

Università Mediterranea di Reggio Calabria
Facoltà di Ingegneria

Corso di Tecnica del Controllo Ambientale

A.A. 2004-2005

Verifica termoigrometrica delle pareti

1 INTRODUZIONE

Negli ambienti le cui pareti raggiungono, sulla loro superficie interna, temperature inferiori alla temperatura di rugiada dell'aria ambiente si ha il fenomeno della condensazione superficiale con il conseguente depositarsi, sulla superficie delle pareti stesse, della quantità di acqua che non può essere contenuta nell'aria sotto forma di vapore.

Il fenomeno della condensa superficiale è strettamente connesso con la temperatura alla quale si trova la faccia interna della parete e quindi dipende, oltre che dalla temperatura e dall'umidità relativa dell'aria ambiente, anche dal grado di isolamento che la parete stessa offre. Per questo sono particolarmente pericolosi i ponti termici, cioè le zone della costruzione dotate di minor resistenza termica rispetto alle zone circostanti: in corrispondenza di essi, infatti, la temperatura superficiale interna è piuttosto bassa e si ha quindi la possibilità di formazione di condensa.

La sola verifica dell'impossibilità di condensa superficiale non esaurisce però l'esame termoigrometrico che è opportuno compiere su una parete; infatti in alcuni casi la condensa si forma all'interno della parete anziché sulla sua superficie interna provocando, oltre agli inconvenienti di carattere igienico-ambientale, che compromettono la qualità dell'aria interna, anche una sensibile diminuzione della resistenza termica della parete, in quanto il contenuto di umidità incrementa notevolmente la conducibilità termica dei materiali da costruzione.

Lo studio del comportamento termoigrometrico di una parete riveste notevole importanza sia in fase di progetto, per una corretta scelta della sequenza degli strati costituenti, sia in occasione di interventi di rinforzo dell'isolamento termico di una parete esistente, al fine di un corretto posizionamento del materiale isolante ed una corretta determinazione del suo spessore.

2 CONDENSAZIONE SULLA SUPERFICIE DELLE PARETI

In generale si può dire che il fenomeno della condensazione superficiale è strettamente legato al grado di isolamento termico che la parete offre in quanto, per un ambiente di date caratteristiche termoigrometriche (temperatura e umidità dell'aria), dipende dalla temperatura alla quale si trova la faccia interna della parete stessa.

Per evitare il fenomeno della condensazione superficiale è sufficiente mantenere la temperatura interna delle pareti al di sopra della temperatura di rugiada dell'aria ambiente, occorre cioè verificare che:

$$t_{pi} > t_R \quad (1)$$

Il valore della temperatura di rugiada t_R è ricavabile dal diagramma psicrometrico o dal diagramma di Mollier dell'aria umida, note la temperatura dell'aria ambiente e la sua umidità relativa, mentre per calcolare la temperatura superficiale è necessario impostare un bilancio termico sulla parete.

2.1 Determinazione della temperatura superficiale

La determinazione del valore della temperatura superficiale della parete può essere condotta nell'ipotesi di flusso termico stazionario uguagliando il flusso termico attraverso l'intera parete (da aria ad aria) con quello adduttivo sulla superficie interna della stessa.

Il flusso termico unitario attraverso l'intera parete è espresso dalla relazione:

$$\frac{Q_p}{A} = U(t_i - t_e) \quad (2)$$

in cui t_i e t_e sono le temperature dell'aria interna ed esterna ed U è la trasmittanza della parete, pari a:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{a,i}} + \sum_{j=1}^N \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_{a,e}}} \quad (3)$$

con s_j e λ_j spessore e conducibilità termica del j -esimo strato omogeneo di materiale, $h_{a,i}$ ed $h_{a,e}$ coefficienti adduttivi superficiali interno ed esterno.

La conducibilità termica λ rappresenta la quantità di calore che attraversa nell'unità di tempo una parete piana di spessore unitario, per effetto di una differenza unitaria di temperatura.

