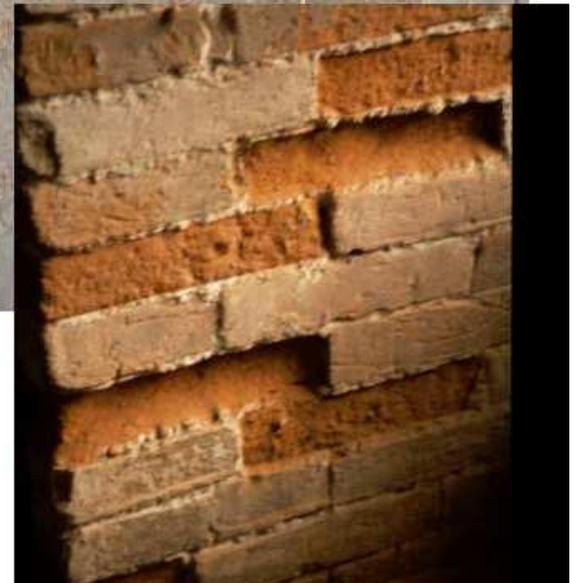


Condensa interstiziale, Metodo Glaser

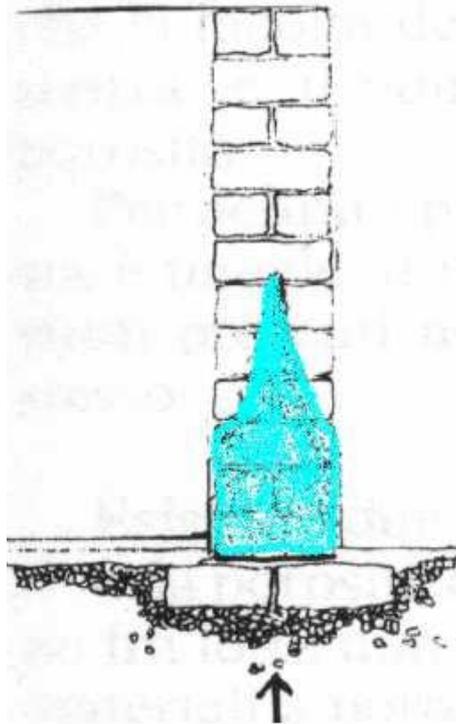
Corso di Fisica Tecnica a.a. 2017/2018
Prof. Marina Mistretta

Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

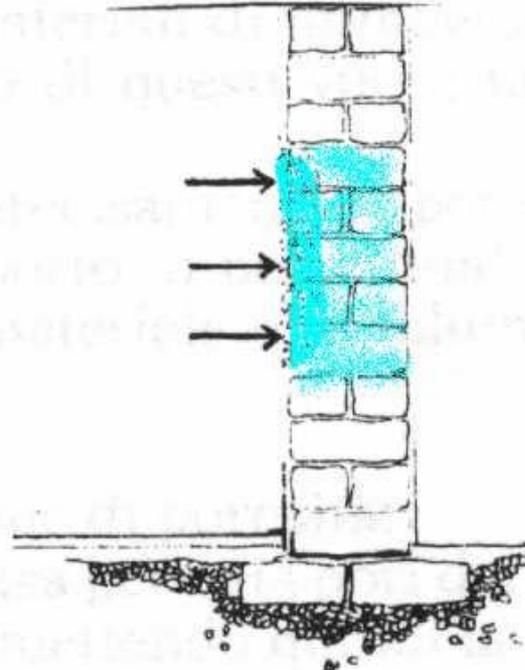


Distribuzione dell'acqua in funzione del tipo di problema

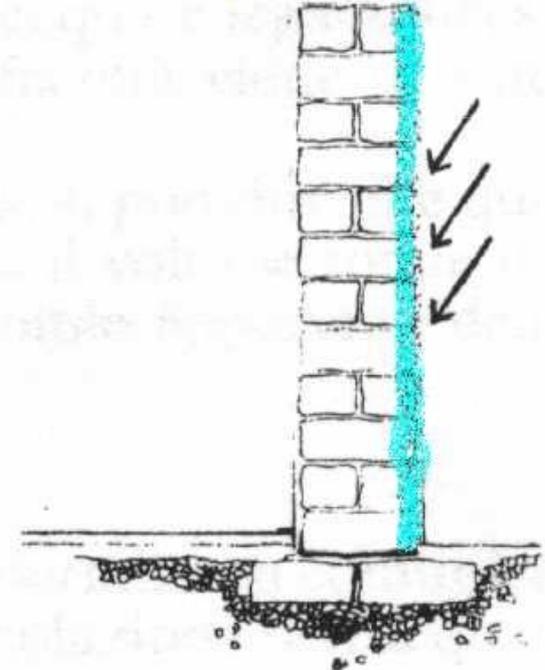
umidita di risalita

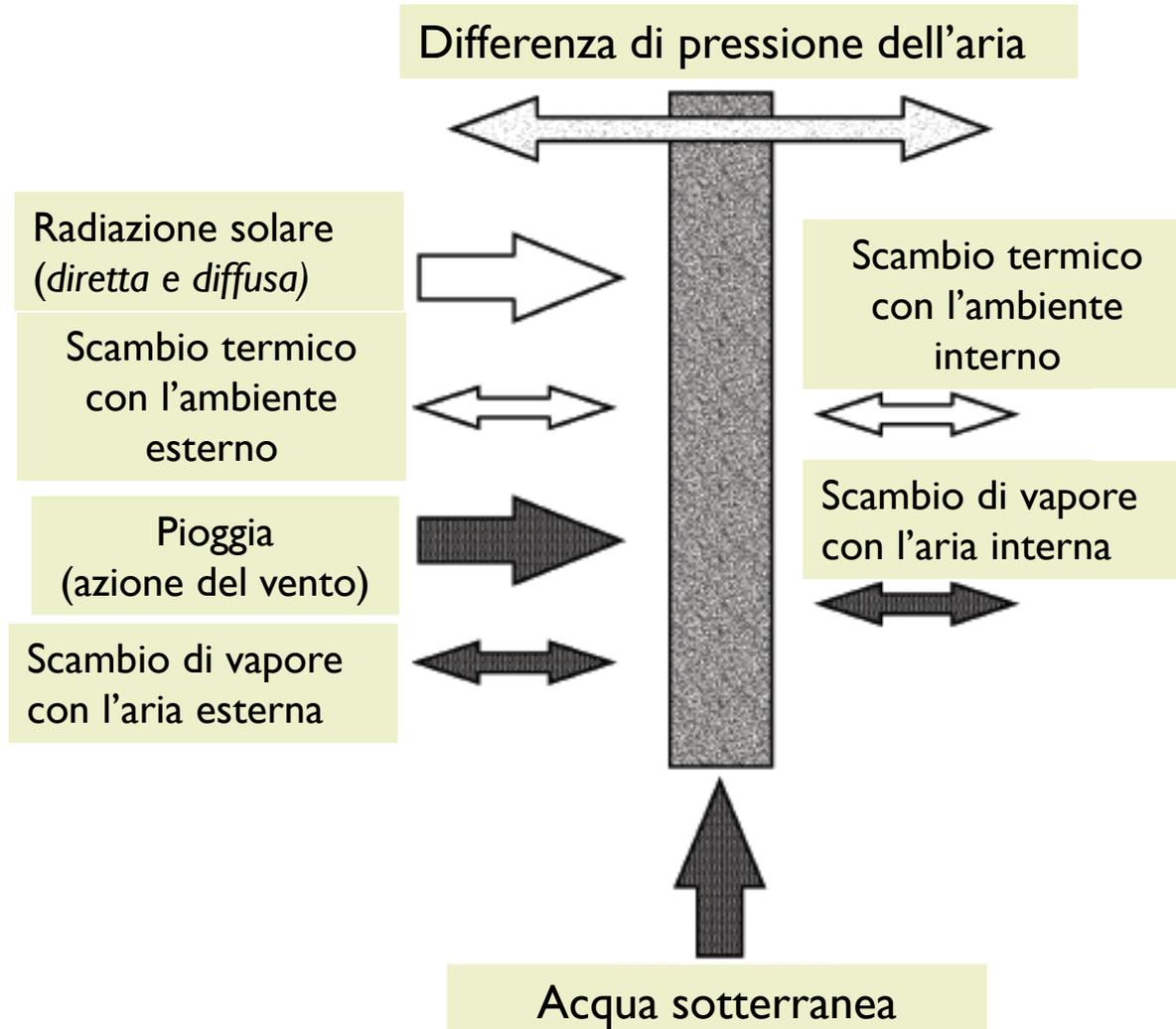


umidita' da condensa



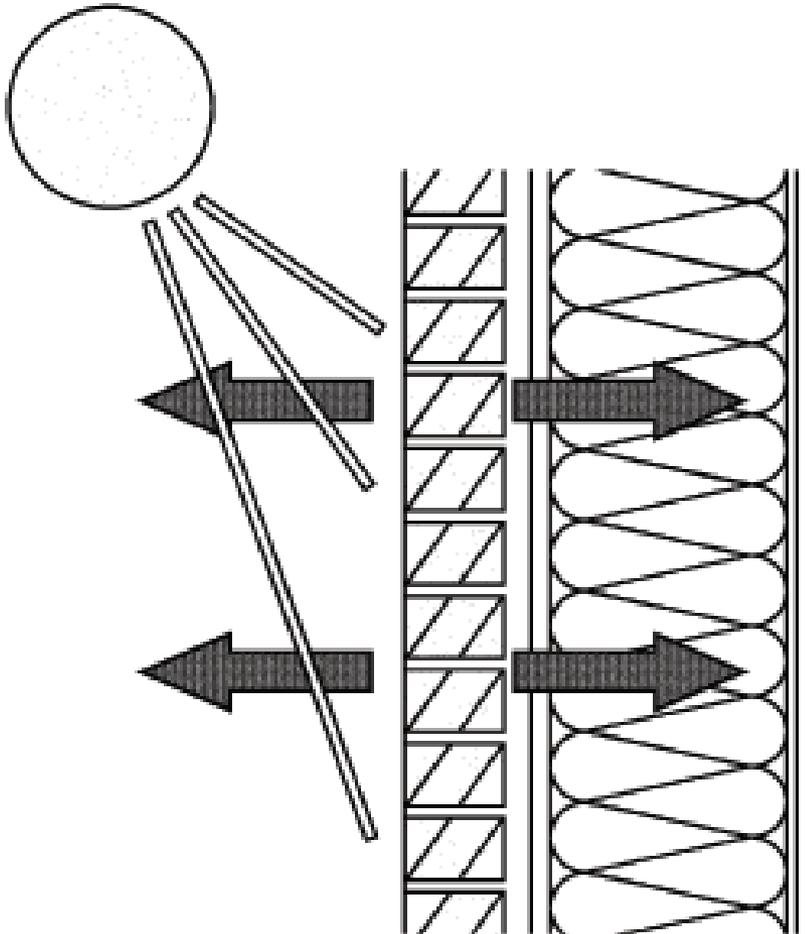
umidita' da acqua meteorica





Carichi igrotermici sull'involucro edilizio (con direzioni alternate stagionali)

Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale



Fattori da considerare:

- Radiazione solare,
 - Agenti atmosferici,
 - Condensazione esterna,
 - Differenze di pressione dell'aria e di temperatura
 - Interfaccia con il terreno e l'acqua contenuta nell'ambiente
 - Materiali da costruzione
-

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

CONDENSA SUPERFICIALE

Se si verifica che è assente la condensazione superficiale, ciò non esclude la diffusione del vapore acqueo attraverso le pareti.

Durante la stagione invernale, 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 ($p_{vi} > p_{ve}$).



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

- ▶ Non è il processo di diffusione del vapore a creare inconvenienti, ma la sua condensazione, che si verifica se esso incontra strati di materiali a determinate temperature.
- ▶ Occorre verificare inoltre che la condensa invernale venga smaltita in estate, in quanto l'acqua va ad occupare gli interstizi all'interno della parete, riducendo sensibilmente la resistenza termica dei materiali che costituiscono la parete stessa.

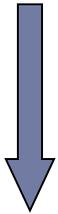


Proprietà aria umida

Umidità
relativa (ϕ)



Rappresenta il rapporto tra la densità del vapore surriscaldato contenuto nella miscela di aria umida e la densità del vapor d'acqua saturo secco contenuto in una miscela di aria umida (miscela satura) alla stessa pressione e temperatura



$$U.R. = \phi = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}}$$



$$\phi = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{\frac{m_v}{V}}{\frac{m_{vs}}{V}} = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}}$$



Aria satura:

Aria satura di vapore.

Umidità relativa o grado igrometrico:

Rapporto tra la quantità di vapore che l'aria contiene m_v e la massima quantità di vapore che l'aria può contenere alla stessa temperatura m_{vs} .

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

$$UR = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{m_v}{m_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}}$$

Se $m_v = 0,01$ kg
e $m_{vs} = 0,02$ kg

$$UR = 0,01/0,02 = 0,5 \text{ o } 50\%$$



CONDENSA SUPERFICIALE

Per date caratteristiche termoigrometriche (temperatura e umidità dell'aria) il fenomeno è legato alla temperatura della superficie interna della parete, quindi al grado di isolamento termico offerto dalla parete stessa.

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

$$T_{si} > T_R$$



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.)

$$p_v(T) = p_{vs}(T_r)$$

CONDENSA SUPERFICIALE

Determinazione di T_R

Note:

1. la temperatura dell'aria umida T_i ,

2. la sua umidità relativa UR

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_{pi} .

Non si verifica condensa superficiale se :

$$T_{pi} > T_R$$



CONDENSA SUPERFICIALE

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

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

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

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

Si ricava, sostituendo q :

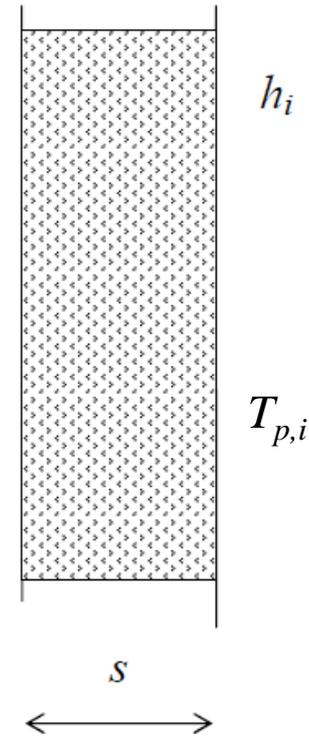
$$T_{p,i} = T_i - \frac{K}{h_i} (T_i - T_e)$$

