

Formazione di umidità e condensa nelle strutture edilizie

Francesca Cappelletti, Piercarlo Romagnoni

*Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi
Università IUAV di Venezia*

Premessa

Le condizioni termoigrometriche interne di un edificio dipendono da una serie di variabili quali la funzione di uso, il tasso di occupazione dello stesso, il sistema impiantistico, Per la maggior parte delle costruzioni commerciali, la temperatura e il contenuto di vapore acqueo sono controllate da sistemi di condizionamento i cui set-point sono solitamente ben definiti. Le condizioni termoigrometriche interne negli edifici residenziali, tuttavia, sono spesso influenzate in modo più evidente anche dal clima esterno e dal comportamento degli occupanti [1].

Inoltre, lo stile di vita moderno costringe le persone a lavorare o a recarsi a scuola durante il giorno e solo durante la sera e la notte gli edifici residenziali sono completamente occupati.

I carichi di umidità dovuti al comportamento degli occupanti mostrano una variazione temporale estremamente variabile: sono caratterizzati da picchi (ad esempio durante la cottura dei cibi o l'uso dei bagni). Il vapore acqueo in eccesso dovrebbe essere rimosso mediante ventilazione forzata o con un sistema di condizionamento dell'aria.

Il valore dell'umidità relativa risultante può essere determinato da una simulazione igrotermica dell'intero edificio o da semplici metodi di stima che utilizzano le informazioni sulla produzione di umidità, i tassi di cambiamento d'aria e il funzionamento del sistema di condizionamento dell'aria regolato a sua volta dalle condizioni climatiche [2].

Lo standard EN ISO 13788 [3] mira a evitare sia fenomeni di condensazione interstiziale che la condensazione sulle superfici interne o comunque condizioni che potrebbero favorire la crescita della muffa sulle strutture edilizie. Nell'economia complessiva degli scambi di umidità, è inoltre importante valutare eventuali scambi con il terreno (risalite) e da precipitazioni



Prof. Francesca Cappelletti

Professore associato
Fisica Tecnica Ambientale
Dipartimento di Progettazione
e Pianificazione in Ambienti
Complessi.
Università IUAV di Venezia.



Prof. Piercarlo Romagnoni

Professore ordinario
Fisica Tecnica Ambientale
Dipartimento di Progettazione
e Pianificazione in Ambienti
Complessi.
Università IUAV di Venezia.

atmosferiche o quelli dovuti allo scambio di vapore acqueo dei materiali da costruzione.

L'ipotesi di base per i calcoli richiesti da questo standard è che le pareti e l'abitazione stessa non influenzino sensibilmente il livello di umidità interno. Si tratta di un'ipotesi realistica solamente se i materiali utilizzati hanno una scarsa capacità di assorbimento dell'umidità e, inoltre, se le superfici interne sono rivestite con vernice impermeabile all'umidità.

Inoltre i materiali dell'involucro edilizio possono avere una funzione di buffer (tampone) per gli scambi di vapore e possono aiutare a smorzare i picchi di umidità interna (ad es. grazie a tappeti, tende, carta), ma possono anche ridurre l'efficacia di rimozione dell'umidità di una ventilazione intermittente (la ventilazione che, ad esempio, si esercita aprendo periodicamente finestre e azionando i ventilatori).

I parametri termofisici

I termini umidità assoluta (absolute humidity), contenuto igrometrico (humidity ratio) e pressione di vapore (vapor pressure) si riferiscono al medesimo concetto: una determinata massa di aria contiene una quantità variabile di vapore acqueo. L'umidità assoluta o meglio il contenuto igrometrico ci consente di definire la massa (kg vapore acqueo) di vapore acqueo contenuto in una determinata massa di aria secca (kg aria secca) [4]. In un determinato contenitore, il volume di aria (miscela di diversi gas, quali N₂, O₂,... e vapore acqueo) ivi contenuto esercita una pressione globale che è la somma delle pressioni che, ciascuno di diversi gas componenti la miscela, eserciterebbe sul contenitore stesso se inserito da solo nel medesimo contenitore alla medesima temperatura (pressione parziale del gas). Allo stesso modo anche il vapore acqueo possiederà una propria pressione parziale.