Il flusso adduttivo unitario sulla parete interna è invece pari a:

$$\frac{Q_{a,i}}{A} = h_{a,i}(t_i - t_{pi}) \quad (4)$$

in cui t_{pi} è la temperatura superficiale interna della parete.
Eguagliando le due espressioni si ha:

$$U(t_i - t_e) = h_{a,i}(t_i - t_{pi}) \quad (5)$$

da cui si ricava:

$$t_{pi} = t_i - \frac{U}{h_{a,i}}(t_i - t_e) \quad (6)$$

2.2 Soluzione al problema della condensazione superficiale

L'aggiunta di opportuni spessori di materiali isolanti consente di evitare il fenomeno della condensazione superficiale perché la presenza del coibente innalza la temperatura superficiale della parete al di sopra di quella di rugiada.

Di grande utilità ed interesse è la determinazione della resistenza termica addizionale R_a da adottare per prevenire fenomeni di condensa, che può essere ottenuta ponendo nella (6) $t_{pi} = t_R$ e ricavando il valore della trasmittanza termica unitaria massimo ammissibile U_{max} .

Affinché in nessun punto della superficie interna della parete possano aversi fenomeni di condensazione si deve avere una trasmittanza termica unitaria di valore inferiore a:

$$U_{max} = \frac{t_i - t_R}{t_i - t_e} h_{a,i} \quad (7)$$

La resistenza termica corrispondente è pari alla somma della resistenza termica posseduta originariamente dalla parete e della resistenza termica addizionale incognita per cui si ha:

$$\frac{1}{U_{max}} = \frac{1}{U} + R_a \quad (8)$$

da cui si ricava:

$$R_a = \frac{1}{U_{max}} - \frac{1}{U} \quad (9)$$

e da cui, nota la conducibilità termica dell'isolante, λ_{is} , è possibile calcolare lo spessore di isolante, s_{is} , da inserire:

$$s_{is} = \lambda_{is} R_a \quad (10)$$

3 CONDENSAZIONE NELLA MASSA

Le differenze di temperatura, di umidità relativa e quindi di pressione di vapore determinano un movimento di vapore nella direzione delle pressioni decrescenti (diffusione) dall'ambiente a pressione parziale maggiore (generalmente a temperatura superiore) all'ambiente a pressione minore (generalmente a temperatura inferiore). La maggior parte dei materiali isolanti e da costruzione sono infatti più o meno permeabili al vapore acqueo a seconda della loro porosità.

Inoltre la temperatura e quindi la pressione di saturazione decrescono lungo lo spessore della parete dall'ambiente più caldo a quello più freddo.

Può avvenire allora che, se la pressione di saturazione all'interno della parete si abbassa in qualche punto al di sotto del valore della pressione parziale di vapore esistente nello stesso punto, si ha formazione di condensa sulla o sulle superfici verticali isoterme corrispondenti e nella fascia di parete fra esse comprese.

Nel campo di temperature che prevalentemente interessano l'edilizia (fino a circa 40°C) la diffusione del vapore attraverso un setto piano (parete, solaio ecc.) può essere calcolata mediante una relazione analitica che è formalmente simile a quella relativa alla propagazione dell'energia termica attraverso una parete piana in regime termico stazionario monodimensionale.

La portata di vapore acqueo che attraversa l'unità di superficie di una parete è quantizzabile con una legge del tipo:

$$\frac{G}{A} = M(p_i - p_e) \quad (11)$$

in cui p_i e p_e sono le pressioni parziali dell'aria interna ed esterna ed M è la permeanza della parete, pari a:

$$M = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \sum_{j=1}^N \frac{s_j}{\mu_j} + \frac{1}{\beta_e}} \quad (12)$$

con s_j e μ_j spessore e permeabilità del j -esimo strato omogeneo di materiale, β_i ed β_e coefficienti di adduzione superficiale del vapore interno ed esterno.

La permeabilità μ rappresenta la quantità di vapore che attraversa nell'unità di tempo una parete piana di spessore unitario, per effetto di una differenza unitaria di pressione.

I valori delle conducibilità e delle permeabilità di alcuni tipici materiali edilizi sono riportati nella seguente Tabella 1.

