

15. CONDENSAZIONE SUPERFICIALE ED INTERSTIZIALE DEL VAPORE NELLE STRUTTURE EDILIZIE

15.1 CONDENSAZIONE SUPERFICIALE

La condensazione del vapore sulle superfici interne di un ambiente confinato si verifica ogni volta che queste vengono a trovarsi ad una temperatura inferiore od uguale alla temperatura di rugiada dell'aria umida presente nell'ambiente.

Supponendo ad esempio che l'aria interna si trovi alla temperatura a b.s. di 30 °C e che la sua U.R. sia dell'80%, dal diagramma psicrometrico si può rilevare che il suo titolo è di 22 g di vapore per kg di aria secca. Con un raffreddamento isotitolo la sua U.R. crescerà fino a raggiungere il 100% in corrispondenza della temperatura a b.s. di 26,2 °C. questa è la temperatura di rugiada (t_r) dell'aria interna al locale. Un ulteriore raffreddamento di una superficie a contatto con quest'aria provoca la comparsa sulla superficie stessa di goccioline di acqua condensata (Figura 15.1).

In generale si può dire che ogni volta che la temperatura di un corpo è inferiore alla t_r dell'aria che lo circonda sulla superficie del corpo condensa una quantità di vapore tale da far sì che nell'aria circostante diminuisca il titolo di vapore e ne resti una quantità tale che la sua pressione parziale corrisponda alla pressione di saturazione (p_{vs}) relativa a quella temperatura.

Dunque il fenomeno della condensazione superficiale all'interno di ambienti confinati interessa quelle superfici che raggiungono più facilmente temperature relativamente basse, a causa della loro elevata trasmittanza. È il caso delle coperture non coibentate di capannoni, ma anche di vetri, di infissi metallici e ponti termici di vario tipo.

Per prevedere il verificarsi del fenomeno bisogna:

- calcolare la temperatura della superficie in questione, impostando l'equazione di bilancio dei flussi termici sulla superficie in regime stazionario,
- confrontarla con il valore della temperatura di rugiada relativa a quelle condizioni termometriche, che sono in genere note come dati di progetto.

Esempio. Una parete in c.a. di 15 cm di spessore separa due ambienti caratterizzati dalle seguenti condizioni termometriche:

	Interno	esterno
t [°C]	20	-5
U.R. [%]	60	80

In base alle condizioni dell'aria interna si rileva su un diagramma psicrometrico che la t_r è di 11,5 °C.

Si calcola la temperatura della superficie interna imponendo l'eguaglianza del flusso termico che dall'aria interna si trasmette alla superficie e quello che dall'aria interna si trasmette all'aria esterna:

$$Q = \frac{t_i - t_e}{R_{tot}} = \alpha_i \cdot (t_i - t_s) \quad (1)$$

da cui:

$$t_s = t_i - \frac{t_i - t_e}{\alpha_i \cdot R_{tot}} = 20 - \frac{20 - (-5)}{8 \cdot 0,27} = 8,5^\circ\text{C} \quad (2)$$

dove:

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e} + \frac{s}{\lambda} = \frac{1}{8} + \frac{1}{25} + \frac{0,15}{1,48} = 0,27 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

poiché

$$t_s = 8,5^\circ C < 11,5^\circ C$$

sulla superficie si formerà condensa.

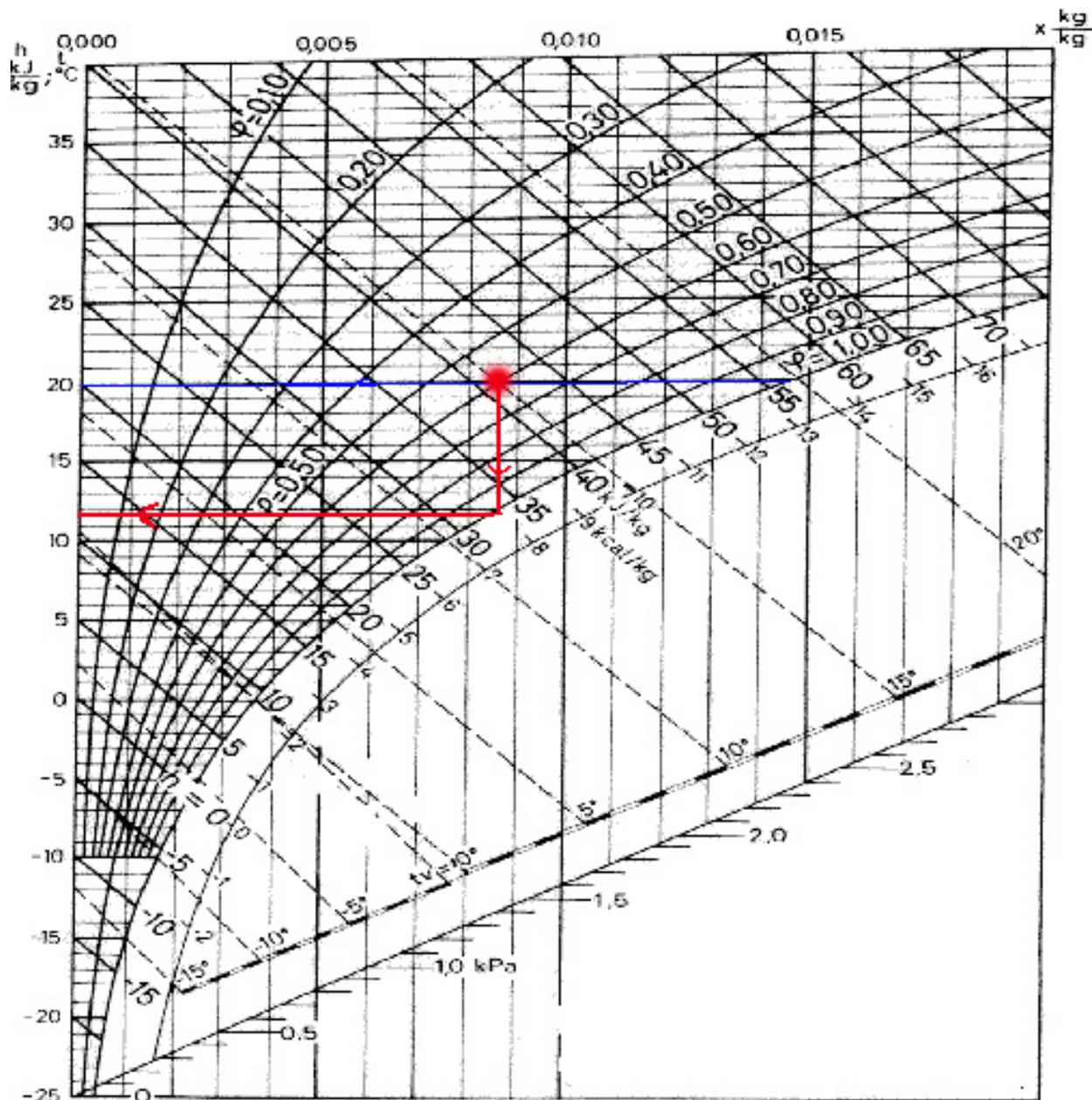


Figura 15.1. Individuazione della temperatura di rugiada sul diagramma di Mollier.

Qualora non si possa utilizzare un diagramma psicrometrico si può ragionare sulle pressioni parziali del vapore e confrontare la pressione effettiva del vapore nell'ambiente (il valore medio di cui si dispone) con la pressione di saturazione alla temperatura della superficie interna della parete. Utilizzando la tabella 15.II o la formula 10.14 della dispensa n.10 si vede che la pressione di saturazione del vapore a 20 °C è 2337 Pa, pertanto la sua pressione parziale sarà:

$$p_v = p_s \cdot U.R. = 2337 \cdot 0,6 = 1402 \text{ [Pa]}$$

mentre la pressione di saturazione del vapore alla temperatura di 8,5 °C è di 1110,5 Pa. Trovandosi il vapore ad una pressione parziale superiore vi sarà condensa.

Per aumentare la temperatura della superficie e portarla al di sopra di t_r , bisognerà ridurre il flusso termico che attraversa la parete aumentando la resistenza termica della stessa, diminuirà così il termine che viene sottratto a t_i nel secondo membro della (2).

Ponendo $t_s = t_r$ nella (1) è possibile ricavare il valore di R_{tot} necessario a tale scopo:

$$R_{tot} = \frac{t_i - t_e}{\alpha_i \cdot (t_i - t_r)} = \frac{20 - (-5)}{8 \cdot (20 - 11,5)} = 0,36 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

15.2 CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE E DIAGRAMMA DI GLASER

L'aggiunta di uno strato di materiale isolante in una parete può evitare come si è visto la condensazione del vapore sulle superfici interne di un locale; tuttavia i materiali da costruzione normalmente impiegati sono permeabili al passaggio di vapore, possono dunque verificarsi fenomeni di condensa all'interno della parete ogniqualvolta il vapore incontra strati a temperatura inferiore od uguale alla temperatura di rugiada relativa alle sue condizioni termogrometriche (temperatura e titolo).

Il fenomeno della condensazione interstiziale è, nell'edilizia, un fenomeno indesiderato ed è pertanto opportuno verificare, già in fase di progettazione, se e quando esso possa verificarsi. Sebbene il vapore condensato possa in molti casi evaporare, quando ciò non avviene, o avviene con ritardo, **l'imbibizione del materiale comporta la riduzione del suo potere termoisolante, la formazione di muffe, la marcescenza e anche, se la temperatura locale della parete scende sotto lo zero, la frantumazione in seguito all'aumento di volume dell'acqua che passa in fase solida.**

Si consideri inoltre che la condensa interstiziale interessa il più delle volte proprio lo strato di isolante, il quale mantiene alte le temperature degli strati tra sé e l'interno, ma lascia abbassare le temperature degli strati posti tra sé e l'esterno.

Per studiare il fenomeno e prevedere la possibilità che si verifichi non si può procedere come finora fatto nel caso della condensazione superficiale, ovvero trovando sul diagramma psicrometrico la t_r partendo dalla temperatura dell'aria interna e dalla sua U.R., dal momento che non è nota come dato di progetto l'U.R. nei vari strati della parete da studiare.

L'U.R. all'interno della parete (l'U.R. dell'aria umida che la attraversa) è funzione delle condizioni termogrometriche dell'aria negli ambienti separati dalla parete e della resistenza che i vari materiali costituenti la parete offrono al passaggio di vapore.

È necessario pertanto studiare le modalità di trasmissione del vapore attraverso la parete.

15.2.1 CONCENTRAZIONE DI UNA SOSTANZA IN UNA MISCELA

Perché si generi un qualsiasi flusso, di energia termica o di massa, si deve verificare una situazione di non equilibrio. In termini matematici è necessario che, definita una grandezza di stato da cui dipende il flusso, essa presenti un gradiente, una variazione del proprio valore lungo una coordinata spaziale.

Nel caso della trasmissione di calore si è visto che il flusso termico si genera in conseguenza di un gradiente di temperatura. La differenza di temperatura è dunque, la “forza motrice” del flusso di calore.

Si tratta ora di capire, nel caso del vapore, quale sia la grandezza il cui gradiente innesca il flusso di massa attraverso le murature.

Se si considera un fluido costituito da una miscela di componenti, quando uno dei componenti non è distribuito in maniera uniforme nello spazio occupato dalla miscela si assisterà al moto “diffusivo” di tale specie (chimica) all'interno dello stesso spazio, questo nel tentativo di raggiungere una situazione di equilibrio distributivo con i gli altri componenti. Il fenomeno di moto del componente prende il nome di **diffusione molecolare** e la grandezza il cui gradiente ne governa il flusso è la concentrazione del dato componente.

Si definisce **concentrazione della specie i-esima** la quantità di materia di tale specie presente per unità di volume occupato dalla miscela. Quando si esprime tale quantità di materia in termini di massa m_i si definisce la **concentrazione ponderale**. Essa corrisponde dimensionalmente ad una densità e può leggersi pertanto come la densità ρ_i assunta dal componente in seno alla miscela. La *concentrazione ponderale* della *specie i-esima* nella miscela si indica pertanto con ρ_i e vale:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V} \quad (15.1)$$

dove V è l'intero volume occupato dalla miscela.

Considerando invece la quantità di sostanza, in termini di moli, si definisce una **concentrazione molare** C_i come il numero di moli della specie i-esima presenti nel volume occupato dalla miscela. In altre parole il numero di moli n_i della specie i-esima nel volume unitario. Ovvero:

$$C_i = \frac{n_i}{V} \quad (15.2)$$

Se M_i è la massa molare della specie i-esima, essendo:

$$m_i = n_i \cdot M_i \quad (15.3)$$

dalle (15.1) e (15.3) si ottiene anche:

$$C_i = \frac{m_i}{M_i \cdot V} = \frac{\rho_i}{M_i} \quad (15.4)$$

Si ricorda infine che la *frazione molare* x_i è il rapporto tra il numero di moli n_i della specie i-esima e il numero di moli totale n di tutti i componenti della miscela contenute nel volume unitario.

$$x_i = \frac{n_i}{n} \quad (15.5)$$

Un caso particolare si ha quando i componenti della miscela sono componenti gassosi il cui comportamento può essere approssimato con quello del gas perfetto: una miscela di questo tipo è, per esempio, l'**aria atmosferica** sia secca (come si trova nella parte più alta dell'atmosfera) sia umida, cioè miscelata a vapor d'acqua (come si trova nella parte d'atmosfera

più vicina al suolo). Una miscela di questo tipo è quella che in Termodinamica è stata definita **miscela di gas ideali**. In questo caso, poiché ogni componente della miscela ha le proprietà del gas perfetto, l'intera miscela può anch'essa essere rappresentata come gas perfetto. Valgono allora le leggi di Dalton e si può scrivere:

$$p_i = n_i \cdot \frac{R^* \cdot T}{V} \quad (15.6)$$

dove p_i è la **pressione parziale** del componente i-esimo, ovvero la pressione che tale componente avrebbe se da solo riempisse il volume V che occupa la miscela. Ricavando V dalla (15.6) la *concentrazione* si può esprimere pertanto anche in funzione della pressione parziale p_i della specie i-esima. Sostituendo V nella (15.1) si ha:

$$\rho_i = \frac{m_i}{n_i \cdot R^* \cdot T} \cdot p_i \quad (15.7)$$

e, dalla (15.2), la *concentrazione molare* C_i risulta:

$$C_i = \frac{p_i}{R^* \cdot T} \quad (15.8)$$

15.2.2 IL TRASPORTO DI MATERIA PER DIFFUSIONE

Come si è detto in precedenza, la concentrazione è la grandezza che governa il flusso di materia per diffusione.

Ciò significa che, considerata una porzione di spazio occupata da un sistema costituito da una miscela di specie chimiche diverse, se in essa esiste un gradiente di concentrazione di uno dei componenti, quel componente diffonderà da zone dove la concentrazione è elevata a zone dove la concentrazione è più bassa.

La legge che descrive il *trasporto di materia per diffusione* è la **legge di Fick** che porge:

$$\dot{g}_i = D_i \cdot \frac{\partial C_i}{\partial n} \quad (15.9)$$

nella quale \dot{g}_i è il flusso specifico di massa della specie i-esima che si esprime in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ e D_i è una costante di proporzionalità tipica della specie i-esima che prende il nome di **coefficiente di diffusione**.

