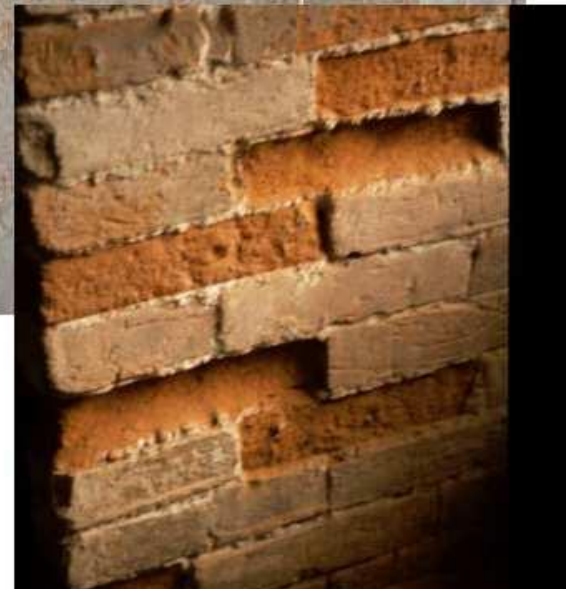


Condensa interstiziale, Metodo Glaser

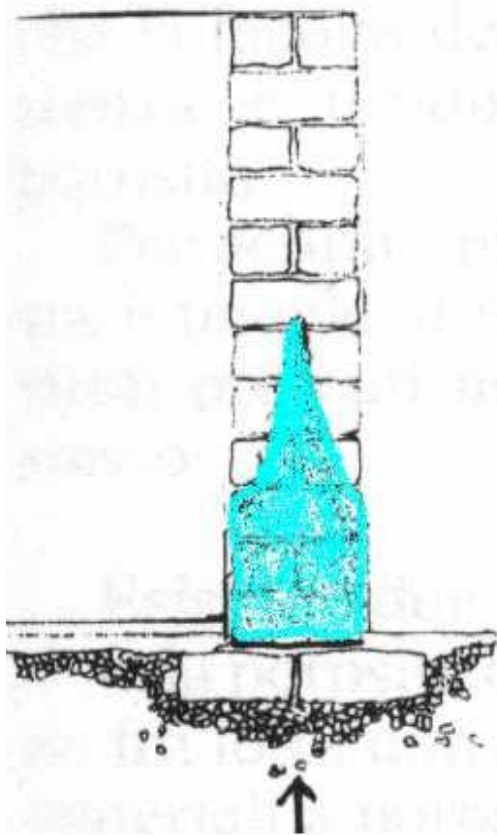
Corso di Fisica Tecnica a.a. 2022/23
Prof. Marina Mistretta

Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

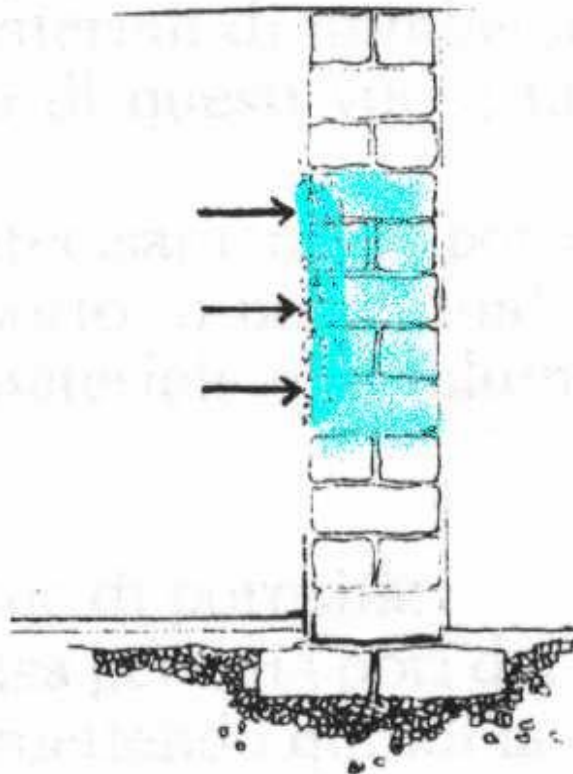


Distribuzione dell'acqua in funzione del tipo di problema

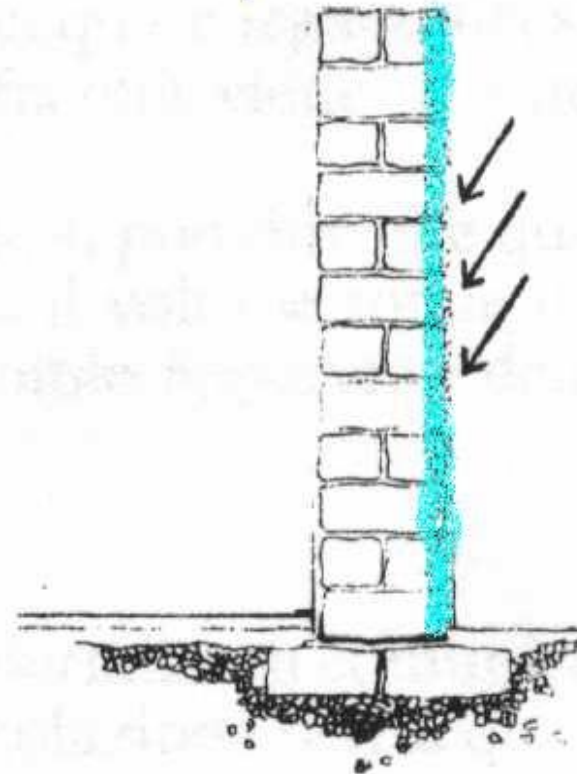
umidita di risalita



umidita' da condensa



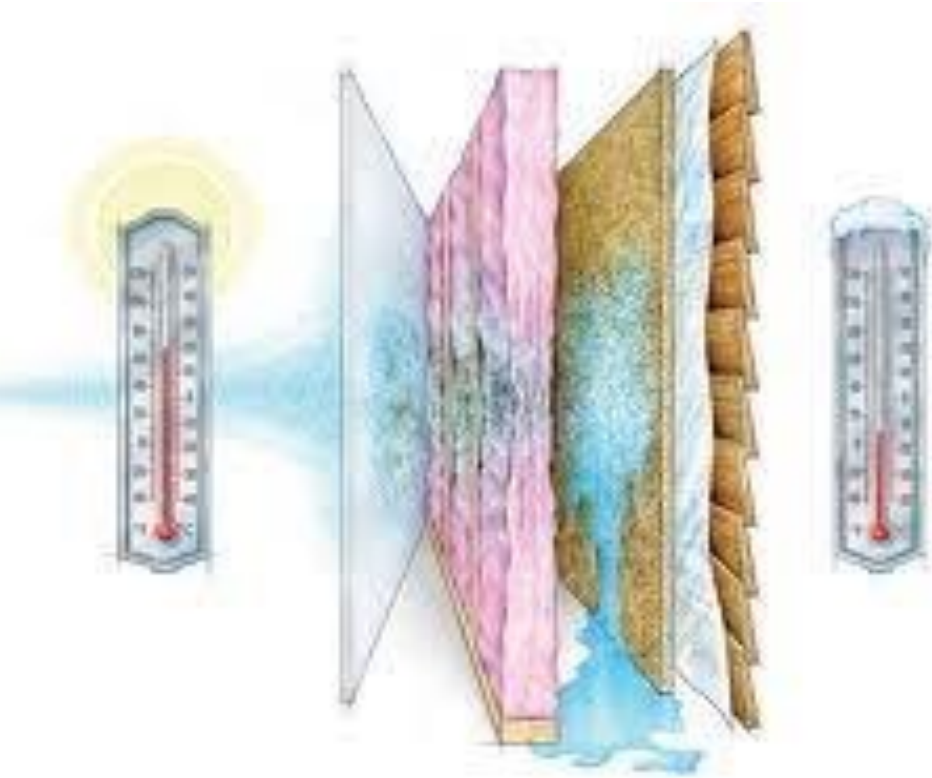
umidita' da acqua meteorica



CONDENSA INTERSTIZIALE

Le pareti multistrato possono essere interessate dal problema della CONDENSA INTERSTIZIALE.

In una certa porzione di spessore della parete quando la portata di vapore entrante supera la portata di vapore uscente, in conseguenza al fatto che il vapore raggiunge le condizioni di saturazione ($p_v = p_{sat}$), avviene il fenomeno della condensa, portando al degrado della parete.



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

Il problema della condensazione del vapor d'acqua, sia che avvenga sulle superfici delle strutture, sia che avvenga all'interno delle stesse, rappresenta un rischio sotto un duplice aspetto: quello legato alla conservazione delle strutture e quello legato alla salubrità degli ambienti:

- Formazione di muffe
- Disgregazione di intonaci e murature

Tipiche cause della generazione di vapor d'acqua negli ambienti interni:

- Attività domestiche: cucina, uso di acqua calda sanitaria.
- Locali affollati (respirazione, traspirazione corporea, sudorazione).
- Ventilazione inadeguata



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : cause

Cause di condensazione del vapor d'acqua presente negli ambienti interni

- Necessità di contenere le dispersioni termiche con l'adozione di serramenti dotati di ottima tenuta all'aria che, in assenza di ventilazione meccanica, ha però comportato una sensibile **riduzione della ventilazione naturale** con conseguente aumento dell'umidità presente nell'aria ambiente.
- Uso nelle cucine di cappe filtranti, prive di collegamenti a condotti di espulsione dei fumi (immissione di grandi quantità di vapore in ambiente a seguito della cottura dei cibi).
- Collocazione errata dello strato isolante.



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

Lo studio del comportamento termoigrometrico di una parete è importante in:

- a) fase di progetto, per il corretto posizionamento degli strati che costituiscono la parete;
- b) interventi di rinforzo dell'isolamento termico di una parete esistente, al fine di un adeguato posizionamento dello strato di materiale isolante e di una corretta determinazione del suo spessore.

È importante verificare il comportamento termoigrometrico di un edificio per evitare fenomeni di degrado dell'edificio stesso.

Infatti i processi di degrado termoigrometrico di un edificio sono principalmente legati a:

1. condensazione superficiale del vapore acqueo sul lato interno dell'involucro edilizio;
 2. condensazione interstiziale del vapore acqueo all'interno delle strutture dell'involucro edilizio.
-



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

Durante la stagione invernale si verifica la diffusione del vapore acqueo attraverso le pareti. Infatti, il vapore migra verso l'esterno, in quanto, per effetto di una differenza di temperatura tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno ($T_i > T_e$), si determina una differenza di pressione di vapore tra l'interno e l'esterno: all'interno la pressione parziale di vapore è maggiore rispetto a quella esterna ($p_{v,i} > p_{v,e}$).

Il vapore presente nell'aria (T_i) può condensare:

- sulla superficie interna della parete, se questa si trova ad una temperatura inferiore alla temperatura di rugiada del vapore T_R
- all'interno della parete, se esso incontra qualche superficie, la cui temperatura determina una pressione di saturazione del vapore pari alla pressione parziale del vapore ($UR = 100\%$).



Aria Umida

L'aria atmosferica è una miscela gas-vapore e può essere assimilata a un sistema bi-componente composto da **aria secca** e **vapor d'acqua**, assumendo così il nome tecnico di ***aria umida***

Aria secca:

Azoto 78%, Ossigeno 21%, Altri gas 1% (Argon, anidride carbonica, ecc.)

Aria Umida = aria secca e vapor d'acqua

Aria secca

L'aria secca è l'aria atmosferica privata di tutti i vapori e agenti inquinanti; l'aria secca è assimilabile a un gas di composizione costante.

Vapor d'acqua

Il vapor d'acqua è la quantità d'acqua presente nella miscela allo stato di vapore. Tale quantità essa varia da zero fino a un massimo che dipende dalla temperatura e dalla pressione.

Sia l'aria secca che il vapore possono essere considerati gas perfetti

Aria umida: **generalità**

Nelle applicazioni di Fisica Tecnica, l'aria secca è considerata come un unico gas, a composizione chimica fissata.

Aria secca

Temperatura critica = -141 °C

Pressione critica = $37,7\text{ bar}$

$R=0,287\text{ kJ/kgK}$

Calore specifico a pressione costante (c_p) = $1,01\text{ kJ/kgK}$



Aria umida: **generalità**

Acqua

Temperatura critica = 374 °C

Pressione critica = 221 bar

$R=0,462$ kJ/kgK

Calore specifico a pressione costante (c_p) = 1,82 kJ/kgK

L'aria umida è una miscela di:

ARIA SECCA

+

VAPORE ACQUEO

Modello di gas ideale

Vapor d'acqua

$$p_v \times v = R_v \times T \quad R_v = 0.462 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$$

Aria secca

$$p_a \times v = R_a \times T \quad R_a = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$$

Aria umida: generalità

- ▶ Tra i vari motivi di interesse per lo studio dell'aria umida (climatologia, studi medici, etc...), vi è sono tutte le applicazioni relative alla **climatizzazione ambientale ed al comfort termo- igrometrico indoor**

Pertanto, il campo di interesse è:

- ▶ **Pressione $p_{\text{ambiente}} = 101.325 \text{ Pa} = 101 \text{ kPa}$**
- ▶ **Temperatura $T_{\text{ambiente}} = -10 \div 50 \text{ °C}$.**

In queste condizioni accade che:

- ▶ **L'aria secca si comporta da gas ideale ($T > T_c = -141 \text{ °C}$)**

L'acqua, con buona approssimazione, si comporta da gas ideale ($p \ll p_c = 221 \text{ bar}$)

LEGGE DI DALTON

LEGGE DI DALTON

$$p_{\text{tot}} = p_a + p_v$$

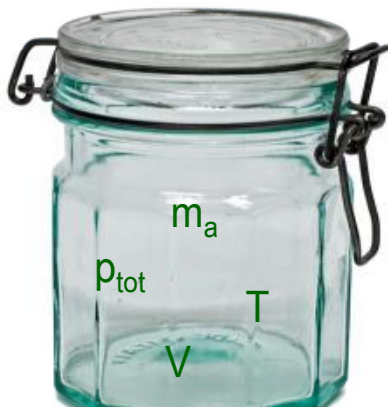
Il vapore acqueo e l'aria secca si comportano come se da soli occupassero l'intero volume a disposizione

p_{tot} pressione totale dell'aria umida

p_a pressione parziale dell'aria secca

p_v pressione parziale del vapor d'acqua

ARIA
UMIDA



=

ARIA SECCA

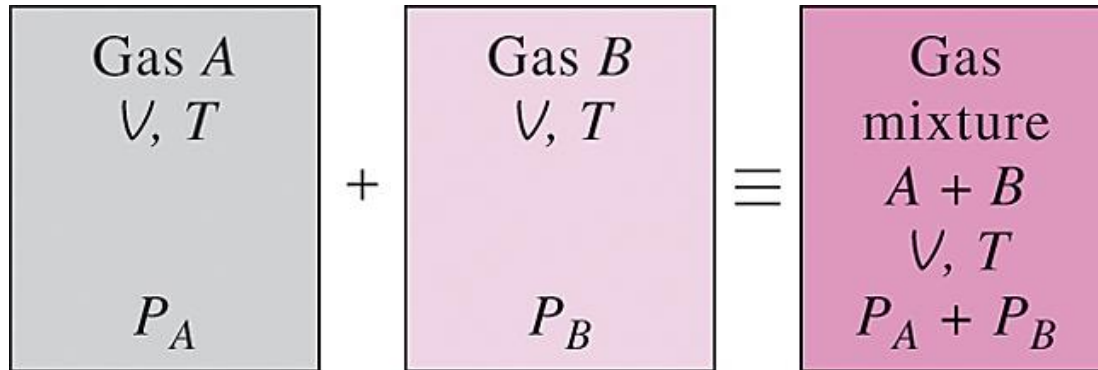


+

VAPORE ACQUEO



MISCELE DI GAS: *P-v-T* LEGGE DI DALTON



Legge di Dalton sulle pressioni additive di una miscela di gas ideali.

Legge di Dalton:

La pressione di una miscela di gas è uguale alla somma delle pressioni che ogni gas componente eserciterebbe se esistesse da solo al volume e alla temperatura della miscela.



LEGGE DI DALTON

- La pressione totale P della miscela di aria umida è la somma delle pressioni parziali dei singoli componenti.
- Si definisce pressione parziale di un componente generico in una miscela la pressione che il singolo componente eserciterebbe se occupasse l'intero volume occupato dalla miscela.

$$p = p_a + p_v$$

Le **proprietà** specifiche **dell'aria** umida vengono calcolate riferendosi alla sola massa di aria secca, in quanto solo quest'ultima resta certamente costante essendo incondensabile nel campo di temperature considerato.

UMIDITA' SPECIFICA

Rappresenta una misura del valore assoluto di vapore presente in una massa di aria. E' definita dal rapporto di massa di vapore e massa di aria secca.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$



Se, a temperatura T costante, aumenta la massa di vapor d'acqua m_v nella miscela, la pressione parziale del vapore p_v aumenta fino a raggiungere un valore massimo possibile p_{vs} , in corrispondenza del quale, aumentando ancora la quantità di vapore, questa inizia a condensare.

Cioè esiste una quantità di vapore massima m_{vs} , in corrispondenza della quale inizia la condensazione

p_{vs} = pressione di saturazione

m_{vs} = massa di vapore in incipiente condensazione

Aria satura: aria in cui il vapor d'acqua sta per condensare, la pressione di vapore è uguale alla pressione di saturazione del vapore

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$p_{vs} \cdot V = m_{vs} \cdot R_v \cdot T$$

UMIDITA' RELATIVA

L'umidità specifica ci dice quanta acqua c'è nell'aria (normalmente, circa una tazzina da caffè in un metro cubo).

Non ci dice nulla però su quanto siamo prossimi o meno al passaggio di questa in fase liquida.

Introduciamo, pertanto, l'UMIDITA' RELATIVA.

“L'umidità relativa è espressa dal rapporto tra la massa di vapore presente in un campione di aria umida e quella che sarebbe presente se, nelle medesime condizioni di temperatura e pressione totale, il campione fosse costituito da aria umida satura”.

$$p_{vs} \cdot V = m_{vs} \cdot R_v \cdot T$$

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{vs}} \iff \phi = \frac{p_v}{p_{vs}}$$

Φ è una grandezza adimensionale il cui valore è compreso tra 0 e 1

$\phi = 0$ (cioè, 0%) → ARIA SECCA

$\phi = 1$ (cioè, 100%) → ARIA SATURA



CONDENSA SUPERFICIALE

Per date caratteristiche termoigrometriche (**temperatura T_i** , **umidità dell'aria UR_i (ϕ_i)**), il fenomeno è legato alla temperatura della superficie interna della parete **$T_{s,i}$** , a sua volta legata al grado di isolamento termico offerto dalla parete stessa (maggiore è la resistenza termica della parete, più alta sarà **$T_{s,i}$** , ossia più vicina **$T_{s,i}$** sarà a **T_i**).

Non si verifica condensa superficiale se la temperatura della superficie interna della parete **$T_{s,i}$** è superiore alla **temperatura di rugiada** del vapore presente nell'aria dell'ambiente interno, ossia:

$$T_{s,i} > T_R$$



Proprietà dell'aria umida

Temperatura di rugiada

Temperatura a cui inizia la condensazione del vapore quando l'aria è raffreddata a pressione costante (cioè, la pressione di saturazione del vapore corrisponde alla pressione di vapore).

$$p_v(T) = p_{v,s}(T_r)$$

$$U.R. = \frac{m_v}{m_{v,s}} = \frac{p_v}{p_{v,s}}$$

Per l'aria satura la **pressione di vapore** è uguale alla **pressione di saturazione del vapore**

VERIFICA DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Determinazione di T_R

conoscendo:

1. la temperatura dell'aria umida T_i ,
2. la sua umidità relativa UR_i

dal diagramma psicrometrico dell'aria umida si ricava T_R .

Per date caratteristiche termo-igrometriche (temperatura e umidità dell'aria) il fenomeno dipende da $T_{p,i}$.