Tabella 1 - Valori di conducibilità termica e di permeabilità al vapore d'acqua di alcuni materiali.

| Materiale | ρ (kg/m ³) | λ (W/m°C) | $\mu \cdot 10^{12}$ (kg/msPa) |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Calcestruzzo | 2200 | 1,16 | 2 |
| Calcestruzzo di argilla espansa | 1000 | 0,31 | 2 |
| Cartongesso in lastre | 900 | 0,21 | 23 |
| Pannelli semirigidi di fibra di vetro | 20 | 0,043 | 150 |
| Intonaco di gesso | 1200 | 0,35 | 18 |
| Intonaco di calce e gesso | 1400 | 0,70 | 18 |
| Intonaco di cemento | 2000 | 1,40 | 8 |
| Laterizi | 600 | 0,25 | 25 |
| Laterizi | 1400 | 0,50 | 25 |
| Laterizi | 2000 | 0,90 | 25 |
| Legno di pino | 550 | 0,15 | 4,5 |
| Legno di quercia | 850 | 0,22 | 4,5 |
| Bitume | 1200 | 0,17 | 0 |
| Cartone catramato | 1600 | 0,50 | 0 |
| Poliuretano in lastre | 40 | 0,032 | 2 |
| Lastre a base di perlite espansa | 190 | 0,071 | 36 |

Poiché i coefficienti di adduzione superficiale del vapore risultano praticamente infiniti, si pone $1/\beta_i = 0$ e $1/\beta_e = 0$; quindi per una parete composta da N strati la permeanza vale:

$$M = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{s_j}{\mu_j}} \quad (13)$$

L'inverso della permeanza rappresenta la resistenza opposta dalla parete al passaggio del vapore:

$$R_v = \frac{1}{M} \quad (14)$$

3.1 Pressione di saturazione del vapore all'interno di una parete

La conoscenza della distribuzione della temperatura e quindi delle pressioni di saturazione del vapore, lungo lo spessore degli strati interni di una parete è necessaria per poter studiare e quindi prevedere i fenomeni di condensa nella parete stessa.

Per calcolare le pressioni di saturazione all'interno della parete è necessario, innanzitutto, determinare i valori della temperatura in corrispondenza della faccia esterna ed interna e sulle superfici di separazione dei vari strati di cui si compone la parete (Figura 1).

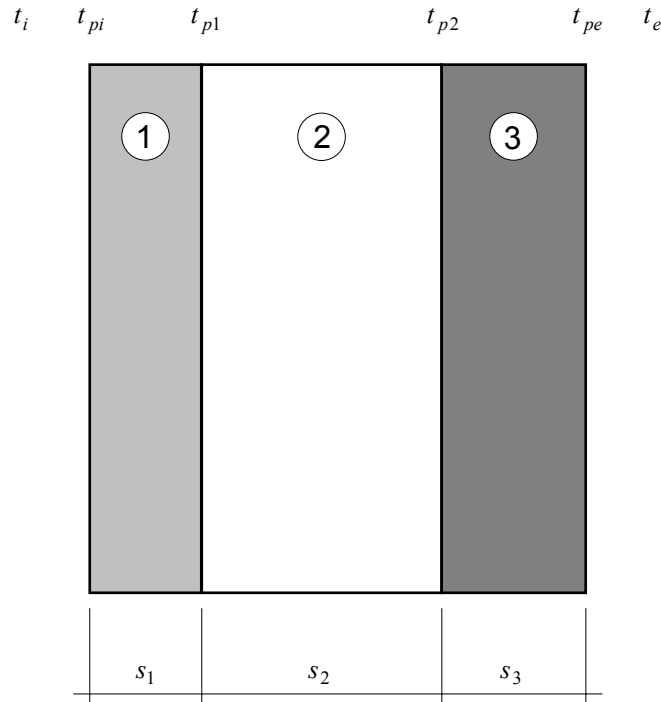


Figura 1. Geometria della parete.

Dalle equazioni relative al flusso termico attraverso gli strati della parete ed a quello che attraversa l'intera parete si ha, procedendo dall'interno verso l'esterno:

$$\frac{Q}{A} = h_{a,i}(t_i - t_{pi}) = \frac{t_i - t_{p1}}{\frac{1}{h_{a,i}} + \frac{s_1}{\lambda_1}} = \frac{t_i - t_{p2}}{\frac{1}{h_{a,i}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} = \dots = U(t_i - t_e) \quad (15)$$

da cui si ottengono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} t_{pi} &= t_i - \frac{U}{h_{a,i}}(t_i - t_e) \\ t_{p1} &= t_i - U(t_i - t_e) \left(\frac{1}{h_{a,i}} + \frac{s_1}{\lambda_1} \right) \\ t_{p2} &= t_i - U(t_i - t_e) \left(\frac{1}{h_{a,i}} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} \right) \\ &\dots \end{aligned} \quad (16)$$

In generale, nel caso di una parete costituita da più strati si potrà porre, per il generico k-esimo strato, la relazione:

$$t_k = t_i - U(t_i - t_e) \left(\frac{1}{h_{a,i}} + \sum_{j=1}^k \frac{s_j}{\lambda_j} \right) \quad (17)$$

Dopo aver ricavato i valori delle temperature sulle superfici di separazione dei vari strati, è possibile rappresentare graficamente il reale andamento delle stesse all'interno della parete (Figura 2).