Il termine $\partial C_i / \partial n$ rappresenta il gradiente di concentrazione del componente considerato nella direzione n .

Se la miscela è una miscela di gas perfetti, si può esprimere la concentrazione molare C_i utilizzando la (15.8), e la legge di Fick può essere scritta come:

$$\dot{g}_i = \frac{D_i}{R^* \cdot T} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial n} = D_{ip} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial n} \quad (15.10)$$

dove D_{ip} prende il nome di **coefficiente di diffusione della specie i-esima riferito alla pressione parziale**.

La analogia formale tra le (15.9) - (15.10) e l'equazione che esprime il postulato di Fourier è evidente. Partendo da tali relazioni sono possibili pertanto sviluppi analoghi a quelli visti in

relazione alla trasmissione di calore per conduzione. In particolare, per regime stazionario e trasporto di materia monodimensionale, si ottiene che il flusso di materia \dot{g}_i della specie i -esima che attraversa uno strato di miscela di area A e di spessore s , sulle cui superfici estreme la concentrazione della sostanza i -esima sia uniforme e costante nel tempo, vale:

$$\dot{g}_i = \frac{D_{ip}}{s} \cdot A \cdot (p_{1i} - p_{2i}) \quad (15.11)$$

essendo p_{1i} e p_{2i} le pressioni parziali della specie i -esima sulle superfici di confine dello strato sulle quali le condizioni al contorno derivanti dalle ipotesi suddette impongono una concentrazione uniforme e costante nel tempo.

Può avvenire che due volumi di miscela, nella quale siano presenti differenti concentrazioni della specie i -esima, siano separati da un setto che può essere o no impermeabile alla specie stessa. Nel primo caso esso impedirà la trasmissione di massa, nel secondo invece la permetterà comportandosi verso la specie i -esima come una **membrana semipermeabile**.

Il comportamento di una membrana di questo tipo è tale che, quando essa separi i due suddetti volumi, permette la realizzazione dell'equilibrio della specie i -esima. In altre parole la membrana permette che la specie i -esima diffonda attraverso di essa fino a che in entrambi i volumi si realizzi il medesimo valore di concentrazione, e quindi di pressione parziale.

Ciò significa che, quando due volumi di miscela in cui vengano mantenuti costanti due differenti concentrazioni della specie i -esima, siano separati da un setto di area A e di spessore s il cui comportamento è approssimabile con quello di una membrana semipermeabile, il flusso che attraversa tale setto è descritto dalla (15.11) e vale:

$$\dot{g}_i = \frac{\pi_{ip}}{s} \cdot A \cdot (p_{1i} - p_{2i}) \quad (15.12)$$

essendo π_{ip} **coefficiente di diffusione della specie i -esima riferito alla pressione parziale proprio del mezzo che compone il setto**. Tale coefficiente prende in genere il nome di **permeabilità alla specie i -esima** del materiale componente il setto [kg/(m·s·Pa)]. In analogia con quanto avviene nel campo della conduzione termica, il rapporto π_{ip}/s si può denominare **permeanza del setto rispetto alla specie i -esima** [kg/(m²·s·Pa)] mentre il suo inverso s/π_{ip} si può denominare **resistenza del setto alla trasmissione per diffusione della specie i -esima** [m²·s·Pa/kg].

Esiste anche un coefficiente di resistenza al passaggio del vapore μ (adimensionale) che indica quanto la resistenza al passaggio del vapore di un certo materiale è superiore a quella dell'aria a parità di spessore e di temperatura. È riportato anch'esso nei successivi tabulati.

La (15.12) permette di quantificare il flusso di una determinata sostanza gassosa attraverso le pareti edilizie. Il caso più comune è quello che fa riferimento al vapor d'acqua, ma assumono sempre più importanza anche valutazioni riguardanti la diffusione di sostanze con spiacevoli proprietà olfattive o inquinanti.

15.2.3 IL VAPOR D'ACQUA NEGLI AMBIENTI INTERNI

Come si è detto nel capitolo 9 nella parte di atmosfera più prossima al suolo all'*aria secca* si aggiunge il *vapor d'acqua* generato dall'evaporazione dei mari, dei fiumi ecc. nonché dalle attività umane. A differenza di quanto avviene per i restanti componenti dell'aria atmosferica, la cui quantità può con buona approssimazione assumersi costante, la quantità di vapor d'acqua

contenuta nell'aria umida è invece sensibilmente variabile. Essa dipende non solo dalle condizioni climatiche locali ma anche dalla presenza di attività umane.

In particolare, negli ambienti confinati, il contenuto di vapore dell'aria umida dipende fortemente non solo dal numero delle persone presenti ma anche dalle attività che vi si svolgono. In **tabella 15.I** è riportata la produzione di vapor d'acqua relativa a differenti attività umane. Come si vede dalla tabella queste attività producono una quantità di vapore relativamente piccola, sebbene sufficiente ad innescare i processi di trasporto di massa.

TABELLA 15.I. Produzione di vapor d'acqua relativa a differenti attività umane.

Attività	Quantità (kg·10 ⁻⁶ /s)	Quantità (kg/h)
Cottura cibi:		
pentola in ebollizione, scoperta, diametro 20 cm	250	0,9
pentola in ebollizione, coperta, diametro 20 cm	97	0,3492
Doccia calda	555	1,998
Bagno caldo in vasca	83	0,2988
Panni stesi ad asciugare (kg 5)	55	0,198
Cibi caldi in tavola, per persona	4	0,0144
Persona:		
in riposo	14	0,0504
in attività leggera	28	0,1008
in lavoro leggero	55	0,198
in lavoro pesante o ginnastica	111	0,3996

15.2.4 TRASMISSIONE DI VAPORE ATTRAVERSO LE PARETI EDILIZIE

Al pari di tutti i sistemi termodinamici in stato di non equilibrio, anche due masse d'aria umida in differenti stati termodinamici tenderanno a portarsi in equilibrio tra loro purché il setto che le separa lo permetta. I due stati termodinamici possono essere caratterizzati sia da differenti temperature della miscela sia da differenti concentrazioni, ovvero da differenti pressioni parziali dei componenti la miscela.

Se il setto non è adiabatico attraverso di esso avrà luogo una trasmissione di calore; se il setto non è impermeabile ai componenti della miscela 'aria umida' attraverso di esso avverrà una trasmissione di massa. I materiali edilizi e le pareti che con essi si costruiscono non sono mai né perfettamente adiabatici né perfettamente impermeabili all'aria umida, per cui, quando le condizioni al contorno sono tali da generare un disequilibrio, attraverso di esse avverrà sempre sia trasmissione di calore che di massa.

La condizione necessaria perché attraverso la parete edilizia abbia luogo *trasmissione di calore* è, naturalmente, che tra le due masse d'aria umida che essa divide (per esempio quella interna all'edificio e quella esterna) esista *una differenza di temperatura*.

La condizione necessaria affinché avvenga trasmissione di massa è che esista una differenza di pressione parziale o una differenza di concentrazione di almeno uno dei componenti della miscela.

In genere la pressione dell'aria secca è la medesima su entrambe le facce della parete. Sono rari, infatti, i casi in cui, mediante un impianto, l'ambiente interno sia messo in leggera sovrappressione rispetto all'ambiente esterno per evitare la penetrazione di odori o di aria inquinata: valga come esempio il caso delle cabine per il pagamento dei pedaggi autostradali.

In quasi tutti i casi varia invece, tra ambiente interno ed esterno, la pressione parziale del vapor d'acqua per il fatto che nell'ambiente interno la concentrazione di questo componente viene modificata dalle attività presenti. Pertanto tra l'aria interna ed esterna alla parete viene a crearsi, per il solo vapor d'acqua, un gradiente di pressione parziale rispetto al quale la parete edilizia si comporta come una membrana semipermeabile che permette la trasmissione di massa secondo la (15.12).

Come si è già fatto notare in precedenza, il fenomeno della diffusione è descritto da una legge che è formalmente analoga a quella che descrive la trasmissione di calore per conduzione e che pertanto è suscettibile degli stessi sviluppi che si sono studiati in relazione alla trasmissione di calore per conduzione per descrivere il comportamento di pareti composte.

Come si ricorderà, nelle ipotesi di regime stazionario e trasmissione monodimensionale, la trasmissione di calore per conduzione in una parete composta è descritta dalla seguente equazione derivata dal postulato di Fourier:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

essendo U il coefficiente di scambio termico globale, detto anche *trasmissanza termica specifica* della parete, che è espresso dall'equazione:

$$U = \frac{1}{R_{glob}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

nella quale deve essere chiaro che le temperature T_i e T_e , con $T_i > T_e$, sono quelle dell'aria dell'ambiente interno ed esterno, supposte uniformi nello spazio e costanti nel tempo. Come visto nel capitolo 13 si possono ricavare le temperature su ciascuna interfaccia con la relazione:

$$T_{(n+1)} = T_n - \frac{R_n}{R_{glob}} \cdot (T_i - T_e)$$

In modo analogo, con le stesse ipotesi, è possibile esprimere la trasmissione di massa del vapor d'acqua con una equazione derivata dalla **legge di Fick**. Essa fornisce il flusso di vapore trasmesso per diffusione attraverso una parete composta da strati di materiale ognuno dei quali si comporta rispetto al vapore come una membrana semipermeabile. Si ottiene pertanto:

$$\dot{g} = \Pi \cdot A \cdot (p_{vi} - p_{ve}) \quad (15.13)$$

essendo p_{vi} e p_{ve} le pressioni parziali del vapor d'acqua nell'aria umida corrispondente ai due ambienti interno ed esterno separati dalla parete. In analogia con il parametro U della trasmissione di calore, Π è detto **permeanza specifica della parete composta** e si ottiene dall'inverso della somma delle resistenze alla trasmissione del vapor d'acqua per diffusione proprie ad ognuno dei singoli strati componenti la parete.

Si noti che nel caso della trasmissione di massa sono assenti le resistenze liminari dovute al fenomeno di adduzione. Risulta:

$$\Pi = \frac{1}{R_{vglob}} = \frac{1}{\frac{s_1}{\pi_{v1}} + \dots + \frac{s_n}{\pi_{vn}}} \quad (15.14)$$

dove la grandezza π_v , detta **permeabilità specifica al vapor d'acqua del materiale** che compone ogni strato, descrive (analogamente alla conduttività nel campo termico) la capacità del materiale di trasmettere la componente i -esima *vapor d'acqua* della miscela di gas denominata *aria umida*.

Dalla (15.14) si vede che l'inverso della permeanza specifica al vapor d'acqua della parete corrisponde ad una resistenza che viene denominata **resistenza globale della parete alla trasmissione del vapor d'acqua per diffusione**. La (15.13) si può allora anche scrivere come:

$$\dot{g} = \frac{A \cdot (p_{vi} - p_{ve})}{R_{vglob}} \quad (15.15)$$

Analogamente a quanto avviene nella conduzione termica, nelle ipotesi di regime stazionario e trasmissione monodimensionale, in assenza di fenomeni di condensazione il flusso di vapore d'acqua che attraversa per diffusione ogni strato deve essere costante. In particolare si può dire che il flusso che attraversa lo strato ennesimo in conseguenza delle differenze di pressione parziale sulle sue due facce deve essere uguale al flusso che attraversa tutta la parete in conseguenza delle differenze di pressione parziale sulle sue due facce estreme.

Infatti, se così non fosse, in qualche punto della parete varierebbe la concentrazione locale di vapore e non sarebbe pertanto più rispettata la condizione di costanza nel tempo di tale grandezza che è alla base dell'ipotesi di regime stazionario.

L'uguaglianza dei flussi di vapore si esprime allora nel modo seguente:

$$\frac{A \cdot (p_{vn} - p_{v(n+1)})}{R_{vn}} = \frac{A \cdot (p_{vi} - p_{ve})}{R_{vglob}} \quad (15.16)$$

essendo p_{vn} e $p_{v(n+1)}$ le pressioni parziali del vapor d'acqua sulle interfacce che delimitano lo strato ennesimo.

Come si vede, nella (15.16) l'area della parete A si semplifica e la differenza di pressioni parziali del vapor d'acqua che si realizza sulle due facce dello strato ennesimo risulta:

$$(p_{vn} - p_{v(n+1)}) = \frac{R_{vn}}{R_{vglob}} \cdot (p_{vi} - p_{ve}) \quad (15.17)$$

Il valore della pressione parziale del vapor d'acqua che si realizza a valle dello strato ennesimo vale dunque:

$$p_{v(n+1)} = p_{vn} - \frac{R_{vn}}{R_{vglob}} \cdot (p_{vi} - p_{ve}) \quad (15.18)$$

Si osserva che con espressioni analoghe alla (18) è possibile ottenere i valori della pressione parziale del vapor d'acqua ad ogni interfaccia e descrivere dunque l'andamento delle pressioni parziali all'interno della parete.

Si ricordi, tuttavia, che il vapore d'acqua è il componente condensabile della miscela aria umida e può avvenire, pertanto, che in un qualsiasi punto della parete caratterizzato dalla temperatura T_p la pressione parziale eguagli quella di saturazione del vapore alla temperatura T_p . In questo punto il vapor d'acqua viene a trovarsi in condizioni di saturazione, è evidente pertanto che basterà un piccolo decremento della temperatura T_p perchè esso condensi. Se ciò avviene all'interno della parete si avrà un cambiamento di fase che darà origine alla cosiddetta **condensazione interstiziale**, ovviamente l'ipotesi di stazionarietà del processo all'interno della parete verrà a cadere e con essa la validità della (15.16).

Inoltre, il fatto che parte della materia in trasferimento passi alla fase liquida presuppone che la trasmissione di massa non avvenga più per sola diffusione in quanto il condensato verrà trasmesso all'interno della parete secondo processi diversi dalla diffusione. A questo punto lo studio della trasmissione di massa nella parete diviene complicato e deve essere affrontato in modo adeguato.

Come anzidetto la condensazione interstiziale sarebbe sempre da evitare, cosa che si può fare progettando opportunamente la parete ed eventualmente introducendo in essa materiali con bassissima permeabilità al vapor d'acqua. Questi materiali, che vengono utilizzati in strati di spessore piccolissimo che prendono il nome corrente di **barriere al vapore**.

Va detto che nella pratica edilizia le applicazioni sono rivolte più che altro a verificare se all'interno di una parete avvenga o no condensazione interstiziale, piuttosto che a studiare dettagliatamente la trasmissione di massa dell'acqua. E' pertanto possibile, sapendo che comunque si tratta di una pesante semplificazione, analizzare il fenomeno di trasmissione del vapore considerando la sola diffusione.

Per il calcolo della pressione di saturazione p_s il modo più rigoroso consiste nell'utilizzare la formula 10.14 già vista nel capitolo 10 riguardante l'aria umida:

$$\ln(p_s) = \frac{A \cdot t}{B + t} + C \quad (10.14)$$

in cui t è la temperatura in [°C] e p_s risulta espressa in Pascal, i valori dei coefficienti A, B e C sono i seguenti:

-40 °C < t < 0 °C:	A = 22,376;	B = 271,68;	C = 6,4146
0 °C < t < +40 °C:	A = 17,438;	B = 239,78;	C = 6,4147

Ma è possibile anche utilizzare un diagramma psicrometrico ove sia riportata la retta delle pressioni, come quello in figura 15.2, oppure tabulati come quello riportato in tabella 15.II.

