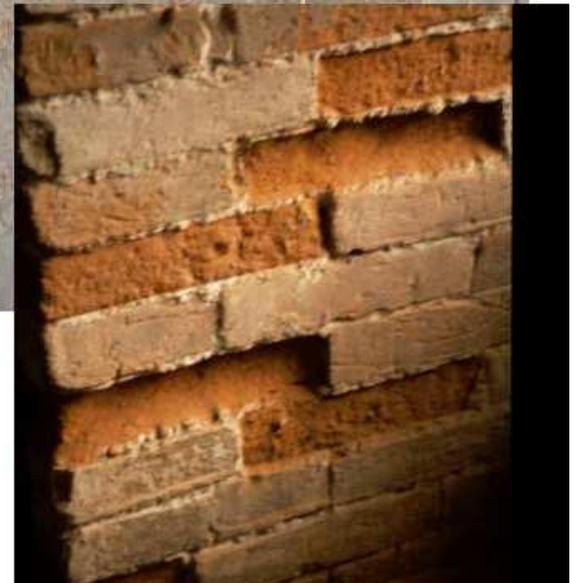


Condensa interstiziale, Metodo Glaser

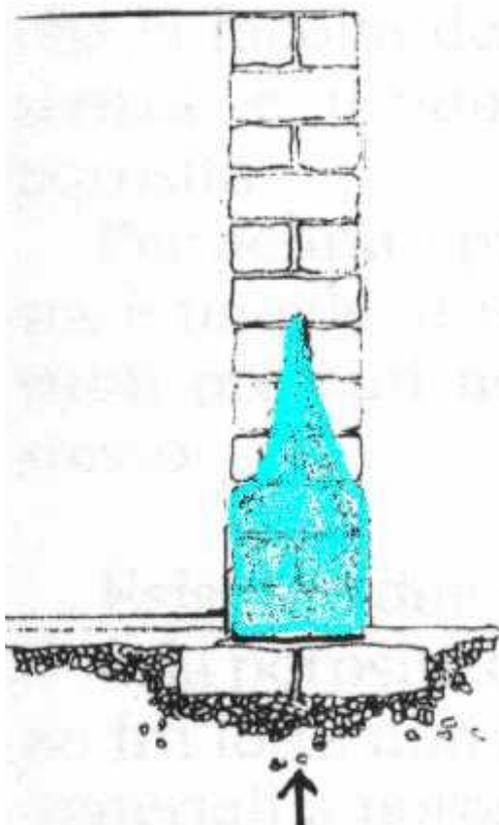
Corso di Fisica Tecnica a.a. 2018/2019
Prof. Marina Mistretta

Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : quadro generale

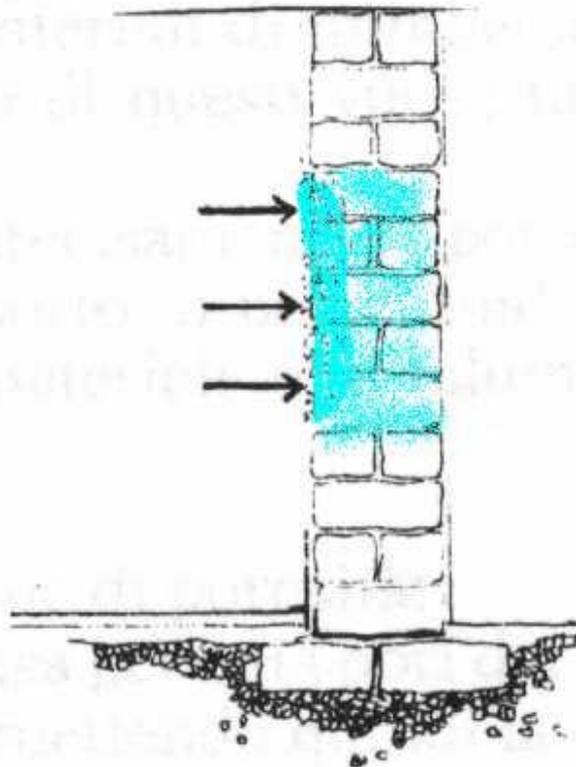


Distribuzione dell'acqua in funzione del tipo di problema

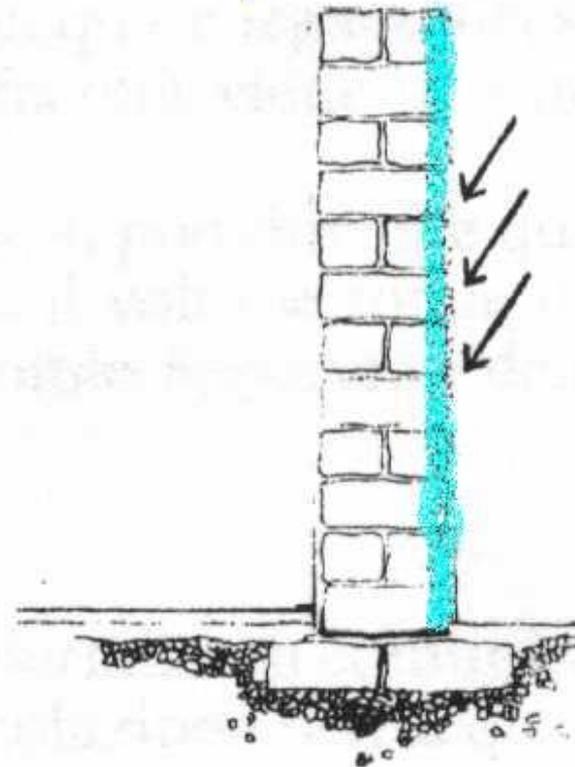
umidita di risalita

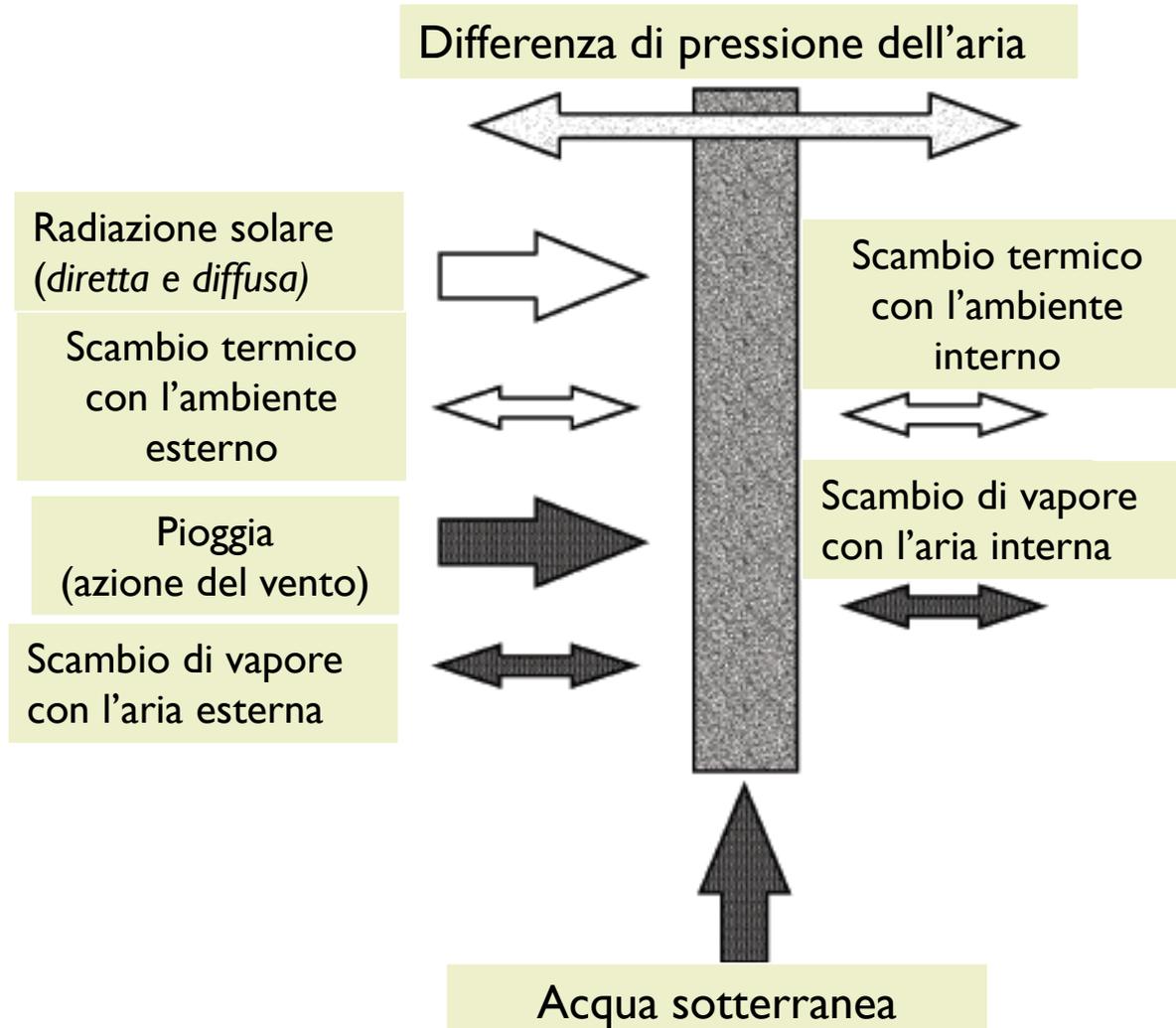


umidita' da condensa



umidita' da acqua meteorica





Carichi igrotermici sull'involucro edilizio

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 (metabolismo umano).



Fenomeni di condensazione di vapore negli edifici : cause

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

- In anni relativamente recenti la necessità di contenere le dispersioni termiche ha favorito 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.
 - L'uso nelle cucine di cappe filtranti, prive di collegamenti a condotti di espulsione dei fumi, al vantaggio della libertà compositiva dell'arredamento della cucina, contrappongono lo svantaggio dell'immissione di grandi quantità di vapore in ambiente a seguito della cottura dei cibi.
 - La formazione di condensa, fenomeno tipico di strutture poco isolate, può manifestarsi anche in presenza di strutture ben isolate dove, però, la collocazione dello strato isolante è errata rispetto alla permeabilità degli strati rimanenti.
-



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.

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 ($p_{v,i} > p_{v,e}$).



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.)

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

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

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



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 $T_{s,i}$.