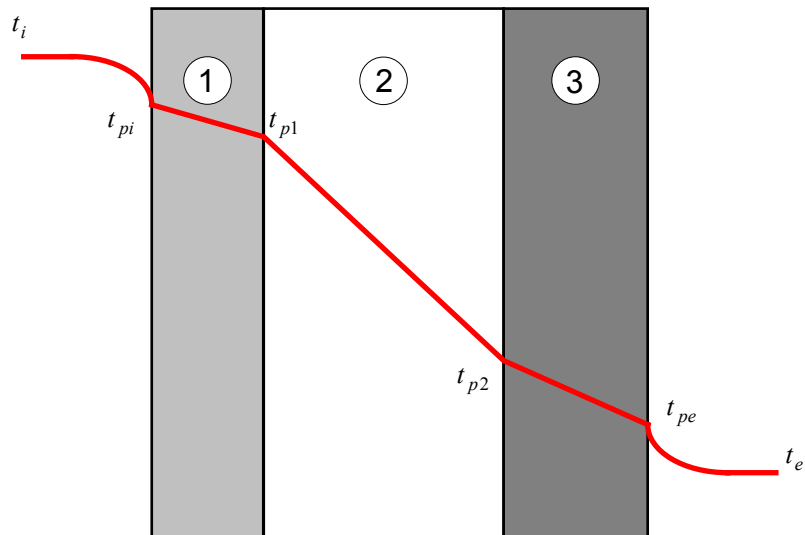


Figura 2. Andamento della temperatura all'interno della parete.

Una volta in possesso dei valori delle temperature si ricavano i valori delle corrispondenti pressioni di saturazione, mediante il diagramma di Mollier dell'acqua o con l'ausilio della seguente equazione, in cui la temperatura è espressa in gradi centigradi:

$$p_{vs} = 1000 \exp\left(16,6536 - \frac{4030,183}{t + 235}\right) \quad (18)$$

e diagrammarne l'andamento (Figura 3).

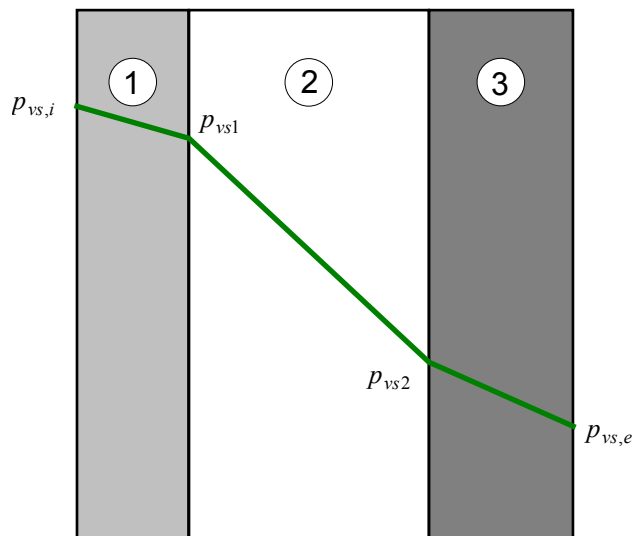


Figura 3. Andamento della pressione di saturazione del vapore all'interno della parete.

3.2 Pressione parziale del vapore all'interno di una parete

Per poter studiare i fenomeni di condensazione del vapore all'interno di una parete, dopo aver valutato l'andamento della temperatura e della pressione di saturazione all'interno dei diversi strati, è necessario conoscere anche l'andamento della pressione di vapore negli stessi strati.