La quantità di vapore in aria è inoltre fortemente dipendente dalla temperatura: più calda è la temperatura della miscela di aria più elevata può essere la quantità di vapore che può essere contenuta in essa. La massima quantità è tuttavia definibile con il raggiungimento del valore massimo della pressione parziale del vapore che è pari al valore della pressione di saturazione. Tale valore è calcolabile nota la temperatura della miscela con le relazioni seguenti:

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{per temperature } \theta \geq 0$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{per temperature } \theta < 0$$

La pressione è ricavata in Pascal [Pa], [3]. Finché la pressione parziale del vapore acqueo rimane inferiore al valore della pressione di saturazione, non si ha condensazione, ed il vapore acqueo può essere considerato a tutti gli effetti un gas ideale. È utile avere una grandezza che descriva la quantità di vapore presente nell'aria umida rispetto alla quantità massima contenibile alla stessa temperatura. Tale grandezza si dice umidità relativa, φ o UR, e viene definita come il rapporto tra la pressione parziale del vapore, p_v, in un certo volume di aria umida, e la pressione del vapore saturo p_{sat} alla stessa temperatura θ a cui si trova la massa d'aria considerata:

$$\varphi = UR = \frac{p_v}{p_{sat}(\theta)} \Big|_{\theta}$$

Il contenuto igrometrico è ricavabile anche grazie all'umidità relativa tramite la relazione:

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_{sat}}{p - \varphi p_{sat}}$$

Considerata una massa di aria umida in un determinato stato termodinamico, si definisce temperatura di rugiada, θ_r, la temperatura alla quale occorre che essa sia raffreddata per ottenere la saturazione, mantenendo costante il valore del contenuto igrometrico e la sua pressione totale. Alla temperatura θ_r, la pressione di vapore, p_v, eguaglia la pressione di saturazione p_{sat}(θ_r).

Infine, è bene ricordare che, fissate la temperatura dell'aria θ e la pressione totale p_{tot}, la densità dell'aria umida diminuisce al crescere del contenuto igrometrico e che, a parità di umidità relativa, l'aria più calda ha una densità inferiore. Ciò spiega come in un ambiente, spesso, l'aria interna sia distribuita in modo disuniforme rispetto al valore dell'umidità.

La legislazione

Il primo dei DM 15/06/2015, relativamente a quanto riguarda le prescrizioni comuni per gli edifici di nuova costruzione, per gli edifici oggetto di importanti ristrutturazioni o per gli edifici sottoposti a ristrutturazione energetica (Allegato 1, punto 2), prescrive:

2. Nel caso di intervento che riguardi le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788), alla verifica dell'assenza:

- di rischio di formazione di muffe, con particolare attenzione ai ponti termici negli edifici di nuova costruzione;
- di condensazioni interstiziali.

Le condizioni interne di utilizzazione sono quelle previste nell'appendice alla norma sopra citata, secondo il metodo delle classi di concentrazione. Le medesime verifiche possono essere effettuate con riferimento a condizioni diverse, qualora esista un sistema di controllo dell'umidità interna e se ne tenga conto nella determinazione dei fabbisogni di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento.

La relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici (Allegato 1 e 2 al secondo dei DM 15/6/2015, relazione tecnica, punto 8) richiede inoltre la presenza delle tabelle con indicazione delle caratteristiche termiche, termigrometriche e della massa efficace dei componenti opachi dell'involucro edilizio con verifica dell'assenza di rischio di formazione di muffe e di condensazioni interstiziali. **La presenza di tale documentazione è obbligatoria.**

La definizione di quanto previsto dalla normativa attualmente vigente diviene pertanto la strada che il progettista deve seguire ai fini di una efficace rispondenza ai requisiti richiesti.

Si noti infine la presenza della parola "assenza" che sembra suggerire come in nessun periodo dell'anno

rischio di formazione di muffe e di condensazioni interstiziali siano tollerate.