Non si verifica condensa superficiale se :

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



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

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

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

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

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

Si ricava, sostituendo q :

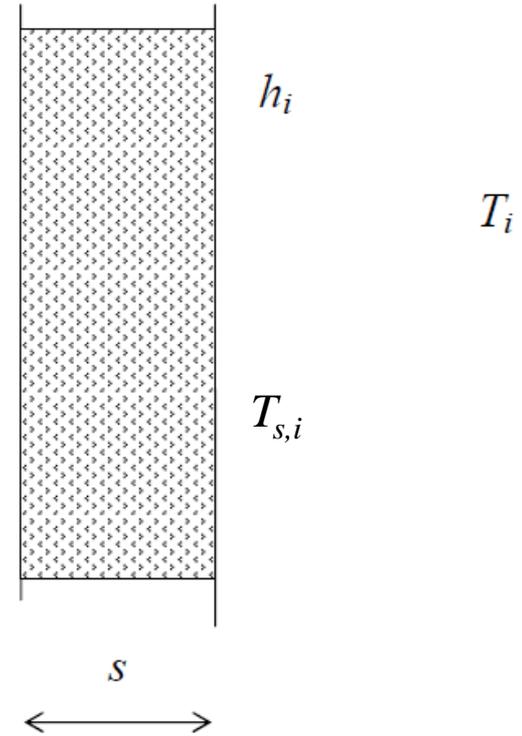
$$T_{s,i} = T_i - \frac{K}{h_i} (T_i - T_e)$$

K : trasmittanza unitaria della parete [W/m^2K]

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

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

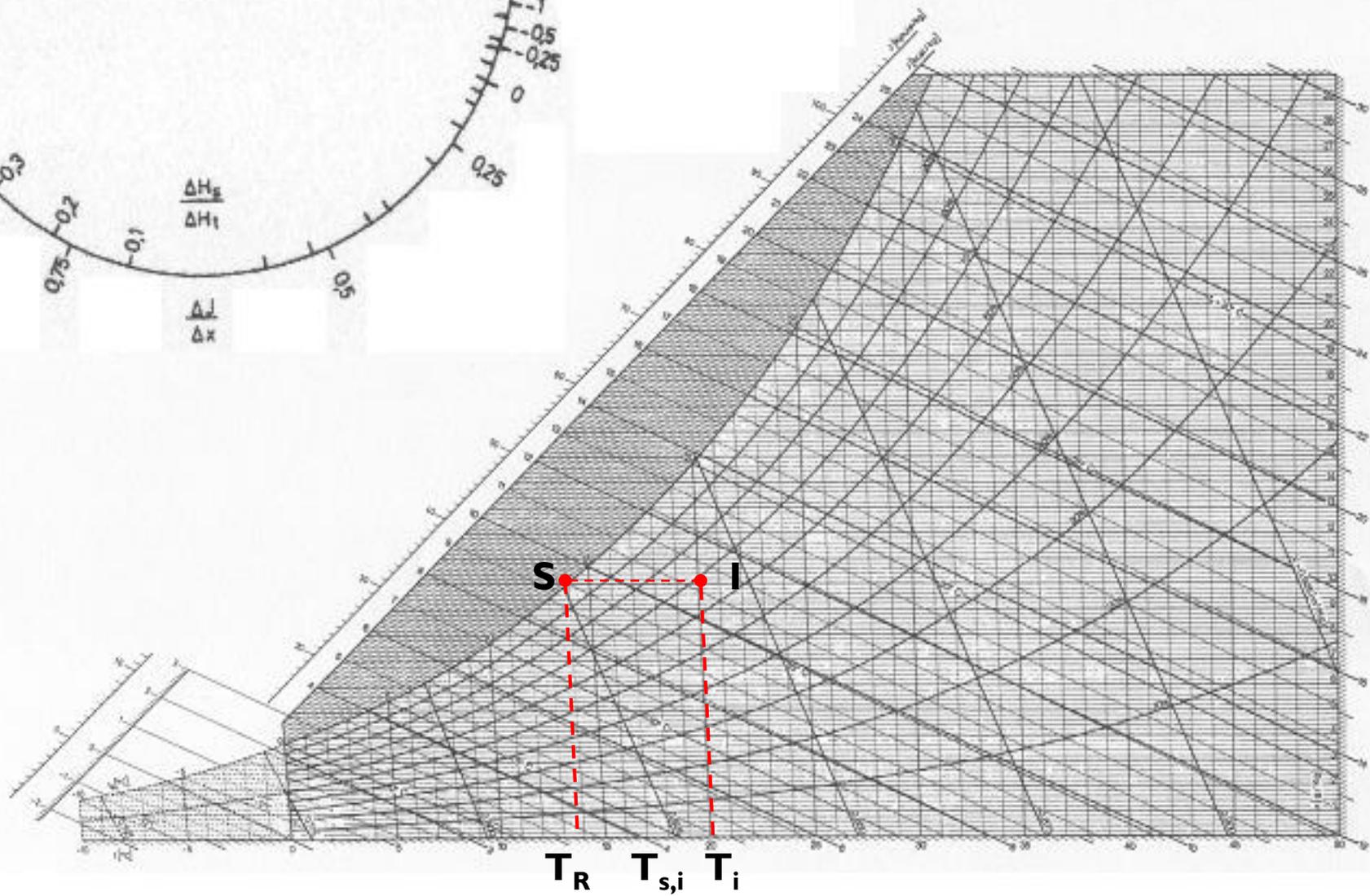
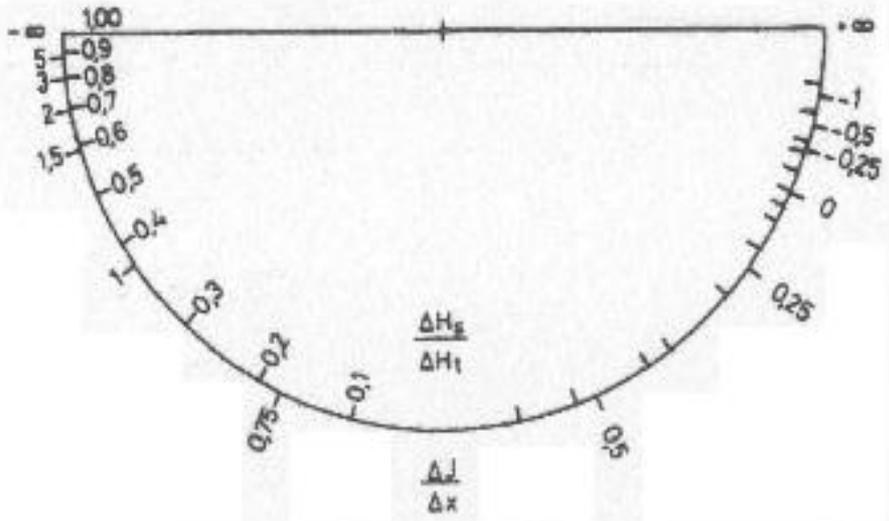
T_e



