

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE



A.A.2020-2021

CORSO DI LAUREA in ARCHITETTURA QUINQUENNALE, 3° ANNO
INSEGNAMENTO DI FISICA TECNICA AMBIENTALE– PROFF. L.BELLIA E B.LPAIELLA

CAP. 7

La verifica termoigrometrica

NAPOLI, MARZO 2021

Capitolo settimo

La verifica termoigrometrica

7.1 Generalità

La verifica termoigrometrica delle tipologie edilizie ha lo scopo di determinare, mediante opportuni procedimenti di calcolo, l'eventuale presenza di vapore d'acqua condensato in un generico punto della struttura esaminata. La formazione di condensa può, infatti, provocare:

- la caratteristica formazione di macchie di umidità e/o di muffa con il tipico distacco dell'intonaco nel caso di condensazione del vapor d'acqua sulla superficie interna della parete;
- il peggioramento, in genere, delle proprietà meccaniche e termofisiche dei materiali. Ad esempio un assorbimento d'umidità provoca l'aumento della conduttività termica del materiale con un conseguente aumento del flusso trasmesso attraverso la parete.

Nello studio dell'aria umida si è visto che l'aria atmosferica è costituita da una miscela di aria secca e di vapor d'acqua. Quest'ultimo, per i valori di temperatura e pressione caratteristici della maggior parte delle applicazioni tecnologiche (pressione prossima alla pressione atmosferica, temperatura compresa tra $-50\text{ °C} < T < +50\text{ °C}$) può considerarsi un gas a comportamento ideale. Un comportamento analogo ha anche l'aria secca, altro componente della miscela. Nelle condizioni descritte infine è valida la legge di Dalton: la pressione totale della miscela di gas è uguale alla somma delle pressioni parziali che i gas componenti eserciterebbero se ciascuno di essi occupasse da solo, alla stessa temperatura, tutto il volume occupato dalla miscela.

Come si è detto in precedenza, al termine del precedente capitolo, se si sottrae calore ad una miscela di aria umida può accadere che la pressione parziale del vapore d'acqua, p_v , eguagli la pressione di saturazione p_{vs} alla temperatura che la miscela assume in seguito al raffreddamento. In tal caso parte del vapore effettua un passaggio di fase trasformandosi in liquido. L'appannamento che si osserva in alcuni ambienti, della superficie interna di una vetrata durante la stagione invernale, quando all'esterno la temperatura è particolarmente bassa, è da collegarsi ad un fenomeno come quello ora descritto. Infatti, durante il periodo invernale la temperatura interna è mantenuta in generale su valori più alti di quella esterna, e poiché le pareti vetrate sono caratterizzate da una bassa resistenza termica, le superfici interne sono di norma ad una temperatura prossima a quella esterna. Pertanto l'aria presente nell'ambiente, lambendo la superficie interna della vetrata esposta all'esterno, cede calore e subisce un raffreddamento e quindi una diminuzione di temperatura. Questo fenomeno di raffreddamento può condurre la miscela ad una condizione in cui alla temperatura raggiunta la pressione parziale del vapore p_v , presente nella miscela coincide con quella di saturazione p_{vs} . Se ciò accade, qualsiasi ulteriore sottrazione di calore comporterà, con una diminuzione di temperatura della miscela, anche la condensa di una parte del vapor d'acqua in essa presente che si depositerà in forma di minute goccioline sulla superficie vetrata determinandone l'appannamento. E' evidente che questo stesso fenomeno può accadere considerando una superficie di una parete opaca che non sia ben isolata termicamente o, meglio che non sia progettata correttamente dal punto di vista termoigrometrico. Qualunque parete o zona di parete caratterizzata da bassa resistenza termica può presentare fenomeni del tipo di quelli ora descritti. Si può avere quindi un deposito di acqua liquida sulle