Le condizioni interne di progetto

Secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 13788, i valori della temperatura

dell'aria interna devono essere usati valori secondo l'uso previsto dell'edificio e l'Appendice A fornisce un metodo di stima per la temperatura dell'aria interna a partire dalla temperatura esterna.

L'umidità relativa interna può essere ricavata nel seguente modo tramite il valore della pressione parziale del vapore dell'aria esterna p_{ve} e definendo un incremento Δp in funzione della destinazione d'uso dell'edificio o dell'apporto specifico di vapore Δv , rispettivamente con le seguenti due relazioni:

$$p_{vi} = p_{ve} + \Delta p$$

$$\Delta p = \Delta v R_v T_i = G R_v T_i / (n V)$$

con

R_v = costante dei gas per il vapore acqueo = 462 Pa m³/(kg K);

T_i = temperatura dell'aria interna [K];

n = tasso di ricambio [h⁻¹] dell'aria in ambiente;

V = volume dell'edificio [m³];

G = produzione di vapore all'interno degli ambienti [kg/h].

Per la valutazione dell'umidità interna stessa o per la definizione degli incrementi proposti, nel caso di climi tropicali e continentali, il metodo proposto è da utilizzare in assenza di ben definite condizioni dell'aria interna, controllate, misurate o simulate, e può essere utilizzato per edifici riscaldati (solo abitazioni e uffici).

La conoscenza della temperatura esterna permette di ricavare le condizioni interne tramite la figura 1 di seguito riportata, oppure utilizzando le seguenti espressioni:

$$\theta_e \leq 10^\circ\text{C} \quad \theta_i = 20^\circ\text{C}$$

$$-10 < \theta_e \leq 20 \quad \theta_i = 0,5 \theta_e + 15$$

$$\theta_e > 20^\circ \quad \theta_i = 25^\circ\text{C}$$

mentre per l'umidità interna, occorre distinguere se l'indice di affollamento è normale (caso A), nel qual caso:

$$\theta_e \leq -10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 35\%$$

$$-10 < \theta_e \leq 20 \quad \varphi_i = \theta_e + 45$$

$$\theta_e > 20^\circ \quad \varphi_i = 65\%$$

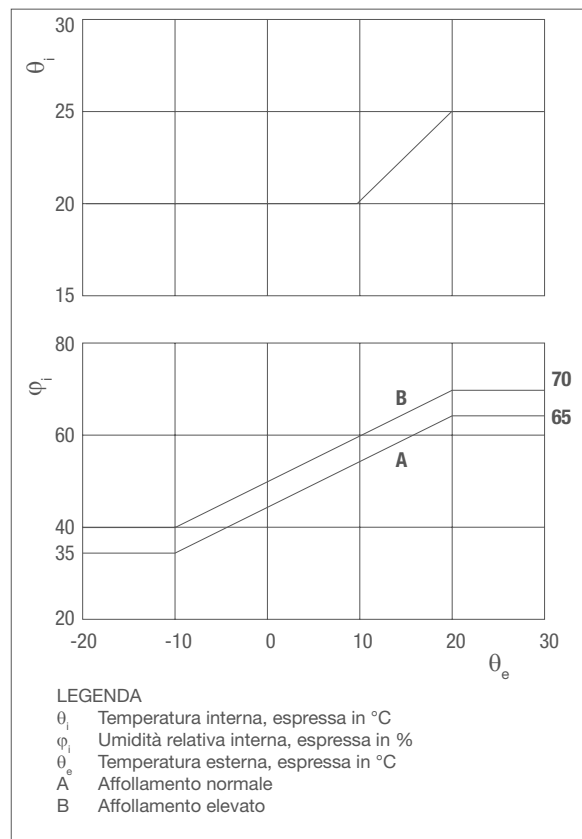
Con indice di affollamento elevato (caso B), le relazioni sono:

$$\theta_e \leq -10^\circ\text{C} \quad \varphi_i = 40\%$$

$$-10 < \theta_e \leq 20 \quad \varphi_i = \theta_e + 50$$

$$\theta_e > 20^\circ \quad \varphi_i = 70\%$$

Figura 1: Temperatura e umidità interna in abitazioni e uffici in funzione della temperatura media giornaliera dell'aria esterna (da [3]).



