

La fisica della condensa e l'origine delle muffe

Alice Lorenzati, Ingegnere - C2R Energy Consulting; Ivana Mattea Lisitano, Architetto – C2R Energy Consulting

Le patologie degli edifici originate da livelli errati di umidità sono spesso responsabili di degradazioni dei componenti per l'edilizia e possono influenzare la salute e il comfort degli utenti. Le soluzioni per il trattamento di tali patologie sono spesso complesse e molte volte di implementazione difficile. Il problema è particolarmente accentuato nel caso di edifici esistenti, per i quali molte di queste patologie sono dovute a tecniche innovative e moderne combinate a materiali preesistenti, che spesso possono possedere prestazioni poco prevedibili. I meccanismi di generazione e trasporto di condensa e umidità all'interno degli edifici sono le tematiche che si intendono approfondire nel presente documento.

La comprensione del movimento dell'umidità negli edifici, negli ultimi anni, è stata oggetto di grande interesse: non sono stati indagati solo i meccanismi di movimento dell'umidità ma anche le cause del suo insorgere in fase di esercizio e/o di applicazione di nuovi materiali nei casi specifici di retrofit di edifici esistenti. In questo secondo caso, infatti, le condizioni termo-igrometriche dell'edificio cambiano a seguito dell'intervento. Allo stesso tempo vi è un crescente riconoscimento del ruolo chiave dell'umidità nella salute degli occupanti e nella "salute" del tessuto edilizio. L'approccio corretto con il quale il progettista deve pianificare gli interventi su un edificio esistente deve tener conto dei seguenti principi:

- Il rischio di umidità negli edifici si riferisce non solo al tessuto edilizio, ma anche alla salute degli occupanti (dove con "rischio di umidità" si intende la formazione di un quantitativo di umidità superiore o inferiore ai livelli consigliati).
- Considerare tutti gli stati dell'acqua: sia come gas che come solido e liquido.
- In quanto i problemi di umidità si verificano in maggior modo in giunzioni, angoli e nei luoghi del cambio di materiale, qualsiasi approccio al rischio di umidità che non tenga conto di questo, risulterebbe inadeguato.
- I rischi legati all'umidità possono derivare non solo dalle condizioni del tessuto edilizio, ma anche dalla produzione di umidità pianificata e non (legata a riscaldamento e alla ventilazione di un edificio), oppure da perdite impreviste dalle tubature.

Spesso finora il problema dell'umidità negli edifici è stato considerato secondario a quello della prestazione termica ed energetica; tuttavia il rischio di umidità è ormai diventato una preoccupazione primaria per le autorità di regolamentazione, a causa della notevole potenzialità di danno. È certo che si tratta di un argomento molto complesso, sul quale persistono molte incognite sia in termini teorici, che nella possibilità di valutarne numericamente i dati. Quando si deve intervenire su edifici esistenti, le sfide sono maggiori, a causa della necessità di una corretta valutazione del tessuto edilizio su cui ci si deve inserire e a causa delle incertezze circa le proprietà dei materiali e i metodi di costruzione.

Il movimento dell'umidità negli edifici è un fenomeno molto complesso, che si verifica sia nel tessuto edilizio quanto nell'aria, all'interno e all'esterno dell'involucro edilizio. Dipende inoltre dal movimento dell'aria e dal calore, sia internamente che esternamente, e dalle caratteristiche fisiche dei materiali e dalle modalità di

posa in opera. Molte proprietà del materiale, in particolare quelle relative al trasporto dell'umidità, sono difficili da misurare e sono note solo per un numero limitato di materiali.

I meccanismi dell'umidità

L'acqua non deve essere a una temperatura di ebollizione per esserci presenza di gas, a tutte le temperature vi possono essere molecole di vapore acqueo nell'aria, sia pure in quantità diverse e con diversi gradi di attività, a seconda delle condizioni ambientali. Tuttavia, quanto più caldo sarà l'ambiente maggiori saranno le molecole di vapore acqueo che possono essere contenute nell'aria, senza che sia raggiunto il punto di saturazione (condizioni in cui la quantità di vapore è così alta che le molecole di vapore acqueo iniziano a trasformarsi in acqua liquida).

Il rischio di umidità in un edificio è determinato da una serie di fattori tra i quali: il tipo di materiali da costruzione (il fenomeno della condensa è infatti più evidente su materiali non porosi, quali vetri, ceramiche e superfici plastiche e metalliche), il tipo di costruzione, la qualità di costruzione, l'uso dell'edificio, la sua forma e posizione. I meccanismi attuali con cui l'acqua in diversi stati si sposta, possono essere dovuti ai seguenti fattori: la diffusione del vapore come gas; il flusso di liquidi e gas attraverso i pori (la cui dimensione consente/limita il trasporto dei diversi stati di umidità, liquido o gassoso), la risalita capillare dell'acqua come liquido, il movimento dell'aria e l'assorbimento igroscopico della acqua come gas e liquido (*hygroscopic buffering*, caratteristica dei materiali autoregolatori dell'umidità).

I rischi dell'umidità

Il rischio maggiore legato all'umidità è legato a un **eccesso di umidità**:

- Alta umidità all'interno dell'edificio può promuovere la crescita di muffe, e acari sulle superfici dell'edificio, causando disagio per gli occupanti (asma e problemi respiratori, sensazione di sporco);
- La condensa interstiziale in alcune condizioni climatiche potrebbe portare a cicli di gelo e disgelo che causerebbero danni strutturali alla muratura;
- Un alto contenuto di umidità nei materiali può favorirne la marcescenza;
- La condensa superficiale può inoltre generare goccioline d'acqua che causano danni alla colorazione.