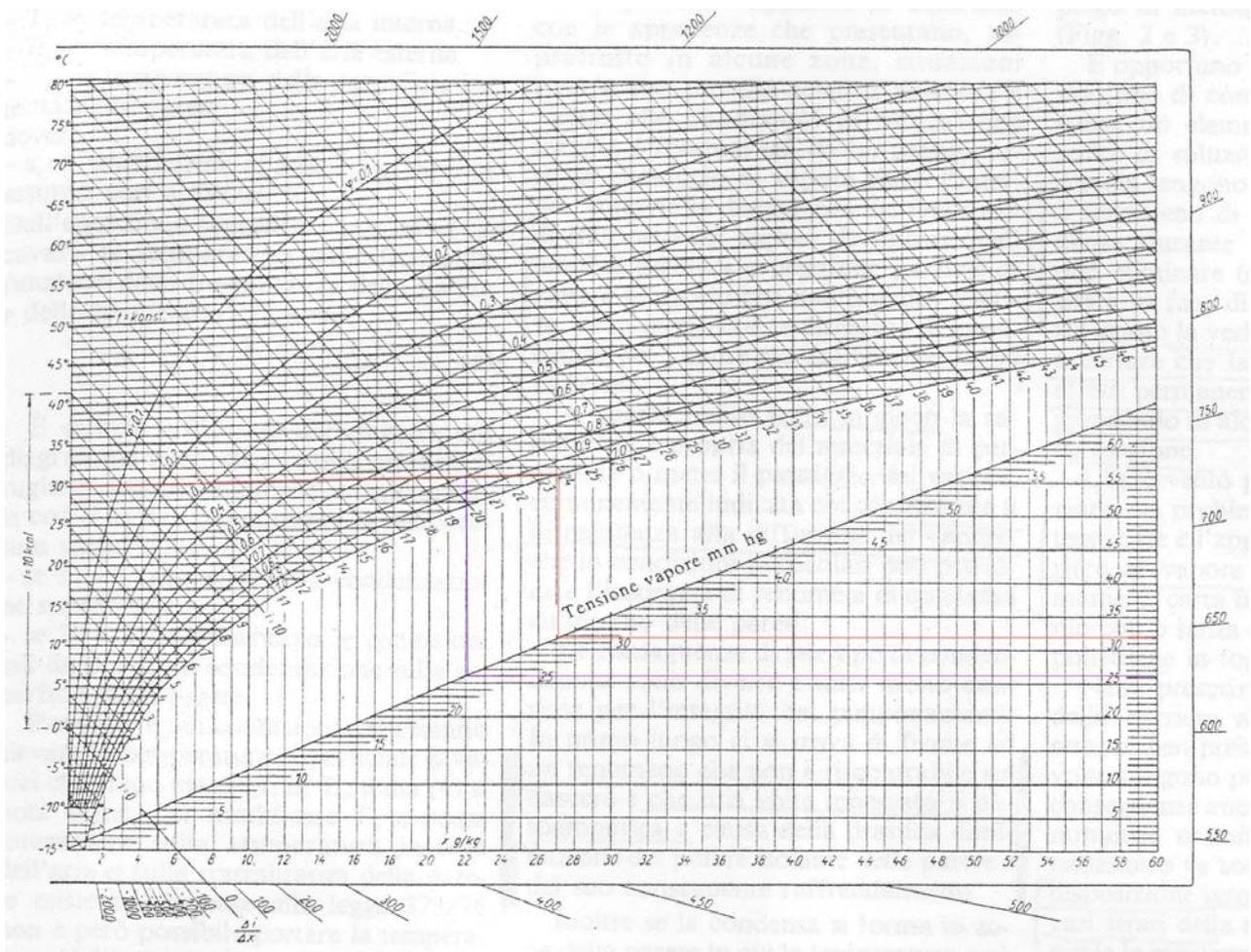


Figura 15.2. Diagramma di Mollier con riportata la retta delle pressioni parziali del vapore.

15.6 DIAGRAMMA DI GLASER

Con i limiti che si sono rilevati in precedenza, per verificare se all'interno di una parete edilizia avvenga il fenomeno della condensa interstiziale si può ricorrere ad un procedimento grafico detto diagramma di Glaser, dal nome dello studioso che lo ha proposto nel 1958 per l'analisi dei fenomeni di condensazione nelle pareti. Il metodo è valido nelle ipotesi che:

- la trasmissione di massa avvenga per sola diffusione,
- il campo delle temperature e delle concentrazioni del vapore d'acqua sia costante nel tempo, ovvero che il regime sia stazionario,
- le trasmissioni di energia e di massa si possano supporre monodimensionali,
- ogni singolo materiale che compone la parete si possa supporre omogeneo e isotropo,
- le sue proprietà si possano supporre indipendenti dalle variazioni di temperatura e di concentrazione del vapore d'acqua.

Per poter applicare il procedimento che va sotto il nome di *diagramma di Glaser*, come d'altra parte per eseguire in qualsiasi altro modo lo studio dei campi termico ed igrometrico che riguardano la parete, si devono definire le condizioni al contorno ovvero si devono determinare gli stati termodinamici assunti dall'aria umida negli ambienti che la parete separa.

Si utilizzano, in genere, le grandezze di stato **temperatura** e **umidità relativa** cosicché, posto che la parete sia una parete perimetrale, lo stato dell'aria dell'ambiente interno è determinato dai valori t_i e UR_i richiesti ai fini del comfort e quello dell'ambiente esterno è determinato dai valori t_e e UR_e valori noti come dati di progetto.

TABELLA 15.II. Pressione di saturazione del vapor d'acqua in funzione della temperatura

°C	Pa	mm Hg	°C	Pa	mm Hg
-10	260	1,95	8	1073	8,05
-9	284	2,13	9	1148	8,61
-8	309	2,32	10	1228	9,21
-7	337	2,53	11	1312	9,84
-6	368	2,76	12	1416	10,62
-5	401	3,01	13	1497	11,23
-4	437	3,28	14	1599	11,99
-3	476	3,57	15	1705	12,79
-2	517	3,88	16	1817	13,63
-1	563	4,22	17	1937	14,53
0	611	4,58	18	2064	15,48
1	657	4,93	19	2197	16,48
2	705	5,29	20	2337	17,53
3	759	5,69	21	2486	18,65
4	813	6,1	22	2644	19,83
5	872	6,54	23	2809	21,07
6	935	7,01	24	2984	22,38
7	1001	7,51			

Il diagramma si basa sulla rappresentazione dell'andamento delle pressioni parziali e della pressione di saturazione del vapore d'acqua all'interno della parete.

In genere, tale andamento si determina, per semplicità, stimando i valori delle suddette pressioni ad ogni superficie di interfaccia degli strati omogenei che compongono la parete e assumendo come lineare l'andamento delle stesse all'interno di ogni strato.

Su tale diagramma si individuano le eventuali zone nelle quali la pressione parziale risulta uguale o superiore alla pressione di saturazione, in queste zone il vapore condensa.

Per prevenire i danni causati dai fenomeni di condensazione interstiziale la verifica igrometrica con il diagramma di Glaser va condotta su ogni elemento di frontiera esterna: pareti verticali, solai di primo piano, di copertura, di logge rientranti, ecc.

ESEMPIO 15.1.

Tracciare il diagramma di Glaser di una parete multistrato della quale si riportano in Tab. 15.III le proprietà geometriche e termofisiche degli strati principali dal punto di vista termoigrometrico, a partire dal lato interno. I valori dei coefficienti di adduzione per le superfici verticali sono nella tabella riportata in 14.1.2 ; le caratteristiche termoigrometriche dell'aria, negli ambienti separati dalla struttura, siano le seguenti:

temperatura e umidità relativa dell'aria interna $t_i = 20 \text{ °C}$ $\varphi_i = 50\%$

temperatura e umidità relativa dell'aria esterna $t_e = -5 \text{ °C}$ $\varphi_e = 90\%$

Tab. 15.III - Stratificazione della parete considerata; dati espressi in unità base del S.I.

N° strato	Descrizione	Spessore (s)	Conduttività (λ)	Resistenza Term. (R)	Coeff. Res Vap. (μ)	Resistenza al Vap. (R_v)
1 (interno)	Blocchi in laterizio forato	0,08	-	0,20	5	$2,1 \cdot 10^9$
2	Pannelli in fibre minerali	0,05	0,045	-	1	$0,26 \cdot 10^9$
3 (esterno)	Pannello di cls armato	0,16	1,91	-	70	$58 \cdot 10^9$

Si noti che mentre gli strati reali sono tre, le resistenze termiche da considerare sono cinque e le interfacce, definite da un pedice, sono quattro: 1=(interno, str1); 2=(str1, str2); 3=(str2, str3); 4=(str3, esterno). La resistenza termica complessiva vale:

$$R_{tot} = \frac{1}{\alpha_i} + R_2 + R_3 + R_4 + \frac{1}{\alpha_e} = \frac{1}{8,1} + 0,2 + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,16}{1,91} + \frac{1}{23,3} =$$

$$= 0,123 + 0,20 + 1,11 + 0,084 + 0,043 = 1,56 \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = 0,641 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Il salto totale di temperatura si ripartisce sulle diverse resistenze termiche secondo le seguenti frazioni percentuali : 7,9% ; 12,8% ; 71,1% ; 5,4% ; 2,8%.

Il flusso che attraversa tutti gli strati è:

$$\dot{q} = \frac{(t_i - t_e)}{R_{tot}} = 16,01 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

con tale valore oppure con le precedenti frazioni, si determinano, come si è visto al par. 15.2.4, le cadute di temperatura su ogni strato dunque le temperature su tutte le interfacce tra gli strati; ricordando che la prima interfaccia (temperatura t_1) è quella tra l'aria del locale e la superficie della parete rivolta verso l'ambiente interno e la resistenza a monte di tale interfaccia è quella resistenza di adduzione interna R_{ai} .

Si ottiene:

$$t_1 = t_i - \frac{(t_i - t_e) \cdot R_1}{R_{tot}} = 20 - 1,97 = 18,03 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = t_1 - \frac{(t_i - t_e) \cdot R_2}{R_{tot}} = 18,03 - 3,2 = 14,83 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_3 = t_2 - \frac{(t_i - t_e) \cdot R_3}{R_{tot}} = 14,83 - 17,77 = -2,94 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_4 = t_3 - \frac{(t_i - t_e) \cdot R_4}{R_{tot}} = -2,94 - 1,35 = -4,29 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_e = t_4 - \frac{(t_i - t_e) \cdot R_e}{R_{tot}} = -4,29 - 0,69 = -5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

L'ultimo calcolo serve come verifica dell'errore cumulativo nei calcoli delle precedenti temperature.

Si ricavano a questo punto i valori della pressione di saturazione, p_s [Pa], che corrispondono alle temperature sulle interfacce tra gli strati:

Tab. 15.IV - Distribuzione della pressione di saturazione nella parete considerata.

t_i (°C)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	T_3 (°C)	t_4 (°C)	t_e (°C)
20	18,0	14,8	- 2,9	- 4,3	- 5
p_{si} (Pa)	p_{s1} (Pa)	p_{s2} (Pa)	p_{s3} (Pa)	p_{s4} (Pa)	p_{se} (Pa)
2338	2063	1684	480	427	402

In base alla definizione di umidità relativa φ , le pressioni parziali del vapore, nell'ambiente interno ed esterno e sulle due facce della struttura, espresse in [Pa] valgono:

$$p_{vi} = \varphi_i \cdot p_{si} = 2338 \cdot 0,5 = 1169 \text{ [Pa]}$$

$$p_{ve} = \varphi_e \cdot p_{se} = 402 \cdot 0,9 = 362 \text{ [Pa]}$$

La resistenza complessiva al vapore della parete vale:

$$R_{v, glob} = \frac{S_1}{\pi_1} + \frac{S_2}{\pi_2} + \frac{S_3}{\pi_3} = 10^9 \cdot (2,1 + 0,26 + 58) = 60,4 \cdot 10^9 \left[\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{kg} \right]$$

Il flusso che attraversa la parete vale:

$$\dot{g}_v = \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{R_{v, glob}} = \frac{(1169 - 362)}{60,4 \cdot 10^9} = 13,36 \cdot 10^{-9} \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

Le pressioni parziali p_2 e p_3 sulle interfacce interne, calcolate con la (15.18), sono:

$$p_{v2} = p_{vi} - \dot{g}_v \cdot R_{v,1} = 1169 - \frac{(1169 - 362)}{60,4} \cdot 2,1 = 1141 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v3} = p_{v2} - \dot{g}_v \cdot R_{v,2} = 1141 - \frac{(1169 - 362)}{60,4} \cdot 0,26 = 1137 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v4} = p_{v3} - \dot{g}_v \cdot R_{v,3} = 1137 - \frac{(1169 - 362)}{60,4} \cdot 58 = 362 \text{ [Pa]}$$

L'ultimo calcolo serve come verifica delle precedenti pressioni calcolate.

Riportando in diagramma i valori delle pressioni parziali e di saturazione (fig. 15.3) si nota che nella zona compresa tra il punto 2' ed il punto 3' (strato isolante e strato in cls) la pressione parziale del vapore supera quella di saturazione pertanto lì il vapore condensa.

E' fisicamente impossibile che la pressione parziale sia maggiore della pressione di saturazione, pertanto i valori effettivi delle pressioni parziali, dal punto 2' sino al punto 3', sono inferiori o uguali a quelli delle corrispondenti pressioni di saturazione.

Il fenomeno evidenziato dal diagramma è grave perché l'isolante bagnandosi perderà le proprie caratteristiche e quindi la trasmittanza U crescerà rispetto al valore calcolato con l'isolante asciutto; inoltre il gelarsi dell'acqua nella zona del calcestruzzo che si trova sotto 0°C può provocare la fessurazione del materiale

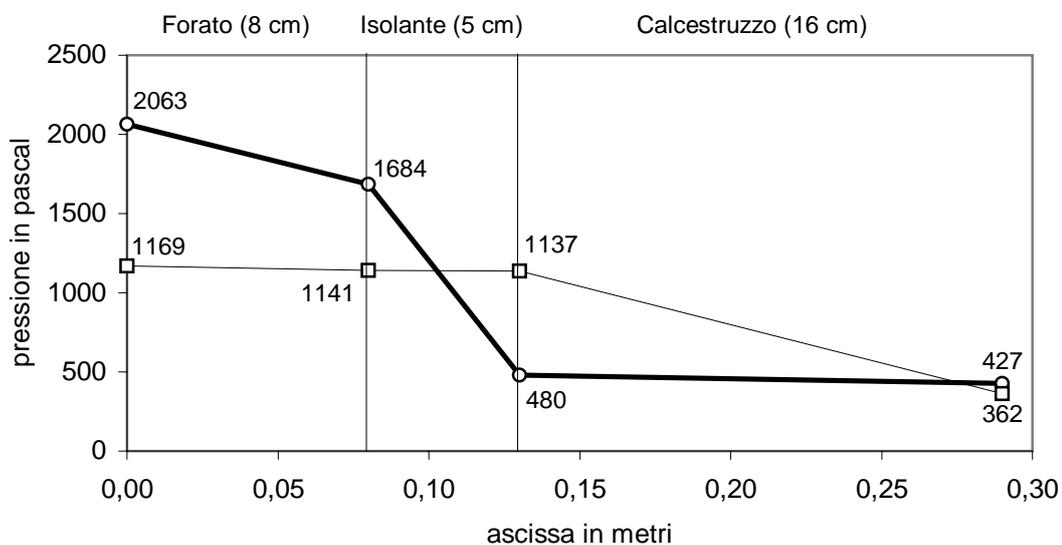


Fig.15.3 - Diagramma di Glaser di una parete composta da uno strato interno conduttore e resistenza al vapore media, uno strato intermedio isolante e resistenza al vapore bassa, uno strato esterno conduttore e resistenza al vapore alta. La linea meno marcata ottenuta unendo i valori calcolati con la legge di Fick mostra che la pressione del vapore supera quella di saturazione nella zona tra isolante e calcestruzzo; pertanto si manifesta la condensazione interstiziale.