Nei climi marittimi, il valore dell'incremento specifico di vapore Δp è ricavabile dal seguente grafico, in funzione delle destinazioni, come da Tabella 1:

Tabella 1: Classi di produzione di umidità [3]

Classe di umidità	Edifici
1	Edifici non occupati, magazzini per stoccaggio di materiale secco
2	Uffici, alloggi con indice normale di affollamento e ventilazione
3	Edifici con indice di affollamento non noto
4	Palestre, cucine, mense
5	Edifici particolari, per esempio lavanderie, distillerie, piscine

Il valore di Δp può essere ottenuto anche dalle se-

guenti relazioni valide per $0 < \theta_e < 20$:

- classe 1: $\Delta p = -8,5 \theta_e + 270$
- classe 2: $\Delta p = -26 \theta_e + 640$
- classe 3: $\Delta p = -35,5 \theta_e + 810$
- classe 4: $\Delta p = -49 \theta_e + 1080$
- classe 5: $\Delta p = -58 \theta_e + 1360$

É possibile indicare un valore medio mensile dell'umidità relativa ϕ_i , se nota o un valore costante qualora tale parametro fosse mantenuto costante da un impianto di condizionamento

Verifica della condensa superficiale

La prima verifica richiesta dalla normativa è quella relativa alla condensa superficiale.

Per evitare la crescita di muffe, pur ammettendo altri criteri come accettabili, l'umidità relativa media mensile in corrispondenza delle superfici non dovrebbe essere maggiore dell'umidità relativa critica $UR_{critica}$ assunta pari a 0,8, in assenza di informazioni più specifiche da regolamenti nazionali o altro.

In realtà è il valore della temperatura superficiale interna, $\theta_{si,min}$, che deve essere accettabile: tale valore è riferibile, infatti, alla pressione di saturazione di vapore, ricavabile dalla funzione:

$$p_{sat}(\theta_{si,min}) = p_i / UR_{critica}$$

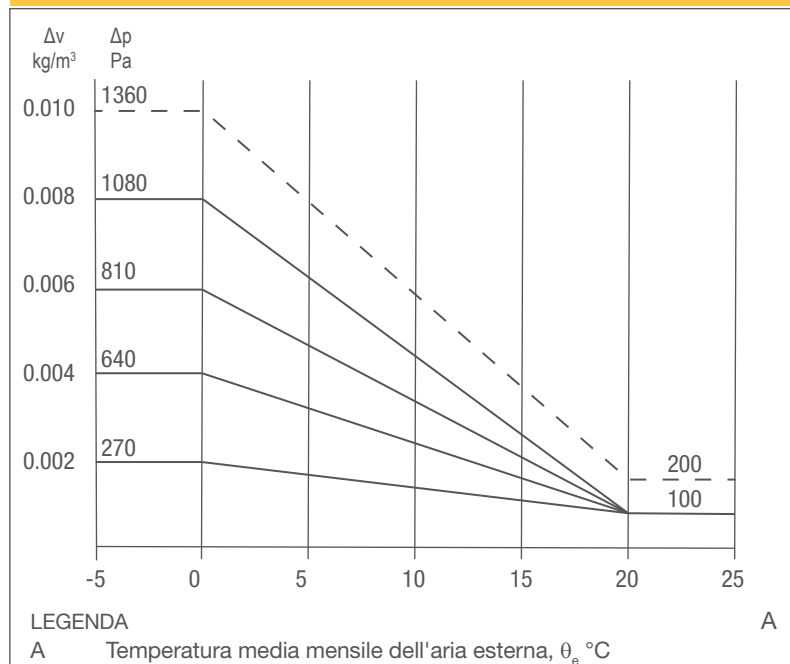
o meglio dalla funzione inversa:

$$\theta_{si,min} = f^{-1}(p_{sat})$$

La norma UNI EN ISO 13788/2013 indica come il calcolo sia funzione anche della temperatura interna dell'aria θ_i e dalla temperatura esterna θ_e tramite il calcolo del parametro f_{Rsi} così definito:

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)}$$

Figura 2: Variazione delle classi di umidità interna in funzione della temperatura esterna (da [3])



Per elementi piani, ciò equivale a definire, per elementi piani:

$$f_{Rsi} = 1 - R_{si} U$$

Il calcolo si basa sul valore della temperatura minima superficiale accettabile è realizzato ricordando che il flusso termico ceduto dalla parete è pari a:

$$q = U (\theta_i - \theta_e) = (\theta_i - \theta_e) / R_{tot}$$

ovvero, evidenziando il valore della temperatura della superficie interna (là dove si potrebbe formare condensa o condizioni di crescita di muffe):

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(R_{tot} - R_{si})}$$

Dalle due relazioni, si ottiene:

$$\frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)} = \frac{(R_{tot} - R_{si})}{R_{tot}} = 1 - \frac{R_{si}}{R_{tot}} = 1 - U R_{si}$$

La valutazione richiesta è basata sul valore massimo assunto dal parametro f_{Rsi} nei vari mesi dell'anno. Il componente edilizio dovrà quindi essere progettato in modo di avere un fattore f_{Rsi} sempre maggiore di $f_{Rsi,max}$, ovvero definire:

$$U = \frac{1 - f_{Rsi,max}}{R_{si}}$$

In assenza di norme nazionali, per la valutazione di condensazione o di crescita di muffe su superfici opache si deve utilizzare un valore della resistenza superficiale interna $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$ per rappresentare l'effetto di angoli, mobili, tende o controsoffitti.

Con i valori proposti per legge dal DM 15/6/2015 per l'edificio di riferimento, è possibile quindi calcolare i seguenti valori di $f_{Rsi,max}$:

Pareti verticali opache	Trasmittanza Edificio Ref. [W/(m ² K)]	f_{Rsi}
Zona climatica E	0,26	0,935
Zona climatica F	0,24	0,94

Pareti orizzontali di copertura	Trasmittanza Edificio Ref. [W/(m ² K)]	f_{Rsi}
Zona climatica E	0,22	0,945
Zona climatica F	0,20	0,95

Tali valori obiettivamente risultano difficili da ottenere (si vedano a tale proposito anche gli esempi proposti nella norma). Per tali valori, con i dati climatici riportati dall'esempio della norma, si arriverebbe a valori di temperatura superficiale medi minima $\theta_{si,min}$ prossimi ai 19°C.

Considerando valide tutte le limitazioni e le assunzioni proposte per gli elementi piani, sono in realtà gli elementi non monodimensionali ad essere maggiormente critici sotto l'aspetto della verifica a condensa. Per tali componenti la verifica deve essere fatta in conformità a UNI EN ISO 10211 [5].

Un'analisi approfondita può essere fatta, ad esempio, usando il software WUFI [6], che permette di simulare in maniera dinamica il comportamento energetico e igrotermico di strutture ed edifici secondo UNI EN 15026 [7] e secondo le norme CEN per la simulazione dinamica degli edifici. Lo sviluppatore del software è il Fraunhofer Institut sin dal 1995.

La procedura di verifica della condensa interstiziale

La verifica proposta nello standard propone di fatto l'applicazione del metodo detto di Glaser [8] di fatto noto a tutti gli operatori del settore, metodo la cui applicazione richiede la conoscenza del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ dei materiali componenti la struttura edilizia.

In via preliminare è inoltre opportuno ricordare che il metodo proposto dalla normativa [3]: "... va considerato come uno **strumento di valutazione** piuttosto che di previsione accurata. Esso permette di confrontare soluzioni costruttive diverse e di verificare gli effetti delle modifiche apportate alla struttura. **Esso non fornisce una previsione accurata** delle condizioni igrometriche all'interno della struttura in opera."

