

CAPITOLO 10

PROBLEMI IGROMETRICI DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

10.1 Generalità

Il contenimento del consumo di energia primaria nel settore edilizio può facilitare, in carenza di un accurato studio preventivo dell'involucro edilizio, fenomeni quali:

- crescita di colonie fungine e/o presenza di condensa sulla superficie interna dell'involucro edilizio;
- formazione di condensa all'interno delle strutture periferiche (pareti perimetrali, coperture, etc).

A questi fenomeni può conseguire il danneggiamento di rivestimenti, riduzione del grado di isolamento termico dell'involucro, migrazione di sali e formazione di efflorescenze.

Le origini di questi fenomeni sono dovute a:

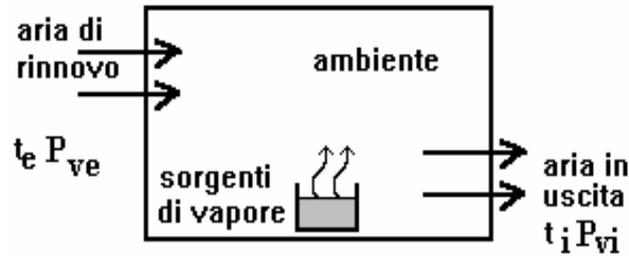
- elevati valori di umidità relativa o condensazione del vapore sul lato interno dell'involucro edilizio (**fenomeni di superficie**);
- condensazione interstiziale del vapore all'interno delle strutture perimetrali (**fenomeni interstiziali**).

La legislazione sul contenimento dei consumi energetici per il riscaldamento invernale (vedi capitolo 9) richiede espressamente la verifica termoigrometrica delle strutture perimetrali (norma UNI EN ISO 13788 "Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale"). Nella verifica non si prendono in considerazione altre problematiche igrometriche quali la *risalita capillare d'acqua* nei muri, la *tenuta all'acqua meteorica*, etc.

10.2 Bilancio igrometrico invernale di un ambiente

Si consideri un ambiente (volume V) ove la temperatura interna $t_i > t_e$ sia controllata da un impianto di riscaldamento. Si supponga che attraverso i serramenti si attui un rinnovo d'aria n [1/h]. All'interno del locale operano sorgenti di vapore

(persone, cottura cibi, asciugatura panni, ecc) per una complessiva produzione di vapore g_v [kg/h].



Ipotizzando, per semplicità, condizioni stazionarie il bilancio di massa del vapore comporta:

$$\frac{dx_a}{d\tau} = 0$$

$$\sum_i g_{vi} = 0$$

ove con g_{vi} si sono indicate le i portate di vapore in gioco.

Nella seguente tabella sono riportati, a titolo indicativo, valori medi di g_v in funzione del numero di persone presenti in un appartamento.

Persone	Generazione media oraria di vapore [kg/h]
1	0.25
2	0.33
3	0.42
4	0.50
5	0.57
6	0.63

In assenza di fenomeni di condensazione la **portata di vapore uscente** dal locale con l'aria di rinnovo dovrà risultare pari alla somma della **portata entrante** e della g_v prodotta dalle sorgenti interne, si può scrivere:

$$nV\rho_{vi} = nV\rho_{ve} + g_v \Rightarrow \rho_{vi} - \rho_{ve} = \frac{g_v}{n \cdot V}$$

ρ_{vi} = densità del vapore nell'aria interna [kg/m³];

ρ_{ve} = densità del vapore nell'aria esterna [kg/m³].

Questa relazione se si fa riferimento a valori medi mensili di ρ_{vi} , ρ_{ve} , g_v ed n risulta sufficientemente approssimata nella pratica. In base all'equazione di stato dei gas

perfetti ($P_v \cdot \frac{1}{\rho_v} = R_v \cdot T$), risulta:

$$P_{vi} = \rho_{vi} \cdot R_v \cdot T_i \qquad P_{ve} = \rho_{ve} \cdot R_v \cdot T_e$$

$$\rho_{vi} - \rho_{ve} = \frac{P_{vi}}{R_v \cdot T_i} - \frac{P_{ve}}{R_v \cdot T_e} = \frac{g_v}{n \cdot V}$$

Poiché si può porre:

$$R_v \cdot T_i \cong R_v \cdot T_e \qquad (R_v = 460 \text{ [J/kg K]}),$$

si può anche scrivere:

$$P_{vi} - P_{ve} \cong \frac{g_v \cdot R_v \cdot (t_i + 273)}{n \cdot V}$$

Si può osservare che la differenza ($P_{vi} - P_{ve}$) è direttamente proporzionale al rapporto g_v / V (produzione interna di vapore per unità di volume) e inversamente al rinnovo di aria n . Come si vedrà al crescere della differenza ($P_{vi} - P_{ve}$) aumenta pure la sollecitazione igrometrica e il rischio di danni. Nella stagione invernale quindi la messa in opera di **serramenti a tenuta pressoché ermetica in ambienti piccoli occupati da molte persone** risulta particolarmente insidiosa.

Nelle altre stagioni, invece, una più frequente apertura dei serramenti determinerà un rinnovo d'aria n assai maggiore e ridurrà quindi il rischio igrometrico ($P_{vi} \cong P_{ve}$).