15.7 BARRIERA AL VAPORE

Per eliminare il fenomeno della condensa all'interno della parete occorre inserire prima del punto di inizio della condensazione un materiale avente elevata resistenza al passaggio del vapore.

Per questo fine si utilizzano sottili fogli di materiali come la carta trattata con bitume, fogli di materia plastica oppure fogli di alluminio, che sono quasi impermeabili al vapore; questo strato prende il nome di **barriera al vapore**.

Questo provvedimento risulta efficace solo se la barriera è situata nella parte calda della parete prima del punto di inizio della condensazione (ad esempio sulla faccia calda dell'isolante) e se la resistenza della barriera al vapore è "sufficientemente elevata".

Si noti che lo spessore delle barriere al vapore è un dato caratteristico di ogni prodotto commerciale, pertanto l'utente non può scegliere liberamente, all'interno di una data produzione, lo spessore e quindi la resistenza al vapore necessaria, poiché il valore richiesto per quest'ultima potrebbe essere maggiore del massimo realizzabile con quel materiale e con gli spessori disponibili.

E' in ogni caso essenziale osservare che l'introduzione di una barriera al vapore deve essere fatta in sede di progetto in quanto è impossibile inserirla quando la parete è già costruita. Questo fatto mostra di per sé la responsabilità che il progettista si assume e l'importanza di eseguire una verifica del comportamento termogrometrico della parete in sede progettuale.

ESEMPIO 15.2

*Determinare il valore minimo della resistenza della barriera al vapore (b.v.) per evitare la formazione di condensa nell'esempio 15.1. Tale strato deve produrre una **caduta di pressione** (c.d.p.) tale far scendere la pressione parziale del vapore p_{v2} , prima dello strato coibente, a valori inferiori di quello della pressione di saturazione dopo lo stesso strato ($p_{S3} = 480 \text{ Pa}$). Nel nuovo diagramma p_{v2} tenderà a crescere, a causa dell'inserimento della barriera che riduce il flusso globale di vapore (facente parte del termine che viene sottratto nelle equazioni come la 15.18 per il calcolo delle pressioni interne), e gran parte della totale differenza di pressione sarà costituita dalla c.d.p. sulla barriera. Assumiamo il caso peggiore e poniamo: $p_{v2} \approx p_{vi} = 1169 \text{ Pa}$ (la pressione del vapore prima della barriera non può essere maggiore di quella all'interno del locale). La c.d.p. che la barriera deve realizzare, è pari a $p_{v2} - p_{S3} = 1169 - 480 = 689 \text{ Pa}$, e rappresenta una frazione della totale differenza di pressione pari a:*

$$f_{BV} = \frac{(1169 - 480)}{(1169 - 362)} = \frac{689}{807} = 0,85$$

Dalla (15.16) si rileva che, date le pressioni parziali del vapore nei due ambienti ($p_{vi} - p_{ve}$) e la resistenza totale della parete al passaggio di vapore $R_{v, glob}$ (fissato dunque il flusso di vapore che attraversa la parete \dot{g}_v), le c. d. p. nei vari strati sono proporzionali alle rispettive resistenze al flusso di vapore, pertanto il rapporto tra la c.d.p. realizzata dalla b.v. e la c.d.p. totale tra interno ed esterno è data anche dal rapporto tra la resistenza della barriera e la nuova resistenza complessiva, che è pari alla somma della resistenza della barriera più la resistenza $R_{V,t}$ degli strati che formano la parete senza barriera:

$$f_{BV} = \frac{R_{BV}}{(R_{BV} + R_{V,t})}$$

pertanto possiamo ricavare:

$$(R_{BV} + R_{V,t}) \cdot f_{BV} = R_{BV} \rightarrow R_{BV} \cdot (1 - f_{BV}) = f_{BV} \cdot R_{V,t}$$

$$R_{BV} = \frac{f_{BV} \cdot R_{V,t}}{(1 - f_{BV})} = \frac{0,85 \cdot 60,4 \cdot 10^9}{0,15} = 342 \cdot 10^9 \left[\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{kg} \right]$$

La resistenza richiesta alla barriera al vapore è molto elevata e si può ottenere con un foglio di alluminio incollato sulla faccia calda dell'isolante e rivestito con un foglio di polietilene, la resistenza è $R_V \approx 440 \cdot 10^9$ [$m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$] e lo spessore complessivo della barriera è circa $50 \mu m$. Tale spessore è trascurabile, pertanto non viene alterata la resistenza termica della parete. Quindi la distribuzione delle temperature resta uguale a quella di fig. 15.1, e le pressioni di saturazione non cambiano.

Invece la distribuzione delle pressioni parziali viene modificata poiché la resistenza aggiunta ($440 \cdot 10^9$) ha un valore molto grande rispetto a quella della parete senza barriera ($60,4 \cdot 10^9$).

La nuova struttura è composta da quattro strati fisici e le pressioni di saturazione e parziali del vapore devono essere valutate su cinque interfacce: 1 (interno-str1), 2 (str1-BV), 3 (BV-str3), 4 (str3-str4), 5 (str4-esterno).

La nuova resistenza al vapore della parete è:

$$R_{Vglob} = \frac{S_1}{\pi_1} + R_{BV} + \frac{S_2}{\pi_2} + \frac{S_3}{\pi_3} = 10^9 \cdot (2,1 + 440 + 0,26 + 58) = 500,4 \cdot 10^9 \left[\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{kg} \right]$$

Il flusso di vapore che attraversa la parete è sceso a:

$$\dot{g}_v = \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{R_{Vglob}} = \frac{(1169 - 362)}{500,4 \cdot 10^9} = 1,61 \cdot 10^{-9} \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$$

La distribuzione delle pressioni, tenuto conto della nuova sequenza degli strati, risulta:

$$p_{v2} = p_{vi} - \dot{g}_v \cdot R_{v,1} = 1169 - \frac{(1169 - 362)}{500,4} \cdot 2,1 = 1166 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v3} = p_{v2} - \dot{g}_v \cdot R_{BV} = 1166 - \frac{(1169 - 362)}{500,4} \cdot 440 = 456 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v4} = p_{v3} - \dot{g}_v \cdot R_{v,2} = 456 - \frac{(1169 - 362)}{500,4} \cdot 0,26 = 456 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v5} = p_{v4} - \dot{g}_v \cdot R_{v,3} = 456 - \frac{(1169 - 362)}{500,4} \cdot 58 = 362 \text{ [Pa]}$$

dove l'ultimo calcolo serve come verifica delle precedenti pressioni. Come si può osservare la c.d.p. nello strato 4 è trascurabile, si è molto ridotta rispetto alla configurazione di partenza dato che la presenza della BV ha ridotto il flusso di vapore attraverso la parete (che fa parte del termine che viene sottratto alla pressione nell'interfaccia precedente).

La fig. 15.4 mostra il nuovo diagramma nel quale si nota che per effetto della barriera introdotta la linea della pressione parziale del vapore risulta sempre inferiore a quella della pressione di saturazione. Infine si ricorda che i calcoli svolti poggiano sull'ipotesi che la barriera al vapore sia continua su tutta la parete, per ottenere tale risultato occorre sigillare i giunti orizzontali e verticali tra i pannelli con nastro autoadesivo plastificato di larghezza maggiore di 5 cm.

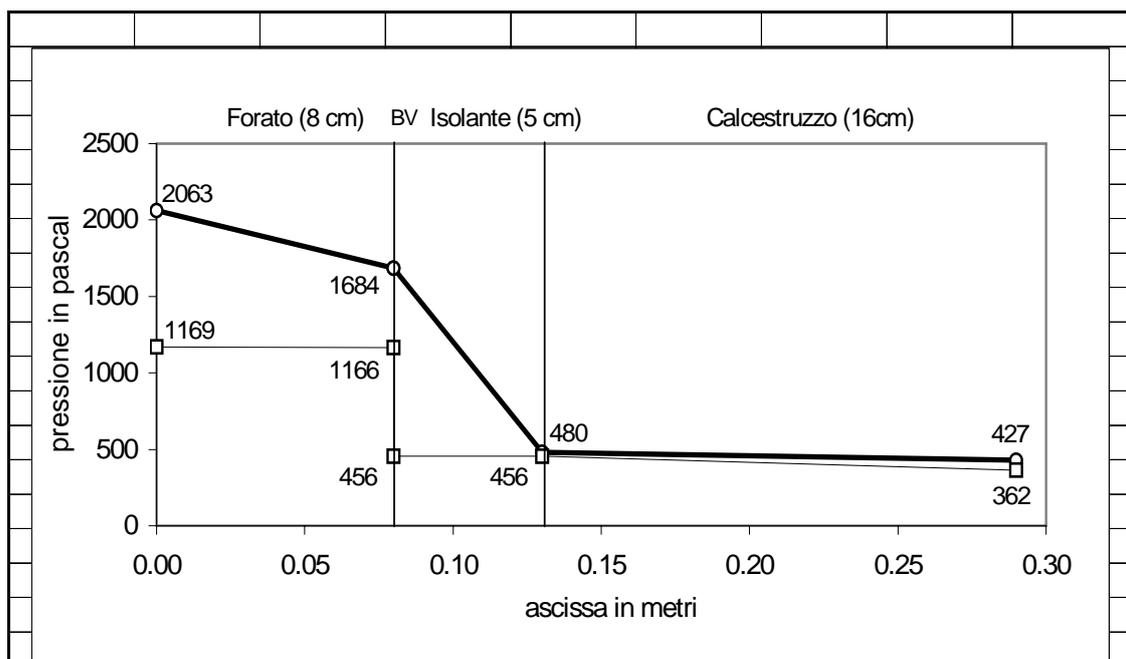


Fig. 15.4 - Diagramma di Glaser della parete di fig. 15.3, con l'inserimento di una barriera al vapore (BV) viene creata una caduta localizzata di pressione parziale del vapore, che permette a questa di restare ovunque inferiore alla pressione di saturazione; pertanto scompare la condensazione interstiziale.

ESEMPIO 15.3.

Tracciare il diagramma di Glaser di una copertura piana composta dagli strati funzionali principali (dal punto di vista termoigrometrico) descritti dalle proprietà geometriche e termofisiche riportate in Tab. 15.V, a partire dalla faccia interna. Le caratteristiche termoigrometriche dell'aria, negli ambienti separati dalla struttura, siano le seguenti:

temperatura e umidità relativa dell'aria interna $t_i = 20 \text{ °C}$ $\varphi_i = 50\%$

temperatura e umidità relativa dell'aria esterna $t_e = -5 \text{ °C}$ $\varphi_e = 90\%$

Tab. 15.V - Stratificazione della copertura considerata nell'esempio 15.3; unità base del S.I.

N° strato	Descrizione	Spessore (s)	Conduttività (λ)	Resistenza termica (R)	Coeff. Resist. Vap. (μ)	Resistenza al vapore (R_v)
1 (interno)	soletta in latero-cemento	0,20		0,30	6	$6,2 \cdot 10^9$
2	massetto in cls	0,04	1,16	0,035	50	$10,4 \cdot 10^9$
3	primer (0,5 mm) + membrana bitume-polimeri (1,5mm) + foglio di alluminio	$2 \cdot 10^{-3}$	0,2	0,010	60000	$622 \cdot 10^9$
4	pannello in lana di vetro	0,05	0,05	1	1	$0,3 \cdot 10^9$
5 (esterno)	membrana impermeabilizzante di bitume, protetta con lamelle di ardesia	$4 \cdot 10^{-3}$	0,4	0,010	20000	$415 \cdot 10^9$

La resistenza termica totale della struttura è:

$$R_t = 1/\alpha_j + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + 1/\alpha_e = 1/8,1 + 0,3 + 0,035 + 0,01 + 1 + 0,01 + 1/23,3 = 1,521 \text{ [m}^2 \text{ K/W]}$$

Il flusso di calore che attraversa tutti gli strati vale: $\dot{q} = \frac{(t_i - t_e)}{R_t} = \frac{25}{1,521} = 16,43 \text{ [W/m}^2 \text{]}$

La resistenza totale al vapore della struttura vale:

$$R_{v_{glob}} = 10^9 \cdot (6,2 + 10,4 + 622 + 0,3 + 415) = 1054 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}}{\text{kg}} \right]$$

Il salto di pressione totale del vapore avviene tra le seguenti pressioni, interna ed esterna:

$$p_{vi} = \varphi_i \cdot p_{si} = 2338 \cdot 0,5 = 1169 \text{ [Pa]}$$

$$p_{ve} = \varphi_e \cdot p_{se} = 402 \cdot 0,9 = 362 \text{ [Pa]}$$

Il flusso di vapore che attraversa tutti gli strati è:

$$\dot{g}_i = \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{R_{v_{glob}}} = \frac{(1169 - 362)}{1054 \cdot 10^9} = 766 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$$

Operando come nei casi precedenti si calcolano le temperature e le pressioni parziali del vapore in base alle resistenze dei diversi strati e si ottengono i dati per la costruzione del diagramma di Glaser, riportati in Tab. 15.VI.

Tab. 15.VI - Distribuzione delle temperature (°C) e delle pressioni parziali del vapore e di saturazione (Pa), nella parete dell'esempio 15.3.

t_i	t_1	t_2	T_3	t_4	t_5	t_6	t_e
20	18,0	13,0	12,5	12,3	- 4,1	- 4,3	- 5
p_{Si}	p_{S1}	p_{S2}	p_{S3}	p_{S4}	p_{S5}	p_{S6}	p_{Se}
2338	2063	1497	1450	1431	434	427	402
p_{vi}	p_{v1}	p_{v2}	p_{v3}	p_{v4}	p_{v5}	p_{v6}	p_{ve}
1169	1169	1164	1156	680	680	362	362

Si nota che per ottenere risultati accettabili è necessario che la barriera crei una caduta di pressione maggiore di quella dovuta alla guaina.

La membrana impermeabilizzante (strato 5), per la natura del materiale di cui è composta, ha una resistenza al vapore molto alta, in assenza della barriera al vapore (strato 3) la pressione parziale del vapore nel pannello coibente (strato 4) si manterrebbe elevata, mentre la pressione di saturazione all'interno dello stesso strato, che dipende unicamente dalla temperatura, diminuirebbe rapidamente, pertanto il vapore condenserebbe.