Non si verifica condensa superficiale se :

$$T_{p,i} > T_R$$



Calcolo della temperatura sulla superficie interna $T_{p,i}$

In regime stazionario, il flusso termico che attraversa la parete uguaglia il flusso termico che attraversa lo strato interno:

$$q = K (T_i - T_e)$$

$$q = h_i (T_{p,i} - T_i)$$

$$\text{Essendo } T_{p,i} = T_i - q \cdot 1/h_i$$

Si ricava, sostituendo q :

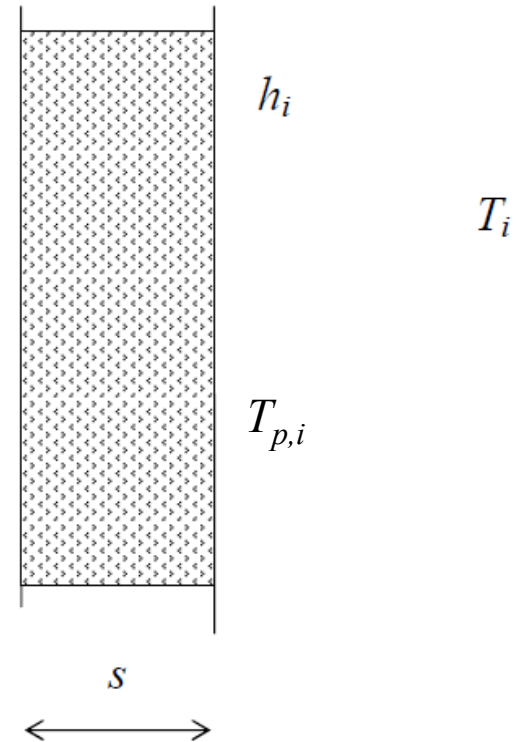
$$T_{p,i} = T_i - \frac{K}{h_i} (T_i - T_e)$$

K : trasmittanza unitaria della parete [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

h_i : coefficiente di scambio termico per adduzione ($h_{conv} + h_{rad}$) relativo alla superficie interna della parete [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Si deve verificare che $T_{p,i} > T_R$

T_e



VERIFICA DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

- ▶ Individuare sul diagramma psicrometrico il punto rappresentativo dell'aria interna (T_i 20°C; U.R._i = 0,70).
- ▶ Leggere per le condizioni di saturazione (U.R. = 100%) sull'asse delle T la corrispondente temperatura di rugiada T_R , definita come la temperatura in corrispondenza della quale il vapore acqueo presente nell'aria satura condensa a pressione costante.
- ▶ Affinché non si verifichi condensa superficiale deve essere:

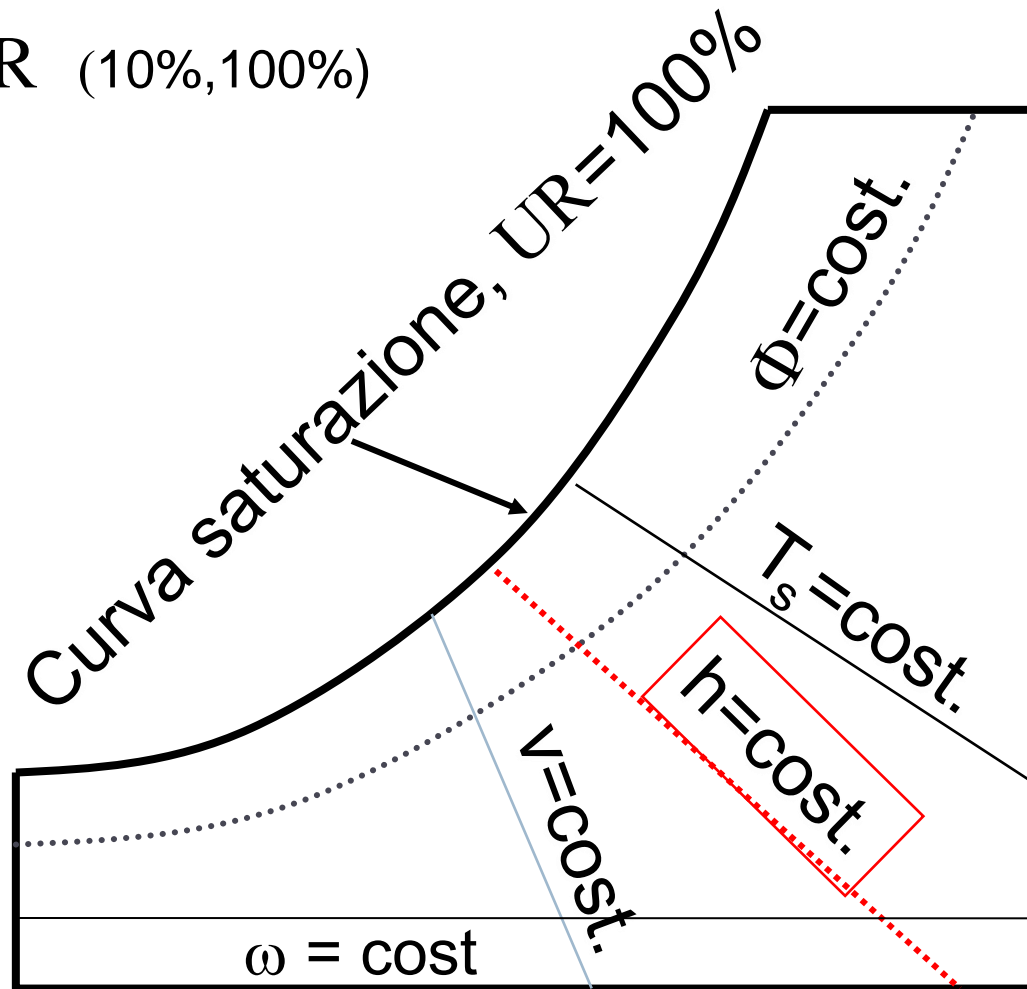
$$\text{▶ } T_{p,i} > T_R$$

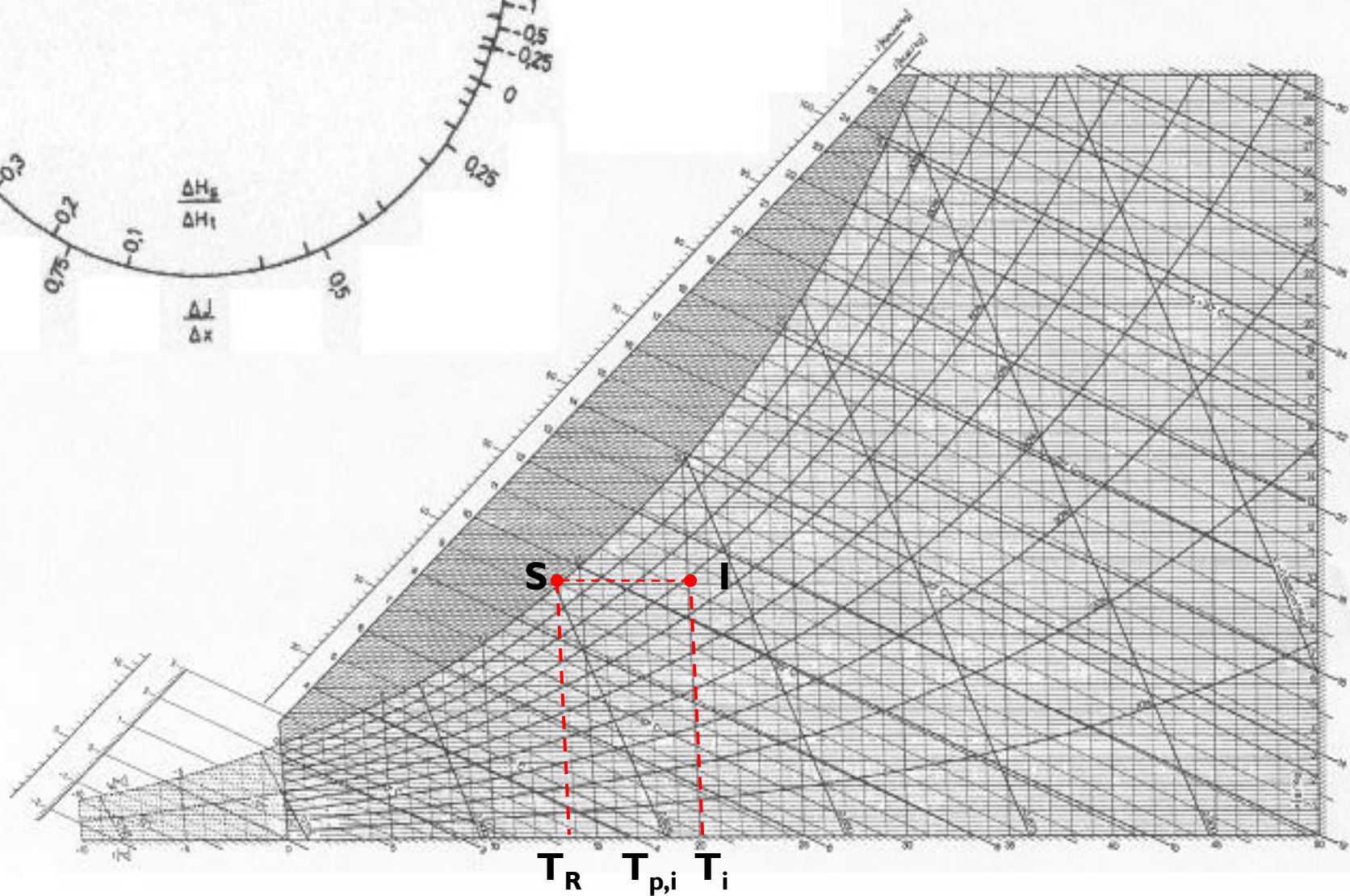
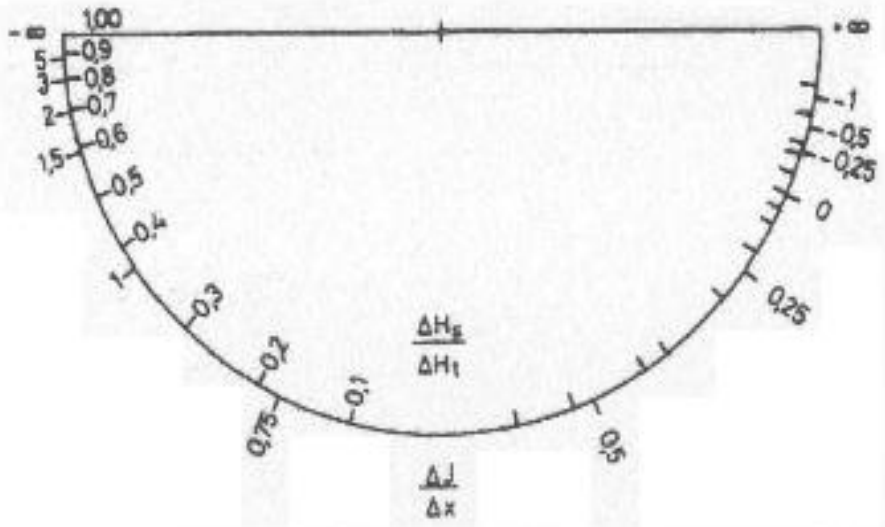
- ▶ Altrimenti c'è condensa superficiale
-



Diagramma psicrometrico

Curve UR (10%,100%)





SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

1. Se $T_{p,i} \leq T_R$, significa che c'è condensa superficiale,

quindi occorre aumentare $T_{p,i}$.

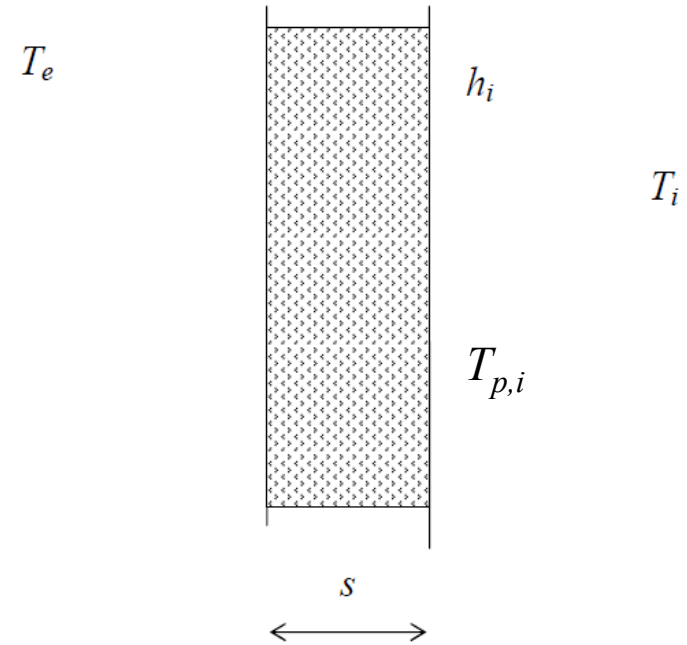
2. A tal fine occorre aumentare la resistenza termica della parete (quindi devo ridurre il flusso termico).

3. Come? Si calcola lo spessore aggiuntivo di isolante di

data conduttività termica λ , necessario ad evitarla.

Cioè devo incrementare la resistenza della parete R ,
ossia ridurre la trasmittanza K .

Operativamente si procede calcolando lo spessore minimo di isolante (per data conduttività termica) derivato imponendo la resistenza minima, quindi per $T_{p,i}$ almeno uguale a T_R .