Si assume inoltre che il trasporto di vapore sia dovuto alla diffusione del vapore in una struttura descritto tramite la relazione:

$$g = \frac{\delta_0}{\mu} \frac{\Delta p}{d} = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d}$$

g = la portata specifica [kg/(s m²)] di vapore
 δ_0 = permeabilità al vapore dell'aria = $2 \cdot 10^{-10}$ kg/(m s Pa).

Δp = differenza di pressione parziale del vapore [Pa];
 μ = fattore di resistenza al vapore [-];

$s_d = \mu \cdot \Delta x$ = spessore equivalente di un singolo strato [m].

Tuttavia le semplificazioni adottate comportano alcune fonti di errore (giustamente richiamate nel testo normativo) quali:

- il valore della conduttività termica dipende dal contenuto di umidità nei materiali.
- l'impiego di proprietà costanti dei materiali;
- in molti materiali si può verificare assorbimento capillare e trasporto di acqua liquida, che possono cambiare la distribuzione dell'umidità;
- i movimenti dell'aria attraverso i materiali dell'edificio, giunti, fessure o intercapedini, possono cambiare la distribuzione dell'umidità per trasporto convettivo del vapore. Anche la pioggia o l'acqua prodotta dalla fusione della neve possono influenzare le condizioni igrometriche;
- le reali condizioni al contorno non sono costanti nell'arco di un mese;
- la maggior parte dei materiali è almeno in parte igroscopica e può assorbire vapore d'acqua;
- si assume che il trasporto di vapore sia monodimensionale;
- ad eccezione degli elementi di copertura, si trascurano gli effetti della radiazione solare e radiazione a lunghezza d'onda elevata.

Il metodo prevede che a partire da un qualsiasi mese dell'anno (mese di tentativo) si calcoli la distribuzione della temperatura, della pressione di saturazione e della distribuzione di vapore attraverso il componente edilizio considerato.

Se non è prevista alcuna condensazione nel mese di tentativo, si deve ripetere il calcolo con i mesi seguenti in successione, fino a che o non si trova condensazione in nessuno dei dodici mesi (in tal caso è possibile affermare che il componente considerato sia esente da fenomeni di condensazione interstiziale) o si individua un mese con condensazione che quindi è utilizzato come mese di partenza del calcolo.

La distribuzione della temperatura è calcolata tramite i valori delle interfacce, a loro volte calcolate tramite la relazione:

$$\theta_n = \theta_e + \frac{R'_n}{R'_T} (\theta_i - \theta_e)$$

$$R'_n = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j$$

$$R'_T = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{si}$$

In condizioni stazionarie, la relazione cui sopra comporta una distribuzione di temperatura lineare.

Nel caso della verifica a condensa interstiziale, i valori delle resistenze liminari da adottare sono i seguenti:

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$R_{si} = 0,10 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ se il flusso di calore è diretto verso l'alto;

$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ se il flusso di calore è orizzontale;

$R_{si} = 0,17 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ se il flusso di calore è diretto verso il basso

A partire dalla temperatura è valutato il valore della pressione di saturazione.

La portata specifica g del vapore attraverso l'elemento edilizio è ricavato da:

$$g = \delta_0 \frac{(p_i - p_e)}{s'_{d,T}}$$

dove con $s'_{d,T}$ si definisce il totale spessore equivalente dello strato:

$$s'_{d,T} = \sum_{j=1}^n s_{d,j}$$

Le relazioni consentono di definire, in un piano pressione parziale p - spessore equivalente $s_{d,j}$, la retta che collega l'interfaccia interna con quella esterna; tale retta sarà confrontata con la linea spezzata che riporta i valori della pressione di saturazione. La retta della pressione parziale di vapore non deve incrociare o superare la linea spezzata della pressione di saturazione.

L'esame delle relazioni proposte dalla norma, ribadiscono quanto ormai noto da qualsiasi buon testo di Fisica Tecnica: la presenza di strati ad elevata resistenza termica, che comportano un rilevante gradino termico e, quindi, della stessa pressione di saturazione tra le interfacce, al fine di evitare pericolo di condensa interstiziale, andrebbe posta verso il lato con temperatura media mensile più bassa.