Per contrastare tale andamento sfavorevole di p_v occorre aggiungere, sulla faccia calda dell'isolante, una ulteriore barriera avente resistenza al vapore maggiore di quella della membrana impermeabilizzante 5. L'adozione di tale barriera, ad alta resistenza, posta prima dello strato 4 permette una migliore ripartizione delle pressioni.

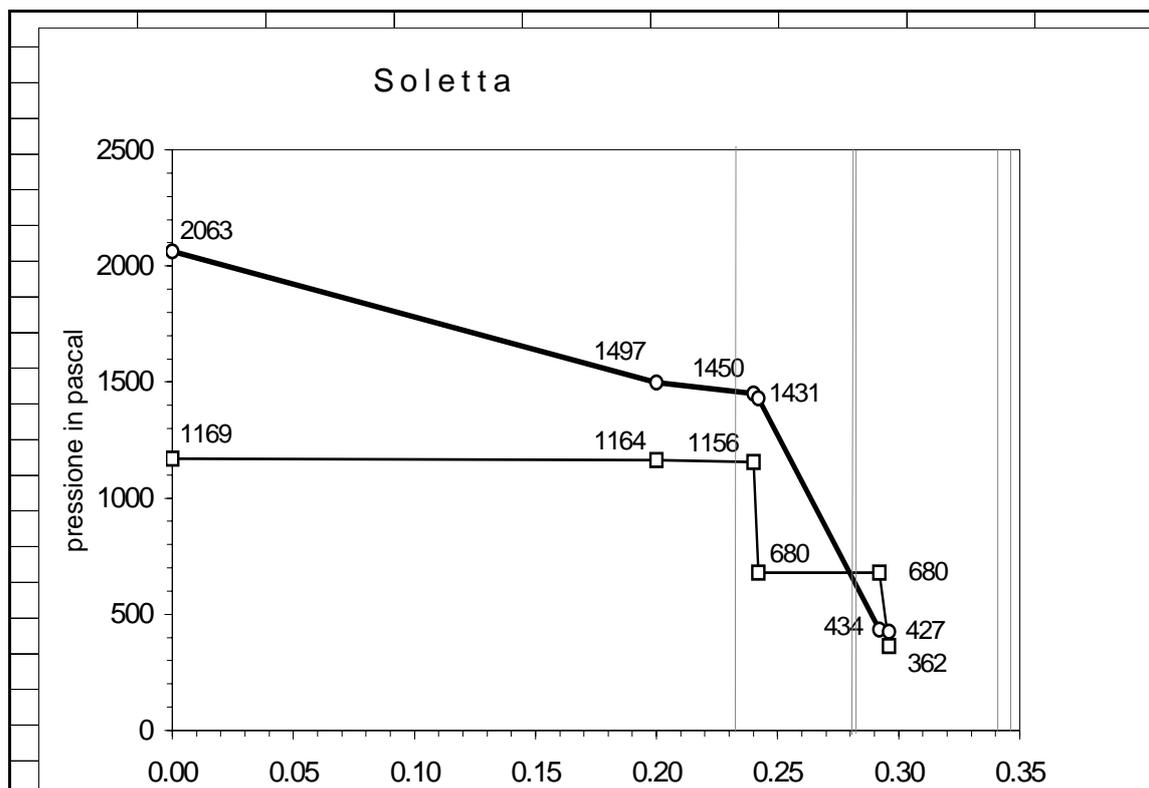


Fig. 15.5 - Diagramma di Glaser per copertura piana con guaina impermeabilizzante e barriera al vapore.

15.8 SOLUZIONI COSTRUTTIVE PER I TETTI PIANI

Nella fig. 15.5 è riportato il diagramma di Glaser della struttura di copertura, si nota che la condensazione è ancora presente nello strato coibente perché la resistenza della barriera, è dello stesso ordine di grandezza di quella della guaina impermeabilizzante, quest'ultima infatti, per motivi di robustezza meccanica, ha uno spessore di 4 mm contro uno spessore di 2 mm della membrana bituminosa (che altrimenti potrebbe realizzare una resistenza maggiore in quanto dotata di un foglio di alluminio di spessore circa 50 μm).

In tutte le strutture che hanno la stratificazione simile a quella dell'esempio 15.3 (strato impermeabile sulla faccia esterna) l'adozione di una barriera al vapore non può eliminare del tutto la formazione di acqua di condensazione sotto la membrana impermeabile, tuttavia se si opera come nell'esempio citato è possibile ridurre la quantità d'acqua condensata a valori così piccoli che la struttura può essere considerata accettabile, come si vedrà più avanti.

Se si vuole eliminare del tutto la condensazione, nelle coperture piane, occorre che il vapore che giunge sotto l'impermeabilizzazione possa essere trasferito direttamente all'esterno, senza che debba attraversarla. Ciò si può ottenere con tre tipi di interventi:

- I) realizzando una intercapedine ventilata tra la guaina impermeabile e lo strato isolante;
- II) realizzando uno strato drenante al di sotto della guaina ed inserendo dei caminetti aeratori che mettano in comunicazione lo strato drenante con l'ambiente esterno;
- III) scambiando le posizioni reciproche dell'isolante termico e della guaina impermeabile, cioè disponendo la guaina sotto l'isolante; questa tecnica, denominata tetto rovescio, risolve il problema eliminando la causa della condensazione, infatti la guaina, nella nuova posizione, svolge la funzione di barriera al vapore, posta nella posizione corretta, dal punto di vista igrometrico.

Alle tre tecniche sopra citate corrispondono tre famiglie di soluzioni tecnologiche. La tecnica della ventilazione trova applicazione nei tetti a falde perché risulta facile inserire nella stratificazione della copertura una intercapedine di 4-5 cm e ventilarla mediante aperture poste sotto la grondaia e sul colmo.

La tecnica dei caminetti e quella del tetto rovescio trovano applicazione nei tetti piani molto estesi. L'intervento con i caminetti comporta, dal punto di vista costruttivo, la foratura della guaina ed il ripristino della sua tenuta all'acqua mediante la saldatura a caldo di raccordi formati da un collare piano, di materiale simile alla guaina, che prosegue con un cilindro che racchiude il caminetto. Lo strato drenante è costituito da materiale molto permeabile al vapore che permette l'afflusso del vapore verso i caminetti.

La tecnica del tetto rovescio espone l'isolante all'azione dell'acqua, pertanto è necessario utilizzare materiali isolanti a celle chiuse che siano impermeabili all'acqua, non solo sulle due facce principali ma anche sui quattro bordi. Vengono prodotti, per questo scopo, pannelli di polistirene trattati con tecniche che conferiscono alla pelle esterna del materiale proprietà idonee ad evitare l'ingresso dell'acqua; le prove sul campo, eseguite su pannelli protetti da uno strato di materiale drenante come ghiaia oppure con quadri di cemento, posati su supporti distanziatori, hanno dimostrato che sul lungo termine (oltre 10 anni) non vi è una variazione apprezzabile della conduttività del materiale isolante esposto all'acqua.

L'effetto della intercapedine ventilata e dei caminetti è simile e consiste nel permettere al vapore di uscire verso l'esterno senza attraversare la guaina; ovvero nel portare la pressione parziale del vapore sotto la guaina ad un valore vicino a quello della pressione parziale del vapore nell'aria esterna e quindi il risultato finale equivale a diminuire drasticamente la resistenza al vapore della guaina. Il diagramma di Glaser per questi due casi va fatto riducendo a zero, oppure ad un valore molto basso ($\mu = 1 - 2$), la resistenza al vapore di tutto il pacchetto di strati collocati sopra l'intercapedine ventilata o sopra lo strato drenante.

15.9 TRATTAZIONE APPROFONDATA DEL DIAGRAMMA DI GLASER

L'andamento delle pressioni di saturazioni all'interno di una struttura omogenea non è in effetti rettilineo, bensì curvilineo come rappresentato in figura 15.6.

Ipotizzando l'andamento delle pressioni parziali (linea blu) e di saturazione (linea nera) rappresentato in figura, tra il punto 1 ed il punto 2 si ha formazione di condensa.

Nelle zone interessate dalla condensazione si ha una diminuzione del flusso di vapore, pertanto, come si può osservare nell'equazione di Fick espressa in termini differenziali:

$$\dot{g}_i = \pi_{ip} \cdot A \cdot \frac{\partial p_i}{\partial x}$$

a questa diminuzione del flusso corrisponderà una diminuzione del gradiente di pressione del vapore.

Come si può osservare in figura 15.6 il segmento 01, della linea rappresentante la p_v , non potrà raccordarsi alla curva delle pressioni di saturazione con uno spigolo ma sarà tangente alla curva stessa (nel punto 1').

Lo stesso discorso vale per il punto 2. La zona effettivamente interessata dalla condensa sarà quella evidenziata in celeste (compresa tra i punti 1' e 2'), più ristretta di quella che risulterebbe dalla trattazione classica del diagramma di Glaser (dal punto 1 al punto 2).

Tuttavia si preferisce la trattazione classica, in quanto il metodo approfondito è più laborioso, soprattutto per strutture a più strati in materiale non omogeneo, e l'errore sistematico che si commetterebbe sarebbe superiore a quello relativo al metodo classico.

Quest'ultimo risulta inoltre più cautelativo in quanto la zona di condensa effettiva è più ristretta di quella calcolata.

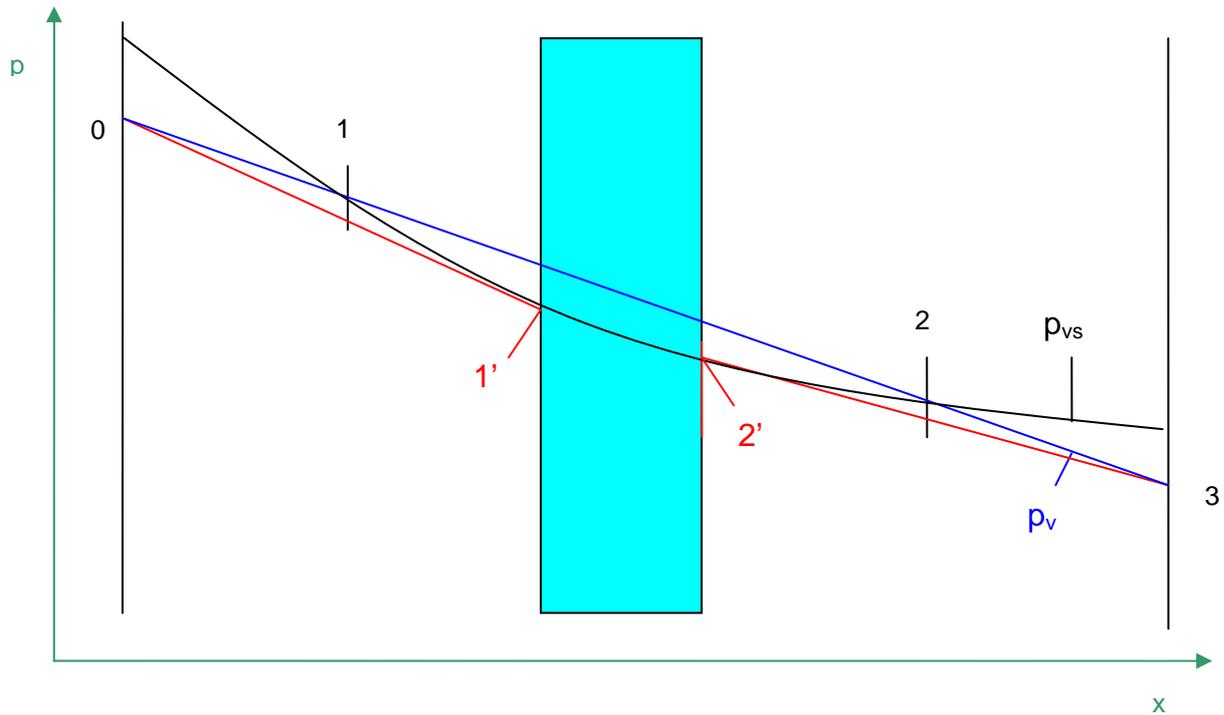


Fig. 15.6 - Andamento della pressione parziale del vapore (linea rossa) e della sua pressione di saturazione (linea nera)

15.10 DETERMINAZIONE DELLA QUANTITÀ DI ACQUA CONDENSATA

In alcuni casi (esempio 15.2) anche con l'uso della barriera al vapore non si riesce ad eliminare del tutto la condensazione interstiziale. È ragionevole pensare che gli effetti negativi della condensazione siano inosservabili a partire da livelli molto bassi di acqua condensata fino ad un valore di soglia dopo il quale gli effetti diventano osservabili ed iniziano a crescere rapidamente. **La normativa italiana ammette che un valore limitato, della quantità d'acqua accumulata alla fine del periodo stagionale di condensazione, sia compatibile con la buona conservazione dei materiali purché il fenomeno sia reversibile**, ovvero a patto che l'acqua possa evaporare prima del successivo periodo di condensazione, in modo che sia nulla la quantità media di acqua liquida presente nel materiale, in ogni ciclo annuale.

La sperimentazione di questi fenomeni non è ancora sufficiente per dare una interpretazione univoca per tutti i casi, tuttavia secondo l'opinione di alcuni studiosi¹ per alcuni materiali si possono, attualmente, considerare tollerabili i valori massimi di acqua condensata, m_{lim} , elencati in Tab. 15.VII.

¹ si riportano in tabella i dati contenuti nella Norma UNI 10350.

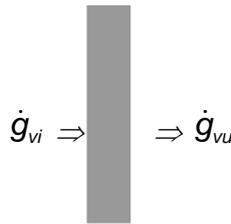
Tab. 15.VII - Quantità limite m_{lim} dell'acqua condensata accettabile alla fine del periodo di condensazione.

Materiale	Densità ρ (kg/m ³)	Massa d'acqua condensata accettabile m_{lim} (g/m ²)
Laterizi	600-2000	500
Calcestruzzi	400-2400	500
Intonaci e malte	600-2000	500
Legnami e derivati	500-800	$30 \cdot \rho \cdot d$
Fibre natura organica con collanti resistenti all'acqua	300-700	$20 \cdot \rho \cdot d$
Fibre natura organica, con collanti non resistenti all'acqua	300-700	$5 \cdot \rho \cdot d$
Fibre minerali	10-150	$50 \cdot \rho \cdot d [\lambda / (1 - 1,7\lambda)]$
Materie plastiche cellulari	10-80	$30 \cdot \rho \cdot d [\lambda / (1 - 1,7\lambda)]$

Questo tipo di verifica è previsto dalla norma UNI 10350 e richiede il calcolo della quantità di acqua condensata all'interno di una struttura, durante l'intero periodo di riscaldamento. Le condizioni di accettabilità della struttura sono:

- l'acqua condensata alla fine del periodo deve risultare inferiore al valore limite di Tab. 15.VII
- tutta l'acqua condensata deve evaporare prima dell'inizio del successivo periodo di riscaldamento.