Allo stesso tempo, però, un livello molto basso di umidità può essere causa di insalubrità per gli occupanti dell'edificio e, in casi limitati, può creare problemi alla struttura stessa (rottura o instabilità).

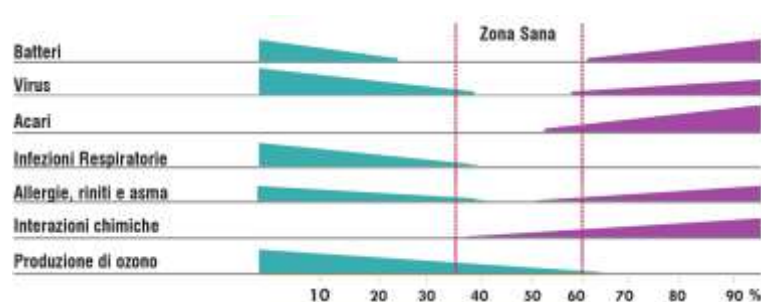


Figura 1 – Effetti e patologie riscontrabili per diversi livelli di umidità relativa dell'ambiente interno degli edifici, con individuazione della zona sana. Le barre decrescenti indicano il diminuire del problema. (Fonte: ASHRAE transaction V90 Parte 2 – 1984).

La sfida sulla valutazione dei rischi dovuti all'umidità non è quella di mantenere l'umidità fuori dall'edificio, quanto quella di raggiungere un equilibrio adatto all'edificio e ai suoi occupanti. Bisogna inoltre ricordare che

la maggior parte degli edifici, oltre al **normale livello di umidità**, sono soggetti a **eventi occasionali** come inondazioni, perdite delle tubature o guasti ai sistemi di ventilazione, per i quali è fondamentale capire se siano in grado di provocare un effetto dannoso sul tessuto edilizio e sulla salute dei suoi occupanti.

ATTENZIONE:

Livelli di umidità relativa **inferiore al 35%** possono causare agli utenti una serie di **problemi bronchiali e shock da elettricità statica**.

Con livelli di umidità relativa **superiori al 60%** **acari, batteri, virus e muffe** sono in grado di prosperare e diffondersi, e sugli utenti si possono osservare **allergie, riniti e asma**.

→ Livelli di umidità relativa al disotto del **35%** o oltre il **60%** (limiti della cosiddetta **zona sana**) possono essere considerati insalubri se mantenuti per lunghi periodi.

Le fonti di umidità in ambiente

La valutazione igrotermica di un componente non sarà accurata senza una completa e precisa descrizione di fenomeni atmosferici, delle condizioni al contorno igrometriche dovute alle eccitazioni atmosferiche e delle forze interne al componente, causate dall'umidità e dal trasferimento di calore. Spesso questi fattori sono di difficile quantificazione, ma un inserimento superficiale o un omissione di alcuni di essi potrebbe compromettere la validità dell'analisi.