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



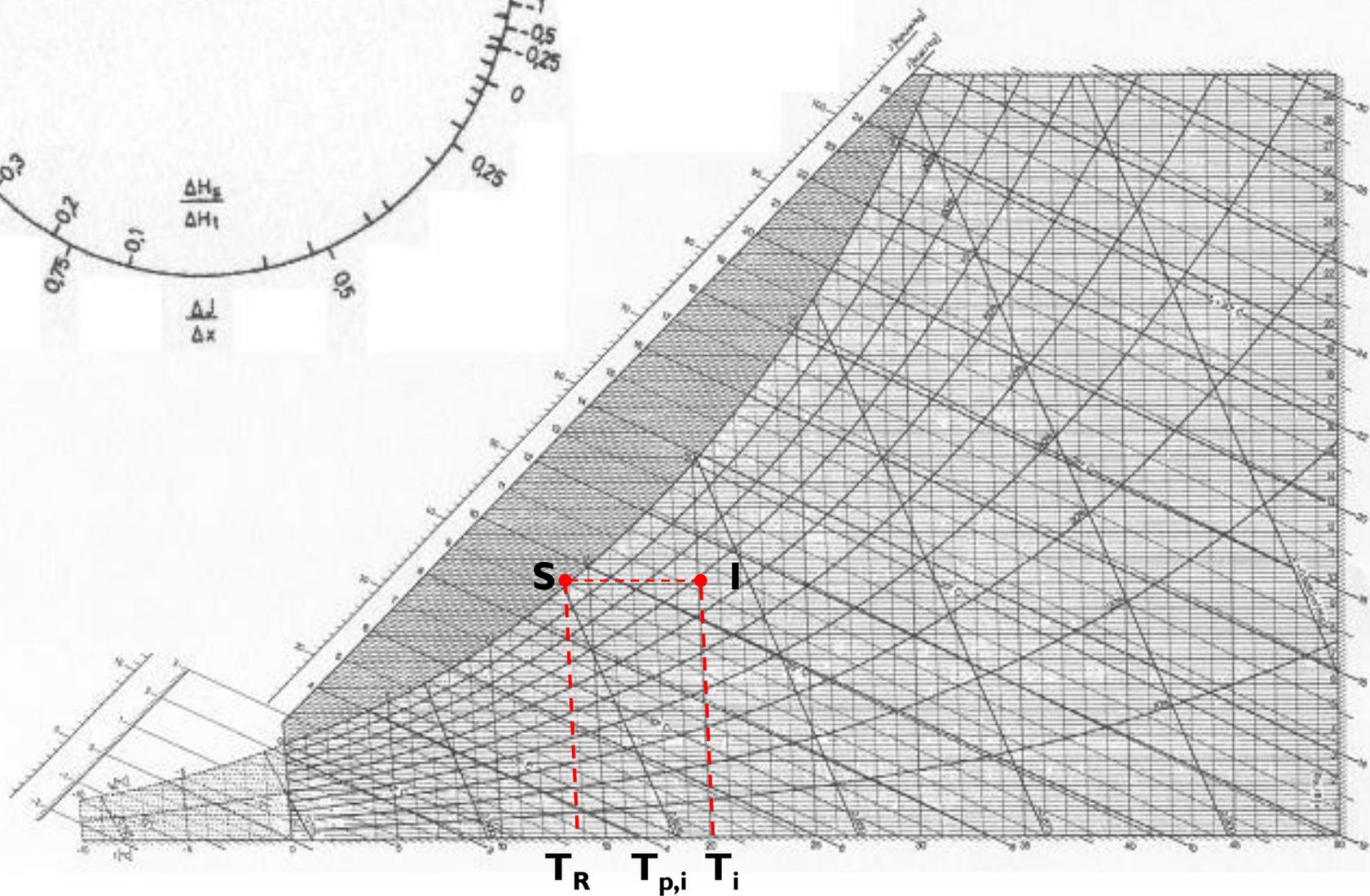
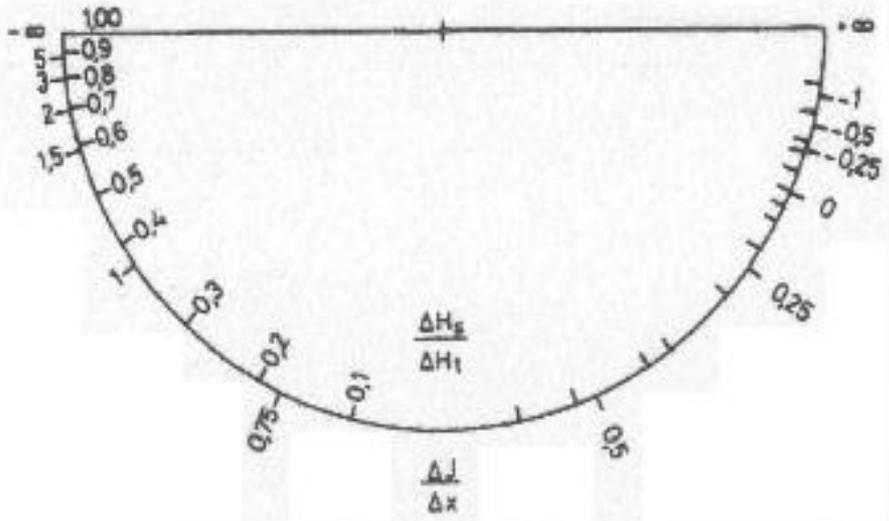
T_i



Verifica alla condensa superficiale

- ▶ Individuare sul diagramma psicrometrico il punto rappresentativo dell'aria interna (20°C ; 0,70), per T_i e U.R._i
- ▶ Leggere per 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:
 - ▶ $T_r < T_{p,i}$





SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

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

Se $T_{p,i} \leq T_R$ c'è condensa superficiale e occorre calcolare lo spessore aggiuntivo di isolante

Necessario ad evitarla.

Cioè devo incrementare la resistenza della parete e ridurre la trasmittanza K

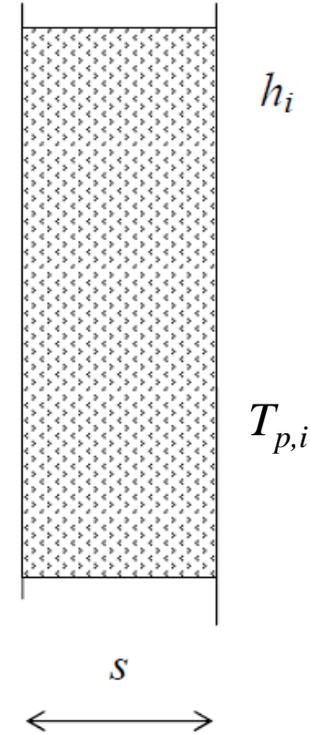
Da:
$$\dot{Q} = K(T_i - T_e)$$

$$\dot{Q} = h_i(T_i - T_{p,i})$$

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

Si pone $T_{p,i} = T_r \rightarrow$ valore massimo ammissibile per la trasmittanza termica unitaria K .

T_e



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

$$\dot{Q} = K(T_i - T_e)$$

$$\dot{Q} = h_i(T_i - T_{p,i})$$

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

Si pone $T_{p,i} = T_R$ → valore massimo ammissibile per la trasmittanza termica unitaria K .

T_R è il valore minimo per $T_{p,i}$;
quindi per $T_R = T_{p,i}$ K assume valore massimo possibile affinché non ci sia condensa.