superfici interne di pareti verticali o di solai di copertura e interpiano che siano di tamponamento verso l'esterno, o verso locali non riscaldati, qualora alle temperature di tali superfici la pressione parziale p_v , del vapore presente nella miscela d'aria umida che le lambisce risulti pari alla pressione di saturazione p_{vs} , rilevabile dalla Tab.di saturazione. E' ben evidente che, per evitare tali fenomeni, la temperatura T_{sup} della superficie della parete dovrà essere tale che per la pressione del vapore nella miscela risulti sempre

$$p_v < p_{vs} \quad (11.1)$$

dove con p_{vs} si indica la pressione di saturazione del vapore alla temperatura della superficie.

Mentre il meccanismo che conduce alla condensa superficiale appare più evidente, riesce più complesso giustificare il fenomeno di *condensa interstiziale* all'interno della parete.

11.2 La diffusione del vapore in un mezzo poroso.

In genere anche i materiali da costruzione più compatti presentano nella loro struttura una serie di vuoti di differenti dimensioni essenzialmente dovuti ai processi di fabbricazione ed alla natura del materiale stesso. Tali vuoti possono essere comunicanti con l'esterno e/o interconnessi oppure completamente isolati. Il rapporto percentuale tra il volume dei vuoti ed il volume complessivo del campione del materiale viene definito come *porosità totale* mentre il rapporto percentuale del volume dei vuoti comunicanti ed il volume totale del materiale viene definito come *porosità apparente*. La connessione dei pori ovviamente è condizione necessaria per l'esistenza di un fenomeno di diffusione di vapore all'interno del materiale. Tale fenomeno presenta molte analogie con quello della trasmissione di calore per conduzione.

Per *diffusione di vapore* si intende un trasferimento di massa di vapore in un mezzo o tra più mezzi in contatto fisico, a causa di una non uniforme distribuzione della pressione.

Osservazioni sperimentali in condizioni di regime stazionario e per geometria monodimensionale su pareti piane hanno dimostrato che, attraverso i numerosi condotti presenti nella parete e prodotti dalla porosità del materiale, che pongono in comunicazione l'ambiente esterno con l'interno, è possibile che si stabilisca un flusso di vapore. In Fig. 11.1 viene mostrata in sezione una piccola zona della parete che separa due ambienti. Sono assegnati i valori che caratterizzano la miscela d'aria umida all'esterno ed all'interno. Essendo per definizione l'umidità relativa:

$$\Phi = \frac{p_v}{p_{vs}}$$

è possibile, poiché è nota la temperatura dell'aria umida nei due casi ricavare il valore della pressione parziale del vapor d'acqua. Infatti dalla precedente relazione si ha:

$$p_v = \Phi \cdot p_{vs}$$

il valore della pressione di saturazione, nei due casi, può essere ricavata dalla Tab.10.1 entrando con i valori di temperatura dell'aria interna ed esterna.

Si ha quindi:

Aria interna:

$$T_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\Phi_i = 70\% = 0,70 = \frac{p_{v,i}}{p_{vs,i}} \quad \text{poiché dalla tab.10.1 risulta } p_{vs,i}(20^\circ\text{C}) = 2340 \text{ Pa} = 0,02340 \text{ bar}$$

$$p_{v,i} = \Phi_i \cdot p_{vs,i} \quad p_{v,i} = 0,70 \cdot 2340 = 1638 \text{ Pa}$$

Aria esterna:

$$T_e = 2^\circ\text{C}$$

$$\Phi_e = 90\% = 0,90 = \frac{p_{v,e}}{p_{vs,e}} \quad \text{poiché dalla tab.10.1 risulta } p_{vs,e}(2^\circ\text{C}) = 657 \text{ Pa} = 0,00657 \text{ bar}$$

$$p_{v,e} = \Phi_e \cdot p_{vs,e} \quad p_{v,e} = 0,90 \cdot 657 = 591 \text{ Pa}$$