10.3 Fenomeni di superficie

I fenomeni di superficie consistono sostanzialmente nella *proliferazione di colonie fungine* e, nei casi estremi, anche nella condensazione d'acqua sulla superficie interna dell'involucro. A parità di altri fattori, la germinazione e lo sviluppo delle spore fungine su supporti porosi (su vetri, superfici in plastica e/o metalli la natura del supporto non consente germinazione ma solo condensazione) risulta tanto più rapida quanto più elevata è l'umidità relativa dell'aria locale. L'esperienza dimostra che per evitare il fenomeno è necessario non superare, a contatto della **superficie** dell'involucro edilizio, un **valore medio mensile di umidità relativa** dell'aria $i_m = 0.80$ e cioè dovrà essere:

$$P_{vi} \leq 0.8 P'_{si},$$

ove: P'_{si} = pressione di saturazione alla temperatura superficiale media mensile t_{pi} .

Pertanto la verifica andrà effettuata su base mensile al fine di garantire il rispetto di questa condizione in tutti i mesi dell'anno. Il calcolo della t_{pi} mensile è assai semplice nel caso di strutture piane (conduzione termica monodimensionale) per le

quali è immediato l'intervento correttivo necessario (riduzione della trasmittanza termica).

Ad esempio, si consideri una parete perimetrale di trasmittanza K . Il flusso termico trasmesso è esprimibile sia sotto la forma $\varphi' = K (t_i - t_e)$ sia sotto la forma $\varphi' = \alpha_i (t_i - t_{pi})$. Uguagliando le due espressioni si ottiene:

$$K = \alpha_i (t_i - t_{pi}) / (t_i - t_e)$$

Essendo t_i prefissata i valori medi mensili t_{pi} si ottengono con questa espressione mese per mese in relazione alle temperature esterne medie mensili t_e della località.

Per stimare poi le P_{vi} medie mensili, note le medie P_{ve} della zona si può ricorrere a tabelle che forniscono direttamente la differenza $(P_{vi} - P_{ve})$ in relazione al tipo di utenza (classi di umidità funzione della destinazione degli ambienti), oppure utilizzare direttamente l'espressione:

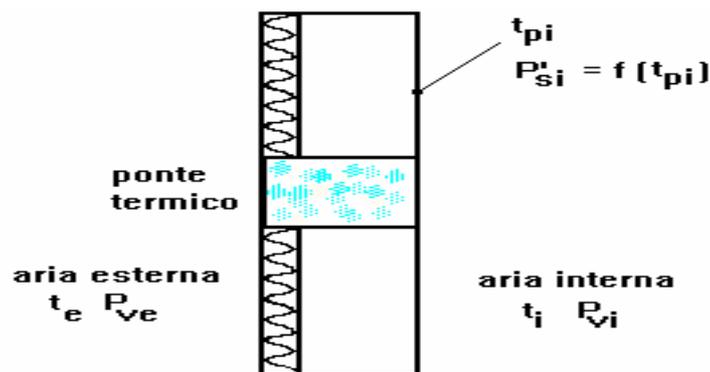
$$P_{vi} - P_{ve} \cong \frac{g_v \cdot R_v \cdot (t_i + 273)}{n \cdot V}$$

sulla base delle informazioni fornite nella **UNI EN ISO 13788**, ad esempio nel caso di edilizia residenziale tradizionale si assume prudenzialmente $n = 0.2$ [1/h] per $t_e \leq 0$ mentre per $t_e > 0$ si stima n sulla base dell'espressione $n = 0.2 + 0.04t_e$ [1/h]. A questo punto la verifica **mese per mese** della condizione $P_{vi} \leq 0.8 P'_{si}$ è immediata.

Nel caso di mancata verifica occorre pianificare interventi per ottenere i seguenti due obiettivi:

- ridurre i valori della P_{vi} aumentando n e/o diminuendo il rapporto g_v/V ;
- aumentare la t_{pi} (media mensile) e cioè tramite un maggiore isolamento termico dell'involucro edilizio.

Si può osservare che la verifica risulta ormai quasi sempre soddisfatta dalle odierne strutture piane (pareti, coperture e solette) isolate termicamente secondo gli attuali standard mentre spesso non lo è sui **ponti termici** e cioè in corrispondenza alle porzioni termicamente più critiche ed insidiose dell'involucro edilizio. Come noto, un ponte termico determina, rispetto ad una struttura piana continua, un **incremento locale del flusso termico disperso** e **riduzione della temperatura superficiale t_{pi}** .



In questo caso la valutazione della situazione e lo stesso intervento correttivo risultano più complessi: ad esempio, il calcolo della temperatura superficiale t_{pi} su un ponte termico richiede la soluzione dell'equazione generalizzata di Fourier in due e talvolta in tre dimensioni.

Nell'involucro tipici ponti termici sono individuabili in corrispondenza a giunzioni tra elementi diversi (solette-pareti perimetrali, tramezzi-pareti, etc.) o dove la struttura, forma e composizione degli stessi elementi edilizi si modifica (spigoli, pilastri ecc.). In generale, per una valutazione precisa della t_{pi} risulta necessario l'uso di metodi numerici di calcolo di elevata precisione i quali richiedono per essere applicati una precisa conoscenza dei relativi dettagli costruttivi e delle condizioni al contorno. In questa sede non è possibile inoltrarsi nella problematica matematica che tale valutazione richiede (Norma ISO 10221 "Thermal bridges in building construction-Calculation of heat flow and surface temperature-General methods").