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



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Affinchè in nessun punto della superficie interna della parete non si verifichi condensazione di vapore, il valore della trasmittanza termica unitaria deve essere inferiore a:

$$K_{\max} = \frac{h_i(T_i - T_R)}{T_i - T_e} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

a cui corrisponde il valore minimo di resistenza termica $R_{T,\min}$

$$R_T = R_{T,\min} + R_a \quad R_a = R_T - R_{T,\min}$$

$$R_a = \frac{s}{\lambda} \quad s = \lambda \cdot R_a \quad [\text{m}]$$



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.



Condensa interstiziale o di massa

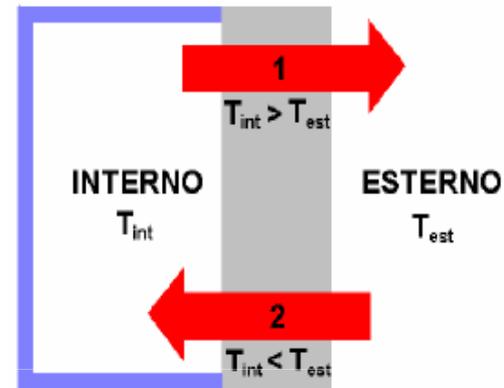
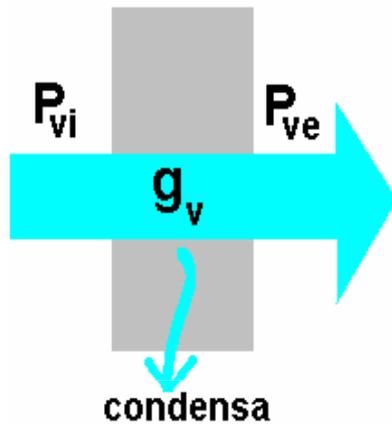
Poiché nell'attraversare una parete multistrato il vapore incontra una certa resistenza r_t , che è direttamente proporzionale allo spessore della parete e inversamente proporzionale alle sue caratteristiche di permeabilità al vapore, si può calcolare (per le temperature che interessano l'edilizia fino a 40°C circa) la diffusione del vapore attraverso un elemento piano (parete, solaio, ecc.) attraverso una relazione formalmente analoga a quella del calcolo del flusso termico, disperso attraverso lo stesso elemento piano in regime stazionario e monodimensionale.

LEGGE DI FICK

La determinazione del flusso di vapore che si diffonde all'interno di un solido può essere espressa in termini della differenza di pressione che si instaura a causa delle variazioni di temperatura e quindi della densità (o in altri termini al variare della concentrazione del vapor d'acqua nell'aria);

la trattazione del problema diviene allora del tutto analoga dal punto di vista fisico ed analitico a quanto visto per la trasmissione del calore





**Trasmissione del
vapore**

$$P_{vi} > P_{ve}$$

$$g'_v = (P_{vi} - P_{ve}) / R_v$$

**Trasmissione del
calore**

$$t_i > t_e$$

$$q = (t_i - t_e) / R_t$$

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

$$g_v = \left(\frac{1}{\beta_i} + \sum \frac{1}{M_j} + \frac{1}{\beta_e} \right) \times (p_{vi} - p_{ve}) \quad [\text{kg/s m}^2]$$

dove:

g_v : portata di vapore acqueo [kg/s m^2]

$p_{vi} - p_{ve}$: 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 [$\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}$]

M_j : permeanza dei singoli strati costituenti la parete [$\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}$]

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



Permeanza al vapore M

Analogo della trasmittanza termica K

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

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

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

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

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

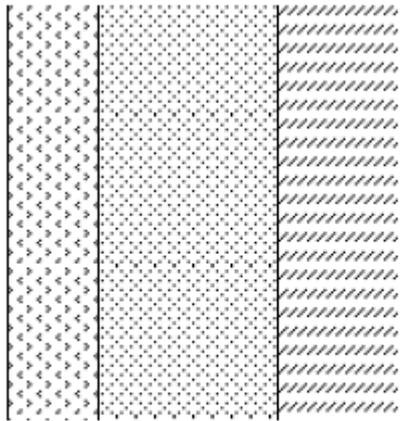
- Metodo semplificato (Legge di Fick)
- Flusso monodimensionale
- Regime stazionario

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 , $p_{sat,j}$, $p_{sat,e}$, 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 ($T_i > T_e$)

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



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

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

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

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

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

Imponendo che il flusso di vapore per unità di superficie nei vari strati della parete sia costante, si scrive:

$$g_v = \beta_1 \times (p_{vi} - \hat{p}_{vi}) = \left(\frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{M_1} \right)^{-1} \times (p_{vi} - p_1) = \dots\dots$$
$$M = \frac{\delta}{s} \quad [\text{kg/s m}^2 \text{ Pa}]$$
$$= \left(\frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{-1} \times (p_{vi} - p_2) = \dots\dots = \left(\frac{1}{\beta_i} + \sum \frac{1}{M_j} + \frac{1}{\beta_e} \right)^{-1} \times (p_{vi} - p_{ve})$$
$$[\text{kg/s m}^2]$$

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

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:

$$p_j = p_{vi} - M \times (p_{vi} - p_{ve}) \times \sum_{j=1}^m \frac{1}{M_j} \quad [\text{Pa}]$$

dove M è la permeanza di tutta la parete.

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

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

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



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:

$$p_{v,j} = p_{v,i} - M \cdot (p_{v,i} - p_{v,e}) \cdot \sum_{k=1}^j R_{v,k}$$

- ▶ (N.B. Si tratta di un'uguaglianza del flusso di vapore tra gli strati i e j e quello che attraversa l'intera parete)
-



Distribuzione delle pressioni nella parete

$$p_{v,j} = p_{v,i} - M \cdot (p_{v,i} - p_{v,e}) \cdot \sum_{k=1}^j R_{v,k}$$

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

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



Distribuzione delle pressioni nella parete

Ponendo:

$$p_{v,A} = p_{sat,A}$$

Si ricava da:

$$p_{v,A} = p_{vi} - M \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{R_v} \sum_{k=1}^3 R_{v,3} \quad Pa$$

La nuova g_v che determina la nuova distribuzione delle p_v nella parete, da cui ricalcolo la nuova distribuzione delle p_v con:

$$p_{v,j} = p_{v,i} - M \cdot (p_{v,i} - p_{v,e}) \cdot \sum_{k=1}^j R_{v,k}$$



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.

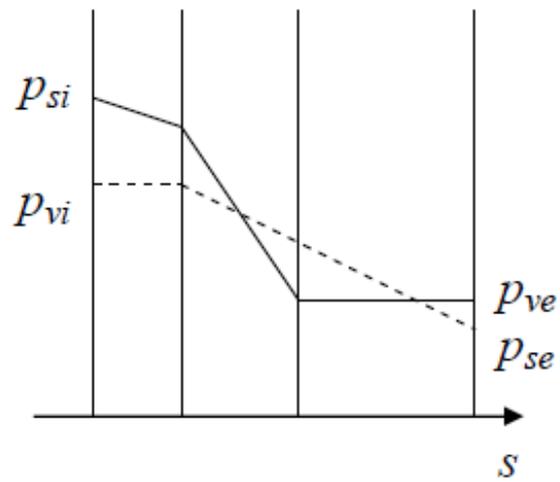
Graficamente, quando l'andamento della pressione di vapore p_v interseca quello della pressione di saturazione p_s , nella zona di intersezione avviene la condensazione:

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

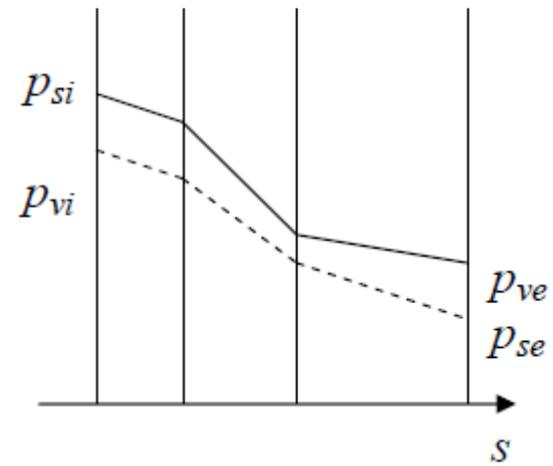
Casi

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.