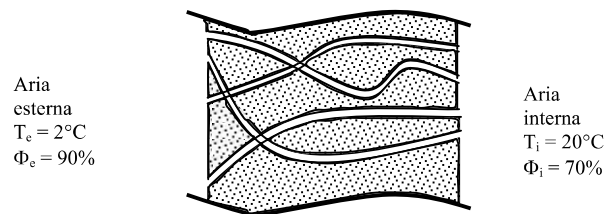


Fig. 11.1

La pressione del vapore all'interno dell'ambiente risulta $p_{vi} = 1638 \text{ Pa}$ quindi più elevata di quella presente all'esterno che è $p_{ve} = 591 \text{ Pa}$. Per ciascuno dei condotti mostrati in Fig.11.2 la pressione sulla sezione rivolta verso l'ambiente interno sarà quindi più elevata di quella presente sulla sezione rivolta verso l'esterno. La differenza di pressione:

$$\Delta p_v = p_{v,i} - p_{v,e}$$

determinerà un flusso di vapore attraverso la parete. Si noti, in analogia con la conduzione che, anche in questo caso:

- si fa riferimento ad una lastra piana cioè ad una parete piana a superfici piane parallele ed indefinite, in cui una delle dimensioni è piccola rispetto alle altre due;
- in analogia alle superfici isoterme, si definiscono le superfici a pressione costante o *isobare* rappresentate dalle superfici limiti della parete su cui agisce la pressione del vapore interna o esterna, e da tutte le superfici interne alla parete e parallele a quelle limiti.

Il flusso di vapore rappresentato dalla *massa di vapore che attraversa una superficie isobara di area unitaria, nell'unità di tempo, nella direzione delle pressioni decrescenti*, ha anch'esso definizione analoga al flusso di calore. Così come analoga al caso della trasmissione di calore per

conduzione [cfr. par. 5.3 relazione (5.13)] è la relazione per il calcolo del flusso di vapore attraverso una parete costituita da tre strati disposti in serie:

$$\text{Flusso di vapore} = g_v = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{(Z'_v / Z''_v / Z'''_v)} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v \text{ tot}}} \quad (11.1)$$

dove:

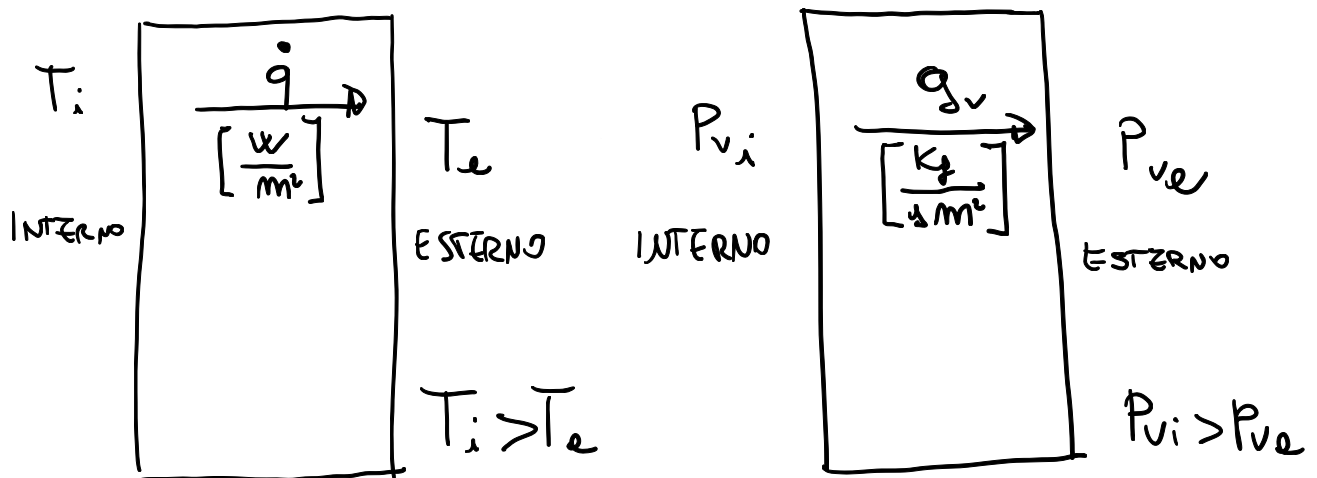
$p_{v,i}$, $p_{v,e}$ rappresentano le pressioni parziali del vapore nella miscela di aria umida all'interno ed all'esterno