10.4 Criteri di intervento per prevenire fenomeni di degrado superficiale

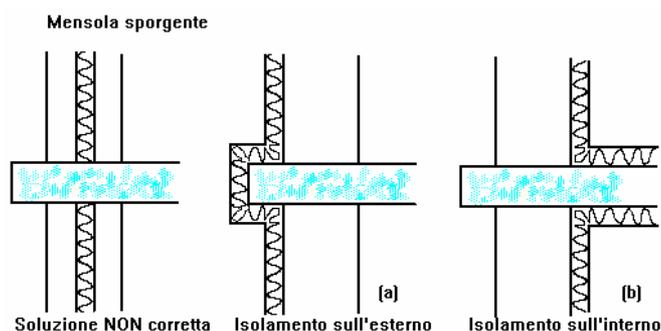
Se il rinnovo d'aria n che caratterizza gli ambienti è troppo ridotto e/o la temperatura t_{pi} del punto più critico dell'involucro edilizio non è sufficiente, occorrerà, come già notato:

- 1) incrementare il rinnovo d'aria n e/o diminuire il rapporto g_v/V ;
- 2) aumentare la temperatura superficiale del punto più critico dell'involucro edilizio.

Nel primo caso l'intervento più immediato è l'incremento del rinnovo d'aria n , ad esempio, si potrà mettere in opera serramenti muniti di dispositivo per il controllo della ventilazione oppure ricorrere a una ventilazione meccanica degli ambienti.

Nel secondo caso, dando per scontato un sufficiente isolamento termico delle pareti perimetrali piane e focalizzando l'attenzione sui ponti termici, sarà necessario modificarne il disegno.

In particolare, se la parete in esame comprende uno strato di materiale isolante, sarà opportuno cercare di mantenere la continuità di tale strato, anche in corrispondenza al nodo strutturale. Ove ciò non fosse possibile, nel disegno delle zone d'accoppiamento si dovrà cercare di incrementare la lunghezza del percorso del flusso termico, in modo da aumentare così la resistenza al suo passaggio. In generale, non sono possibili indicazioni precise, valide in ogni caso particolare: ad esempio, nella situazione raffigurata si possono considerare alcune possibilità d'intervento.



Come si può osservare, il ponte termico rappresentato a sinistra, in un primo caso (a) viene corretto mantenendo la continuità dell'isolamento termico dell'involucro edilizio (isolamento sull'esterno); nell'altro caso (b) (isolamento termico sull'interno), si è fatto ricorso al prolungamento dell'isolamento verso l'interno che comporta un deciso incremento del percorso del flusso termico.

10.5 Fenomeni interstiziali : condensazione del vapore

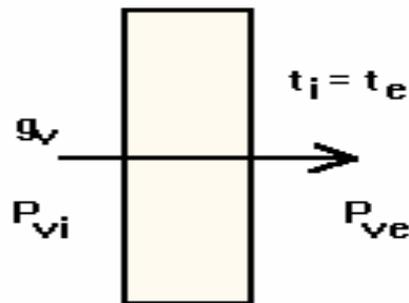
Durante l'inverno può formarsi condensa all'interno delle strutture perimetrali con i già citati effetti negativi (degrado di rivestimenti, migrazione dell'acqua formatasi verso l'interno dell'involucro con formazione di efflorescenze saline, etc.). In linea di principio la condensazione del vapore all'interno di una struttura può *sempre essere controllata/evitata* con una corretta progettazione dell'involucro (scelta e disposizione dei materiali).

10.6 Trasmissione del vapore attraverso uno strato permeabile.

Legge di Fick

Come già osservato, nella stagione invernale, la pressione parziale del vapore P_{vi} all'interno degli ambienti residenziali è superiore alla pressione nell'aria esterna P_{ve} .

Nella figura è schematizzato uno strato di un materiale a struttura porosa che divida l'aria interna da quell'esterna.



Attraverso lo strato, si verifica trasporto di vapore nel senso indicato in figura e cioè verso l'esterno ove la pressione parziale del vapore è minore ($P_{vi} > P_{ve}$). In condizioni di **regime stazionario** la portata specifica di vapore g'_v [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] può essere espressa in perfetta analogia a quanto discusso nella trasmissione di calore. Nella tabella seguente si può osservare la perfetta identità formale tra le relazioni esprimenti il trasporto di vapore e di calore attraverso lo strato:

Trasmissione del vapore	Trasmissione del calore
$P_{vi} > P_{ve}$	$t_i > t_e$
$g'_v = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_{vt}$ [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	$\phi' = (t_i - t_e) / R'_t$ [W/m^2]

ove z'_{vt} = resistenza specifica totale alla trasmissione del vapore.

La resistenza z'_{vt} è esprimibile nello stesso modo della resistenza termica globale R'_t nella forma:

$$z'_{vt} = (1 / \beta_i + L / \delta + 1 / \beta_e) \quad [\text{Pa} / (\text{kg m}^2 \text{ s})]$$

Si può osservare che z'_{vt} è costituita dalla somma delle **resistenze** $1/\beta_i$ e $1/\beta_e$ in corrispondenza delle superfici interna ed esterna e dalla **resistenza** L/δ dello **strato**. β_i e β_e sono detti **coefficienti convettivi di trasporto di massa** ed hanno significato analogo ai coefficienti termici convettivi della trasmissione del calore.

La grandezza δ [kg/(m s Pa)] è detta **permeabilità al vapore** e corrisponde alla conduttività termica λ . Infatti, analogamente alla legge di Fourier per la conduzione:

$$\phi' = - \lambda dt / dx \quad [W/m^2] \quad (\text{legge di Fourier})$$

per la trasmissione del vapore nel materiale poroso può scriversi la relazione di **Fick**:

$$g'_v = - \delta dP_v / dx \quad [kg/m^2s] \quad (\text{legge di Fick})$$

La tabella riporta, a titolo di esempio, alcuni valori di permeabilità al vapore di materiali edilizi, ripresi dalla norma UNI 10351. Le permeabilità sono distinte in relazione alle condizioni di impiego del materiale (δ_a in campo asciutto e δ_u in campo umido).