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Siccome l'obiettivo è allontanare la superficie della parete dalle condizioni di condensa, quindi fare in modo che $T_{p,i}$ sia maggiore della T_r , si impone la condizione limite che sia $T_{p,i} = T_R$ e così si determina la resistenza minima (trasmittanza massima), al di sotto della quale non si deve scendere se si vuole impedire la condensa superficiale. A questo punto, determiniamo la R_{min} in corrispondenza della quale la $T_{p,i}$:

Per $T_{p,i} = T_R$

$$q' = h_i (T_i - T_R)$$

$$q' = \frac{(T_i - T_e)}{R_{min}}$$



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

$$q' = h_i (T_i - T_R)$$

$$q' = \frac{(T_i - T_e)}{R_{min}}$$

Da cui

$$R_{min} = \frac{(T_i - T_e)}{q'} = \frac{(T_i - T_e)}{h_i (T_i - T_R)}$$



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

$$R_{\min} = \frac{T_i - T_e}{h_i(T_i - T_R)}$$

T_R è il valore minimo per $T_{s,i}$;

quindi per $T_R = T_{p,i}$ \mathbf{R} assume valore minimo possibile affinché non ci sia condensa.

In pratica ci sarà un valore \mathbf{R}_{\min} tali che per $\mathbf{R} < \mathbf{R}_{\min}$ c'è condensa sulla superficie interna della parete.



Calcolo dello spessore di isolante

R_{min} è quindi pari alla somma della resistenza originaria (quella in cui c'era condensa e $T_{s,i}$ era minore di T_R) e della resistenza addizionale fornita dall'isolante scelto. Pertanto:

$$R_{min} = R + R_a = R + \frac{S_{isol}}{\lambda_{isol}}$$

$$\frac{S_{isol}}{\lambda_{isol}} = R_{min} - R \quad S_{isol} = \lambda_{isol} \cdot (R_{min} - R)$$



Condensa interstiziale o di massa

- ▶ Le differenze di temperatura, di umidità relativa e quindi di pressione di vapore tra l'interno e l'esterno, causano il fenomeno di diffusione del vapore attraverso la parete, nel verso delle pressioni decrescenti, lungo lo spessore della parete:
 - ▶ Pressione maggiore (temperatura maggiore) → Pressione minore (temperatura minore)
 - ▶ In genere sono noti i valori delle temperature e dell'umidità relativa dell'aria interna ed esterna e non i valori delle pressioni di vapore
 - ▶ La pressione parziale del vapore contenuto nell'aria con umidità relativa del 100%, **che viene definita pressione di saturazione p_s** , dipende dalla temperatura dell'aria, ma non è una funzione lineare della temperatura dell'aria.
-



Condensa interstiziale o di massa

- ▶ Il fenomeno della condensa interstiziale si verifica generalmente in inverno in occasione di marcate differenze di temperatura tra aria interna ed esterna.
- ▶ Se all'interno della parete la pressione saturazione si abbassa in qualche punto sino a raggiungere il valore della pressione di vapore si forma condensa sulle superfici verticali isoterme corrispondenti e nella fascia di parete tra esse comprese.



Flusso di vapore

Sotto tali ipotesi, il flusso di vapore che attraversa l'unità di superficie di una parete si esprime con la seguente relazione:

$$g_v = \frac{p_{vi} - p_{ve}}{\frac{1}{\beta_i} + \sum_j^n \frac{S_j}{\delta_j} + \frac{1}{\beta_e}}$$

dove:

g_v : portata di vapore acqueo [kg/s m²]

$p_{vi} - p_{ve}$: differenza di pressione del vapore tra interno ed esterno [Pa]

β_i e β_e : coefficienti di adduzione superficiale del vapore rispettivamente all'interno e all'esterno [kg/s m² Pa]

Si pone $1/\beta_i = 1/\beta_e = 0$, valendo β_i e β_e praticamente infinito.



Permeanza al vapore M


$$g_v = M(p_{ve} - p_{vi}) \quad \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

$$g_v = \frac{(p_{ve} - p_{vi})}{R_v} \quad \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

$$M = \left(\frac{1}{\beta_i} + \sum \frac{s}{\delta} + \frac{1}{\beta_e} \right)^{-1}$$

$$R_v = \left(\frac{1}{\beta_i} + \sum \frac{s}{\delta} + \frac{1}{\beta_e} \right)$$

Coefficienti di adduzione
superficiale del vapore



Permeanza al vapore M [kg/sm²Pa]

Resistenza alla diffusione del vapore R_v [sm²Pa/kg]



Per uno strato

$$M = \frac{\delta}{s} \quad [\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}]$$

dove δ è la permeabilità del materiale costituente la parete, anche detta coefficiente di conducibilità del vapore $[\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}]$

La permeabilità δ rappresenta la quantità di vapore che attraversa una parete piana di superficie unitaria e spessore unitario, per effetto di una differenza di pressione di 1 Pa.

$$r_v = \sum \frac{s}{\delta} \quad [\text{sm}^2\text{Pa/kg}]$$



Metodo analitico

Assunzioni del modello

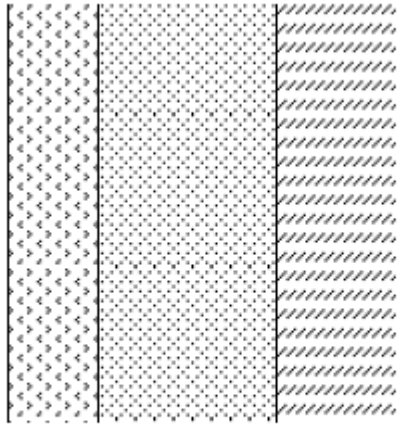
- Flusso monodimensionale
- Regime stazionario

STEP da seguire nell'analisi termoigrometrica della parete

1. Studio termico della parete (q , T interfaccia j - k , K e/o R_T)
2. Analisi del flusso di vapore (R_v e/o M_v , $p_{sat,i}$, $p_{sat,e}$, p_{vi} , p_{ve} , g_v)
3. Distribuzione delle pressioni p_v e p_{sat} nella parete



Step 1. Studio termico nella parete



T_{si} T_1 T_2 T_{se}

Equazioni del flusso termico che attraversa ogni singolo strato di una parete e del flusso termico attraverso tutta la parete, dall'interno verso l'esterno ($T_i > T_e$)

$$q = h_i \cdot (T_i - T_{s,i}) = \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1}} = \frac{T_i - T_2}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} = \frac{T_i - T_3}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_e}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



$$T_{si} = t_i - K/h_i * (t_i - t_e) \quad [\text{K}]$$

$$T_1 = t_i - K * (t_i - t_e) * (1/h_i + r_1) \quad [\text{K}]$$

$$T_2 = t_i - K * (t_i - t_e) * (1/h_i + r_1 + r_2) \quad [\text{K}]$$

$$T_{se} = t_i - K * (t_i - t_e) * (1/h_i + r_1 + r_2 + r_3) \quad [\text{K}]$$

dove r_1 è la resistenza termica unitaria del primo strato, r_2 quella del secondo ed r_3 quella del terzo, espresse in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.