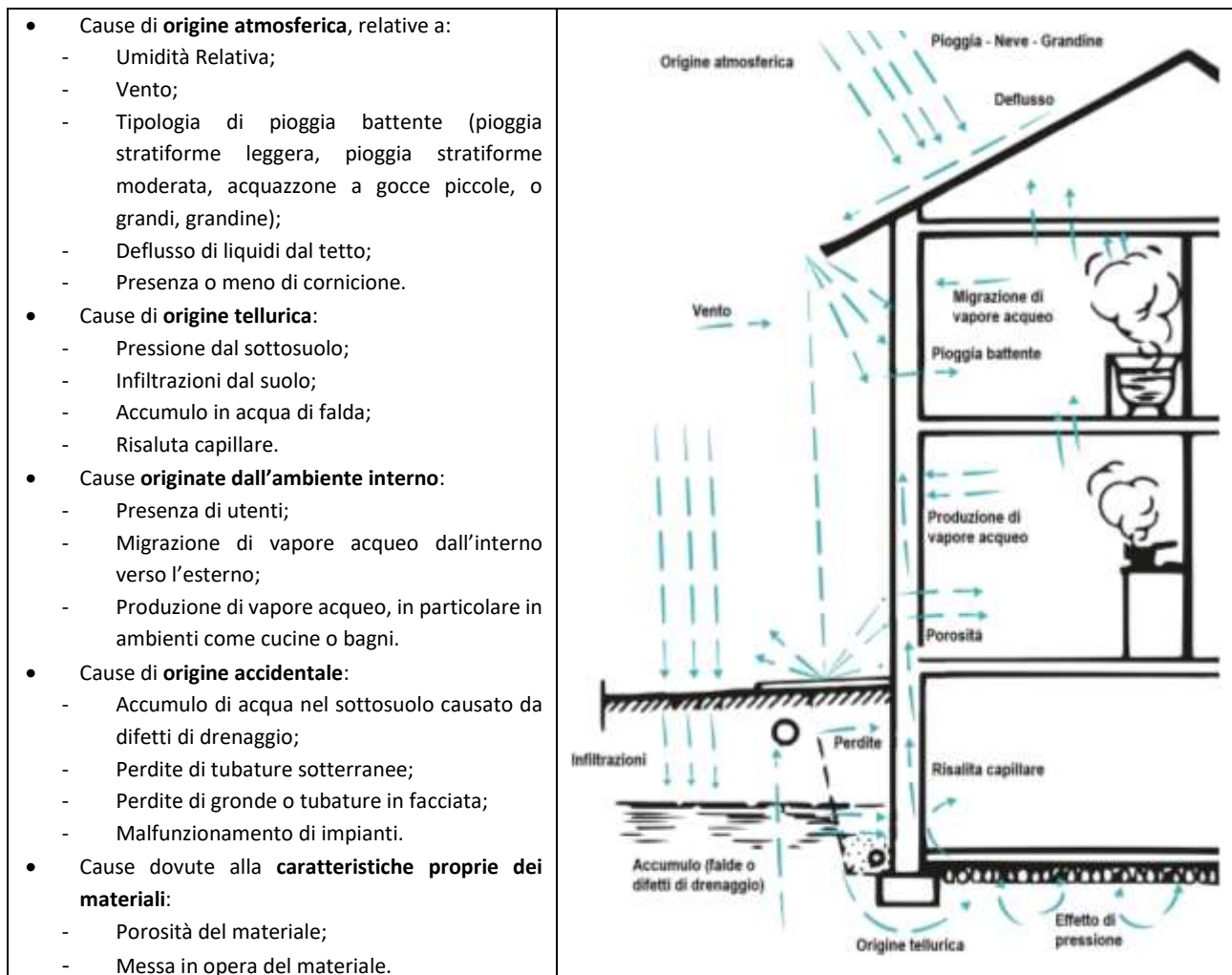


Figura 2 – Fonti di umidità in ambiente.

Nello schema precedente si è cercato di riassumere tutte le possibili cause che generalmente dovrebbero essere prese in considerazione. In alcuni casi specifici, potrebbe però verificarsi che alcune di queste siano trascurabili o che ve ne siano altre “ad hoc”.

Metodologie di modellazione di contenuto e trasporto dell’umidità

Il tema dell’umidità può essere affrontato attraverso differenti metodologie che differiscono in uso e limitazioni. Il metodo attualmente più diffuso è conosciuto come “**Metodo di Glaser**”, sviluppato nel 1950, è specificato nella **UNI EN ISO 13788:2013** “Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l’umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo”. Tuttavia, Glaser ignora diversi fattori importanti, compreso il trasporto dell’umidità allo stato liquido, la variazione giornaliera della temperatura, l’impatto della pioggia battente, il contributo dell’acqua contenuta nel terreno, l’umidità di costruzione, il trasporto di vapore nelle intercapedini e nelle cavità, il guadagno solare sulla superficie esterna, lo scambio di calore latente, e l’ampia variazione delle proprietà dei materiali in base al contenuto di umidità. Di conseguenza il metodo non risulta applicabile per particolari strutture nelle quali questi effetti non siano trascurabili.

Nel corso degli anni sono stati elaborati metodi più complessi e software di calcolo per valutazioni termoigrometriche più approfondite in **regime dinamico** (normate dalla **UNI EN 15026:2008** “Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica”). Per questo tipo di analisi è però richiesto un grande numero di proprietà dei materiali, che spesso possono variare in funzione della temperatura e del contenuto di umidità: densità, porosità, calore specifico, conducibilità termica, coefficiente di diffusione al vapore, ed fino ad arrivare all’umidità di stoccaggio.

Nel presente articolo ci si concentrerà su una trattazione di tipo **stazionario** della verifica termo-igrometrica in edilizia (**UNI EN ISO 13788:2013**).

La diffusione del vapore all’interno di una parete: la Legge di Fick

La quantità di vapore acqueo (in termini di **portata in massa**, G [kg/s]) che si diffonde all’interno di un materiale poroso lungo una determinata direzione è direttamente proporzionale alla differenza di pressione parziale del vapore tra le due superfici (1 e 2) del materiale, e l’area della superficie stessa (perpendicolare alla direzione di diffusione del vapore). Per **pressione parziale di vapore acqueo** (p_v [Pa]) si intende la pressione esercitata dalle molecole di vapore contenute in una massa d’aria. La proporzionalità è definita dalla **resistenza alla diffusione del vapore acqueo** del materiale (R_v [m²sPa/kg]), la quale dipende a sua volta dalla **permeabilità al vapore acqueo** del materiale (δ [kg/msPa]) e dal suo spessore (s [m]):

$$G = \frac{\delta}{s} \cdot (p_{v1} - p_{v2}) \cdot A = \frac{(p_{v1} - p_{v2}) \cdot A}{R_v}$$

Da cui si evince che:

$$R_v = \frac{s}{\delta}$$

Si può quindi ricavare la **Legge di Fick** per elementi di involucro **monostrato**:

$$\frac{G}{A} = \frac{(p_{v1} - p_{v2})}{R_v}$$

Nel caso di componenti di involucro **multistrato**, entra in gioco il concetto di **permeanza** della componente di involucro (M [$\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$]):

$$M = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \sum_{j=1}^n \frac{S_j}{\delta_j} + \frac{1}{\beta_e}}$$

I coefficienti β_i e β_e , ovvero i coefficienti di adduzione superficiale del vapore rispettivamente interno ed esterno, si possono assumere pari ad infinito, di conseguenza il calcolo della permeanza si riduce a:

$$M = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{\delta_j}} = \frac{1}{R_{v,tot}}$$

Dove $R_{v,tot}$ è la resistenza alla diffusione del vapore acqueo dell'intera componente di involucro.