Valori indicativi di permeabilità al vapore

Materiale	ρ [kg/m ³]	$\delta_a \cdot 10^{12}$ [kg/(m s Pa)]	$\delta_u \cdot 10^{12}$ [kg/(m s Pa)]
aria in quiete	1.23	193	193
calcestruzzi: a struttura porosa aperta a struttura porosa chiusa	1600 - 2400 1600 - 2400	18 - 36 1.3 - 2.6	60 1.8 - 4
fibre minerali	10 - 15	150	150
intonaci	600 - 1200	18	18
laterizi	600 - 2000	18 - 36	18 - 36
polistirolo espanso	10 - 35	1.8 - 4.5	1.8 - 4.5

La legge di Fick può essere posta nella forma:

$$g'_v = - dP_v / dz'_v \quad [kg/m^2s]$$

ove:

$$dz'_v = dx / \delta$$

rappresenta la **resistenza alla trasmissione del vapore** di una strato di spessore dx .

In termini finiti, per uno strato di spessore L , sarà ovviamente pari a:

$$z'_v = L / \delta$$

Nel caso di materiali non omogenei, si considera una grandezza analoga alla **conduttanza termica C**, detta **permeanza W**, la quale pertanto rappresenta l'*inverso della resistenza alla trasmissione del vapore di un manufatto*.

10.7 Metodologia di valutazione dei fenomeni interstiziali

Per studiare i fenomeni di condensazione del vapore all'interno delle strutture edilizie (pareti, solette, ecc.) si utilizza il **metodo di Glaser**. Il metodo consente, fissate le condizioni termoigrometriche interne ed esterne, di verificare se in una struttura piana, **supposta inizialmente asciutta**, possa verificarsi condensazione di vapore. La formazione di condensa *non pregiudica l'idoneità della struttura*, purché **si dimostri** che la *quantità complessiva di condensa*, alla fine del periodo invernale di condensazione sia in assoluto $Q_c \leq 500 \text{ g/m}^2$, non ecceda limiti quantitativi $Q_c \leq Q_{amm}$ **caratteristici dei diversi** materiali interessati e che il bilancio annuale effettuato conteggiando la condensa Q_c che può evaporare nella restante parte dell'anno (periodo di evaporazione) sia $Q_c + Q_e \leq 0$ (in altre parole la condensa invernale deve poter asciugare completamente nell'arco dell'anno). In sintesi una struttura è idonea se:

$$Q_c \leq 500 \text{ g/m}^2$$

$$Q_c \leq Q_{amm}$$

$$Q_c + Q_e \leq 0$$

Valori indicativi di Q_{amm} da stabilirsi in relazione al materiale sono riportati nella seguente tabella ripresa dalla UNI EN ISO 13788. L rappresenta lo spessore dello strato di materiale interessato alla condensa e ρ la sua densità.

Materiale	Densità [kg/m ³]	Q_{amm} [g/m ²]
Laterizi	600-2000	≤ 500
Calcestruzzi	400-2400	≤ 500
Legnami e derivati	500-800	$\leq 30 \rho L$
Intonaci e malte	600-2000	$\leq 30 \rho L$
Fibre di natura organica: con collanti resistenti all'acqua con collanti non resistenti all'acqua	300-700 300-700	$\leq 20 \rho L$ $\leq 5 \rho L$
Fibre minerali	10-150	$\leq 5000 \rho L [\lambda / (1-1.7\lambda)]$
Materie plastiche cellulari	10-80	$\leq 5000 \rho L [\lambda / (1-1.7\lambda)]$

Se le condizioni descritte non risulteranno verificate la struttura non risulterà accettabile e il progettista dovrà modificarla fino a verifica positiva.

10.8 Descrizione sintetica del metodo di Glaser

Questo metodo grafico fa riferimento ad un piano cartesiano che riporta in ordinate la pressione del vapore P_v , e in ascisse la resistenza alla diffusione del vapore z'_v . Il metodo si basa sul confronto tra l'andamento della pressione di saturazione $P_s(z'_v)$ determinata dalla distribuzione di temperatura nella struttura e l'andamento della pressione di vapore $P_v(z'_v)$. Il metodo assume notevoli semplificazioni della fenomenologia fisica del problema:

- il trasporto di umidità unidimensionale in fase vapore;
- non si considera trasporto di umidità associato a moti convettivi di aria umida;
- si considerano condizioni di regime stazionario;
- l'acqua condensata all'interno della parete non si muove dalle zone di condensa verso le più secche zone limitrofe.