Per una parete costituita da m strati, per lo strato j -esimo si può scrivere

$$T_j = t_i - K * (t_i - t_e) * (1/h_i + \sum_{j=1}^m r_j)$$



Step 2. Flusso di vapore

► LEGGE DI FICK

$$g_v = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{R_v} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{\frac{s_1}{\delta_1} + \frac{s_2}{\delta_2} + \frac{s_3}{\delta_3}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{smPa}} \right]$$

$$q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{h_e}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



Distribuzione delle pressioni nella parete

In generale, per una parete costituita da m strati nello strato j -esimo, la pressione di vapore si ricava mediante la seguente relazione:

$$p_{j+1} = p_{vi} - g_v \times \sum_j R_j$$

Pressione di vapore nell'ambiente interno: $p_{vi} = p_{si}^* UR_i$ [Pa]

Pressione di vapore nell'ambiente esterno: $p_{ve} = p_{se}^* UR_e$ [Pa]

Analogia termica

$$T_{j+1} = T_i - q \times \left(\frac{1}{h_i} + \sum_j R_j \right)$$



Distribuzione delle pressioni nella parete

- ▶ Ipotesi :
- ▶ Condizioni stazionarie: la portata di vapore che si diffonde è la medesima in tutti gli strati della parete e pari a quella che diffonde tra l'ambiente interno e quello esterno. Il valore che la pressione di vapore p_v assume in corrispondenza del j -esimo strato della parete è:

$$p_{j+1} = p_{vi} - g_v \times \sum_j R_j$$

- ▶ Dove:



Distribuzione delle pressioni nella parete

$$g_v = M(p_{ve} - p_{vi}) \quad \text{kg} / \text{m}^2 \text{s} \qquad g_v = \frac{(p_{ve} - p_{vi})}{R_v} \quad \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

$$p_{j+1} = p_{vi} - g_v \times \sum_j R_j$$

Affinché non ci sia condensa interstiziale all'interfaccia tra due strati consecutivi deve accadere che:

$$p_{v,j} < p_{sat,j} \quad [Pa]$$



PRESSIONE DI SATURAZIONE E PRESSIONE DI VAPORE A CONFRONTO

Poiché la temperatura, quindi la pressione, di saturazione si abbassano lungo lo spessore della parete dall'ambiente a temperatura maggiore verso l'ambiente a temperatura minore, c'è la possibilità che la p_s raggiunga il valore della p_v , cioè si forma condensa.

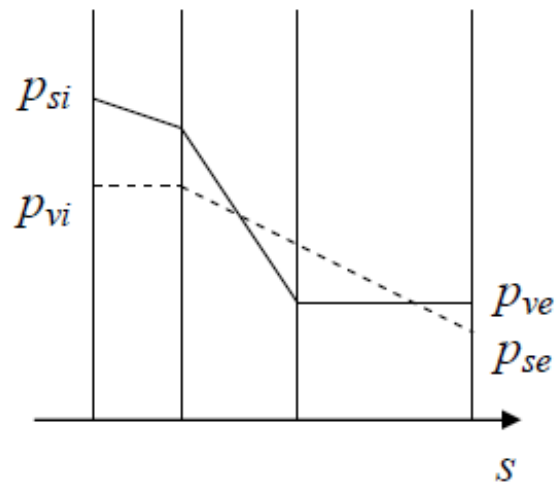
Graficamente, quando l'andamento della pressione di vapore p_v interseca quello della pressione di saturazione p_s , nella zona di intersezione avviene la condensazione:

$p_v = p_s$, il vapore inizia a condensare finché non accade nuovamente che $p_v < p_s$.

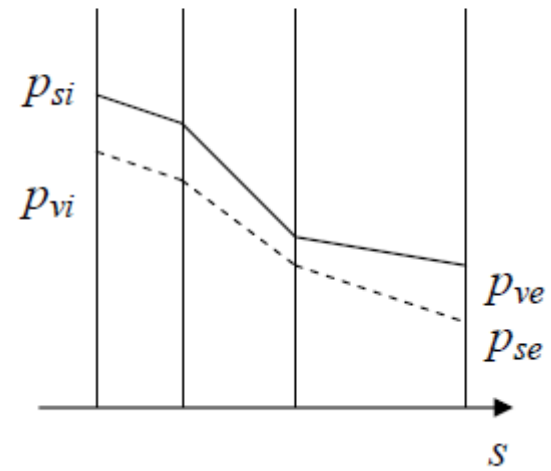
Casi

1. L'andamento della pressione di saturazione interseca quello della pressione di vapore in due punti e nella zona compresa tra essi risulta $p_v > p_s$: c'è condensazione all'interno della parete nella zona di intersezione.
2. L'andamento della pressione di vapore incontra quello della pressione di saturazione in un solo punto: si verifica la condensazione solo sulla superficie isoterma verticale passante per quel punto. Una variazione anche di lieve entità nelle condizioni climatiche può causare il fenomeno della condensazione.
3. L'andamento della pressione di saturazione è sempre superiore a quello della pressione di vapore, ossia i due andamenti non si intersecano mai: non si verifica condensazione.