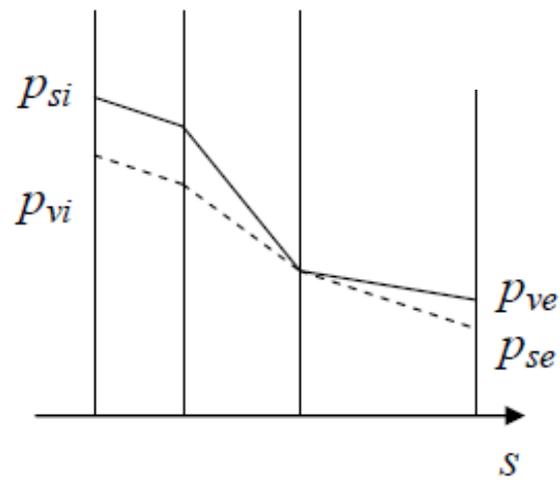
Caso 1



Caso 3



Caso 2



Metodo di *Glaser*

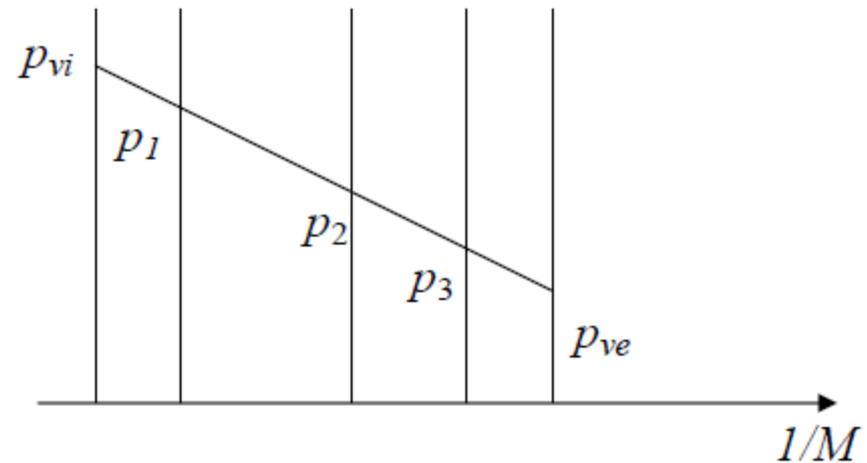
- ▶ Metodo grafico o metodo di *Glaser*
- ▶ Tracciare il diagramma delle pressioni



- ▶ 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 decrescente 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.
-



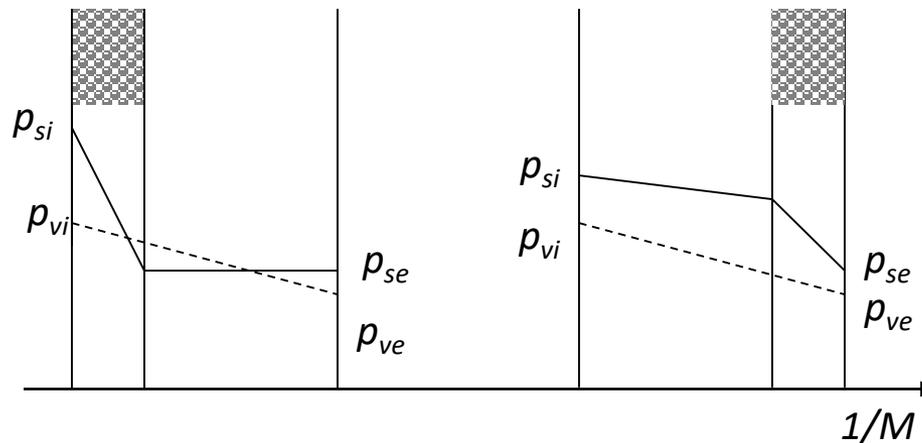
Soluzione

- ▶ 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*).



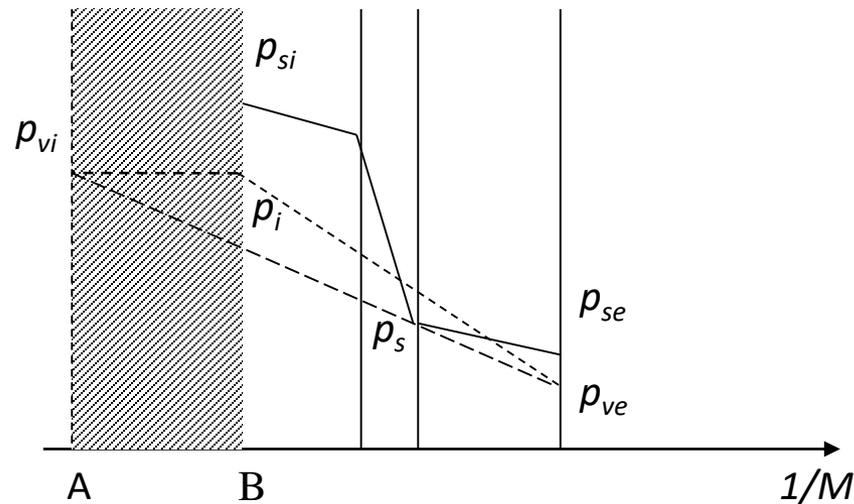
Soluzione

- ▶ 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 ($1/M_d$).



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



Esercizio

1) Una parete verticale costituita due strati di calcestruzzo ($\lambda_1 = 0,7 \text{ W/m K}$) con interposto uno strato di isolante ($\lambda_2 = 0,04 \text{ W/mK}$), separa un ambiente interno con temperatura dell'aria di 18°C con l'esterno a temperatura -5°C .

Lo strato esterno di calcestruzzo ha uno spessore di 15 cm, quello interno di 10 cm, lo strato di isolante è di 3 cm.

- Calcolare il flusso termico specifico (W/m^2) che attraversa la parete.
- Disegnare il profilo delle temperature all'interno della parete.
- Verificare se sulla superficie interna della parete si forma condensa nell'ipotesi in cui l'umidità relativa nell'ambiente interno sia del 70%
- Verificare la formazione di condensa interstiziale (si assuma $UR_{\text{esterna}} = 80\%$)
- Se si verifica condensa interstiziale determinare lo spessore minimo di una barriera al vapore che abbia permeabilità al vapore pari a $\delta = 6,75 \cdot 10^{-15} \text{ [kg/s m Pa]}$

Si assumano i seguenti valori per i coefficienti di adduzione $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$

1) Calcolo del flusso termico q in condizioni stazionarie:

$$q = K * \Delta T$$

- K = trasmittanza termica globale della parete (reciproco della resistenza)
- ΔT = differenza delle temperature interna ed esterna

Ricordando che per una parete piana multistrato considerata indefinita le resistenze di ogni singolo strato si sommano, avremo:

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

$$R_1 = \text{spessore}_1 / \lambda_1 = 0,1 / 0,7 = 0,14 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$R_2 = \text{spessore}_2 / \lambda_2 = 0,03 / 0,04 = 0,75 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$R_3 = \text{spessore}_3 / \lambda_3 = 0,15 / 0,7 = 0,21 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$



Inoltre considerando i coefficienti di convezione h_i e h_e si avrà:

$$R_{\text{con},i} = 1/h_i = 1/8 = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{con},e} = 1/h_e = 1/23 = 0,04 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{tot}} = 1,28 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

$$K = 1/R_{\text{tot}} = 0,78 \text{ W/ m}^2 \text{ K}$$

Il flusso termico che attraversa la parete (potenza termica per unità di superficie) sarà:

$$q = K (T_i - T_e) = 0,78 * [18 - (-5)] = 18,03 \text{ W/m}^2$$

ovvero:

$$q = (T_i - T_e)/R_{\text{tot}} = 0,78 * [18 - (-5)] = 18,03 \text{ W/m}^2 \quad \text{Flusso dalla parete interna a quella esterna}$$



- 2) In condizione stazionarie, il flusso termico che attraversa ogni singolo strato sarà lo stesso. Possiamo continuare ad applicare sempre la stessa formula. Per uno strato j :

$$q = (T_i - T_j)/R_j \quad \text{con} \quad R_j = 1/h_i + \sum_{z=1}^j \frac{s_z}{\lambda_z} \quad (\text{I})$$

$\sum_{z=1}^j \frac{s_z}{\lambda_z}$ è la resistenza termica alla conduzione degli strati a monte dello strato j .



Determinare la distribuzione della temperatura all'interno della parete

• Temperatura della superficie interna della parete $T_{p,i}$

$$q = h_i (T_i - T_{p,i}) \quad \text{essendo } T_{p,i} \text{ incognita}$$

$$T_{p,i} = T_i - q/h_i = 18 - 18.03/8 = 15,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$



- Temperatura della superficie di contatto tra lo strato 1 (strato di calcestruzzo interno) e lo strato 2 (strato di isolante termico) T_1 :

$$q = (T_i - T_1)/(1/h_i + s_1/\lambda_1)$$

$$T_1 = T_i - q/(1/8 + 0,1/0,7) = 13,2^\circ\text{C}$$

- Temperatura della superficie di contatto tra lo strato 2 (strato di isolante termico) e lo strato 3 (strato di calcestruzzo esterno) T_2 :

$$T_2 = T_i - q/(1/8 + 0,1/0,7 + 0,03/0,04) = 0,35^\circ\text{C}$$

- Temperatura della superficie esterna della parete $T_{p,e}$

$$T_4 = T_i - q/(1/8 + 0,1/0,7 + 0,03/0,04 + 0,15/0,7) = T_e + q/h_e = -4,2^\circ\text{C}$$

Si può adesso calcolare il profilo di T



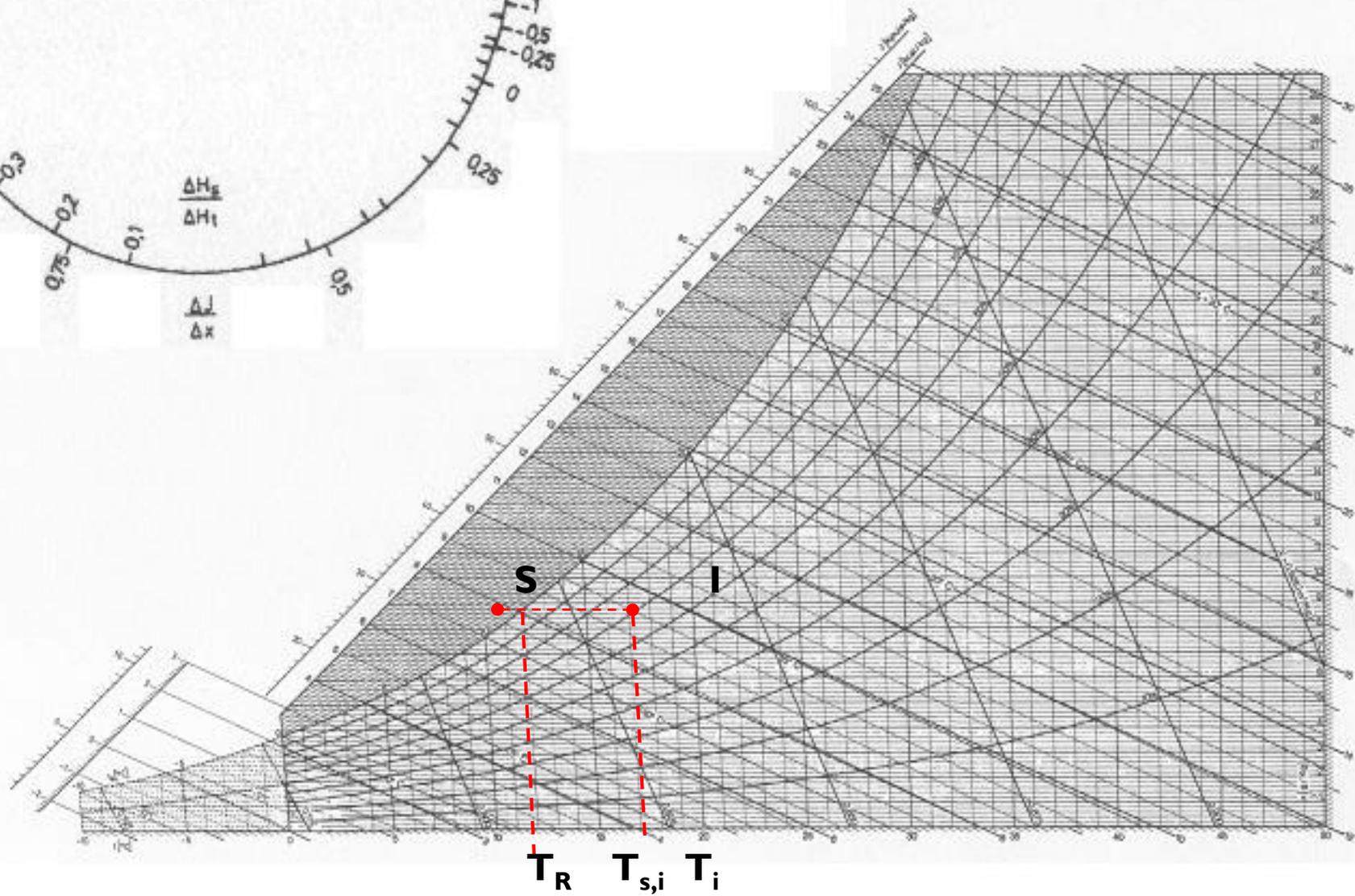
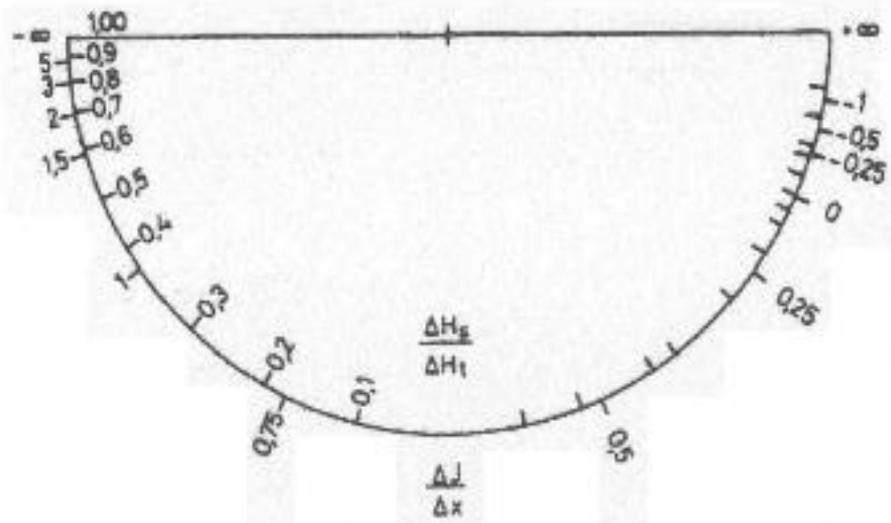
3) Dal diagramma psicrometrico, individuato il punto rappresentativo dell'aria interna I (18°C ; $0,70$), si determina la corrispondente temperatura di rugiada T_r , definita come la temperatura in corrispondenza della quale il vapore acqueo presente nell'aria satura condensa a pressione costante.