Consideriamo una porzione qualsiasi di materiale, fig. 15.4, all'interno di una parete multistrato, il principio di conservazione della massa applicato alle portate di vapore d'acqua entrante ed uscente dalla zona considerata, permette di scrivere, in regime stazionario, la relazione:

**Fig. 15.4.** Portate di vapore entrante ed uscente da una zona entro una struttura

$$\dot{g}_C = \dot{g}_{vi} - \dot{g}_{vu} \quad [\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)] \quad (15.19)$$

dove \dot{g}_C rappresenta la portate d'acqua, riferite all'unità di superficie, che condensa (se il valore è positivo) o evapora (se il valore è negativo) nella zona considerata, \dot{g}_{vi} e \dot{g}_{vu} [kg/(s·m²)] sono le portate specifiche di massa del vapore entrante ed uscente dalla zona.

Per il calcolo di \dot{g}_{vi} e \dot{g}_{vu} si può applicare la legge di Fick negli strati che precedono e seguono la zona di condensazione o evaporazione, perché in essi il trasporto di calore e massa avviene solo per diffusione.

Si nota che la portata di massa del vapore entrante in uno strato di spessore dx è proporzionale alla pendenza della curva $p_v = f(R_v)$.

$$\dot{g} = \pi_p \cdot A \cdot \frac{dp}{dx} \quad [\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)] \quad (15.20)$$

Nel caso di più strati, all'interno dei quali vi è trasporto di vapore per diffusione, senza cambio di fase, la curva è una retta con pendenza negativa (dalle pressioni maggiori a quelle minori) e la portata è positiva e costante nello spazio.

Nel caso di condensazione interna ad uno strato, la portata uscente dallo strato è minore di quella entrante, pertanto la pendenza della curva $p_v = f(R_v)$ è maggiore sul lato di ingresso del vapore e minore su quello di uscita.

Ciò significa che vi è condensazione in tutti i punti nei quali la curva $p_v = f(R_v)$ ha la concavità rivolta verso l'alto; per gli stessi motivi si può affermare che vi è evaporazione in tutti i punti nei quali la curva $p_v = f(R_v)$ ha la concavità rivolta verso il basso. Infine se la curva $p_v = f(R_v)$ è orizzontale non vi è passaggio di vapore tra i due punti considerati.

Per procedere operativamente nei calcoli è necessario conoscere la vera forma della curva $p_v = f(R_v)$. Infatti gli andamenti delle pressioni p_v e p_s , costruiti come indicato in precedenza (fig. 15.3), sono basati sulla semplice sovrapposizione di due diagrammi e non tengono conto della interazione tra le due pressioni, cioè del fatto che la pressione parziale del vapore è grandezza che non può superare la corrispondente pressione di saturazione p_s .

Per questo motivo la costruzione grafica $p_v = f(x)$, nella quale p_v è rappresentata in funzione dell'ascissa x corrente entro la struttura, può individuare le strutture nelle quali non vi è condensazione, ma per quelle nelle quali esiste questa possibilità il grafico citato non può dare alcuna indicazione sul reale andamento della p_v nel punto o la zona nella quale la condensazione si manifesta.

Si noti che neppure la modifica della curva $p_v = f(x)$, in modo tale che essa diventi uguale alla pressione di saturazione dove la linea di p_v supera quella di p_s , fornisce un andamento che rappresenta correttamente il processo fisico. Infatti questa procedura determina una concavità verso il basso e quindi un punto di evaporazione all'ingresso della zona di saturazione; tale andamento di p_v viola il principio di conservazione della massa perché ad essa corrisponde l'evaporazione di liquido in un punto nel quale non vi è liquido, in quanto il vapore non è ancora entrato nella zona di condensazione.

Invece le precedenti considerazioni sulle variazioni di pendenza della pressione del vapore in un diagramma $p_v = f(R_v)$ forniscono, in modo univoco, le condizioni per individuare i punti o le zone di condensazione. Infatti le variazioni di pendenza della curva $p_v = f(R_v)$ sono determinate dal fatto che l'andamento di p_v deve deformarsi, rispetto alla linea retta che caratterizza l'assenza di cambiamento di fase, in modo da soddisfare la condizione di non superare in nessun punto la pressione di saturazione. Da ciò consegue che ogni zona di materiale, anche non omogeneo, privo di fenomeni di condensazione interstiziale deve essere caratterizzata da un andamento rettilineo di p_v , mentre ogni punto di condensazione corrisponde ad una diminuzione della pendenza della curva $p_v = f(R_v)$ ed ogni punto di evaporazione corrisponde ad un aumento della pendenza della curva.

Sulla base di quanto detto si può affermare che la distribuzione della pressione del vapore all'interno di una parete assume l'andamento di una cordicella tesa tra i punti p_{vi} e p_{ve} che trova verso l'alto un confine insuperabile costituito dalla linea della pressione di saturazione e si appoggia ad esso.

Per osservare gli andamenti tipici del diagramma di Glaser sul piano $p_v - R_v$ riesaminiamo il diagramma delle pressioni della struttura a tre strati dell'esempio 15.1, riportato nelle figg. 15.3 e 15.4 rispettivamente senza barriera e con barriera al vapore.

Nel diagramma della pressione di saturazione lo strato isolante è rappresentato da una linea approssimativamente verticale, infatti tale strato provoca una elevata caduta di temperatura e quindi una elevata caduta di pressione di saturazione, in un intervallo delle ascisse quasi nullo, perché la resistenza al vapore dell'isolante (se è un materiale fibroso) è quasi nulla.

Invece lo strato di calcestruzzo è caratterizzato da lungo segmento quasi orizzontale poiché questo strato possiede una elevata resistenza al vapore e una modesta resistenza termica, tali caratteristiche provocano una bassa caduta di temperatura e quindi anche di pressione di saturazione.

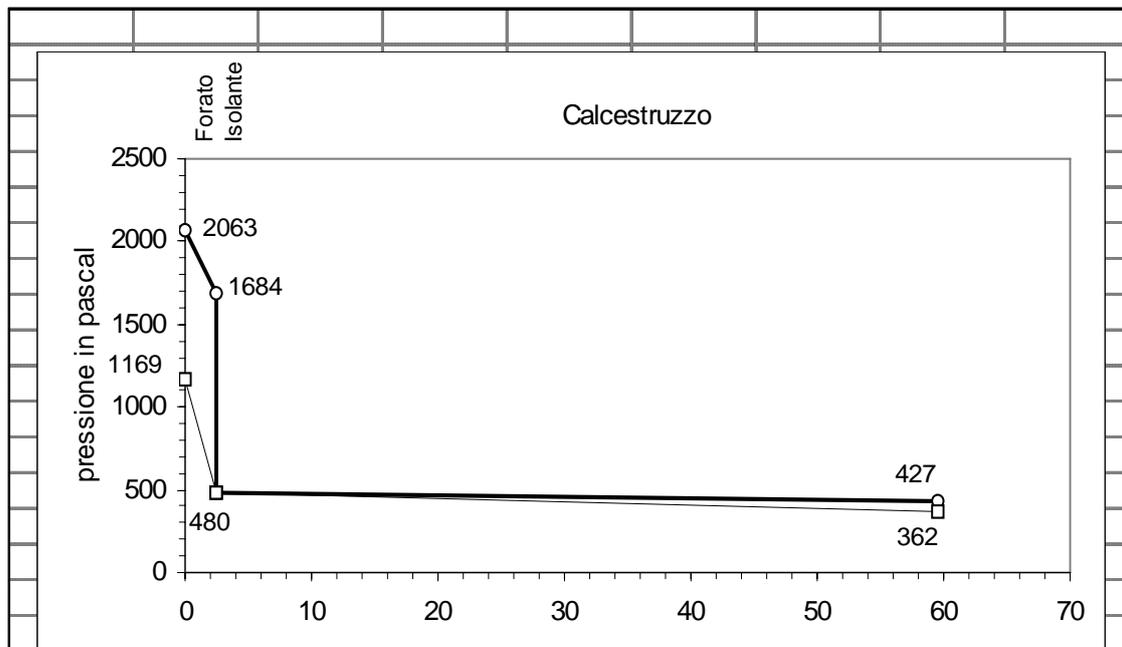


Fig. 15.7. Diagramma di Glaser della struttura, senza barriera al vapore, dell'esempio 15.1.

Nel diagramma della pressione di saturazione, la barriera al vapore è rappresentata da un lungo segmento orizzontale, poiché la sua resistenza al vapore è elevatissima e la sua resistenza termica è trascurabile, infatti tali caratteristiche provocano una caduta di temperatura e di conseguenza una caduta di pressione di saturazione che tendono a zero; invece nel piano $p_v - x$ la barriera è rappresentata da un segmento verticale, poiché essa determina una grande caduta di pressione su uno spessore trascurabile. Lo strato isolante è rappresentato, per i motivi detti nel caso precedente da un tratto approssimativamente verticale.

La fig. 15.7 mostra che l'andamento della pressione reale del vapore, determinato con il metodo della cordicella tesa, è una spezzata che individua il punto di condensazione nel suo punto angoloso; nel caso particolare, la condensazione si manifesta in un punto (nello spazio su una superficie) mentre in altri casi la condensazione può coinvolgere un volume del materiale.

La fig. 15.8 relativa ad una parete, dotata di barriera al vapore, mostra un andamento della pressione del vapore rettilineo e privo di punti angolosi e quindi di condensazione del vapore.

Per valutare la **quantità d'acqua che condensa**, in regime stazionario, si utilizza la (15.19) cioè si calcola la differenza tra il flusso di vapore entrante nella zona di condensazione dall'ambiente caldo e quello uscente dalla stessa zona verso l'ambiente freddo. Si ottiene:

$$\dot{g}_c = \dot{g}_{vi} - \dot{g}_{vu} = \frac{(p_{vi} - p_{ci})}{R_i} - \frac{(p_{ce} - p_{ve})}{R_u} \quad [\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)] \quad (21)$$

essendo:

\dot{g}_c = quantità di acqua che condensa all'interno della zona nell'unità di tempo, per unità di superficie,

R_i = resistenza al vapore della porzione di parete compresa tra la faccia interna ed il punto di inizio della zona condensazione,

R_u = resistenza al vapore della porzione di parete compresa tra il punto finale della zona di condensazione e la faccia esterna,

$p_{vi} - p_{ci}$ = differenza di pressione parziale del vapore tra la faccia interna ed il punto di inizio della zona di condensazione,

$p_{ce} - p_{ve}$ = differenza di pressione parziale del vapore tra il punto finale della zona di condensazione e la faccia esterna.

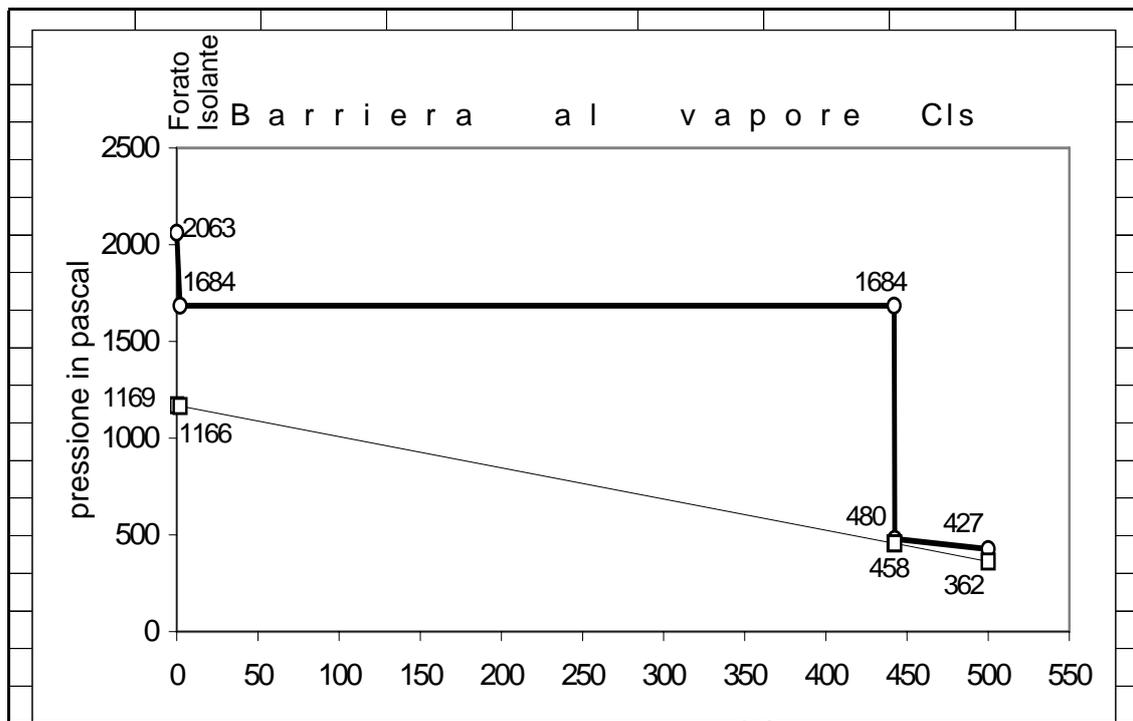


Fig. 15.8. Diagramma di Glaser della struttura, con barriera al vapore, dell'esempio 15.2.

Nel periodo di evaporazione nella (21) il primo termine diventa negativo e si ottiene la somma di due portate negative, cioè uscenti dalla zona considerata.

Il valore istantaneo di g_c dipende dagli scambi di calore e di massa al contorno della parete considerata che dipendono, come mostra la (21), dalle pressioni p_{vi} , p_{ve} , p_c : la prima dipende dalla temperatura e l'umidità relativa dell'aria nell'ambiente interno (t_i , φ_i), la seconda dalle analoghe grandezze del clima esterno (t_e , φ_e), la terza (essendo p_{ci} , p_{ce} valori della pressione di saturazione) dalla struttura e dalla temperatura interna ed esterna (t_i , t_e).

La massa d'acqua che condensa o evapora in un periodo di tempo finito ($\tau_2 - \tau_1$) si ottiene integrando la (21):

$$m_c = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \dot{g}_c(\tau) \cdot d\tau \quad [\text{kg/m}^2] \quad (22)$$

dove m_c rappresenta la massa d'acqua, per unità di superficie, che condensa (se >0) o evapora (se <0) nella zona considerata, durante l'intervallo definito dagli istanti τ_1 e τ_2 di inizio e di fine del periodo di calcolo.

L'integrale (22) si può approssimare mediante la somma di N termini del tipo:

$$\Delta m_c = \bar{g}_c \cdot (\tau_2 - \tau_1) \quad (23)$$

dove \bar{g}_c è la portata specifica media nell'intervallo di tempo $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)$, calcolata sostituendo nella (21) le rispettive pressioni medie :

$$\bar{g}_c = \frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})}{R_i} - \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})}{R_u} \quad (24)$$

La durata dell'intervallo elementare $\Delta\tau$ dipende dalla precisione richiesta e perciò può spaziare dal minimo di 1 ora al massimo dell'intero periodo di condensazione o evaporazione.