L'aumentata prestazione dello strato di isolante in qualche modo esaspera tale situazione.

Le maggiori criticità sembrano quindi da ascrivere a pareti esterne di edifici da ristrutturare o alle coperture.

Quanto consigliato dalla norma è quindi assai opportuno: ovvero che, nelle strutture di copertura, quando è presente uno strato

di impermeabilizzazione sul lato esterno rispetto all'isolante, nel caso si adotti una barriera al vapore, è opportuno che la barriera garantisca una resistenza al passaggio del vapore superiore di almeno 5-7 volte il corrispondente valore della membrana impermeabile. La resistenza termica degli strati sottostanti la barriera al vapore non dovrebbe superare il 20% della resistenza termica globale.

La presenza di barriere al vapore, che potrebbe costituire una soluzione assai semplice, va valutata con estremo buon senso, in quanto con la loro presenza spesso si possono verificare inconvenienti, tra i quali per esempio una riduzione dell'asciugamento estivo, oppure la perdita delle caratteristiche della barriera nel tempo (necessità di certificazioni?).

Infine, nelle strutture con impermeabilizzazione sul lato esterno rispetto all'isolante, si rammenta come l'eventuale umidità presente all'atto della costruzione o dell'intervento di ristrutturazione (getti in opera) possa essere difficilmente smaltita.

Vediamo quando è possibile la condensa. Si consideri una struttura di copertura come quella di seguito proposta (Tabella 2) posta in condizioni climatiche della Zona E (Vicenza) e con produzione di vapore media (zona 3). La struttura è stata analizzata tramite un software disponibile

Tabella 2: Struttura copertura tetto piano (dall'interno all'esterno)

Descrizione	Spessore [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]	Resistenza al vapore μ [-]	Calore specifico c [J/(kg K)]	Densità ρ [kg/m ³]
Fibra legno minerale	0,035	0,07 ^	5	1180	390
Barriera vapore	0,0002	0,4	700000	1800	940
Isolante plastico	0,140	0,025	33	1458	44
Camera d'aria*	0,100	0,625*	1	1000	1,2
Strato OSB	0,015	0,13	250	1700	650
Impermeabilizzazione	0,0018	0,2	50000	1750	910

^ La conducibilità è valutata sulla base della resistenza termica dichiarata

* Il valore riportato si riferisce alla resistenza termica dello strato non ventilato secondo UNI EN ISO 6946

**I dati di conducibilità termica e di calore specifico sono presunti

gratuitamente in rete (EBA-U). Il grafico relativo al mese di Gennaio presenta formazione di condensa verificabile direttamente in Figura seguendo gli andamenti della pressione di saturazione (in blu) e della pressione parziale del vapore (in rosso).

Per poter ridurre la formazione di condensa occorre agire, in questo caso, sullo strato impermeabilizzante. La membrana impermeabilizzazione deve essere in grado di garantire una ridotta permeabilità al vapore ($\mu = 40 - 50$ al massimo, nel caso proposto), a meno di non incorrere nuovamente in problemi precedentemente evidenziati dal tetto caldo proposto.

La Figura 4 evidenzia il risultato ottenuto.

Tale sostituzione non garantisce comunque, come ben evidenziato dal testo normativo [3], il riformarsi di tali eventi né, tantomeno, risolve questioni legate al possibile profondo ammaloramento degli strati che hanno sino ad ora subito l'effetto della migrazione e, soprattutto, dell'eventuale accumulo di acqua.

Quali strutture?

Le considerazioni dei precedenti paragrafi consigliano uno studio accurato della scelta non solo della posizione e della tipologia di materiale isolante, ma anche dell'uso attento dello strato di impermeabilizzazione o della barriera al vapore, in particolare nelle coperture.

L'analisi delle proprietà dello strato di isolante (sia esso naturale o sintetico) deve essere in primo luogo completa e rigorosa, ovvero deve riguardare anche densità, calore specifico, resistenza al vapore, assorbimento all'acqua, proprietà che consentono non solo una indagine di tipo dinamico, ma anche valutazioni legate alla durata della struttura e alle manutenzioni necessarie.