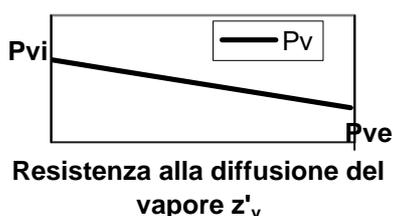
La norma UNI EN ISO 13788 ipotizza condizioni termoigrometriche interne ed esterne costanti e pari a valori medi mensili e utilizza il metodo di Glaser applicandolo all'intero anno mese per mese. Il metodo si basa sulla costruzione di un particolare diagramma (detto diagramma di diffusione della parete) con in ordinate le pressioni parziali del vapore ed in ascisse la resistenza z'_v dei vari strati della struttura. Su questo diagramma (P_v, z'_{vt}), supponendo inizialmente assenza di condensazione, si riporta il relativo andamento lineare $P_v(z'_{vt})$ previsto dalle relazioni (regime stazionario):

$$g'_v = - dP_v / dz'_v \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

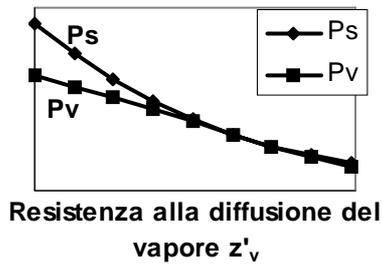
ovvero:

$$g'_v = (P_{vi} - P_{ve}) / z'_{vt} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

Si noti la perfetta analogia formale con la trasmissione del calore stazionaria. Oltre a ciò si osserva che le resistenze al trasporto convettivo del vapore $1/\beta_i$ e $1/\beta_e$ sia sul lato interno che esterno sono trascurabili rispetto alle resistenze offerte dagli strati per cui le pressioni operanti sulla superficie interna ed esterna della parete coincidono con le pressioni P_{vi} e P_{ve} nell'ambiente interno ed esterno.

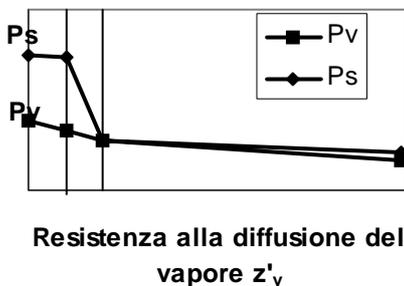


Il risultato che si ottiene nel caso di una struttura monostrato è rappresentato nella figura a alto ove la $P_v(z'_v)$ sarà il segmento di retta che unisce i punti P_{vi} e P_{ve} .



L'andamento $P_v(z'_v)$ viene ora confrontato sullo stesso diagramma con l'andamento della pressione di saturazione $P_s(z'_v)$. Se l'andamento della $P_v(z'_v)$ **non interseca** la $P_s(z'_v)$, o al più risulta tangente in un punto come rappresentato nella figura a lato, per la stessa struttura, la $P_v(z'_v)$ ottenuta è corretta dal punto di vista fisico.

Si conclude che per le condizioni mensili considerate non si verifica condensazione essendo ($g'_v = -dP_v / dz'_v = \text{cost.}$).



Se, invece, la $P_v(z'_v)$ intersecasse la $P_s(z'_v)$ ciò non avrebbe più significato fisico (all'interno della parete non possono esistere zone in cui $P_v > P_s$).

In questo caso, l'andamento corretto $P_v(z'_v)$ corrisponde alla disposizione che, un elastico teso tra i punti P_{vi} e P_{ve} , assumerebbe schiacciandosi contro la $P_s(z'_v)$. In figura questo caso è illustrato per una struttura composta da tre strati.

Il diagramma tracciato è ora corretto: in ogni punto la $P_v(z'_v)$ è ora inferiore alla $P_s(z'_v)$, determinata dalla temperatura locale. Inoltre, formandosi acqua, la portata di vapore g'_v dovrà ridursi in proporzione alla quantità condensata. La zona, o il piano, ove si verificano variazioni (continue o discontinue) di pendenza della curva $P_v(z'_v)$ vengono detti zona o piano di condensazione. Il diagramma di diffusione consente allora di trovare graficamente sia dove si forma condensa che la sua quantità. Ciò viene fatto analizzando sul diagramma le diverse pendenze che la $P_v(z'_v)$ assume, da queste infatti si hanno immediatamente le portate di vapore entranti g'_{vi} e uscenti g'_{ve} dalla parete. Si può scrivere:

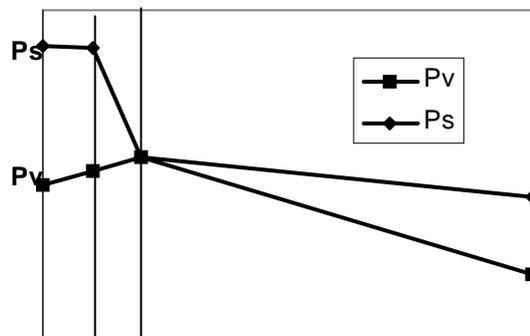
$$g'_{vi} - g'_{ve} = g'_c$$

nella quale si è indicata con g'_c la portata di vapore specifica condensata nella parete.

In particolare la condensazione del vapore si verificherà in tutti i mesi (o nei periodi) con caratteristiche climatiche interne ed esterne tali da comportare una differenza $g'_{vi} - g'_{ve} > 0$.

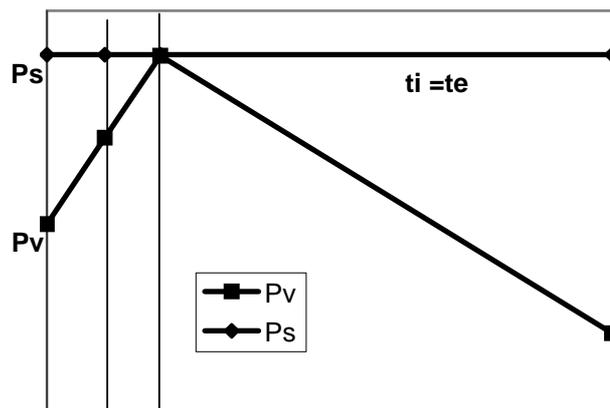
Nei mesi (o nei periodi) invece in cui le condizioni climatiche interne ed esterne saranno tali da comportare un differenza $g'_{vi} - g'_{ve} < 0$, si verificherà invece un processo di asciugamento che si può sempre indagare con lo stesso schema grafico.