Si definiscono inoltre altre due proprietà termoigrometriche dei materiali:

- Il **coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore** (μ [-]), dato dal rapporto tra la R_v dello strato di materiale e la resistenza di uno strato di aria di pari spessore (per barriere al vapore si assume pari a $100'000$):

$$\mu = \frac{R_{v,materiale}}{R_{v,aria}} = \frac{\delta_{materiale}}{\delta_{aria}} \quad \text{Con } \delta_{aria} = 192 \cdot 10^{-12} \text{ kg/msPa}$$

- Lo **spessore d'aria equivalente** (S_d [m]), ovvero lo spessore di uno strato di aria di resistenza uguale a quella dello strato di materiale considerato di spessore s [m]:

$$S_d = \mu \cdot s$$

La fisica della condensa: UNI EN ISO 13788:2013

Per dare una definizione di **condensa**, questa si definisce come quel fenomeno fisico che si verifica quando il vapore acqueo e una superficie fredda entrano in contatto. L'aria è composta da una miscela di elementi chimici e di vapore acqueo (si parla infatti di **aria umida**), generato a seguito dell'evaporazione dell'acqua presente in ambiente. L'aria è in grado di assorbire vapore acqueo fino a diventare satura (aumentando anche il suo volume e il suo peso specifico). Maggiore è la temperatura maggiore è la capacità dell'aria di assorbire vapore (si evidenzia infatti che 1 m^3 di aria in condizioni di saturazione al livello del mare, contiene circa 4 g di acqua a 0°C , 18 g a 20°C , 55 g a 40°C fino a raggiungere quasi 95 g a 50°C). Quando si raffredda, il volume dell'aria si riduce e di conseguenza il vapore viene espulso: se il raffreddamento avviene in modo molto rapido (ad esempio tramite il contatto con una superficie fredda), il vapore espulso condensa e si trasforma in gocce d'acqua, o rugiada. La temperatura a cui avviene la formazione di queste gocce è denominata **temperatura di rugiada**, la quale dipende sia dalla temperatura dell'aria interna (ϑ_{ai} [$^\circ\text{C}$]) che dalla sua umidità relativa (φ_{ai} [%]).

L'obiettivo progettuale primario per evitare problemi di condensa, con conseguente formazione di muffa, è quindi quello di individuare il giusto equilibrio tra temperatura e umidità dell'ambiente interno, ventilando

inoltre l'ambiente in maniera corretta. A tal fine, la scelta dei materiali porta con se problematiche che devono essere prese in considerazione. Ad esempio, l'utilizzo di materiali isolanti non traspiranti (o quasi impermeabilizzati come polistirene espanso o estruso e poliuretano) veicolano la condensa all'interno delle strutture, mentre quelli traspiranti (come lane minerali o fibre di legno) assorbono l'acqua, perdendo le prestazioni energetiche nel tempo e imbibendo la parete. Anche la posizione del materiale isolante ha effetti sulle prestazioni finali dell'edificio in termini di condensa. La presenza di materiale isolante posto sulla superficie interna della parete scherma fin da subito il trasferimento di calore per conduzione nei diversi strati della parete, portando all'aumento delle temperature superficiali e dell'aria interna e mantenendo costante la temperatura media radiante, con conseguenti benefici per il benessere termico degli utenti. Contemporaneamente, però, l'isolamento dall'interno porta a una sensibile riduzione delle temperature dei diversi strati che compongono l'involucro edilizio, con conseguente aumento del rischio di condensa interstiziale (ovvero condensa interna all'involucro). Si osserva inoltre un raffreddamento più rapido del locale per effetto dell'assenza di massa termica del lato più interno della parete nel momento in cui si spegne il riscaldamento: l'isolante infatti non trattiene il calore per poi rilasciarlo lentamente come farebbe una muratura tradizionale. In fine, la discontinuità del materiale isolante crea dei punti freddi in cui si può avere condensa superficiale o rischi di muffa.

In edilizia, quindi, bisogna porre attenzione a **due tipologie di condensa: la condensa superficiale e quella interstiziale**.

La norma **UNI EN ISO 13788:2013** specifica le procedure per il **calcolo, in regime stazionario, del rischio di condensa superficiale, interstiziale, e di formazione delle muffe**, sulla base di alcune importanti ipotesi:

- Il trasporto di umidità considerato è da sola **diffusione del vapore**;
- **Non** vi è alcun stoccaggio di umidità all'interno dei componenti;
- I **materiali** sono considerati **omogenei e isotropi**;
- Le **proprietà di trasporto di umidità dei materiali non sono influenzati dal loro contenuto di umidità**;
- Le **condizioni interne ed esterne** sono considerate **costanti per il mese**.

Si trascurano inoltre le variazioni di conduttività e trasmittanza in funzione del contenuto di umidità.

Il metodo presenta però alcuni vantaggi, che lo rendono ancora il metodo più diffuso per la maggior parte delle applicazioni (che non richiedono analisi più approfondite), tra i quali:

- La semplicità di calcolo;
- La semplicità di reperimento dei dati relativi alle proprietà dei materiali necessari;
- La semplicità di interpretazione dei risultati.

Dati necessari per il calcolo

La norma **UNI EN ISO 13788:2013** fornisce innanzitutto i dati e le condizioni al contorno che devono essere utilizzati nei calcoli:

- **Proprietà dei materiali:** utilizzare i valori di progetto riportati sulle specifiche di prodotto o allegati a normative vigenti (conducibilità termica e permeabilità dei materiali omogenei riportati nella UNI 10351:2015, resistenza termica di murature e solai indicata nella norma UNI 10355:1994).
- **Temperatura esterna:** per l'aria esterna (ϑ_{ae} [°C]) devono essere usati i valori medi mensili (UNI 10349-1:2016); per il terreno devono essere usati i valori annuali medi della temperatura dell'aria esterna.

- **Pressione di vapore esterna** ($p_{v,e}$ [Pa]): per l'aria esterna devono essere usati i valori medi mensili. Se tuttavia si conosce il valore medio mensile dell'umidità relativa (φ_{ae} [%]), il valore medio della pressione di vapore si può ottenere come:

$$p_{ve} = \varphi_{ae} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ae})$$

Per il terreno si assume l'umidità relativa pari al 100%.