VERIFICA DELLA 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 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:
 - ▶ $T_R < T_{s,i}$
- ▶ Altrimenti c'è condensa superficiale



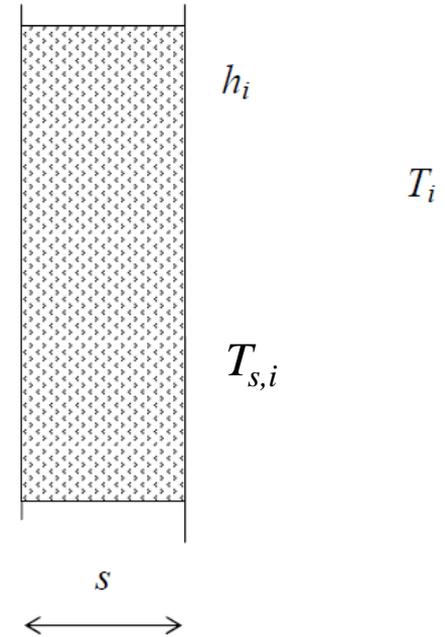


S I

T_R $T_{s,i}$ T_i

SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

T_e

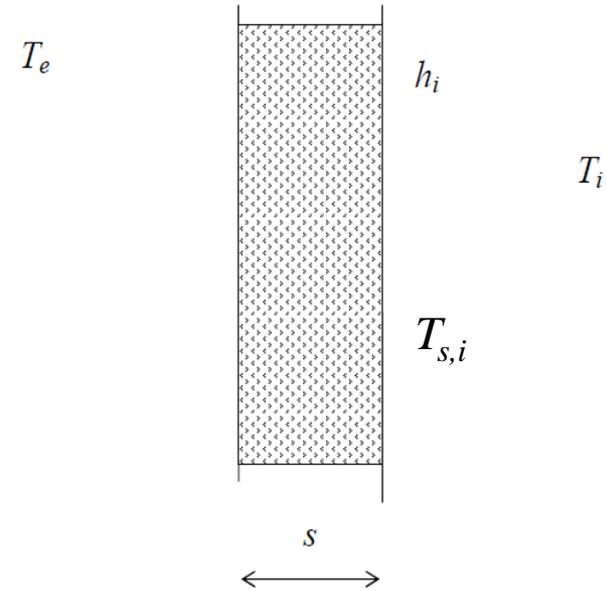


1. Si deve verificare che $T_{s,i} > T_R$
Se $T_{s,i} \leq T_R$, significa che c'è condensa superficiale, quindi occorre aumentare $T_{s,i}$.
2. A tal fine occorre aumentare la resistenza termica della parete (quindi devo ridurre il flusso termico).
3. Come? Si calcola lo spessore aggiuntivo di isolante di data conduttività termica λ , necessario ad evitarla. Cioè devo incrementare la resistenza della parete R , ossia ridurre la trasmittanza K .



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

- Si calcola la resistenza termica della parete esistente.
- Si calcola la resistenza termica minima della parete, tale che $R > R_{\min}$ affinché non ci sia condensa superficiale



$$q = \frac{T_i - T_e}{R} \quad \text{con} \quad R = \frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_e}$$

$$\text{da cui } R = \frac{T_i - T_e}{q}$$

$$\text{essendo } q = h_i(T_i - T_{s,i}) \quad \text{si scrive} \quad R = \frac{T_i - T_e}{q} = \frac{T_i - T_e}{h_i(T_i - T_{s,i})}$$

SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Si calcola la resistenza termica minima della parete, tale che $R > R_{\min}$ affinché non ci sia condensa superficiale

$$R = \frac{T_i - T_e}{h_i(T_i - T_{s,i})}$$

Per calcolare R_{\min} , si pone $T_{s,i} = T_R$, in corrispondenza della quale si ha condensa superficiale

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



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 $T_R = T_{s,i}$ \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.

\mathbf{K}_{\max}

se $\mathbf{K} > \mathbf{K}_{\max}$ c'è condensa sulla superficie interna della parete.



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Alla resistenza termica minima corrisponde la
trasmittanza termica massima

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

$$K = \frac{1}{R} \quad \text{quindi} \quad K_{\max} = \frac{1}{R_{\min}} = \frac{h_i(T_i - T_R)}{T_i - T_e}$$

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:

$$K_{\max} = \frac{h_i(T_i - T_R)}{T_i - T_e}$$



SOLUZIONE DELLA CONDENSA SUPERFICIALE

Alla resistenza termica minima corrisponde la
trasmittanza termica massima

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

$$K = \frac{1}{R} \quad \text{quindi} \quad K_{\max} = \frac{1}{R_{\min}} = \frac{h_i(T_i - T_R)}{T_i - T_e}$$

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:

$$K_{\max} = \frac{h_i(T_i - T_R)}{T_i - T_e}$$



Calcolo dello spessore di isolante

A R_{\min} occorre aggiungere una resistenza aggiuntiva:

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

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



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.