Le norme tecniche attuali, per la verifica termoigrometrica delle pareti in edilizia, utilizzano il passo temporale $\Delta\tau_m$ pari ad un mese, pertanto si scrive:

$$m_C = \sum_{m=1}^{12} \bar{g}_{Cm} \cdot \Delta\tau_m \quad \text{con } \bar{g}_{Cm} > 0 \quad (25.a) \quad m_E = \sum_{m=1}^{12} \bar{g}_{Em} \cdot \Delta\tau_m \quad \text{con } \bar{g}_{Em} < 0 \quad (25.b)$$

Per un approccio più elementare si fissano convenzionalmente le lunghezze, D_I , del periodo di condensazione, D_E , del periodo di evaporazione, e si utilizzano le grandezze medie di tutto il periodo di calcolo; si ottiene:

$$m_C = \bar{g}_C \cdot D_I \quad \text{con } \bar{g}_C > 0 \quad (26.a) \quad m_E = \bar{g}_E \cdot D_E \quad \text{con } \bar{g}_E < 0 \quad (26.b)$$

In entrambi i casi la parete è accettabile se valgono contemporaneamente le condizioni:

$$m_C \leq m_{lim} \quad (27) \quad m_C + m_E \leq 0 \quad (28)$$

dove m_{lim} è il valore limite dell'acqua condensata accettabile nel materiale nel quale si verifica la condensazione. Per l'applicazione delle (25) e (26) è necessario conoscere i valori medi mensili oppure i valori medi stagionali delle grandezze climatiche; tali grandezze devono rappresentare il clima tipico della zona geografica in cui si opera; questo metodo è utilizzato dalla norma UNI 10350.

La scelta di una media nazionale unica semplifica i calcoli ma può essere utilizzata solo in paesi con clima abbastanza uniforme. Alcuni stati del Nord Europa hanno norme tecniche di verifica basate sui valori medi annuali delle variabili climatiche e sulla durata convenzionale del periodo di condensazione e del periodo di evaporazione. Nei Paesi con zone climatiche molto diverse, come l'Italia, è necessario definire le medie mensili o annue, per ogni zona climatica oppure per le località del territorio che sono sensibilmente diverse dal punto di vista climatico.

Nel seguito verrà utilizzato, a scopo didattico, il metodo dell'analisi con i dati medi stagionali.

Supponiamo di conoscere i valori medi stagionali delle pressioni parziali del vapore nell'aria esterna, in due periodi convenzionali di lunghezza D_I e D_E che chiameremo **periodo Invernale** ed **Estivo**. Per fissare le idee supponiamo che:

- il **periodo convenzionale di condensazione** abbia la durata $D_I = 60$ giorni = 1440 ore,
- il **periodo convenzionale di evaporazione** abbia la durata convenzionale $D_E = 90$ giorni = 2160 ore,
- m_C sia sempre positiva durante il primo periodo e sia sempre negativa durante il secondo;
- i valori medi delle grandezze negli ambienti interno ed esterno siano quelli definiti in Tab. 15.VIII
- durante il periodo *Estivo* la parete sia isoterma alla temperatura media esterna e perciò pressione di saturazione sia uniforme in tutta la parete e pari a $p_c(\bar{t}_e)$.

Tab. 15.VIII - valori medi convenzionali per la verifica stagionale di Glaser

Periodo di calcolo	\bar{t}_i (°C)	$\bar{\varphi}_i$ (%)	\bar{p}_{vi} (Pa)	\bar{t}_e (°C)	$\bar{\varphi}_e$ (%)	\bar{p}_{ve} (Pa)
I = invernale	20	50	1169	-5	90	362
E = estivo	12	70	981	12	70	981

Le (26), tenuto conto che i periodi convenzionali sono espressi in ore, diventano:

$$m_C = 3600 \cdot D_I \cdot \bar{g}_C = 3600 \cdot D_I \cdot \left[\frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I}{R_i} - \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I}{R_u} \right] \quad (29.a)$$

$$m_E = 3600 \cdot D_E \cdot \bar{g}_E = 3600 \cdot D_E \cdot \left[\frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_E}{R_i} - \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_E}{R_u} \right] \quad (29.b)$$

Sostituendo le (29) nelle condizioni (27) e (28) si ottiene:

$$R_i \geq \frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I}{\frac{m_{lim}}{3600 \cdot D_I} + \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I}{R_u}} \quad (30)$$

$$\frac{R_u}{R_i} \leq \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I + \frac{D_E}{D_I} \cdot (\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_E}{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I + \frac{D_E}{D_I} \cdot (\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_E} \quad (31)$$

dove i pedici "I" ed "E" applicati alle parentesi significano che le grandezze interne alla parentesi devono assumere il valore medio del periodo convenzionale **Invernale** o **Estivo**, rispettivamente. Le (30) e (31) indicano, in forma generale, le condizioni necessarie e sufficienti perché la parete sia accettabile; si possono interpretare come segue:

- la resistenza al vapore degli strati compresi tra la faccia interna ed il punto di condensazione deve essere maggiore del valore dato dalla (30), se si vuole limitare il flusso di vapore e, di conseguenza, mantenere la formazione della quantità d'acqua condensata al di sotto del limite ammissibile m_{lim}

- il rapporto tra la resistenza al vapore degli strati successivi al punto di condensazione e quella precedente tale punto deve essere inferiore al rapporto (31), se si vuole garantire durante il periodo di evaporazione un flusso di vapore verso l'ambiente esterno tale da asciugare tutta l'acqua che si è formata durante il periodo della condensazione.

Nel caso più frequente la condensazione avviene in un solo punto, pertanto si ha: $\bar{p}_{ci} = \bar{p}_{ce}$ (le due pressioni sono diverse quando la condensazione si estende con continuità su un intervallo di punti). In questo caso il valore della resistenza della barriera necessaria (R_{BV}) per annullare la condensazione si ottiene ponendo $m_C=0$ nella (29.a), ovvero:

$$\frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I}{R_i + R_{BV}} - \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I}{R_u} = 0 \quad (32) \quad R_{BV} = R_u \cdot \frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I}{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I} - R_i \quad (33)$$

ESEMPIO 15.4

Verificare le condizioni di accettabilità della struttura dell'esempio 15.1, nell'ipotesi che il materiale che viene bagnato sia un pannello in fibre minerali avente densità $\rho = 50 \text{ kg/m}^2$, conducibilità $\lambda=0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$, spessore $d=5 \text{ cm}$. Dai dati della struttura e dal suo diagramma (fig. 15.1) si deduce:

$$(\bar{p}_{ci})_I = (\bar{p}_{ce})_I = 480 \text{ Pa}, \quad (\bar{p}_{ci})_E = (\bar{p}_{ce})_E = p_c(12^\circ\text{C})=1402 \text{ Pa}, \quad R_u=58 \cdot 10^9 \text{ m}^2\text{s}\cdot\text{Pa/kg},$$

pertanto le condizioni (30) e (31), con i valori convenzionali di Tab. 15.VIII, diventano:

$$R_i \geq \frac{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I}{\frac{m_{lim}}{3600 \cdot D_I} + \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})}{R_u}} = \frac{1169 - 480}{0,2 + \frac{480 - 362}{58 \cdot 10^9}} = 17 \cdot 10^9 \left[\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{kg} \right]$$

$$\frac{R_u}{R_i} \leq \frac{(\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_I + \frac{D_E}{D_I} \cdot (\bar{p}_{ce} - \bar{p}_{ve})_E}{(\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_I + \frac{D_E}{D_I} \cdot (\bar{p}_{vi} - \bar{p}_{ci})_E} = \frac{(480 - 362) + 1,5 \cdot (1402 - 981)}{(1169 - 480) + 1,5 \cdot (981 - 1402)} = 13$$

La condizione (30) non è verificata perché $R_i = 2,4 \cdot 10^9 [m^2 \cdot s \cdot Pa/kg]$; la condizione (31) non è verificata perché, essendo $R_u = 58 \cdot 10^9 [m^2 \cdot s \cdot Pa/kg]$, risulta $R_u / R_i = 24,2$. La parete sarebbe accettabile se la resistenza R_i degli strati precedenti il punto di condensazione diventasse maggiore di $17 \cdot 10^9 [m^2 \cdot s \cdot Pa/kg]$. Il valore minimo della resistenza della barriera che annulla la condensazione è dato dalla (33):

$$R_{BV} = 58 \cdot 10^9 \cdot \frac{1169 - 480}{480 - 362} - 2,4 \cdot 10^9 = 336 \cdot 10^9 \left[\frac{m^2 \cdot s \cdot Pa}{kg} \right]$$

Infatti la barriera al vapore scelta per la stessa parete ha resistenza $R_V \approx 440 \cdot 10^9 m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$. Se invece si inserisse una barriera con resistenza minore di quella che elimina completamente la condensazione, come ad esempio un foglio di alluminio che ha $R_V \approx 180 \cdot 10^9 m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$, la quantità d'acqua condensata varrebbe:

$$m_c = 1440 \cdot 3600 \cdot \left[\frac{1169 - 480}{2,1 + 0,26 + 180} - \frac{480 - 362}{58} \right] \cdot 10^{-9} = +31 [g/m^2]$$

$$m_E = 2160 \cdot 3600 \cdot \left[\frac{981 - 1402}{2,1 + 0,26 + 180} - \frac{1402 - 981}{58} \right] \cdot 10^{-9} = -74 [g/m^2]$$

Il valore limite m_{lim} dell'acqua condensata accettabile nel materiale è (Tab. 15.VII):

$$m_{lim} = 50 \cdot 50 \cdot 0,05 \cdot \left[\frac{0,045}{1 - 1,7 \cdot 0,045} \right] = 6,1 [g/m^2]$$

La parete, con una barriera al vapore di resistenza $R_V \approx 180 \cdot 10^9 m^2 \cdot s \cdot Pa/kg$, non è accettabile poiché la quantità d'acqua condensata nel periodo convenzionale ($31 g/m^2$) è molto maggiore di quella ammissibile nel pannello isolante.

ESEMPIO 15.5

Verificare le condizioni di accettabilità per la copertura studiata nell'esempio 15.3, nell'ipotesi che il pannello isolante sia in fibre minerali con densità $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$, conducibilità $\lambda = 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$, spessore $d = 5 \text{ cm}$, $m_{lim} = 6,1 \text{ g/m}^2$ (Tab.15.8). La costruzione del diagramma di Glaser nel piano $p_v - R_v$ mostra che esiste un solo punto di condensazione (fig.15.7).

Nel diagramma si notano due lunghi segmenti orizzontali che corrispondono alla barriera al vapore ed alla guaina. Il tratto verticale corrisponde allo strato isolante, come si è già detto per la fig. 15.1.

Dai dati della struttura (Tab. 15.V) e dal suo diagramma (fig. 15.3) si deduce che il punto di condensazione si trova all'interfaccia tra lo strato isolante e la guaina impermeabilizzante, pertanto si ricavano i dati necessari al calcolo:

$$(\bar{p}_{ci})_I = (\bar{p}_{ce})_I = 434 \text{ Pa}, \quad (\bar{p}_{ci})_E = (\bar{p}_{ce})_E = p_s(12^\circ\text{C}) = 1402$$

$$R_i = (6,2+10,4+622+0,3)=638,9 \cdot 10^9 [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}] ; R_u=415 \cdot 10^9 [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa/kg}].$$

e si può costruire il diagramma delle pressioni relativo al periodo estivo (fig. 15.8).

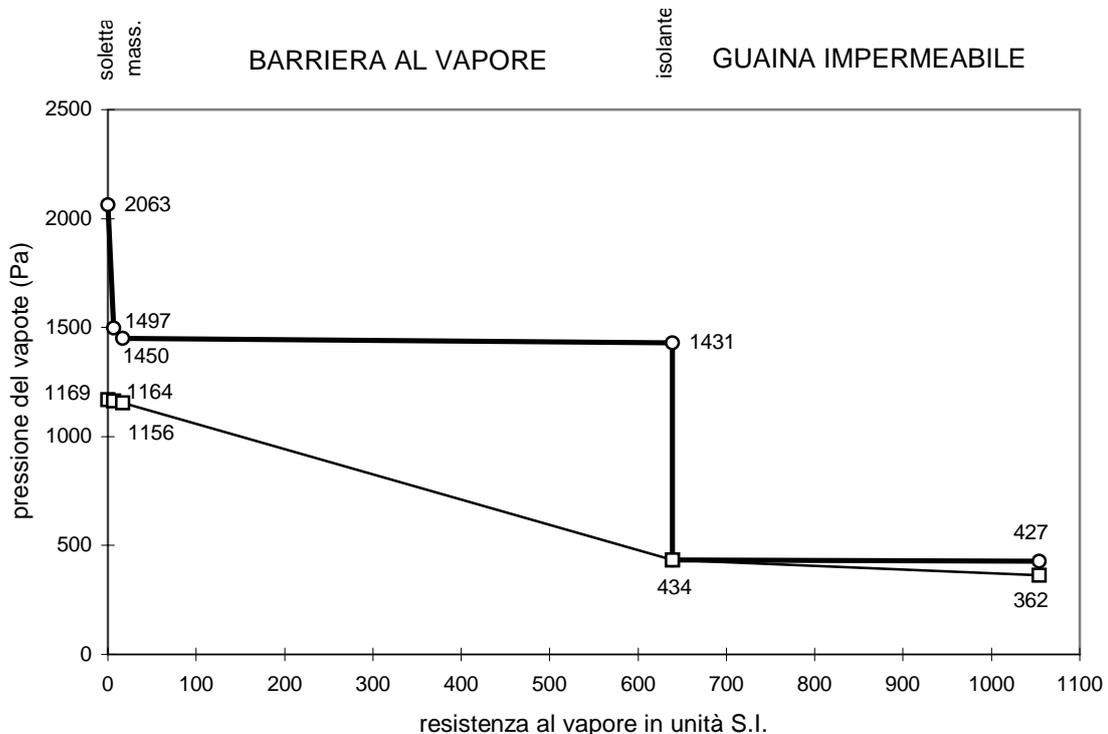


Fig. 15.7. Diagramma di Glaser, nel periodo invernale, della copertura, con barriera al vapore e guaina, studiata nell'esempio 15.3.

Le masse d'acqua che condensa ed evapora nei due periodi si calcolano con le (26) ed i valori convenzionali di Tab. 15.VIII, si ottiene:

$$m_c = 1440 \cdot 3600 \cdot \left[\frac{1169 - 434}{638,9} - \frac{434 - 362}{415} \right] \cdot 10^{-9} = 5,1 [\text{g/m}^2]$$

$$m_e = 2160 \cdot 3600 \cdot \left[\frac{981 - 1402}{638,9} - \frac{1402 - 981}{415} \right] \cdot 10^{-9} = -13 \text{ [g/m}^2\text{]}$$

I calcoli dimostrano che la struttura è accettabile poiché la quantità d'acqua condensata nel periodo convenzionale (5,1 g/m²) è minore del valore accettabile (6,1 g/m²) ed inoltre la massa evaporabile nel periodo convenzionale di essiccazione supera quella condensata.