Affinché non si verifichi condensa superficiale deve essere:

$$T_r < T_{p,i}$$

Nel caso in specie non c'è condensa superficiale, in quanto risulta $T_r = 12,5^{\circ}\text{C}$ che è inferiore alla $T_{p,i} = 15,7^{\circ}\text{C}$.





4) Verifica della condensa interstiziale

Ricordate che, date le temperature, affinché non si verifichi condensa interstiziale in ogni strato della parete la pressione parziale del vapore deve essere inferiore alla pressione di saturazione corrispondente alla data temperatura. Ciò vuol dire che il vapore deve trovarsi in condizioni di pressione e temperatura lontane da quelle di saturazione (incipiente condensazione- T_r e p_{sat}).

4) Supponiamo i seguenti valori di permeabilità al vapore per ogni strato:

$$\text{Permeabilità strati 1 e 3:} \quad \delta_1 = \delta_3 = 1.3 \cdot 10^{-12} \text{ [kg/Pa m s]}$$

$$\text{Permeabilità strato 2 :} \quad \delta_2 = 1.8 \cdot 10^{-12} \text{ [kg/Pa m s]}$$

Per calcolare il flusso di vapore “ g_v ” usiamo una formula strutturalmente analoga a quella usata per il calore:

$$g_v = \Delta p / R_v$$

con Δp = differenza tra la pressione di vapore interna p_{vi} e la pressione di vapore esterna p_{ve}

Si ricordi che:

$$UR = p_v / p_{sat}$$

Per l'ambiente interno:

$$UR_i = 0,7$$

Una formula empirica per il calcolo della pressione di saturazione è:

$$P_{sat} = 0.0496965 T^3 + 0.979515 T^2 + 46,9035 T + 609,484 \quad [\text{Pa}]$$

$$(\text{Per } T = 18^\circ\text{C}) p_{sat} = 2060 \text{ Pa}$$

Essendo $UR = 0,7$

$$p_{v,i} = U.R._i p_{sat,i} = 0,7 * 2060 = 1442 \text{ [Pa]}$$



Per l'ambiente esterno $U.R._e = 0,80$

Dalla formula empirica per $T = -5 \text{ }^\circ\text{C}$

Si ottiene

$$p_{\text{sat},e} = 393 \text{ Pa}$$

$$p_{v,\text{esterno}} = p_{\text{sat},e} * U.R._e = 393 * 80 = 314 \text{ Pa}$$

Resistenza al vapore della parete:

$$\text{Resistenza al vapore}_1 = s_1/\delta_1 = 7,69 \cdot 10^{10} \text{ [m}^2 \text{ Pa s/kg]}$$

$$\text{Resistenza al vapore}_2 = s_2/\delta_2 = 1,67 \cdot 10^{10} \text{ [m}^2 \text{ Pa/kg]}$$

$$\text{Resistenza al vapore}_3 = s_3/\delta_1 = 11,5 \cdot 10^{10} \text{ [m}^2 \text{ Pa/kg]}$$

$$R_{\text{vapore,tot}} = \Sigma R_v = 2,09 \cdot 10^{11} \text{ [m}^2 \text{ Pa s/kg]}$$

Il reciproco della resistenza al vapore è detto permeanza

$$M_{\text{vapore}} = 1/R_v = 4,79 \cdot 10^{-12} \text{ [kg/m}^2 \text{ s Pa]}$$

Flusso di vapore:

$$g_v = \Delta p / R_v = (p_{v,i} - p_{v,e}) / R_v = (1442 - 393) / (2,09 \cdot 10^{11}) = 5,4 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2 \text{ s]}$$

Calcolo delle pressioni di vapore

Così come sono state prima determinate le temperature adesso, si calcolano le pressioni parziali di vapore nei singoli strati:

Mentre $T_{p,i}$ non è uguale alla T_i a causa della resistenza alla convezione tra strato superficiale della parete e l'aria che la lambisce (lo stesso vale per la superficie esterna a $T_{p,e}$ distinta da T_e), nello studio delle pressioni, visto che la resistenza dell'aria alla diffusione del vapore è trascurabile rispetto a quella opposta dai materiali da costruzione, si assume $p_{v,i}$ anche sulla superficie interna della parete e $p_{v,e}$ sulla superficie esterna a contatto con aria a $T = -5^\circ$.



- Pressione sulla superficie di separazione tra lo strato 1 (cls interno) e lo strato 2 (isolante):

$$g_v = (p_v - P_{v,1}) / R_{v,1}$$

$$P_{v,1} = p_{v,i} - g_v * R_{v,1} = 1442 - 5,4 \cdot 10^{-9} * 7,69 \cdot 10^{10} = 1025 \text{ [Pa]}$$

Analogamente:

$$P_{v,2} = p_{v,i} - g_v * (R_{v,1} + R_{v,2}) = 934 \text{ [Pa]}$$

$$p_{v,e} = 314 \text{ [Pa]}$$



$$P_{\text{sat}} = 0.0496965 T^3 + 0.979515 T^2 + 46,9035 T + 609,484 \quad [\text{Pa}]$$

Con la formula empirica possiamo anche calcolare i valori delle p_{sat} (in funzione delle temperature degli strati già calcolate):

$$p_{\text{sat},i} = 2060 \text{ [Pa]}$$

$$p_{\text{sat},1} = 1510 \text{ [Pa]} \text{ a } T_1 = 13,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{\text{sat},2} = 537 \text{ [Pa]} \text{ a } T_2 = 0,35 \text{ }^\circ\text{C}$$