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

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

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

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

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

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

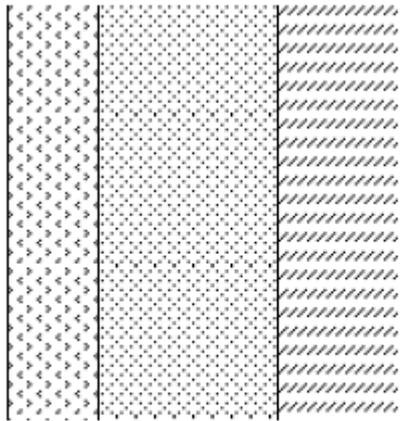
- Flusso monodimensionale
- Regime stazionario

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 , $p_{sat,j}$, $p_{sat,e}$, 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 $\text{m}^2\text{K/W}$.

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:

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

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

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



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

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

$$p_{v,j} = p_{v,i} - g_v \cdot \sum_{k=1}^j R_{v,k}$$

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

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



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.

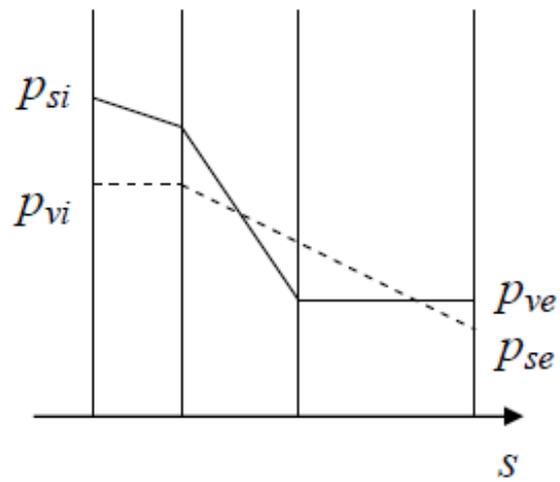
Graficamente, quando l'andamento della pressione di vapore p_v interseca quello della pressione di saturazione p_s , nella zona di intersezione avviene la condensazione:

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

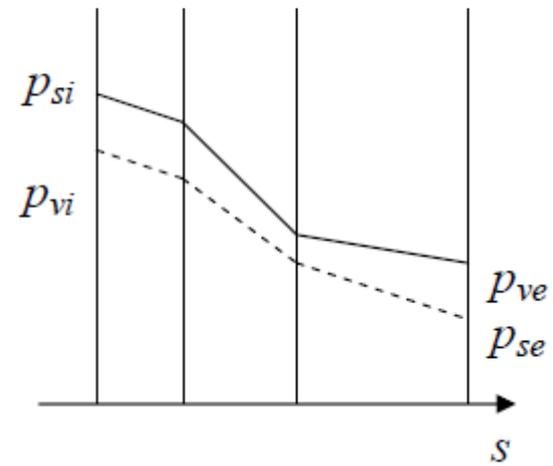
Casi

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.

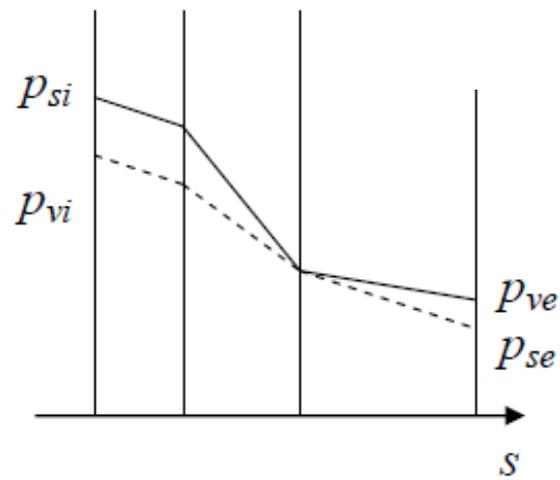
Caso 1



Caso 3



Caso 2



Metodo di *Glaser*

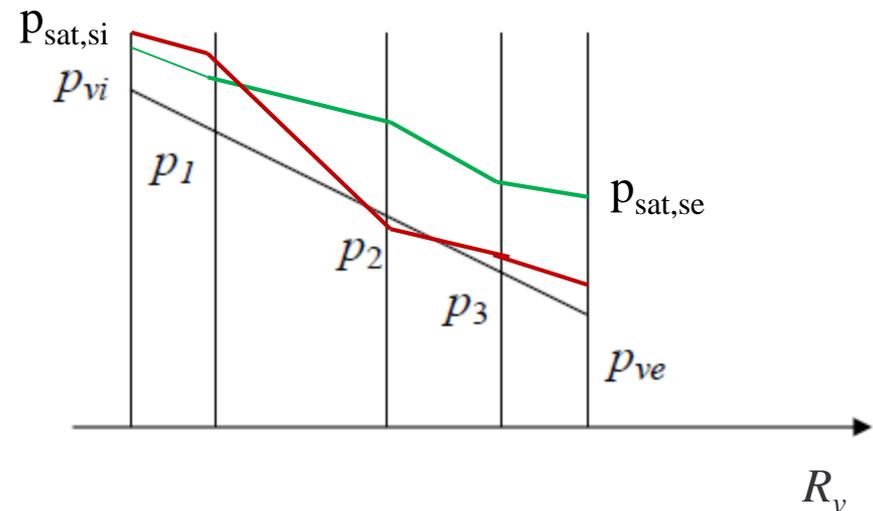
- ▶ Metodo grafico o metodo di *Glaser*
- ▶ Tracciare il diagramma delle pressioni