Per il calcolo delle pressioni del vapore nei vari punti è possibile operare come già fatto in precedenza per il calcolo delle temperature, imponendo la costanza del flusso di vapore areico nei vari strati della struttura.

$$\frac{G}{A} = \beta_i (p_i - p_{pi}) = \frac{p_i - p_{p1}}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{s_1}{\mu_1}} = \frac{p_i - p_{p2}}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{s_1}{\mu_1} + \frac{s_2}{\mu_2}} = \dots = M(p_i - p_e) \quad (19)$$

Già si è visto come i valori di $1/\beta_i$ e $1/\beta_e$ si possano trascurare assumendoli eguali a 0 per cui si avrà in questo caso $p_i = p_{pi}$ e $p_e = p_{pe}$.

In generale nel caso di una parete costituita da più strati si potrà ricavare per lo strato k-esimo il valore

$$p_k = p_i - M(p_i - p_e) \sum_{j=1}^k \frac{s_j}{\mu_j} \quad (20)$$

dove M è la permeanza di tutta la parete.

I valori delle pressioni di vapore nell'ambiente interno ed esterno si determinano mediante le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} p_i &= p_{vs,i} \cdot UR_i \\ p_e &= p_{vs,e} \cdot UR_e \end{aligned} \quad (21)$$

dove UR_i (UR_e) è l'umidità relativa interna (esterna).

Determinati i valori delle pressioni parziali di vapore in corrispondenza dei vari strati dalla struttura servendosi dalle equazioni che regolano la diffusione del vapore è possibile tracciarne l'effettivo andamento (Figura 4).

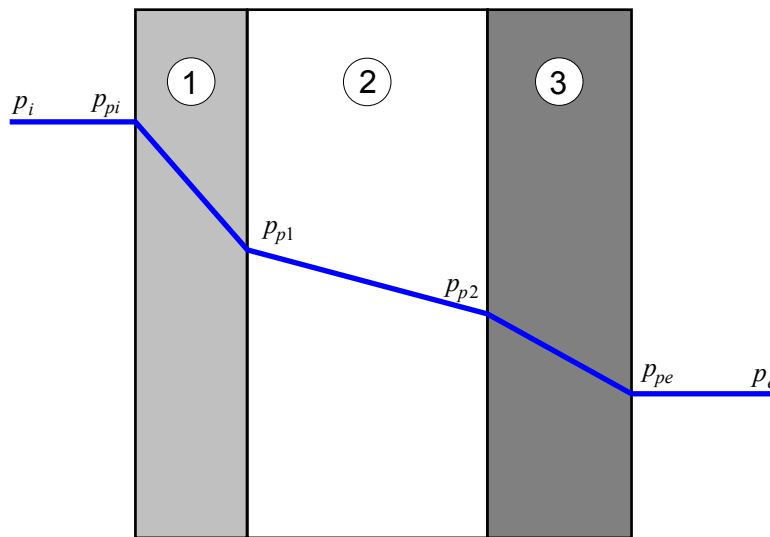


Figura 4. Andamento della pressione parziale del vapore all'interno della parete.

3.3 Verifica della condensazione all'interno della parete

Come si è già detto, tra due ambienti separati da una parete, il vapore migra dall'ambiente a pressione parziale maggiore (normalmente quello più caldo) verso quello a pressione parziale minore (normalmente quello più freddo), filtrando attraverso la parete divisoria (che si comporta come una membrana filtrante); inoltre, la temperatura e quindi la pressione di saturazione si abbassa lungo lo spessore della parete, dall'ambiente più caldo a quello più freddo.

Se la curva della pressione parziale di vapore interseca la curva delle pressioni di saturazione, nella zona di intersezione si forma condensa con conseguenti inconvenienti igienico-sanitari e con riduzione del potere isolante della parete.

Nella zona ove si ha condensazione la pressione del vapore diviene pari alla pressione di saturazione alla corrispondente temperatura e così si mantiene finché la pressione parziale non diviene nuovamente minore della pressione di saturazione.

Ciononostante le curve rappresentanti l'andamento di p e di p_{vs} vengono disegnate sovrapposte in modo indipendente, per poter valutare in modo qualitativo i verificarsi del fenomeno di condensazione nella massa.