- **Temperatura aria interna** (ϑ_{ai} [°C]): i valori dipendono dall'uso specifico dell'edificio. Per edifici destinati ad abitazione:

- $\vartheta_{ai} = 20$ °C nei mesi in cui è in funzione l'impianto di riscaldamento
- $\vartheta_{ai} = 18$ °C nei mesi in cui l'impianto di riscaldamento non è in funzione ma la temperatura esterna media mensile è < 18 °C
- $\vartheta_{ai} = \vartheta_{ae}$ nei mesi in cui la temperatura esterna media mensile è ≥ 18 °C.

- **Pressione di vapore interna** ($p_{v,i}$ [Pa]):

- Se l'umidità relativa è nota (presenza di impianto di condizionamento), vale la stessa formula della pressione di vapore esterna, con l'aggiunta di un fattore di sicurezza pari a 0,05:

$$p_{vi} = (\varphi_{ai} + 0,05) \cdot p_{vs}(\vartheta_{ai})$$

- Negli altri casi:

$$p_{vi} = p_{ve} + \Delta p_v \cdot 1,10$$

Dove

Dove Δp_v è la differenza di pressione parziale del vapore ($p_{vi} - p_{ve}$ [Pa]) e dipende dalla destinazione d'uso dell'edificio e dalla temperatura media mensile dell'aria esterna (valori riportati all'interno della norma), mentre 1,10 è di nuovo un fattore di sicurezza.

- **Resistenze superficiali:** per la valutazione del **rischio di crescita muffe e della condensazione interstiziale** si devono utilizzare i seguenti valori di resistenza termica superficiale interna ed esterna (rispettivamente R_{si} e R_{se} [m^2K/W]):

- Resistenza termica superficiale esterna $R_{se} = 0,04$ m^2K/W ;
- Resistenza termica superficiale interna per **vetri e telai** $R_{si} = 0,13$ m^2K/W ;
- Resistenza termica superficiale interna per **tutte le altre superfici interne** $R_{si} = 0,25$ m^2K/W (valore che corrisponde al caso più sfavorevole di rischio di condensazione in un angolo).

ATTENZIONE:

Per i **componenti di involucro opaco** il valore di R_{si} da utilizzare per la verifica alla condensa è diverso da quello utilizzato per il calcolo della trasmittanza termica (pari a 0,13 m^2K/W per flussi termici orizzontali).

Per approfondire: [Analisi dei ponti termici agli elementi finiti \(FEM\): procedura ed esempi di calcolo \(ingenio-web.it\)](http://ingenio-web.it)

Verifica condensa superficiale

Si ha formazione di **condensa superficiale** quando la **temperatura di una qualsiasi superficie** (ϑ_{si} [°C]) **dell'involucro di un ambiente risulta inferiore o uguale alla temperatura di rugiada dell'aria in esso contenuta.**

La temperatura di rugiada (ϑ_{ru} [°C]) è facilmente ricavabile tramite l'utilizzo del **Diagramma di Mollier** (Figura 3).

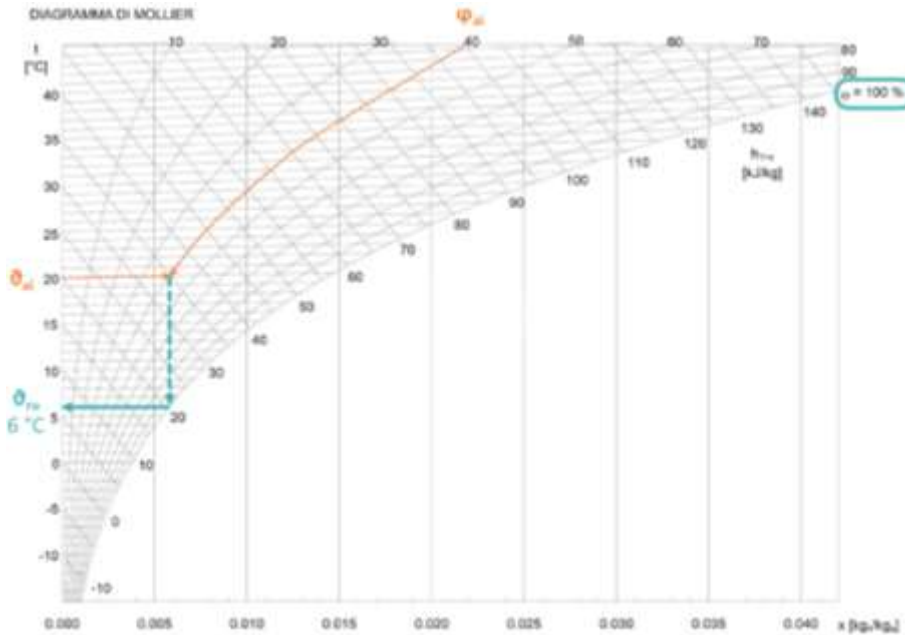


Figura 3 – Diagramma di Mollier con individuazione della temperatura di rugiada per tipiche condizioni di comfort ($\vartheta_{ai} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_{ai} = 40 \%$): si osserveranno fenomeni di condensa a partire da una temperatura di $6 \text{ }^\circ\text{C}$.