R'_v , R''_v ed R'''_v sono le resistenze dei singoli strati al passaggio del vapore.

La R_v si definisce, in analogia alla resistenza termica unitaria in conduzione (cfr. par. 4.2 relazioni 4.8), per una parete costituita da un solo strato, come il rapporto:

$$Z_v = \frac{s}{\delta} \quad (11.2)$$

dove δ è la *permeabilità al vapore* del materiale che costituisce la parete. La permeabilità al vapore δ è una proprietà fisica dei materiali che caratterizza la sua attitudine alla diffusione del vapore, essa dipende dalla composizione chimica, dalla struttura e dalla porosità del materiale. A parità di differenza tra le pressioni del vapore tra l'interno e l'esterno, il flusso di vapore è tanto maggiore quanto più grande è la permeabilità. Nel Sistema Internazionale è espressa in $kg/(s \cdot m \cdot Pa)$ ma tale unità di misura può risultare poco funzionale a causa dei bassi valori delle permeabilità al vapore dei materiali da costruzione. Da ciò deriva talvolta l'uso pratico, ma non coerente con le unità SI, di adottare come unità di misura i $g/(h \cdot m \cdot mmHg)$. Va inoltre precisato che la permeabilità al vapore dei materiali varia in funzione della pressione, ma in virtù del basso intervallo di variazione di tale proprietà nel campo delle verifiche termoigrometriche delle pareti, essa può essere assunta costante per tali applicazioni. In appendice, nel fascicolo Proprietà termofisiche, sono riportati i valori di δ per alcuni materiali da costruzione.



Tale flusso verrà a contatto con zone della parete sempre più fredde, poiché si sposta

dall'ambiente interno verso l'esterno, il primo, nella stagione invernale, a temperatura più elevata del secondo. Può accadere, in qualche punto della parete che la pressione del vapore $p_{v,j}$, risulti maggiore della pressione di saturazione del vapore alla temperatura della zona attraversata: in questo caso si avrà un fenomeno di *condensa interstiziale*.

Come già detto in precedenza quindi la procedura di verifica della condensa consiste nell'accertare che, anche all'interno della parete, oltre che sulle sue superfici limiti, risulti sempre

$$p_v < p_{vs}$$

Si noti infine che l'unità di misura del flusso di vapore è

$$\frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

in essa, la grandezza kg/s rappresenta *la massa di vapore che nell'unità di tempo attraversa la superficie isobara di area A, detta portata massica di vapore ed indicata con il simbolo \dot{m}* .

Moltiplicando il flusso di vapore per l'area della parete A è possibile dalla (11.1) ottenere la portata massica di vapore che attraversa la parete nell'unità di tempo. Risulta infatti:

$$g_v \cdot A = \dot{m}$$

e tenendo conto della (11.1) e della (11.3)

$$\dot{m} = A \cdot \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v,tot}} \quad (11.3)$$

Anche in questo caso si tratta il problema in **regime stazionario** e quindi tutte le proprietà del sistema, in particolare la pressione e la temperatura presenteranno di norma valori diversi sulle diverse superficie isoterme-isobare, ma tali valori resteranno inalterati nel tempo.