Dall'osservazione dell'andamento dei diagrammi ottenuti si possono trarre alcune indicazioni circa lo sviluppo del fenomeno; precisamente i casi che si possono presentare sono tre:

- a) le curve della pressione di saturazione e della pressione parziale di vapore non si intersecano mai, nel senso che la pressione parziale di vapore rimane ovunque al di sotto della pressione di saturazione: in questo caso non si avranno fenomeni di condensazione e non sarà necessario alcun particolare accorgimento costruttivo;

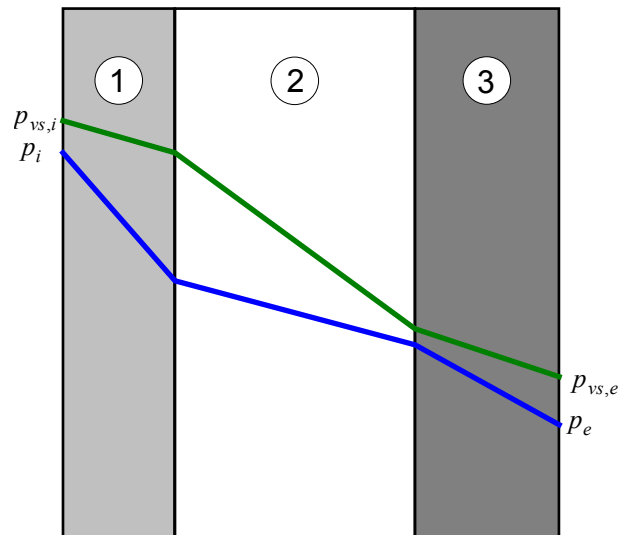


Figura 5. Assenza di condensazione all'interno della parete.

- b) la pressione parziale di vapore raggiunge in un solo punto la pressione di saturazione: in tal caso si ha condensazione solo sulla superficie verticale isoterma passante per quel punto;

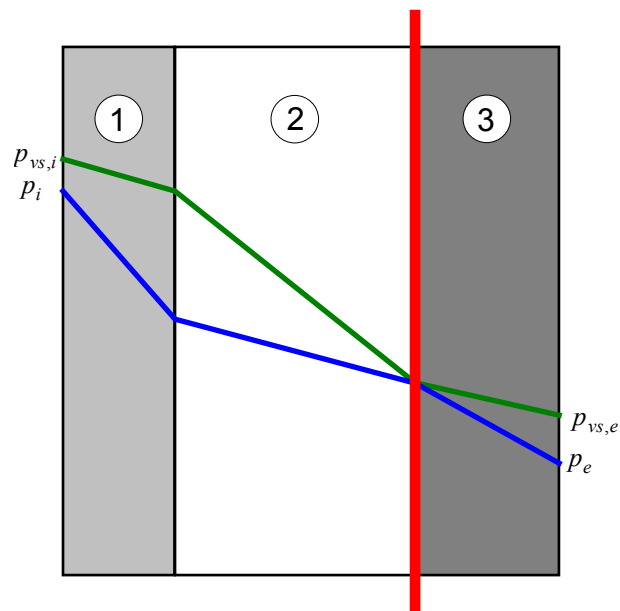


Figura 6. Condensazione su una superficie verticale isoterma.

- c) le curve della pressione di saturazione e della pressione parziale del vapore si intersecano in due punti e nella zona compresa fra essi la pressione parziale risulta maggiore di quella di saturazione: in questo caso si avrà condensazione all'interno della zona così individuata.

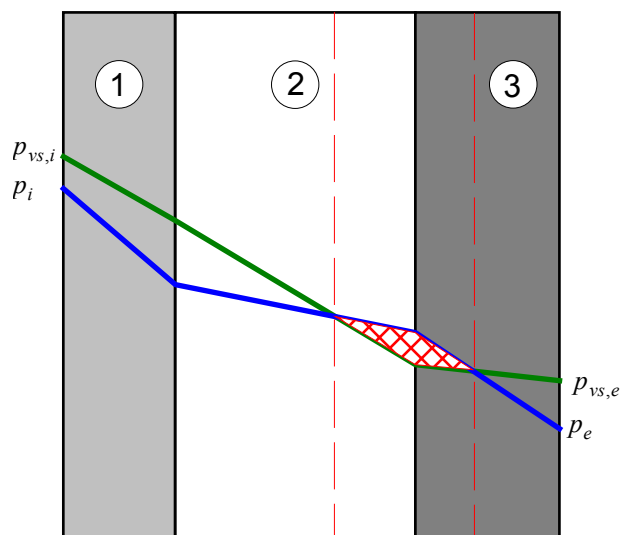


Figura 7. Condensazione in una zona all'interno della parete.