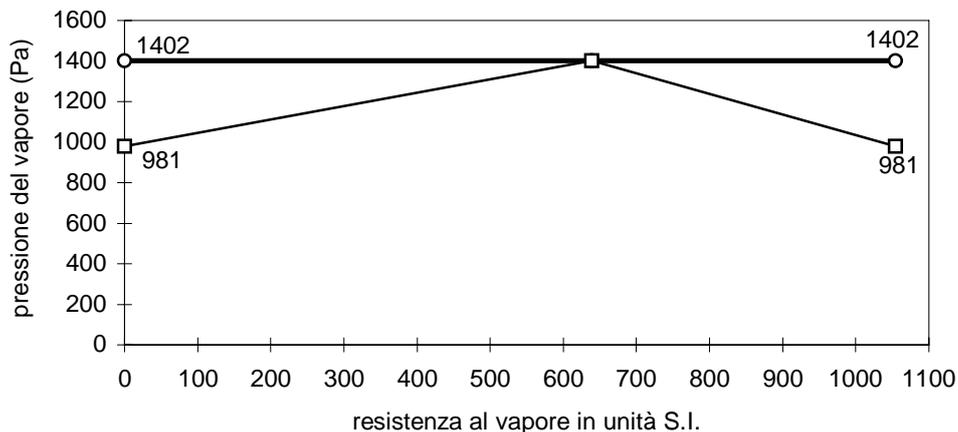


Fig. 15.8. Diagramma di Glaser nel periodo estivo della copertura dell'esempio 15.3.

15.8 FATTORE DI POSIZIONE

L'esempio 15.1 mostra che pareti dotate di uno strato coibente posto in posizione intermedia hanno un comportamento igrometrico che deve essere verificato attentamente, e quasi sempre devono essere dotate di barriera al vapore, per eliminare la possibilità di danni dovuti alla condensazione interstiziale.

Il comportamento di questo tipo di parete migliora se gli strati di materiale posti tra l'ambiente interno e l'isolante hanno resistenza al vapore elevata e resistenza termica bassa (come ad esempio il cls) e se gli strati posti tra l'isolante e l'ambiente esterno hanno resistenza al vapore bassa e resistenza termica relativamente alta (come ad esempio i laterizi alveolati). Questi requisiti, oltre a mantenere più alte le pressioni di saturazione e più basse le pressioni parziali del vapore nella zona comprendente l'isolante, agevolano nella stagione estiva la migrazione verso l'esterno del vapore eventualmente condensato durante l'inverno.

In sostanza, la sequenza (nel verso interno - esterno) cls - coibente - laterizio si comporta meglio, dal punto di vista igrometrico, della sequenza laterizio - coibente - cls; come si vede anche dal diagramma di fig. 15.9, costruito utilizzando gli stessi dati dell'esempio 15.1 e scambiando le posizioni dello strato di laterizio con quello dello strato di cls.

La fig. 15.9 confrontata con la fig. 15.1 evidenzia che il migliore comportamento della struttura attuale (sequenza cls - coibente - laterizio) è dovuto al fatto che la curva delle pressioni di saturazione ha un andamento nel quale è predominante la concavità verso il basso e contemporaneamente l'andamento della pressione del vapore ha la concavità rivolta verso l'alto.

E' proprio l'andamento opposto delle due curve che assicura la condizione di non condensazione: $p_v < p_{sat}$; ciò non accade nel diagramma di fig. 15.1 relativo alla sequenza laterizio - coibente - cls.

Generalizzando la precedente osservazione, si può affermare che una parete stratificata ha una probabilità di condensazione tanto più bassa quanto più si avvicina al **caso ideale** costituito da:

- uno strato conduttore-impermeabile (barriera al vapore) posto sulla superficie interna,
- eventuali strati intermedi conduttori – permeabili,
- uno strato adiabatico-permeabile posto sulla superficie esterna (isolamento a cappotto e rivestimento a parete ventilata).

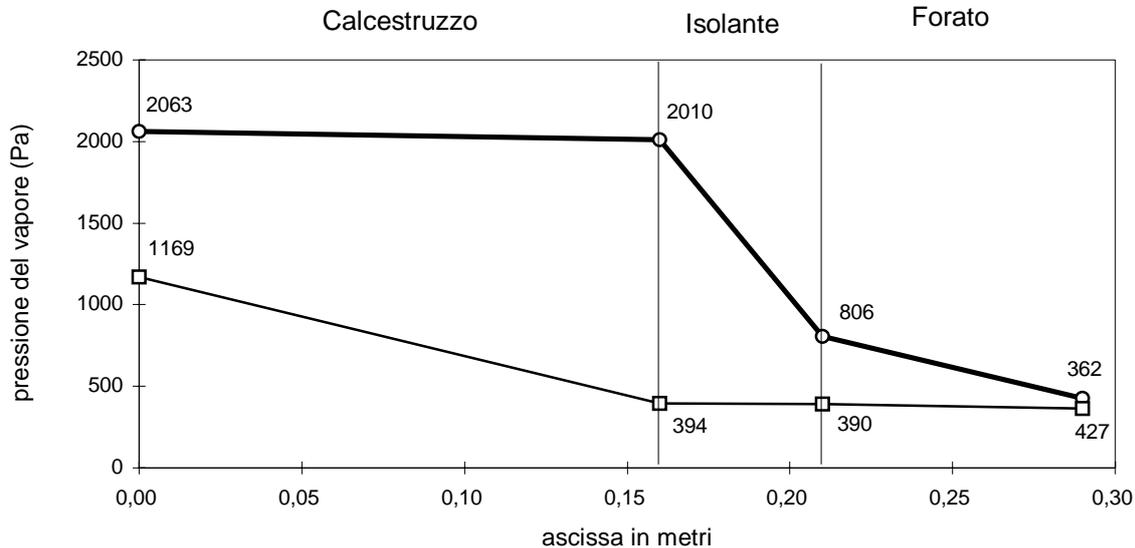


Fig. 15.9. Diagramma della parete composta dagli strati dell'esempio 15.1 disposti nella nuova sequenza: cls - isolante - laterizio.

Nei casi reali per evitare la condensazione è necessario e sufficiente che la curva della pressione parziale del vapore, p_v , sia parallela o decresca più rapidamente della curva della pressione di saturazione, p_{sat} , cioè che il parametro dp_v/dp_{sat} , calcolato lungo la sequenza degli strati, nel verso del flusso del vapore, abbia valori decrescenti o al più costanti. Poiché p_{sat} cresce con t scostandosi poco dalla retta, si può scrivere approssimativamente:

$$dp_{sat} \propto dt \quad (34)$$

In base alla legge di Fourier si può scrivere:

$$dt \propto dR_T \quad (35)$$

pertanto si può anche scrivere:

$$dp_{sat} \propto dR_T = dx/\lambda \quad (36)$$

Dalla legge di Fick si ottiene:

$$dp_v \propto dR_v = dx/\pi_v \propto \mu \quad (37)$$

Infine dalle (36) e (37), per un generico strato, risulta:

$$dp_v/dp_{sat} \propto dR_v/dR_T \propto \mu \cdot \lambda \quad (38)$$

Il prodotto $\mu \cdot \lambda$ tra il fattore di resistenza al vapore e la conduttività termica del materiale è chiamato **fattore di posizione del materiale**. Dalla (34) e applicando l'osservazione fatta all'inizio, possiamo dedurre la seguente *regola per la disposizione degli strati di materiali in una parete*: **condizione necessaria e sufficiente per evitare la condensazione interstiziale è che la sequenza dei fattori di posizione degli strati sia costante o decrescente, nel verso del flusso del vapore.**

Nella parete dell'esempio 15.1 la sequenza dei fattori di posizione è: 2 (laterizio) - 0,05 (coibente) - 140 (cls); la sequenza dei valori non obbedisce alla regola sopra enunciata ed infatti il comportamento termoigrometrico non è accettabile.

Disponendo gli strati secondo la regola del fattore di posizione decrescente, sequenza cls - laterizio - coibente, la stessa parete risulta priva di condensazione; tuttavia dal punto di vista costruttivo la presenza del laterizio non è giustificata e si dovrà aggiungere uno strato finale di finitura che sia fortemente permeabile al vapore, ad esempio un rivestimento con intercapedine ventilata.

La sequenza cls - coibente - laterizio non corrisponde alla regola del fattore di posizione, ma è corretta dal punto di vista costruttivo e, come dimostra la fig. 15.11, non vi è la possibilità che avvenga la condensazione.

Nel caso delle intercapedini d'aria in comunicazione con l'ambiente esterno (*intercapedini ventilate*) il fattore di posizione dello strato finale esterno è zero perché il vapore non deve attraversare questo strato, quindi la sua resistenza al vapore è nulla. Pertanto la precedente struttura funzionerebbe correttamente adottando la seguente configurazione: cls-coibente-intercapedine ventilata-laterizio o altra chiusura dotata di fessure per la ventilazione.

Nella copertura piana tradizionale, lo strato impermeabilizzante posto sul lato esterno, ha sempre un comportamento igrometrico insoddisfacente perché ha un fattore di posizione molto elevato (circa 3500), a meno che non venga introdotta una seconda barriera con fattore altrettanto elevato posta sul lato caldo dello strato coibente; nel secondo caso la condensa assume valori di pochi g/m² alla fine del periodo di condensazione e se la resistenza della barriera interna supera quella della barriera esterna l'evaporazione dell'acqua condensata è possibile nel periodo successivo. Tuttavia la soluzione migliore consiste nello scambio delle posizioni dello strato impermeabile con lo strato coibente (soluzione a tetto rovescio), in modo gli stessi materiali risultano disposti secondo la sequenza determinata dai loro fattori di posizione: guaina-coibente-strato ventilato di protezione meccanica del coibente; naturalmente il materiale coibente deve essere di tipo non bagnabile, in modo tale che anche se esposto all'acqua la sua conducibilità, a lungo termine, cambi in modo trascurabile.

ESEMPIO 15.6

Consideriamo una struttura di tamponamento perimetrale composta dagli strati sotto elencati e troviamo la loro disposizione corretta, dal punto di vista termoigrometrico:

Descrizione dello strato	μ	λ	$\mu \cdot \lambda$
1 - mattone pieno	8	0,8	6,4
2 - forato da 8 cm	5	0,4	2
3 - intercapedine d'aria da 4 cm	1	0,25 ²	0,25
4 - strato di intonaco cementizio	20	0,90	18
5 - strato di malta di cls leggero a struttura aperta (intonaco isolante)	6	0,15	0,9

Una sequenza che rispetta le prestazioni funzionali dei materiali e che minimizza i problemi di condensazione è (partendo dall'interno): 4 - 1 - 3 - 2 - 5. Tale sequenza non è completamente accettabile perché l'intercapedine d'aria ha un fattore $\mu \cdot \lambda$ che non è compatibile con nessuna

² questo dato rappresenta la conducibilità equivalente di uno strato solido, ricavata dalla relazione $\lambda = s/R_T$ sapendo che $R_T = 0,16$ m²°C/W.

posizione interna; per rimediare bisogna eliminare l'intercapedine oppure ventilarla oppure verificare, con le condizioni (32) e (33), se la massa d'acqua che condensa è accettabile. Nell'esempio è stato utilizzato un intonaco di calcestruzzo leggero a struttura aperta che ha un fattore di posizione basso poiché ha bassa conduttività e permeabilità alta (μ basso) rispetto di un normale intonaco cementizio.

Questa scelta risolve il problema generale di evitare la condensazione sotto l'intonaco esterno. Infatti gli intonaci a base di cemento o di calce e cemento, i rivestimenti in piastrelle di ceramica smaltate, oppure i pannelli di cemento o i pannelli di marmo hanno tutti fattore di posizione maggiore di 10, pertanto, nella maggior parte dei casi, sotto il rivestimento esterno l'acqua condensa e, nel caso di formazione di ghiaccio, vi è il pericolo di fessurazione.

In tutti questi casi una scelta corretta, dal punto di vista termoigrometrico, è quella di creare una intercapedine ventilata tra la faccia esterna della parete e lo strato di rivestimento, il quale sarà montato su una idonea struttura portante agganciata alla parete stessa.

15.9 ASPETTI TERMOIGROMETRICI DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Infine una nota sugli aspetti termoigrometrici delle intercapedini d'aria poste all'interno delle murature perimetrali.

Tale scelta oggi non procura apprezzabili vantaggi poiché l'intercapedine incrementa in modo marginale la resistenza termica delle pareti, che attualmente deve essere elevata per garantire il rispetto delle norme sul risparmio energetico.

Anche nel caso di pareti prive di isolamento termico la resistenza termica della parete varia poco se il confronto è fatto a parità di volume occupato dalla parete, cioè se si sostituisce un dato spessore di laterizio con una intercapedine d'aria chiusa di eguale spessore.

Ad esempio un forato da 8 cm ha una resistenza termica $R_T = 0,20$ [(m²·K)/W], un forato da 12 cm ha resistenza termica $R_T = 0,31$ [(m²·K)/W] una intercapedine d'aria chiusa da 4 cm ha resistenza $R_T = 0,16$ [(m²·K)/W]. A parità di spessore della parete si può sostituire un forato da 12 cm con un forato da 8 cm ed una intercapedine d'aria da 4 cm. Il vantaggio della soluzione con intercapedine è: $\Delta R_T = (0,20 + 0,16) - 0,31 = 0,05$ [(m²·K)/W], pari a circa il 7% della resistenza totale di una parete non isolata in forati da 26 cm, la cui resistenza è $\approx 0,7$ [(m²·K)/W] e pari a circa il 3% della resistenza di una parete composta da due forati da 12 cm e da 4 cm di materiale isolante che vale circa 1,7 [(m²·K)/W].

Il precedente vantaggio si annulla (o diventa negativo) se l'intercapedine viene ventilata praticando sul tamponamento esterno una fila di fori di piccolo diametro (2 ÷ 3 cm), in alto ed in basso, per garantire l'uscita del vapore dall'intercapedine e l'ingresso di aria dall'esterno; infatti la presenza di un flusso d'aria fredda che attraversa il tamponamento esterno introduce una nuova via di passaggio del calore uscente dalla parete e quindi riduce drasticamente l'effetto coibente del forato che forma l'ultimo strato.

Ne consegue che, una parete costituita da forato (8 cm) + isolante (5 cm) + forato (12 cm) ha resistenza maggiore della stessa parete avente una intercapedine d'aria ventilata, da 4 cm, posta tra lo strato isolante e il tamponamento esterno, ridotto a 8 cm per mantenere costante lo spessore.

Un vantaggio, dal punto di vista igrometrico, è costituito dal fatto che la parete con l'intercapedine ventilata non ha bisogno della barriera al vapore mentre la parete senza intercapedine ventilata deve averla.

Questa conclusione porta alcuni progettisti a preferire la soluzione con intercapedine ventilata in base al fatto che la muratura risulta più permeabile al vapore ("la casa respira di più"); tuttavia l'entità dei flussi di vapore prodotti in un giorno in un alloggio medio è così grande (par. 15.2.3) che la quota parte di vapore prodotto che può uscire attraversando l'involucro edilizio, è del tutto trascurabile anche se tutto l'involucro è costituito di materiali molto permeabili (laterizi). Pertanto la presenza o l'assenza di barriere al vapore non "regola" affatto il comportamento igrometrico dell'alloggio.

La vera via di uscita del vapore dall'alloggio non è costituita dalla diffusione attraverso le superfici solide ma dal trasporto naturale o forzato attraverso le aperture (finestre, fessure, condotti) di comunicazione tra ambiente interno ed ambiente esterno (ricambi d'aria).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

A. Cavallini, L. Mattarolo, *Termodinamica Applicata*, CLEUP. Padova.

G. Moncada Lo Giudice, L. De Santoli, *Impianti Tecnici*, Masson. Milano.