11.3. La verifica termoigrometrica in una parete piana, in regime stazionario

Per quanto detto nel precedente paragrafo, affinché non si abbia condensa all'interno o sulle superfici di interfaccia di una parete, in ogni suo punto deve sempre essere soddisfatta la condizione:

$$p_v < p_{vs} \quad (11.4)$$

E quindi necessario, per poter verificare la (11.4), conoscere l'andamento delle pressioni di saturazione del vapore d'acqua nei vari strati che compongono la parete piana. Essendo la pressione di saturazione p_{vs} funzione della sola temperatura, è possibile ricavare l'andamento di tali pressioni una volta noto l'andamento delle temperature in parete. Considerando, inoltre, che la variazione di p_{vs} all'interno dei singoli strati può essere assunta con buona approssimazione lineare, è sufficiente determinare le sole temperature, e conseguentemente la pressione di saturazione, all'interfaccia tra i vari strati che compongono la parete per individuare il campo di p_{vs} all'interno della muratura. Nota la geometria della parete e le proprietà termofisiche dei vari strati

è, quindi, necessario:

1) calcolare la trasmittanza unitaria globale della parete:

La trasmittanza unitaria globale della parete è data dalla relazione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \sum_{k=1}^n \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_{j=1}^m \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{\text{est}}}} \quad (11.5)$$

dove i diversi simboli hanno il significato illustrato nel par.7.2;

2) calcolare il flusso termico che attraversa la parete:

Il calcolo va effettuato come illustrato nel par. 7.2 secondo la relazione:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = U (T_i - T_e) \quad (11.6)$$

dove T_e e T_i sono le temperature nell'ambiente esterno ed interno alla parete;

3) determinare la temperatura sulle superfici limiti e su quelle d'interfaccia tra vari strati

Poiché il sistema è a regime stazionario basterà tener conto che il flusso termico che attraversa la parete è costante. Ad esempio, per una parete come quella mostrata in Fig. 11.1, applicando la procedura per il calcolo del flusso termico per meccanismi combinati si ottiene:

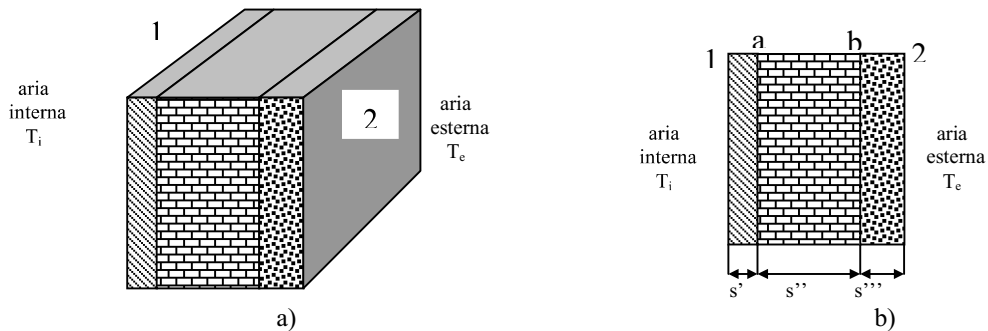


Fig. 11.2

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

dove con U , per la parete mostrata in Fig.11.2, si intende:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{\text{int.}}} + \frac{s'}{\lambda'} + \frac{s''}{\lambda''} + \frac{s'''}{\lambda'''} + \frac{1}{h_{\text{est}}} \right)}$$

Si avrà

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_i - T_e}{\left(\frac{1}{h_{\text{int.}}} + \frac{s'}{\lambda'} + \frac{s''}{\lambda''} + \frac{s'''}{\lambda'''} + \frac{1}{h_{\text{est}}} \right)} = \frac{T_i - T_e}{(R_{\text{int}} + R' + R'' + R''' + R_{\text{est}})} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} = \text{cost.}$$

Quindi si può scrivere, considerando le singole zone:

- per lo scambio aria interna-superficie 1 (convezione irraggiamento)