- ▶ 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.
-



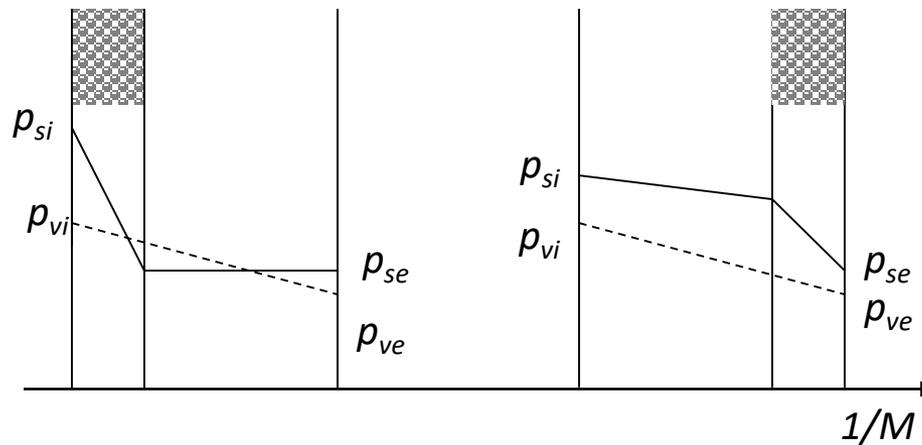
Soluzione

- ▶ 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*).



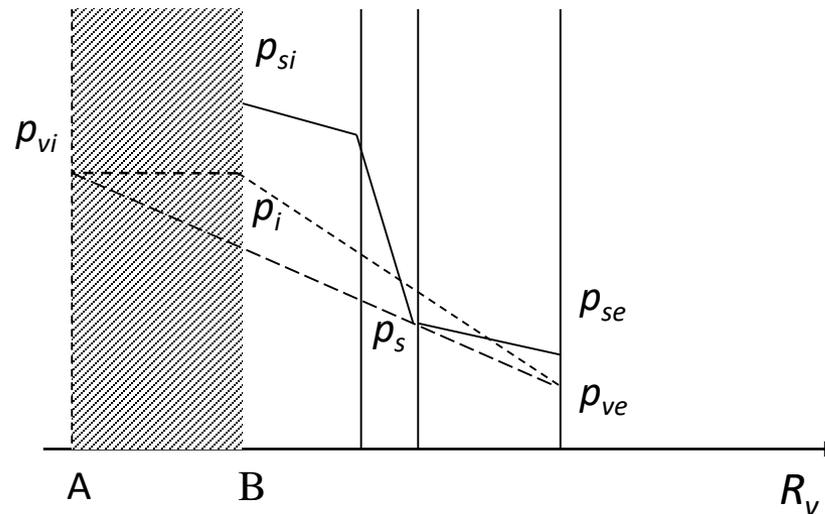
Soluzione

- ▶ 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:

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

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

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

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



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



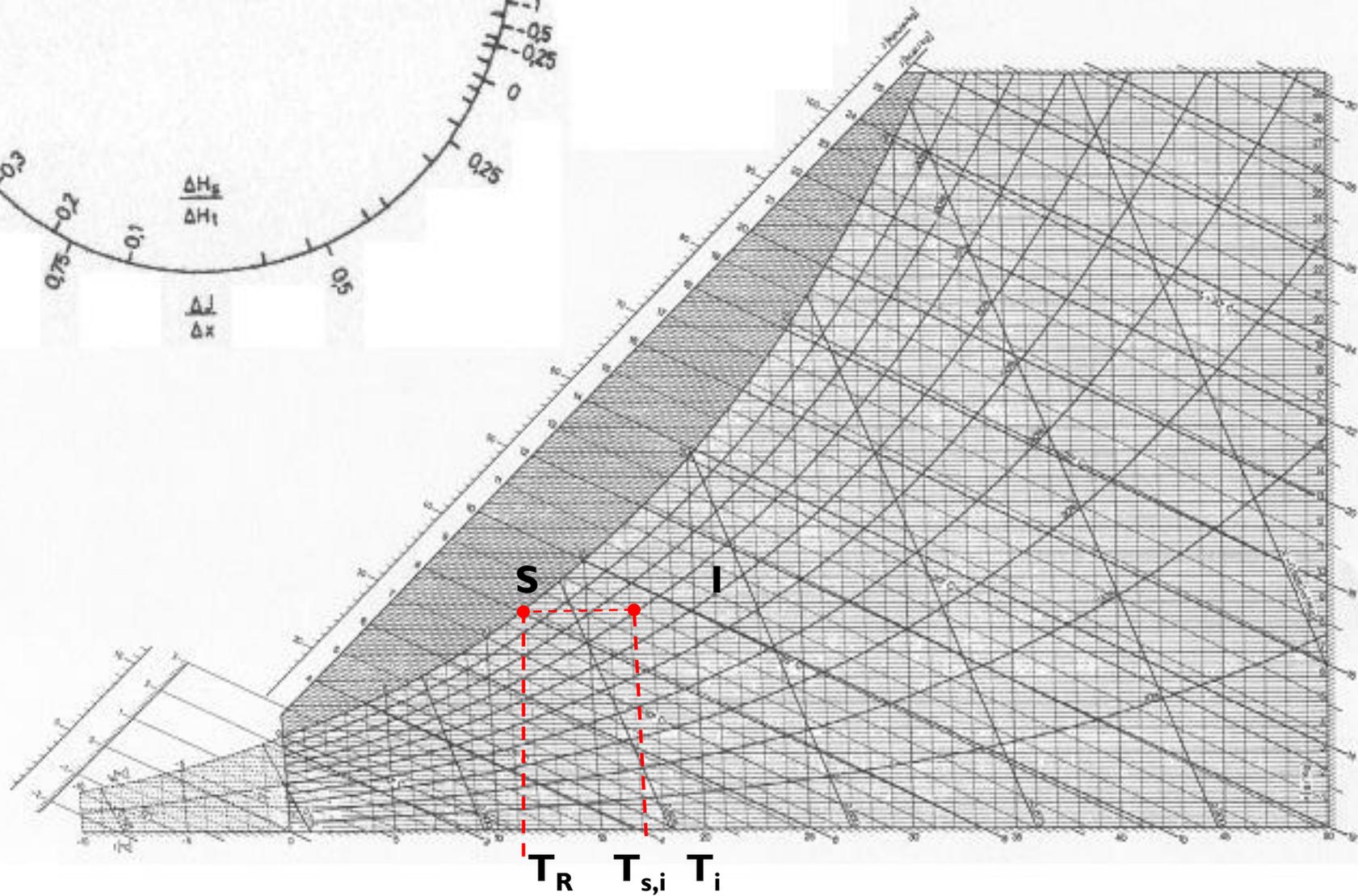
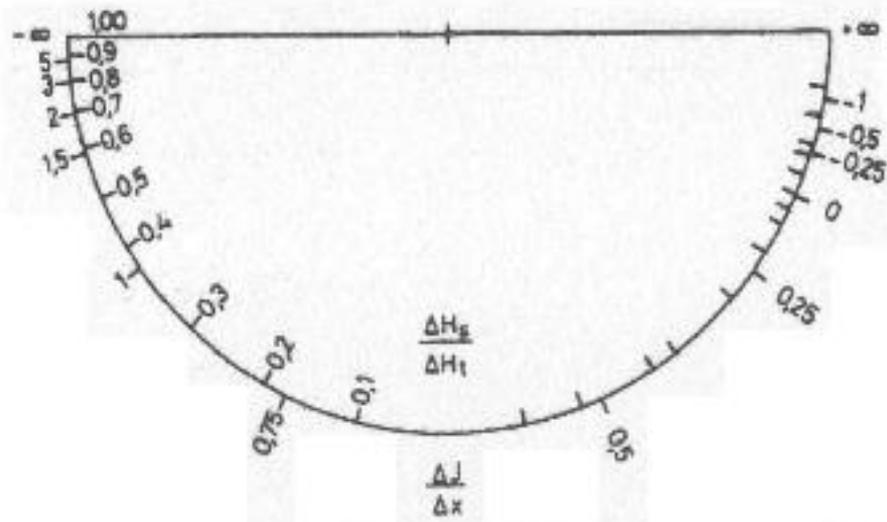
3) Dal diagramma psicrometrico, individuato il punto rappresentativo dell'aria interna I (18°C ; $0,70$), si determina la corrispondente temperatura di rugiada T_r , definita come la temperatura in corrispondenza della quale il vapore acqueo presente nell'aria satura condensa a pressione costante.

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:

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

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

$$\text{Resistenza al vapore}_3 = s_3/\delta_3 = 11,5 \cdot 10^{10} \text{ [m}^2 \text{ Pa/kg]}$$

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

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):