La seguente figura rappresenta la forma assunta dal diagramma di diffusione in una stagione intermedia quando il processo di asciugamento si attua verso entrambi i lati della struttura. Infatti se nel piano di condensazione nei mesi precedenti si è formata acqua, allora vi sarà (finché l'acqua non sarà tutta evaporata) sia una caduta di pressione ΔP_{vi} verso l' interno che una caduta ΔP_{ve} verso l'esterno. Il metodo assume che l'acqua formatasi rimanga localizzata nel piano di condensazione, ove vi sarà una P_v eguale alla P_s . La P_s dipenderà dalla temperatura esistente nel piano stesso.



Resistenza alla diffusione del vapore z'_v

Nella figura sottostante è rappresentato il caso di un mese caratterizzato da $t_i \cong t_e$ e pertanto con l'intera parete a temperatura uniforme.



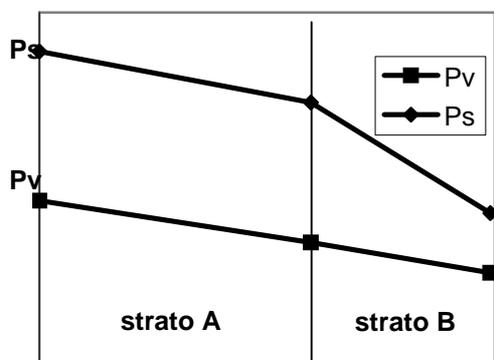
Resistenza alla diffusione del vapore z'_v

10.8.1 Criteri di intervento per modificare strutture non idonee

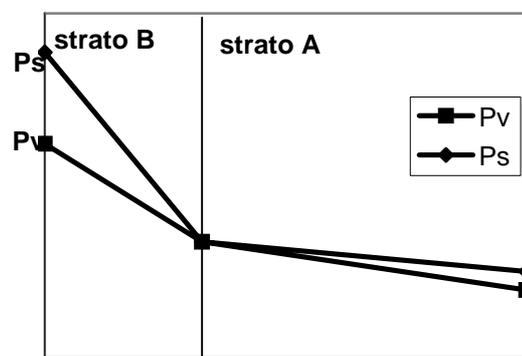
Qualora la struttura in esame non risulti idonea secondo i criteri presentati, è necessario adottare una o più delle seguenti linee d'intervento sulla struttura. In generale, un *migliore comportamento igrometrico* della struttura può essere ottenuto *intervenendo sulla disposizione degli strati* secondo i seguenti criteri:

- disposizione sul lato **interno** degli strati con maggiore resistenza alla diffusione z'_v ;
- disposizione sul lato **esterno** degli strati con maggiore resistenza termica R' .

Nelle seguenti due figure si confrontano due diverse disposizioni degli strati **A** e **B** componenti una parete bistrato.



Resistenza alla diffusione del vapore z'_v

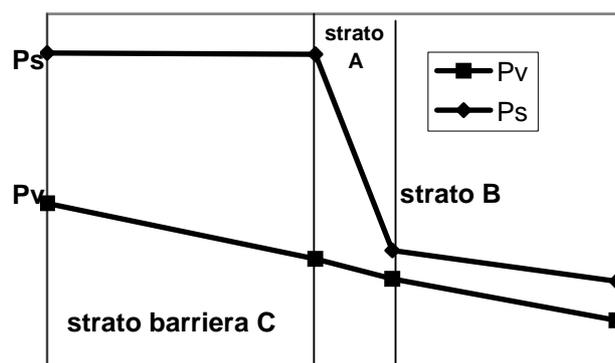


Resistenza alla diffusione del vapore z'_v

Appare evidente come il comportamento della struttura in cui la resistenza termica maggiore (**strato B**) è posta sul lato esterno e la resistenza alla diffusione maggiore (**strato A**) sul lato interno sia più favorevole.

Questa disposizione, tuttavia, non è sempre possibile: ad esempio una copertura piana deve inevitabilmente presentare uno strato d'impermeabilizzazione (z'_v elevato) sul lato esterno. Si può osservare che è sempre possibile evitare la formazione di condensa, impedendo al vapore di diffondere nella struttura, mediante l'inserimento sul lato interno di uno strato (**strato C**) di materiale di notevole resistenza alla diffusione (**barriera al vapore**).

Nella figura è rappresentato l'effetto dell'inserimento di questo *strato barriera* (**strato C**) nella parete bistrato che nel caso precedente risultava essere caratterizzata da condensazione.



Resistenza alla diffusione del vapore z'_v

Parrebbe quindi sempre possibile risolvere il problema di qualsivoglia struttura introducendo, senza tanti problemi, un'adeguata barriera al vapore sul lato interno. A questo riguardo è opportuno precisare che l'adozione di barriera al vapore deve essere sempre valutata con molta attenzione, poiché con la sua presenza spesso si possono verificare inconvenienti, tra i quali ad esempio:

- riduzione dell'asciugamento estivo;
- nelle coperture piane l'eventuale umidità presente all'atto della costruzione (getti in opera) non ha più la possibilità di essere smaltita;
- la barriera può perdere con il tempo le sue caratteristiche.

In genere, *se la quantità di condensa formatasi risulta ammissibile, è preferibile non porre in opera la barriera al vapore.* Al fine di aumentare la possibilità di smaltimento dell'acqua condensata è anche possibile prevedere un'opportuna ventilazione con aria esterna della zona interessata alla condensazione.