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_i - T_1}{R_{\text{int}}} \quad \text{da cui si ricava} \quad T_1 = T_i - \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} \cdot R_{\text{int}}$$

- per lo scambio tra le superfici 1-a (conduzione)

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_1 - T_a}{R'} \quad \text{da cui si ricava} \quad T_a = T_1 - \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} \cdot R'$$

- per lo scambio tra le superfici a-b (conduzione)

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_a - T_b}{R''} \quad \text{da cui si ricava} \quad T_b = T_a - \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} \cdot R''$$

- per lo scambio tra le superfici b-2 (conduzione)

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_b - T_2}{R'''} \quad \text{da cui si ricava} \quad T_2 = T_b - \frac{T_i - T_e}{R_{\text{tot}}} \cdot R'''$$

- per lo scambio superficie 2 – aria esterna (convezione irraggiamento)

$$\dot{q} = \frac{T_i - T_e}{R_{tot}} = \frac{T_2 - T_e}{R_{est}} \quad \text{da cui si ricava} \quad T_{est} = T_2 - \frac{T_i - T_e}{R_{tot}} \cdot R_{est}$$

Nella procedura illustrata compare il termine $(T_i - T_e)/R_{tot} = \dot{q}$ che nel calcolo può essere valutato preliminarmente e quindi utilizzato in ciascuna relazione

4) Determinare il valore delle pressioni di saturazione del vapore sulle superfici limiti della parete e sulle superfici d'interfaccia tra i diversi strati

Dai valori della temperatura sulle superfici estreme e su quelle d'interfaccia tra i vari strati, calcolate come indicato nel punto precedente, è possibile determinare con l'ausilio della tab. 10.1 i corrispondenti valori della pressione di saturazione p_{vs} ;

5) Disegnare il diagramma delle p_{vs} in funzione dell'ascissa corrente

Noti tali valori è possibile costruire il diagramma delle pressioni di saturazione in funzione dell'ascissa corrente assumendo che la variazione di p_{vs} sia lineare all'interno di ciascuno strato;

6) Determinare i valori della pressione del vapore saturo p_{vsi} e p_{vse}

Mediante i valori delle temperature interna ed esterna dell'aria, si ricavano dalla Tab.10.i corrispondenti valori della pressione del vapore saturo p_{vsi} e p_{vse} ;

7) Determinare valori della pressione parziale del vapore p_{vi} e p_{ve}

In base ai valori di pressione di saturazione calcolati al punto precedente ed alla conoscenza dei valori dell'umidità relativa interna (70%) ed esterna (90%) dell'aria è possibile determinare, mediante la relazione di definizione dell'umidità relativa, i corrispondenti valori della pressione parziale del vapore p_{vi} e p_{ve} .

8) Determinare la resistenza al vapore globale unitaria Z_v

Note le caratteristiche geometriche ed igrometriche dei vari strati che compongono la parete si determina la resistenza globale unitaria Z_v mediante la relazione (11.3);

9) Determinare il flusso di vapore che attraversa la parete

Nota il $\Delta p = p_{vi} - p_{ve}$ tra l'interno e l'esterno è possibile determinare il flusso di vapore mediante la (11.1);

10) Determinare la pressione del vapore sulle interfacce tra i vari strati

È possibile determinare la pressione del vapore sulle interfacce tra i vari strati, con una procedura del tutto analoga a quella utilizzata precedentemente per il calcolo delle temperature.

