accumulo progressivo anche in ambienti aventi concentrazioni di vapore medio-alti. Soluzioni conformi comunque migliorative (specie per il tavolato esterno più che per l'isolante) consistono nel predisporre una barriera o freno al vapore sul lato caldo dell'isolante.

In fig. 7 si è voluto analizzare il comportamento degli stessi sistemi di copertura, con isolanti naturali, esasperando le condi-

zioni di produzione di vapore internamente ai locali. A tale scopo è stata condotta una simulazione con una condizione di U.R.% media interna dell'80% con 25°C di temperatura: una situazione certamente gravosa riscontrabile solo in edifici particolari come le piscine. Come era lecito attendersi, raddoppiando la produzione di vapore interna ai locali, l'omissione della barriera al vapore diviene deleteria sia per l'isolante, sia per il tavolato ligneo portando ad accumuli di umidità non tollerabili.

Ripetendo la simulazione per differenti condizioni climatiche (fig. 8), si evidenzia che lo strato che maggiormente risente delle condizioni esterne è il tavolato ligneo che in climi umidi e continentali raggiunge dei picchi di accumulo prossimi al 19%. In climi mediterranei non sussiste alcun problema di durabilità connesso all'accumulo di umidità.

Conclusioni La ricerca ha messo in luce come le due diverse strategie di controllo igrometrico (ventilazione, coperture a perfetta tenuta) siano in grado di risolvere le problematiche igroscopiche a carico degli isolanti e del tavolato ligneo di copertura. Tuttavia, relativamente alla ventilazione, sembra opportuno non ricorrere a camere di ventilazione eccessivamente alte, in quanto non sempre l'aria esterna, almeno nelle condizioni climatiche analizzate, dimostra avere tenori di vapore inferiori a quelli dell'aria interna. Anche la strategia alternativa (copertura a perfetta tenuta), si è rivelata efficace ma solo per produzioni di vapore negli ambienti interni non elevate e per climi particolarmente freddi. Infine si è evidenziato che, in ogni caso, le problematiche igroscopiche appaiono assumere rilevanza esclusivamente nel caso in cui vengano impiegati materiali isolanti fibrosi di natura vegetale, oggi in crescente utilizzo. ¶