In alternativa è possibile ricorrere al **calcolo analitico della temperatura di rugiada**, nota l'umidità assoluta dell'aria interna (x_i [kg_v/kg_a], definita come il rapporto tra la massa di vapore e la massa di aria secca presenti in ambiente). In questo caso, si deve calcolare la **pressione del vapore a saturazione** alla temperatura di rugiada (p_{vs} [Pa]), ovvero la pressione esercitata dalle molecole di vapore in condizioni di massima concentrazione consentita dalla temperatura della massa di aria (come precedentemente detto, infatti, quanto più elevata è la temperatura tanto maggiore è la quantità di vapore che può essere contenuto nell'aria umida, e quindi tanto maggiore è la p_{vs} della miscela di aria umida).

$$p_{vs}(\vartheta_{ru}) = \frac{p_{atm} \cdot x_i}{0,622 + x_i}$$

In cui p_{atm} è il valore della pressione atmosferica (101325 Pa), e x_i , qualora non fosse noto, è ricavabile conoscendo temperatura e umidità relativa dell'aria interna:

$$x_i = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{ai} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ai})}{p_{atm} - \varphi_{ai} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ai})}$$

I valori delle pressioni di saturazione sono tabellati in funzione della temperatura (Figura 4), e sono correlabili alla **pressione parziale di vapore acqueo** (p_v [Pa]) tramite le relazioni scritte in precedenza:

$$p_{ve} = \varphi_{ae} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ae})$$

$$p_{vi} = (\varphi_{ai} + 0,05) \cdot p_{vs}(\vartheta_{ai})$$

pressione di saturazione in funzione della temperatura (Pa)

θ in °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	4241	4265	4289	4314	4339	4364	4389	4414	4439	4464
29	4003	4026	4050	4073	4097	4120	4144	4168	4192	4216
28	3778	3800	3822	3844	3867	3889	3912	3934	3957	3980
27	3563	3584	3605	3626	3648	3669	3691	3712	3734	3756
26	3359	3379	3399	3419	3440	3460	3480	3501	3522	3542
25	3166	3185	3204	3223	3242	3261	3281	3300	3320	3340
24	2982	3000	3018	3036	3055	3073	3091	3110	3128	3147
23	2808	2825	2842	2859	2876	2894	2911	2929	2947	2964
22	2642	2659	2675	2691	2708	2724	2741	2757	2774	2791
21	2486	2501	2516	2532	2547	2563	2579	2594	2610	2626
20	2337	2351	2366	2381	2395	2410	2425	2440	2455	2470
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
...										
10	1227	1236	1244	1252	1261	1269	1278	1286	1295	1303
9	1147	1155	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1219
8	1072	1080	1087	1094	1102	1109	1117	1124	1132	1140
7	1001	1008	1015	1022	1029	1036	1043	1050	1058	1065
6	935	941	948	954	961	967	974	981	988	994
5	872	878	884	890	897	903	909	915	922	928
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
...										
-10	259	262	264	266	269	271	274	276	278	281
-11	237	239	241	244	246	248	250	252	255	257
-12	217	219	221	223	225	227	229	231	233	235
-13	198	200	202	203	205	207	209	211	213	215
-14	181	182	184	186	187	189	191	193	194	196
-15	165	166	168	169	171	173	174	176	177	179

Figura 4 – Estratto di tabella delle pressioni di saturazione. Si evidenziano i valori relativi a $\vartheta_{ai} = 20$ °C e $\vartheta_{ru} = 6$ °C (in questo secondo caso, valore di p_{vs} calcolato).

Il Diagramma di Mollier consente inoltre di visualizzare immediatamente l'effetto della variazione di temperatura (ϑ_{ai} [°C]) e umidità relativa (φ_{ai} [%]) dell'aria interna sul valore della temperatura di condensa: supponendo di mantenere costante una grandezza tra ϑ_{ai} e φ_{ai} e aumentando l'altra grandezza, si genera un aumento della ϑ_{ru} . Ciò significa che l'aria in ambiente condenserà prima, ovvero con temperature più alte.

La temperatura superficiale interna (ϑ_{si} [°C]) è calcolabile nota la trasmittanza del componente di involucro (U [W/m²K]), il coefficiente di scambio termico superficiale interno (h_i [W/m²K]) e le temperature dell'aria interna ed esterna (quest'ultima denominata ϑ_{ae} [°C]):

$$\vartheta_{si} = \vartheta_{ai} - \frac{U}{h_i} \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae})$$

VERIFICA TERMOIGROMETRICA SUPERFICIALE

In termini di **temperatura:**

- $\vartheta_{si} \leq \vartheta_{ru} \rightarrow$ **Condensa superficiale**
- $\vartheta_{si} > \vartheta_{ru} \rightarrow$ **NO condensa superficiale**
- $\vartheta_{si} > \vartheta_{ru} + 1 - 2$ °C \rightarrow **Favore di sicurezza.**

In termini di **pressioni parziali:**

- $p_{v,i} \geq p_{vs}(\vartheta_{si}) \rightarrow$ **Condensa superficiale**
- $p_{v,i} < p_{vs}(\vartheta_{si}) \rightarrow$ **NO condensa superficiale**
- $p_{v,i} < 0,8 \cdot p_{vs}(\vartheta_{si}) \rightarrow$ **Favore di sicurezza.**

Nel caso in cui si verifichi condensa superficiale si può valutare la **resistenza termica addizionale** (R_a [m²K/W]) necessaria per risolvere il problema, assumendo la condizione limite $\vartheta_{si} = \vartheta_{ru}$. In questo modo è possibile determinare il valore della **trasmittanza termica massima ammissibile** (U_{max} [W/m²K]):

$$U_{max} = \frac{\vartheta_{ai} - \vartheta_{ru}}{\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}} \cdot h_i$$

Da cui:

$$R_a = \frac{1}{U_{max}} - \frac{1}{U}$$

Siccome la condensa superficiale dipende anche dalla produzione di vapore acqueo in ambiente, potrebbe capitare che, pur diminuendo la trasmittanza termica il fenomeno di condensazione superficiale rimanga, a causa di una **elevata produzione di vapore acqueo associata a scarsa ventilazione degli ambienti**.