Considerando ad esempio la parete mostrata in Fig.11.2, il flusso di vapore può essere ottenuto tenendo conto della (11.1), dalla relazione:

$$\text{Flusso di vapore} = \dot{q}_v = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{(Z'_v + Z''_v + Z'''_v)} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{\frac{s'_v}{\delta'_v} + \frac{s''_v}{\delta''_v} + \frac{s'''_v}{\delta'''_v}} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v,tot}}$$

Poiché il sistema è in regime stazionario il flusso di vapore è costante. Va comunque precisato che nel fenomeno della diffusione del vapore non vengono definite le conduttanze superficiali interne ed esterne come nella trasmissione del calore per meccanismi combinati. Infatti, le resistenze al vapore negli strati liminari interno ed esterno, in virtù dell'elevato valore della permeabilità dell'aria (0.09 g/h m mmHg) e del ridotto spessore degli strati liminari stessi, possono essere trascurate rispetto alle resistenze dei materiali da costruzione. In tale ipotesi le pressioni del vapore dell'aria interna ed esterna coincidono con i valori di pressione del vapore sulle superfici limiti della parete.

Ciò premesso, si ottiene:

- sulla superficie 1

$$p_1 = p_{v,i}$$

- per il primo strato

$$q_v = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v,tot}} = \frac{p_{v,i} - p_{v,a}}{Z'} \quad \text{da cui si ricava} \quad p_{v,a} = p_{v,i} - \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z'} \cdot Z'$$

- per il secondo strato

$$q_v = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v,tot}} = \frac{p_{v,a} - p_{v,b}}{Z''} \quad \text{da cui si ricava} \quad p_{v,b} = p_{v,a} - \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{v,tot}} \cdot Z''$$

- per la superficie 2

$$p_2 = p_{v,e}$$

11) Disegnare il diagramma della pressione del vapore in parete in funzione dell'ascissa corrente

Noti i valori puntuali delle pressioni del vapore alle interfacce tra i vari strati è possibile tracciare il diagramma in funzione dell'ascissa corrente considerando che la variazione delle p_v è lineare nell'interno di ciascuno strato; questo diagramma va tracciato sullo stesso piano utilizzato per il diagramma delle p_{vs}

12) Verificare che risulti in ogni punto $p_v > p_{vs}$

Dal confronto dei valori puntuali di p_{vs} e p_v all'interfaccia tra i vari strati e soprattutto dalla sovrapposizione dei diagrammi (p_v, x e p_{vs}, x) determinare l'esistenza o meno di fenomeni di condensa sia superficiali che interni alla parete e l'estensione della zona da essi interessata.

11.4 Metodi per l'eliminazione della condensa

Una volta accertata l'esistenza del fenomeno di condensa all'interno di una muratura o sulle superfici limiti della parete è necessario individuare gli opportuni interventi correttivi per l'eliminazione di tale fenomeno.

Dovendo soddisfare la (11.4), gli interventi possibili per l'eliminazione della condensa devono consentire di:

- a) modificare l'andamento delle pressioni di saturazione del vapore p_{vs} ; in particolare nella zona interessata al fenomeno bisognerà aumentare i valori della pressione del vapore saturo affinché risultino superiori ai valori effettivi della pressione parziale p_v del vapore presente nella miscela;
- b) modificare l'andamento delle pressioni parziali del vapore, in particolare nella zona interessata al fenomeno di condensa i valori effettivi della pressione parziale p_v del vapore presente nella miscela dovranno essere diminuiti affinché risultino inferiori ai corrispondenti valori delle pressioni del vapore saturo;
- c) modificare contemporaneamente in maniera opportuna gli andamenti delle p_v e p_{vs} affinché sia sempre rispettata la (11.4).

L'intervento a) si basa sulla semplice considerazione che il valore delle pressioni di saturazione del vapore sono legate alla temperatura quindi, elevare il valore di tali pressioni significa aumentare il valore delle temperature all'interno della parete e sulle superfici limitanti. La parete deve quindi essere più "calda".