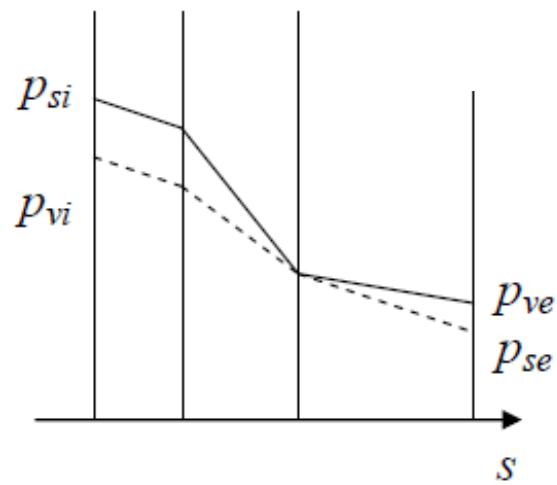
Caso 1



Caso 3



Caso 2



Metodo di *Glaser*

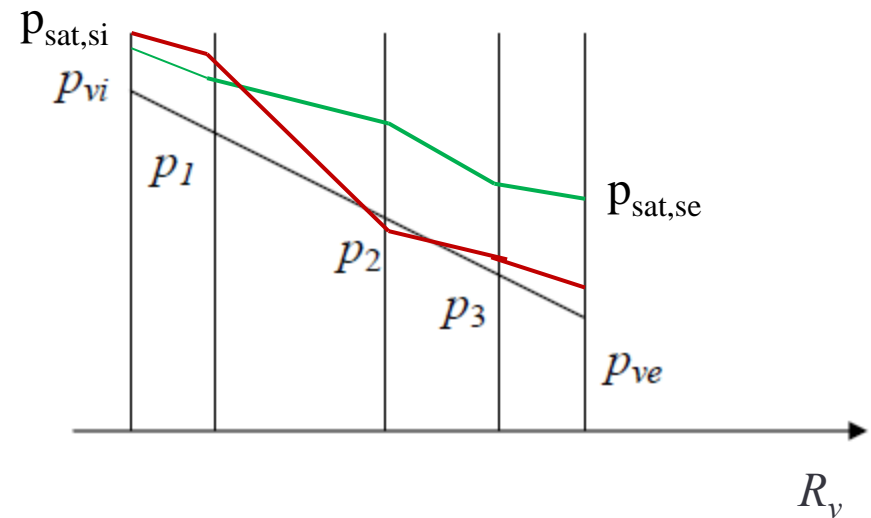
- ▶ Metodo grafico o metodo di *Glaser*
- ▶ Tracciare il diagramma delle pressioni



- ▶ Si riportano in ascissa i valori della resistenza al passaggio del vapore per ogni strato.
- ▶ Si riportano in ordinata i valori della pressione di vapore interna

p_{vi} ($= \hat{p}_{vi}$) ed esterna p_{ve} ($= \hat{p}_{ve}$).

Si traccia la retta che unisce p_{ve} e p_{vi} .



$$g_v = \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{R_v} \quad \text{kg} / \text{m}^2 \text{s}$$

Soluzione

- ▶ Mantenere bassi i valori della pressione di vapore e mantenere elevati i valori della pressione di saturazione in relazione a ogni singolo strato.

In fase di progettazione:

- ▶ Scegliere adeguatamente i materiali in funzione della loro resistenza al passaggio di vapore.
 - ▶ Posizionare correttamente gli strati in modo che la resistenza alla diffusione di vapore risulti crescente dall'esterno verso l'interno e che la resistenza termica assuma valori crescenti dall'interno verso l'esterno.
 - ▶ Inserire gli strati di materiali in modo che non costituiscano **barriera al vapore** verso l'esterno – lato freddo, in quanto essi manterrebbero alta la pressione di vapore all'interno della parete, favorendo il raggiungimento della pressione di saturazione.
-



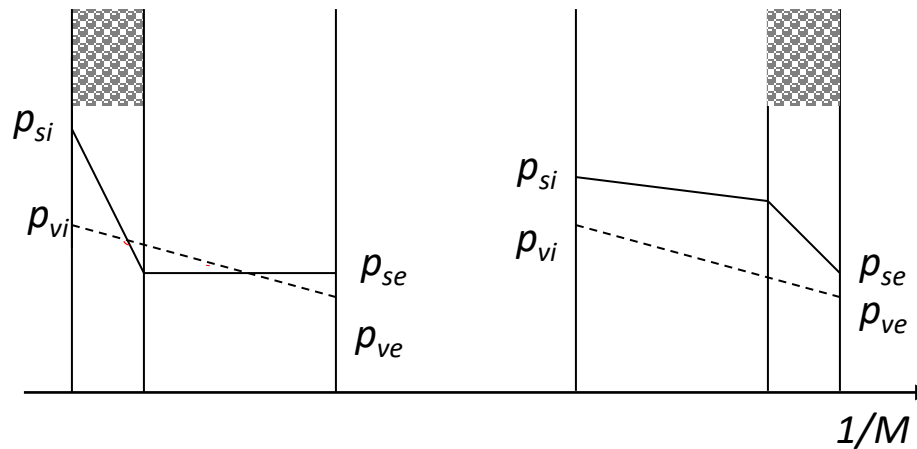
Soluzione

- ▶ Per ridurre la diffusione del vapore attraverso la parete e mantenere $p_v < p_s$ **scegliere materiali con resistenza al vapore elevata collocati verso la parte interna della parete** (materiali detti “barriera al vapore”: *bitume*, o *carta kraft bitumata*, o *sottili fogli di alluminio* o di *cloruro di polivinile* o *polietilene*).



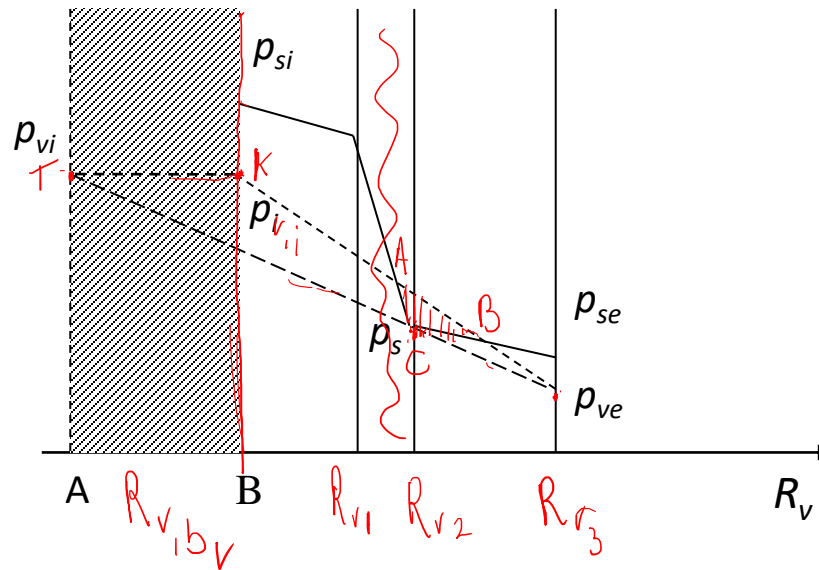
Soluzione

- ▶ Per ridurre la condensa mantenendo alta p_s all'interno della parete, inserire lo strato di isolante in maniera corretta.



Barriera al vapore

- ▶ Il metodo di Glaser consente di determinare il valore minimo ammissibile della resistenza al vapore da raggiungere per evitare il fenomeno della condensazione ($1/M_d$).



$$R_{v,b,v} = \frac{\Delta_{b,v}}{\delta_{b,v}}$$

$$\Delta_{b,v} = \delta_{b,v} \cdot R_{v,b}$$

$$R_v^1 = R_v + R_{v,b,v}$$

Barriera al vapore

- ▶ Determinata sul diagramma la presenza di condensa all'interno della parete, si conduce dal punto che rappresenta il valore della pressione di vapore esterna p_{ve} una retta passante per il punto di minor valore di pressione di saturazione p_s sino ad incontrare il valore della pressione di vapore p_{vi} .
- ▶ Il segmento AB rappresenta la resistenza al vapore addizionale, ossia la resistenza della barriera al vapore da adottare