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

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

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

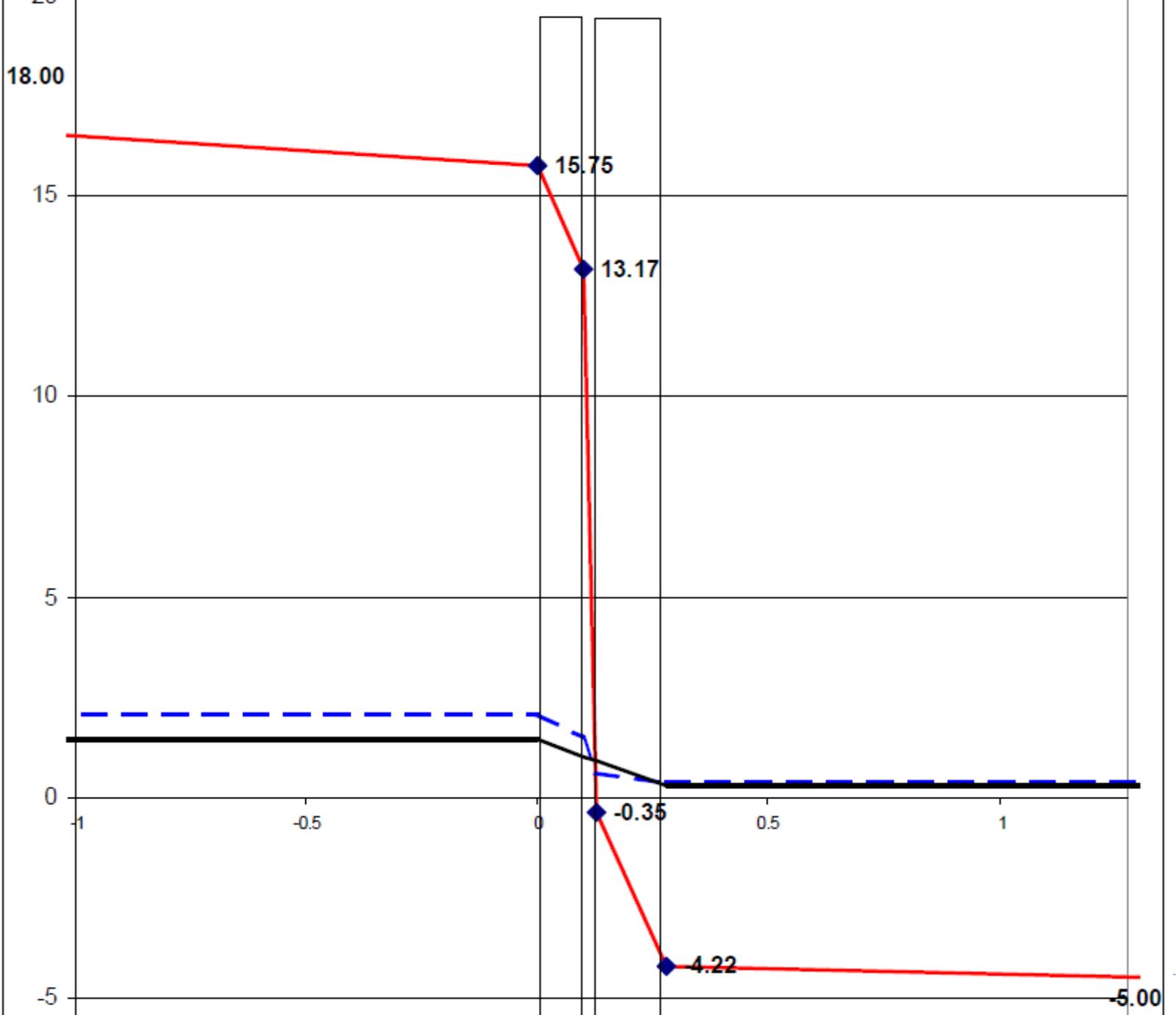
$$p_{\text{sat},e} = 393 \text{ [Pa]}$$

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

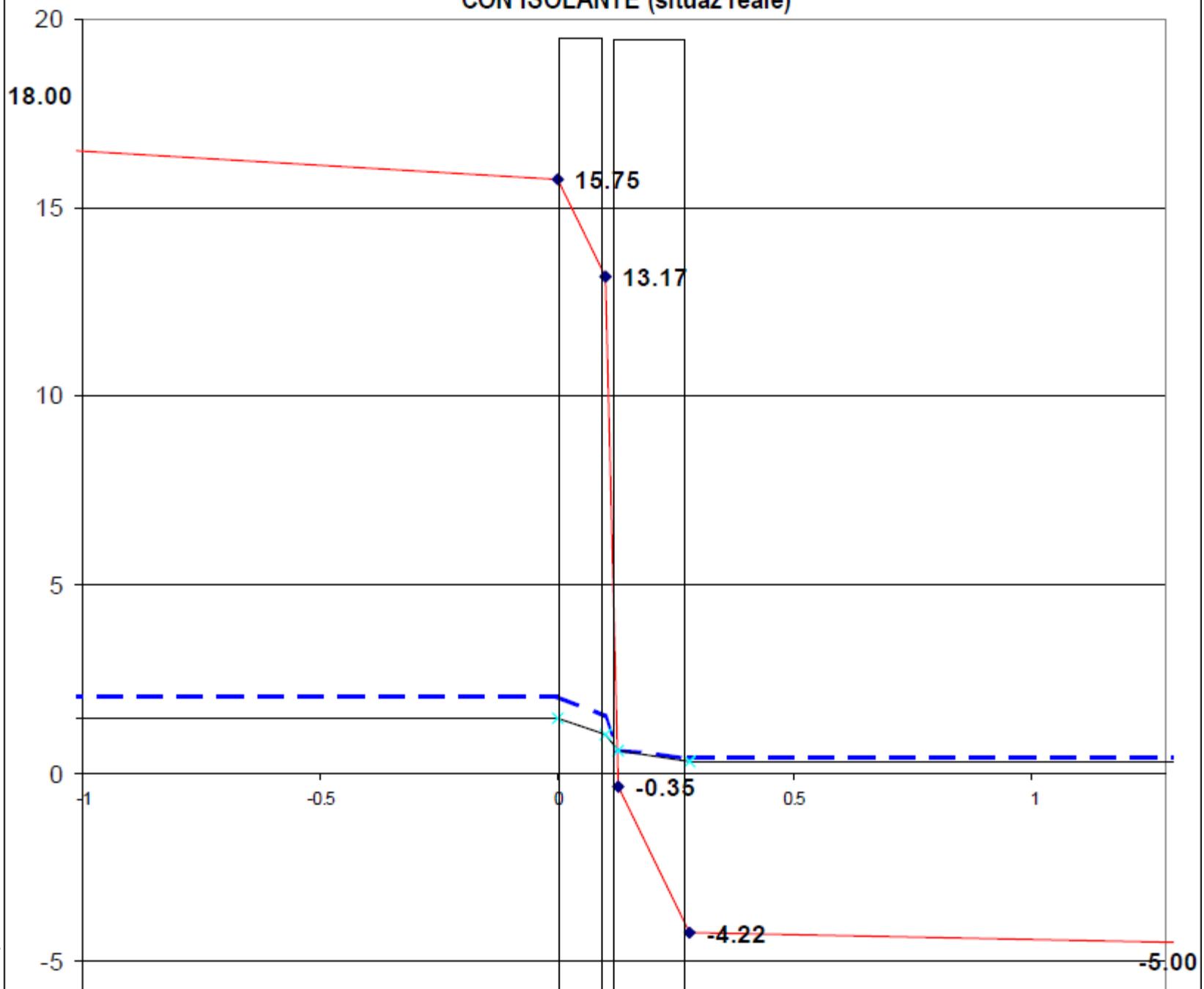
$$p_{v,1} = 1025 < p_{\text{sat},1} = 1510 \text{ [Pa]} \text{ non c'è condensa}$$

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





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