La completezza di tale analisi non può che essere estesa all'in-

Figura 3: Grafico pressione – spessore per la struttura di Tabella 2 (codice on line EBA-U)

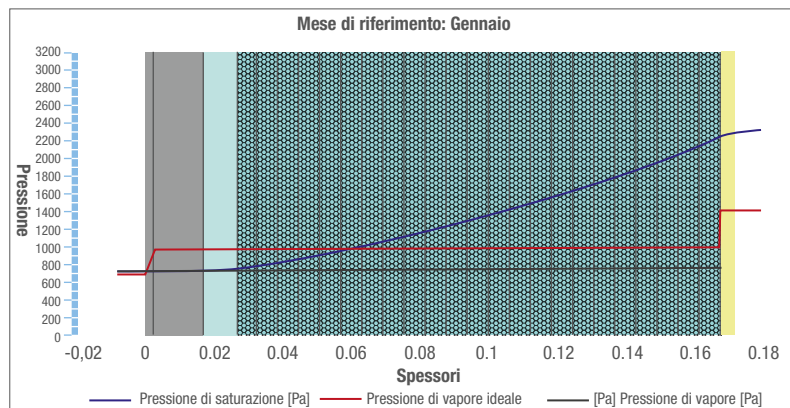
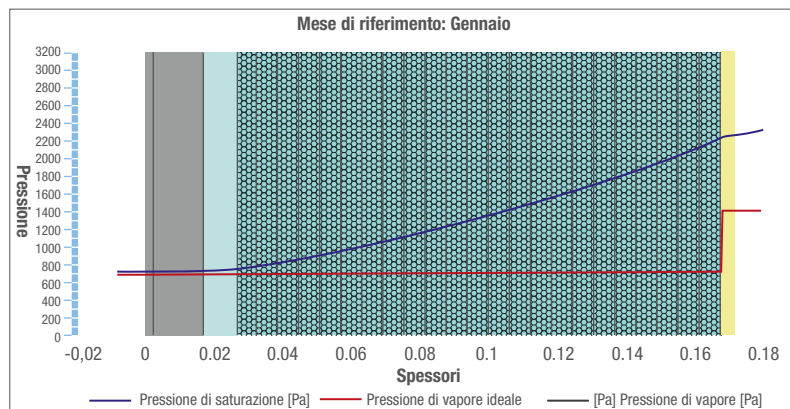


Figura 4: Grafico pressione – spessore per la struttura di Tabella 2 con membrana impermeabile modificata (codice on line EBA-U)



tera stratigrafia della struttura coinvolgendo, in particolare per l'analisi termoigrometrica, quegli elementi (barriere al vapore, membrane, etc.) estremamente significativi per la trasmissione del vapore.

Una ulteriore precisazione. Non si può scordare come la ventilazione interna, resa efficiente ed uniforme da un idoneo impianto, resti una soluzione assai valida per il controllo dei valori di umidità interna negli edifici, in particolare oggi quando le costruzioni presentano "gradi di sigillatura" che di fatto ostacolano ricambi d'aria naturali sufficienti alla realizzazione di condizioni di benessere, ovviamente in relazione alla qualità dell'aria interna.

Riferimenti

- [1] ASHRAE, Fundamentals Handbook, SI Edition, 2017 ASHRAE (USA)
- [2] TenWolde A., Walker I., Interior moisture design loads for residences, In Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings VIII, ASHRAE, 2001
- [3] UNI ISO EN 13788, 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, UNI 2013
- [4] Lstiburek J., Carmody J., Moisture Control Handbook: Principles and Practices for Residential and Small Commercial Buildings, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [5] UNI EN ISO 10211, Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati, UNI 2018
- [6] www.wufi.it
- [7] UNI EN 15026, Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, UNI 2008
- [8] Glaser H., Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis, Kältetechnik 1958; Vol. 10 (11): pp. 358-364 and (12) pp. 386-390