Verifica formazione muffe

Per evitare il rischio di formazione di muffe si rende necessario che l'umidità relativa superficiale non superi l'80 % per periodi di tempo prolungati. (o il 60 % per evitare fenomeni di corrosione). A tal fine, la norma **UNI EN ISO 13788:2013** aggiunge una verifica rispetto al solo confronto tra temperatura superficiale e temperatura di rugiada, introducendo il concetto di qualità termica del componente edilizio.

La **qualità termica** del componente edilizio è definita dal **fattore di temperatura sulla superficie interna** (f_{Rsi} [-]):

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_{ae}}{\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}} = \frac{R - R_{si}}{R}$$

In cui R [m^2K/W] è la resistenza termica del componente edilizio, mentre R_{si} [m^2K/W] è la resistenza termica superficiale interna, definita in precedenza.

Per ogni mese è possibile definire una **qualità termica di progetto** richiesta, pari al **valore minimo** che f_{Rsi} dovrebbe avere per evitare il rischio di muffe.

$$f_{Rsi,min} = \frac{\vartheta_{si,min} - \vartheta_{ae}}{\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}}$$

Dove $\vartheta_{si,min}$ è ricavato dalla tabella delle pressioni parziali di saturazione, noto che:

$$p_{vs}(\vartheta_{si}) = \frac{p_{vi}}{\varphi_{ai,max}} = \frac{p_{vi}}{0,8}$$

Definito **mese critico il mese con il più alto valore di progetto di $f_{Rsi,min}$** , si indica il fattore di temperatura di questo mese come $f_{Rsi,max}$: occorre verificare che la qualità termica del componente edilizio f_{Rsi} sia sempre maggiore di $f_{Rsi,max}$, o al più uguale.

$$f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$$

$$R \geq \frac{R_{si}}{1 - f_{Rsi,max}}$$

Verifica condensa interstiziale

Per la verifica della condensazione interstiziale del vapore acqueo all'interno delle strutture dell'involucro edilizio si richiede che in tutti i punti si abbia una **pressione parziale di vapore minore della pressione parziale di saturazione**: $p_v < p_{vs}$.

È quindi necessario confrontare i due profili della pressione di vapore e della pressione di saturazione, in cui le pressioni in ogni singolo stato sono definite con:

Profilo della pressione di vapore

$$p_{v,j} = p_{vi} - M \cdot (p_{vi} - p_{ve}) \cdot \sum_{j=1}^n R_{v,j}$$

Con $p_{ve} = \varphi_{ae} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ae})$ e $p_{vi} = \varphi_{ai} \cdot p_{vs}(\vartheta_{ai})$

In cui $p_{v,j}$ [Pa] è la pressione di vapore nello strato j-esimo, $R_{v,j}$ [sm²Pa/kg] è la resistenza al vapore dello strato j-esimo, e n è il numero di strati.

Profilo della pressione di saturazione

$$\vartheta_j = \vartheta_{ai} - U \cdot (\vartheta_{ai} - \vartheta_{ae}) \cdot \left(\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n R_j \right)$$

$p_{vs,j} = f(\vartheta_j)$ ricavabile da tabella

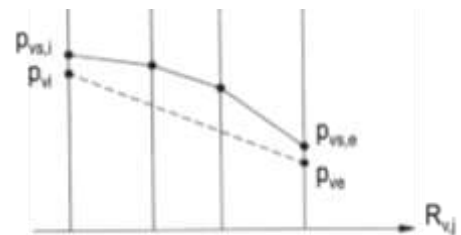
In cui ϑ_j [°C] è la temperatura dello strato j-esimo e R_j [m²K/W] è la resistenza termica dello strato j-esimo.

Per verificare se all'interno di un componente di involucro opaco avvenga il fenomeno della condensa interstiziale, si può ricorrere ad un **procedimento grafico (detto Metodo di Glaser)**. In un diagramma in cui si riporti in ascissa la resistenza al vapore e in ordinata la pressione parziale l'andamento della pressione parziale è rappresentato da una retta. Questa proprietà vale anche del caso di un diagramma con in ascissa una grandezza proporzionale alla resistenza, come lo spessore di aria equivalente S_d .

Confrontando quindi il profilo di pressione di saturazione con il profilo di pressione parziale (essendo una retta è sufficiente conoscere p_{vi} e p_{ve}), si possono riscontrare i seguenti tre casi:

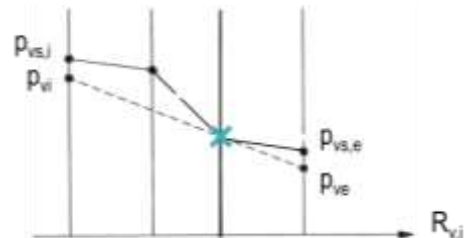
1. Gli andamenti della pressione di saturazione e della pressione di vapore non si intersecano mai, la pressione di vapore rimane ovunque al di sotto della pressione di saturazione:

NON CONDENSA



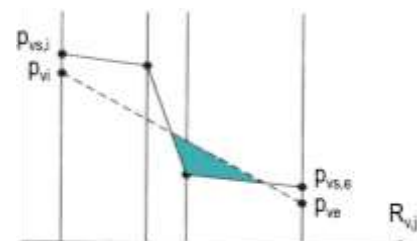
2. L'andamento della pressione di vapore raggiunge in un solo punto quello della pressione di saturazione: in tal caso si verifica la condensa solo sulla superficie verticale isoterma passante per quel punto:

CONDIZIONE LIMITE



3. Gli andamenti della pressione di saturazione e della pressione di vapore si intersecano in due punti e nella zona compresa fra essi la pressione risulta "maggiore" di quella di saturazione: in questo caso si avrà condensa all'interno della parete nella zona di intersezione:

CONDENSA



Per evitare la formazione di condensa interstiziale è quindi necessario mantenere basso il profilo della pressione di vapore (direttamente correlato alle resistenze al vapore dei singoli strati), e allo stesso tempo mantenere alto il profilo della pressione di saturazione (direttamente correlato all'andamento delle temperatura e di conseguenza alle resistenze termiche dei singoli strati). A livello progettuale bisogna quindi seguire i due criteri seguenti:

- **Strati con resistenza al vapore decrescente dall'interno verso l'esterno;**
- **Strati con resistenza termica crescente dall'interno verso l'esterno.**

La norma **UNI EN ISO 13788:2013** specifica inoltre che il calcolo deve essere effettuato su base mensile, e che deve essere verificata una delle condizioni seguenti:

- **Non si verifica condensazione in alcun mese;**
- **La condensa accumulata in ogni interfaccia evapora completamente durante i mesi estivi:** $m_{evap} \geq m_{cond}$.

È tuttavia ammessa una certa quantità limite di condensa presente in un elemento alla fine del periodo di condensazione, in funzione del tipo di materiale (valori da produttori o ricavabili dalla seguente tabella):

Materiale	Densità [kg/m ³]	Q _{amm} [g/m ²]
Laterizi	600 - 2 000	≤ 500
Calcestruzzi	400 - 2 400	≤ 500
Legnami e derivati	500 - 800	≤ 30 ρ d
Intonaci e malte	600 - 2 000	≤ 30 ρ d
Fibre di natura organica: con collanti resistenti all'acqua	300 - 700	≤ 20 ρ d
con collanti non resistenti all'acqua	300 - 700	≤ 5 ρ d
Fibre minerali	10 - 150	≤ 5 000 ρ s [λ/(1 - 1,7λ)]
Materie plastiche cellulari	10 - 80	≤ 5 000 ρ s [λ/(1 - 1,7λ)]

Nota: lo spessore s è espresso in [m] e la densità ρ in [kg/m³].

Tuttavia, la quantità di condensa non può mai superare i 500 g/m², e tutta la condensa che si è formata all'interno di un elemento alla fine della stagione di riscaldamento dovrà sempre evaporare prima che inizi la stagione di riscaldamento successiva.

Le quantità di vapore condensato ed evaporato si possono calcolare come:

$$m_{cond} = \left(\frac{p_{vi} - p_v^*}{R_v^*} - \frac{p_v^* - p_{ve}}{R_{v,tot} - R_v^*} \right) \cdot d_{cond} \cdot 24 \cdot 3600 \quad [kg/m^2]$$

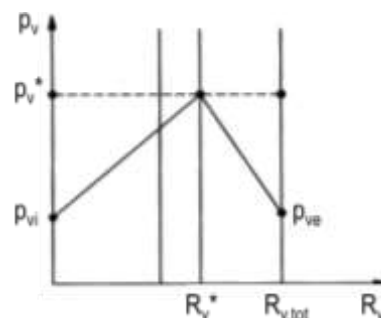
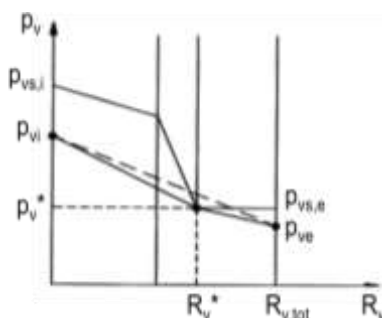
$$m_{evap} = \left(\frac{p_s^* - p_{vi}}{R_v^*} + \frac{p_s^* - p_{ve}}{R_{v,tot} - R_v^*} \right) \cdot d_{evap} \cdot 24 \cdot 3600 \quad [kg/m^2]$$

p_{vi}^* e R_v^* = coordinate del punto in cui i profili della pressione di vapore e della pressione di saturazione sono tangenti (interfaccia di condensazione)

d_{cond} = giorni del periodo di condensazione

p_s^* e R_v^* = coordinate del punto in cui i profili della pressione di vapore e della pressione di saturazione sono tangenti (interfaccia di evaporazione)

d_{evap} = giorni del periodo di evaporazione



Nel caso non si riesca ad intervenire attraverso una corretta successione stratigrafica, il metodo più diretto per evitare fenomeni di condensazione interstiziale risulta essere l'inserimento di strati di barriera al vapore

(bitume, carta bitumata, sottili fogli di alluminio o cloruro di polivinile o di polietilene...) sul lato caldo dell'isolante. La scelta di utilizzare una barriera al vapore deve comunque essere sempre valutata attentamente, inquanto potrebbe comportare inconvenienti, quali ad esempio la riduzione dell'evaporazione nel periodo estivo. Eventualmente si può ricorrere a materiali con funzione di freno al vapore, cioè impermeabili all'acqua ma con un minimo di permeabilità al vapore acqueo.

ATTENZIONE:

Se dai calcoli di verifica in fase di progetto la quantità di vapore acqueo di condensazione durante il periodo invernale risulta ammissibile, si sconsiglia l'inserimento della barriera al vapore.