3.4 Soluzione al problema della condensazione nella massa

La formazione di condensa all'interno di una parete può essere evitata mantenendo bassi i valori della pressione di vapore e mantenendo elevati i valori della pressione di saturazione in relazione ad ogni singolo strato.

Per ottenere ciò, in fase di progettazione dell'involucro edilizio è possibile operare non solo attraverso una accurata scelta dei materiali da impiegare in funzione della loro resistenza al passaggio del vapore, ma soprattutto attraverso la realizzazione di una corretta sequenza degli strati in modo che la resistenza alla diffusione del vapore assuma valori decrescenti dall'interno verso l'esterno e la resistenza termica assuma invece valori crescenti dall'interno verso l'esterno.

Bisogna cioè evitare l'inserimento di strati di sbarramento al passaggio del vapore verso l'esterno (lato freddo) poiché manterrebbero elevata la pressione parziale di vapore all'interno dell'elemento della costruzione favorendo il raggiungimento dei valori critici corrispondenti alla saturazione.

Al fine di ridurre la diffusione del vapore attraverso la parete e di mantenere i valori della pressione di vapore al di sotto di quelli corrispondenti alla saturazione devono quindi essere impiegati materiali caratterizzati da un'alta resistenza al vapore collocati verso l'interno della parete; detti materiali prendono comunemente il nome di "barriera al vapore" o "freno vapore" e sono costituiti da bitume oppure carta kraft bitumata oppure sottili fogli di alluminio o di cloruro di polivinile o di polietilene.

È possibile anche evitare il fenomeno della condensazione mantenendo elevati i valori della pressione di saturazione all'interno della parete, isolando termicamente la parete. È necessario tuttavia scegliere una opportuna sequenza dei materiali, in modo che la resistenza termica cresca dall'interno verso l'esterno; un errato posizionamento dello strato coibente può infatti rendere inefficace il suo contributo all'eliminazione del fenomeno, o addirittura accentuarlo.

Si considerino, ad esempio due pareti aventi la stessa resistenza al passaggio del vapore, l'una isolata dall'interno, l'altra dall'esterno (Figura 8).

Alla diversa posizione dello strato isolante corrisponde un diverso diagramma delle temperature e conseguentemente un diverso andamento delle pressioni di saturazione. Disponendo l'isolante all'interno la temperatura in corrispondenza di esso decresce rapidamente e si ha maggiore probabilità che essa raggiunga il valore della temperatura di rugiada, con conseguente formazione di condensa nella parte posteriore dell'isolante. Per questo motivo, quando si realizza l'isolamento di una parete dall'interno, bisogna sempre prevedere la presenza di una barriera al vapore sul lato caldo.

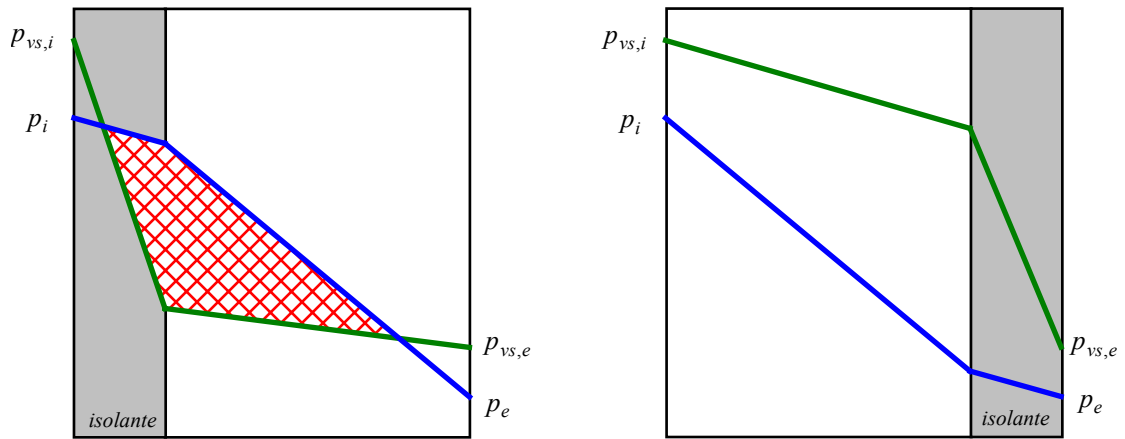


Figura 8. Effetto della disposizione degli strati sulla condensazione all'interno della parete.