ESEMPI ED ESERCIZI

1) Si valuti, nel mese di Novembre, la temperatura di parete t_{pi} che soddisfa la condizione $P_{vi} \leq 0.8 P'_{si}$. nel caso di un monolocale ($S = 35 \text{ [m}^2\text{]}$, $h = 3 \text{ [m]}$) abitato da una persona (produzione di vapore complessiva $g_v = 0.25 \text{ [kg/h]}$); valori medi mensili per Novembre $t_e = 4 \text{ [}^\circ\text{C]}$, $t_i = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$, $i_e = 88 \text{ [%]}$.

a) La pressione di vapore media mensile esterna P_{ve} :

$$P_{se} = P_{se}(t_e) = 812 \text{ [Pa]}$$

$$P_{ve} = i_e P_{se} = 0.88 \cdot 812 = 714.5 \text{ [Pa]}$$

b) L'ambiente è caratterizzato da un volume $V = 105 \text{ [m}^3\text{]}$. La pressione di vapore media mensile interna P_{vi} :

$$P_{vi} = P_{ve} + R_v (t_i + 273) g_v / n V$$

In base alla norma UNI EN ISO 13788 per $t_e \leq 0$ si assume $n = 0.2 \text{ [1/h]}$ mentre per $t_e > 0$ si può stimare n sulla base dell'espressione $n = 0.2 + 0.04 t_e \text{ [1/h]}$.

Nel nostro caso risulta $t_e = 4 \text{ [}^\circ\text{C]}$ per cui $n = 0.36 \text{ (1/h)}$:

$$P_{vi} = 714.5 + 460 (20 + 273) 0.25 / 0.36 (35 \cdot 3) = 714.5 + 892 = 1606.5 \text{ [Pa]}$$

c) Imponendo la condizione $P_{vi} = 0.8 P'_{si}(t_{pi})$ si può determinare la t_{pi} .

Risulta $P'_{si} = P_{vi} / 0.8 = 2007 \text{ [Pa]}$ che, in base ai valori tabellati della pressione di saturazione corrisponde a $t_{pi} = 17.6 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Dovrà quindi risultare $t_{pi} \geq 17.6 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Per valutare il massimo ammissibile della trasmittanza K_{max} si può scrivere:

$$K_{max} = \alpha_i (t_i - t_{pi}) / (t_i - t_e)$$

Ponendo, ad esempio $\alpha_i = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, si ottiene $K_{max} = 1.2 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. La parete perimetrale dovrà quindi avere una $K \leq K_{max}$.

Il valore K ottenuto può apparire elevato. È importante osservare che in questo esempio si è considerato $\alpha_i = 8 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Nella pratica in altre situazioni α_i potrà risultare anche molto minore e cioè più critico, ad esempio dietro una credenza ($\alpha_i \approx 4 \text{ [W/m}^2\text{K]}$) o in prossimità di uno spigolo, già un punto termicamente "debole" e cioè ancora più freddo dell'involucro edilizio.

2) Si supponga che una parete, asciutta, inizi a formarsi condensa. Si valuti la quantità di condensa formatasi in 30 giorni.

Il mese di inizio condensazione sia caratterizzato dalle seguenti condizioni medie:

$$t_e = 0 [^{\circ}\text{C}], \quad i_e = 80 [\%], \quad t_i = 20 [^{\circ}\text{C}], \quad i_i = 50 [\%]$$

La parete in studio è costituita dall'interno verso l'esterno:

- intonaco $L_1 = 1 [\text{cm}], \lambda_1 = 1.0 [\text{W/mK}], \delta_1 = 18 \cdot 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m s Pa})]$
- lana minerale $L_2 = 8 [\text{cm}], \lambda_2 = 0.035 [\text{W/mK}], \delta_2 = 150 \cdot 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m s Pa})]$
- mattoni $L_3 = 13 [\text{cm}], \lambda_3 = 0.2 [\text{W/mK}], \delta_3 = 30 \cdot 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m s Pa})]$

La procedura inizia col calcolo della P_{vi} e della P_{ve} :

- calcolo pressione di vapore interna $\Rightarrow P_{vi} = i_i P_{si} = 0.5 \cdot 2339.3 = 1169.6 [\text{Pa}]$
- calcolo pressione di vapore esterna $\Rightarrow P_{ve} = i_e P_{se} = 0.8 \cdot 610.9 = 488.7 [\text{Pa}]$

Si procede poi a tracciare la distribuzione di temperatura nella parete attraverso i seguenti passi:

- calcolo trasmittanza termica parete $\Rightarrow K = 0.32 [\text{W/m}^2\text{K}]$
- calcolo flusso termico specifico trasmesso $\Rightarrow \phi' = 6.4 [\text{W/m}^2]$
- calcolo a partire dall'esterno le t_j (interfacce strati) $\Rightarrow t_j = t_e + \phi' R'_j$

dove:

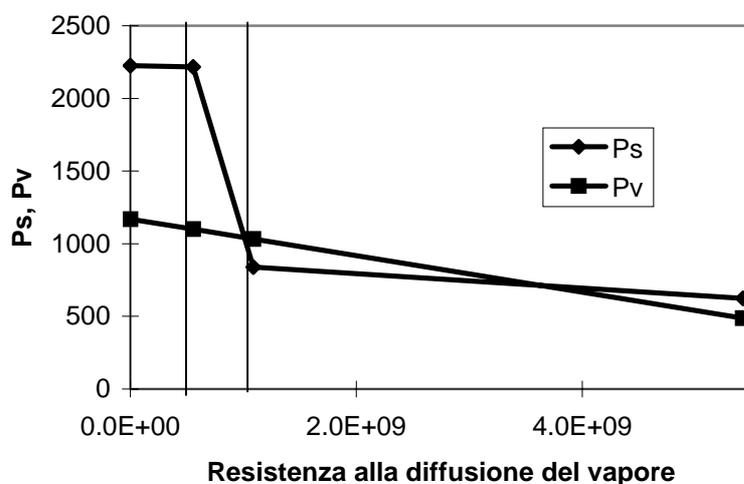
R'_j = resistenza a partire dall'esterno fino all'interfaccia j .