In una parete costituita da più strati disposti in serie il salto di temperatura tra l'interno e l'esterno, si ripartisce tra i diversi strati della parete in relazione alla resistenza termica di ciascuno. In particolare la maggiore caduta di temperatura avviene negli strati che presentano una resistenza termica più elevata. Questo fenomeno è quindi molto marcato negli isolanti termici. In una generica parete composta da più strati l'andamento del diagramma delle temperature in funzione dell'ascissa corrente può essere diverso a seconda della disposizione dei diversi strati. Quanto più lo strato a maggiore resistenza termica è esterno, cioè spostato verso la zona fredda, minore sarà la differenza di temperatura parziale tra l'interno e la superficie limite di tale strato rivolta verso l'interno, inoltre, tutta la porzione di parete che si trova all'interno dello strato isolante risulta a temperatura mediamente molto più elevata rispetto al caso della parete senza isolante. Conseguentemente l'andamento delle p_{vs} si presenterà in maniera analoga, con la maggiore caduta di pressione in corrispondenza dello strato di maggiore resistenza termica. Da quanto detto si deduce che un possibile intervento per l'eliminazione della condensa consiste nel *posizionare un materiale coibente quanto più esterno è possibile, facendo restare calda e secca la parte più interna della parete*. Essendo stato introdotto un ulteriore strato nella parete è necessario verificare completamente il suo comportamento, sia da un punto di vista termico che igrometrico, ripercorrendo i punti dall'1) al 10) del precedente paragrafo.

Relativamente al tipo di intervento b), finalizzato alla variazione delle p_v , va osservato che, sulla base delle osservazioni fatte in precedenza e dell'esempio trattato, di norma la pressione parziale del vapore all'interno dell'ambiente $p_{v,i}$ risulta maggiore della pressione parziale del vapore all'esterno $p_{v,e}$. E' ben evidente che tali valori sono costanti e non sono influenzabili da interventi sulla parete. Tuttavia se nella parete si introduce uno strato a bassissima permeabilità al vapore, la caduta di pressione si concentrerà per gran parte su tale strato. Se si posiziona uno strato che presenta una elevata resistenza alla diffusione del vapore il più possibile interno alla parete, su tale strato si avrà la maggiore caduta di pressione e, a parità di condizioni igrometriche al contorno, la rimanente variazione della p_v tra tale strato e l'esterno risulterà sensibilmente ridotta e quindi i valori di p_v in tale zona saranno ovviamente più bassi e prossimi al valore assunto all'esterno.

Il fenomeno della diffusione del vapore in un solido è legato alla presenza di una forte connessione tra i pori. Un materiale può, quindi, presentare una elevata resistenza al vapore o

perché poco poroso o perché i vuoti non sono comunicanti. Alla prima categoria appartengono le cosiddette *barriere al vapore* che, avendo elevate densità si presentano con basse permeabilità al vapore, dell'ordine di 10^{-9} - 10^{-12} kg/s m Pa. Esempi sono i *fogli di alluminio*, il *polietilene in fogli* o il *PVC in fogli*. Di tale categoria fanno anche parte i comuni *impermeabilizzanti* come *l'asfalto*, il *bitume* o il *cartone bitumato*, universalmente usati per evitare i fenomeni d'infiltrazione d'acqua e che per loro caratteristiche (porosità trascurabile) sono anche delle barriere al vapore. Inoltre, a causa dei ridottissimi spessori di tali barriere, (in alcuni casi dell'ordine dei centesimi di mm per le barriere al vapore vere e proprie, e mai comunque superiori a qualche mm come nelle impermeabilizzazioni), la resistenza termica di tali materiali risulta nella maggior parte dei casi trascurabile. Si supponga di introdurre, nella parete utilizzata come esempio, immediatamente dopo l'intonaco interno una barriera al vapore costituita da un foglio di cartone catramato di 0.1 mm la resistenza termica di tale strato risulta di due ordini di grandezza minore delle resistenze termiche degli altri strati. Ne consegue che l'andamento delle temperature in parete e quindi delle pressioni di saturazione del vapore, p_{vs} , rimane identico a quello calcolato precedentemente. Di contro il comportamento igrometrico risulta sensibilmente variato per effetto della forte caduta di pressione parziale del vapore p_v che si determina in corrispondenza della barriera introdotta.