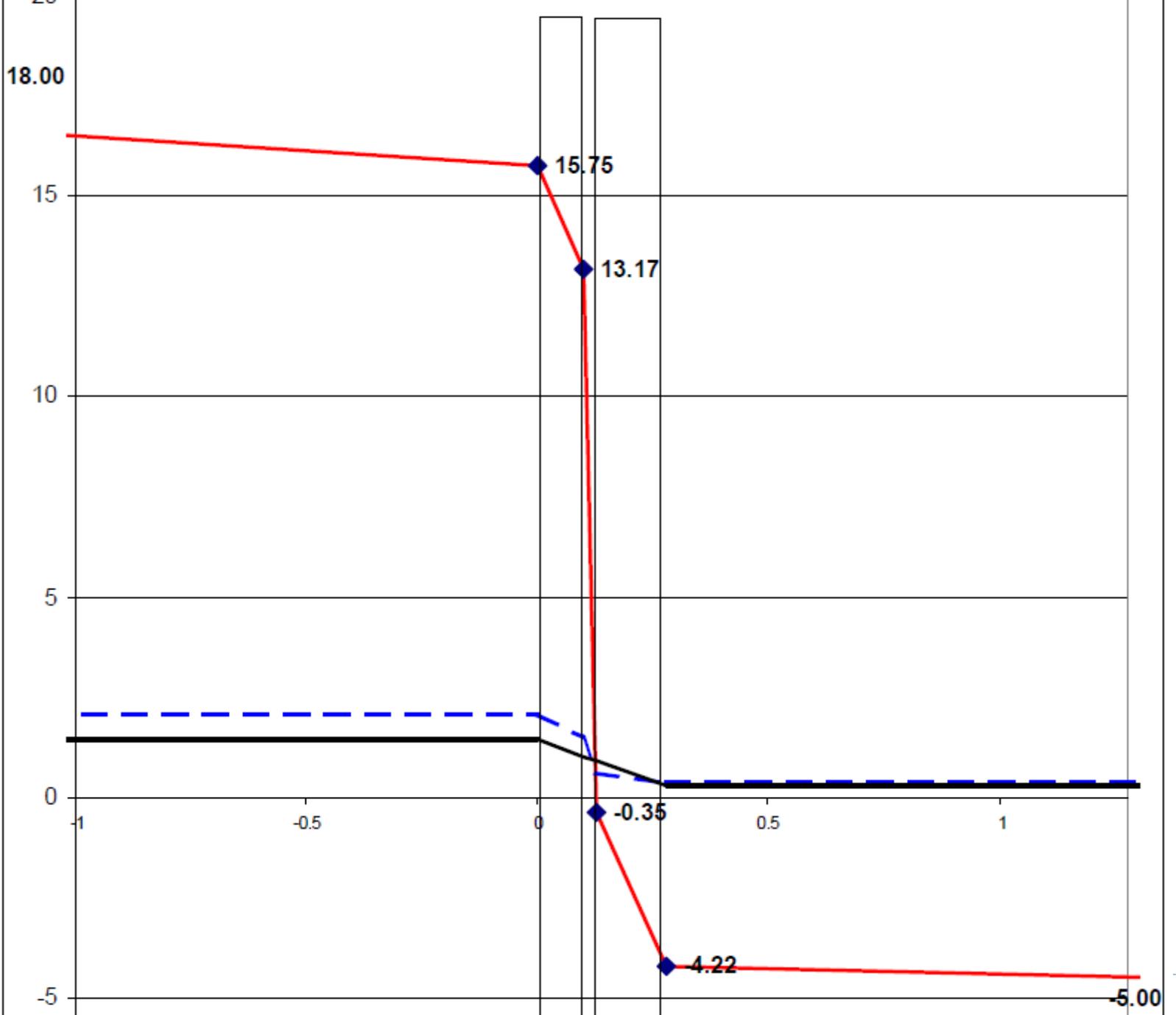
$$p_{\text{sat},e} = 393 \text{ [Pa]}$$

Affinché non avvenga condensazione occorre che $p_v < p_{\text{sat}}$

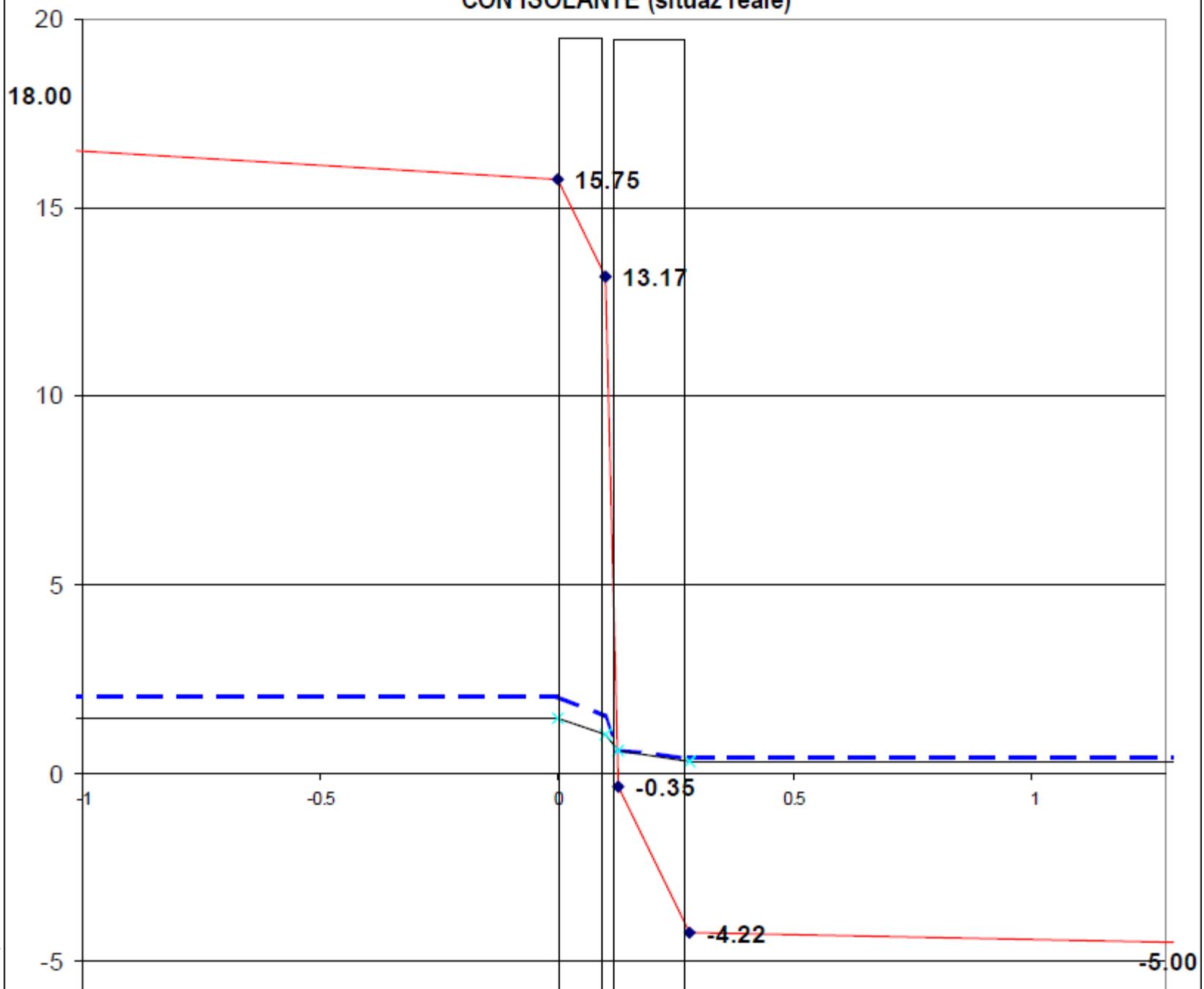
$$p_{v,1} = 1025 < p_{\text{sat},1} = 1510 \text{ [Pa]} \text{ non c'è condensa}$$

$$p_{v,2} = 934 > p_{\text{sat},2} = 537 \text{ [Pa]} \text{ c'è condensa}$$





CON ISOLANTE (situaz reale)



5) Per la parete in esame individuate graficamente lo spessore minimo di una barriera al vapore di permeabilità al vapore $\delta_{\text{barriera}} = 6.75 \cdot 10^{-15}$ [kg/Pa m s], affinché non vi sia condensa interstiziale e posizionatela correttamente