Note le temperature t_j si calcolano le corrispondenti pressioni di saturazione P_s . Si ottiene la seguente tabella.

Posizione	$t [^{\circ}\text{C}]$	$P_s [\text{Pa}]$
Ambiente interno	20	2339.3
Superficie interna parete	19.2	2225.7
Interfaccia intonaco/isolante	19.1	2216.8
Interfaccia isolante/mattoni	4.5	839.9
Superficie esterna parete	0.3	623.4
Ambiente esterno	0	610.9

Si può ora confrontare l'andamento sul diagramma della $P_v (z'_v)$ e della $P_s (z'_v)$ in funzione della resistenza alla diffusione z'_v . Nella procedura si assumono di regola

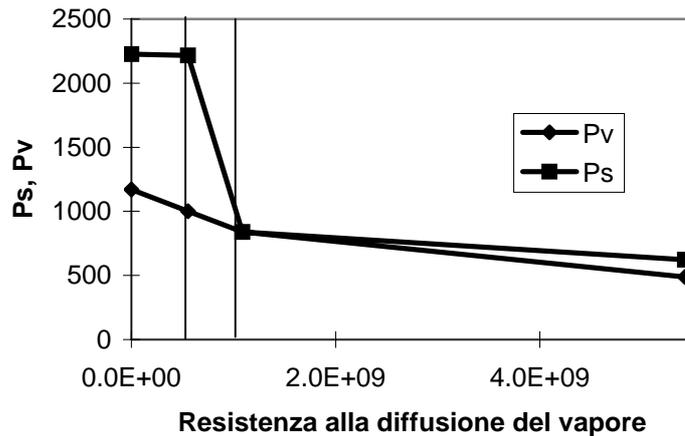
valori di permeabilità a campo asciutto. In prima ipotesi si prova ad assumere assenza di condensazione ottenendo il diagramma riportato nella seguente figura. Il diagramma indica solo che nella parete si forma condensa per le condizioni climatiche considerate. Nel tracciare il diagramma si è considerato, per semplicità, un andamento della $P_s(z'_v)$ lineare in ciascun strato. Ovviamente se la variazione di temperatura in una strato fosse significativa per avere una rappresentazione più precisa sarebbe opportuno calcolare la $P_s(z'_v)$ anche in alcuni punti intermedi.



Per approfondire l'analisi è quindi necessario ritracciare il diagramma tenendo conto di quale sia nel caso di condensazione il corretto andamento $P_v(z'_v)$. Questo, come si ricorderà, coincide con la disposizione assunta da un elastico in tensione tra i punti P_{vi} e P_{ve} e spinto contro la $P_s(z'_v)$ come illustrato nella seguente figura.

La figura consente di valutare graficamente (e anche numericamente) la pressione P_v^* all'interfaccia esterna tra isolante e laterizio.

La pressione P_v^* permette di calcolare le pendenze delle due spezzate che rappresentano la portata di vapore che entra nella parete e quella che ne esce.



La portata di vapore in ingresso nella parete è:

$$g'_{vi} = (P_{vi} - P_{v^*})/z'_{v^*}$$

con z'_{v^*} = resistenza fino all'interfaccia in cui si verifica condensazione.

La portata di vapore in uscita è:

$$g'_{ve} = (P_{v^*} - P_{ve})/(z'_v - z'_{v^*})$$

con $(z'_v - z'_{v^*})$ = resistenza tra l'interfaccia di condensazione e l'esterno.

La portata di vapore g'_c condensata può essere quindi valutata come differenza tra la portata di vapore in ingresso e quella in uscita:

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve}$$

In questo caso si ha $P_{v^*} = 840$ [Pa] e quindi $g'_{vi} = 3.03 \cdot 10^{-7}$ [kg/s m²] e $g'_{ve} = 0.81 \cdot 10^{-7}$ [kg/s m²].Risulta:

$$g'_c = g'_{vi} - g'_{ve} = 2.22 \cdot 10^{-7} \text{ [kg/s m}^2\text{]}$$

Nel primo mese di condensazione di 30 giorni (mese), la quantità di acqua condensata sarà pari a:

$$Q_{c(30gg)} = 0.575 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Anche se in questo esempio si è fatto riferimento solo al primo mese di condensazione la quantità di condensa valutata appare già superiore al limite di $Q_c = 500$ [g/m²] per cui, è inutile ripetere la verifica per i mesi successivi. Il giudizio sulla parete è inevitabilmente negativo per cui questa dovrà essere modificata. Ad esempio si potrà inserire una barriera al vapore sul lato interno della lana minerale oppure provare a sostituire l'isolante termico in lana minerale ($\delta_a = 150 \cdot 10^{-12}$ [kg/(m s Pa)]) con polistirolo e cioè con un isolante termico di assai minor permeabilità ($\delta_a = 4.5 \cdot 10^{-12}$ [kg/(m s Pa)]).