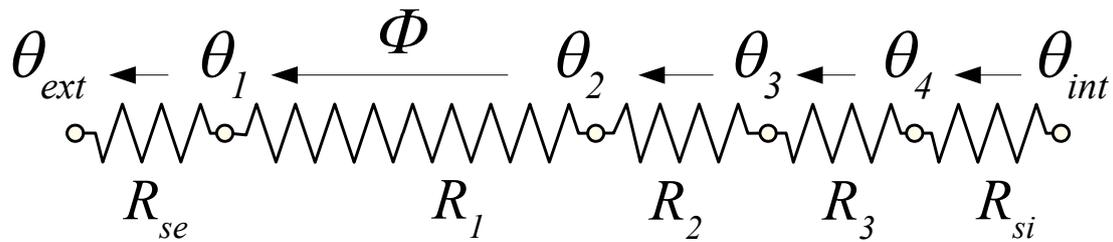


Temperature alle interfacce



$$\Phi = \frac{\theta_{int} - \theta_{ext}}{R_{tot}}$$

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_{ext}}{R_{se}} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_1} = \frac{\theta_3 - \theta_2}{R_2} = \frac{\theta_4 - \theta_3}{R_3} = \frac{\theta_{int} - \theta_4}{R_{si}}$$

$$\theta_1 = \theta_{ext} + \frac{R_{se}}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext}) \quad \theta_2 = \theta_1 + \frac{R_1}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

$$\theta_3 = \theta_2 + \frac{R_2}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext}) \quad \theta_4 = \theta_3 + \frac{R_3}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

Salti termici nella parete composta

Temperature alle interfacce

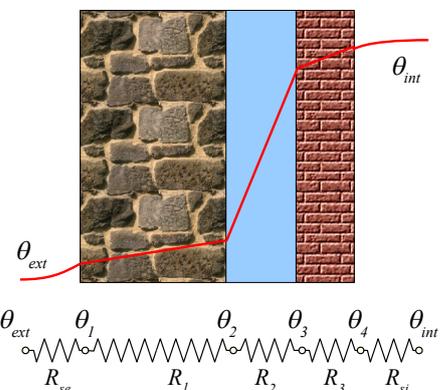
$$\theta_1 - \theta_{ext} = \frac{R_{se}}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

$$\theta_{j+1} - \theta_j = \frac{R_j}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

$$\theta_{int} - \theta_{N+1} = \frac{R_{int}}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

N numero di strati

- il salto termico è proporzionale alla resistenza termica
- negli strati di isolante ho il maggior salto termico



Condizione di saturazione

legame tra p_{sat} e θ

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{per } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_{sat} = 610,5 e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{per } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

legame tra θ e p_{sat}

$$\theta_{sat} = \frac{237,3 \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)} \quad \text{per } p \geq 610,5 \text{ Pa}$$

$$\theta_{sat} = \frac{265,5 \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p}{610,5}\right)} \quad \text{per } p < 610,5 \text{ Pa}$$

Tipologie di calcolo

Verifica superficiale

- serve a verificare che non ci siano condizioni per lo sviluppo di muffe
- trattamento diverso per muri e porte, finestre
- La verifica avviene in regime stazionario
- importantissimi i ponti termici

Verifica Interstiziale

- si verifica che non ci sia formazione di condensa interstiziale
- dipende dal tipo di stratigrafia utilizzata
- utilizzato metodo stazionario (Glaser)
- il metodo prevede anche il calcolo della quantità evaporabile, ma non può essere utilizzato per "approvare" una struttura

Umidità

condizioni interne

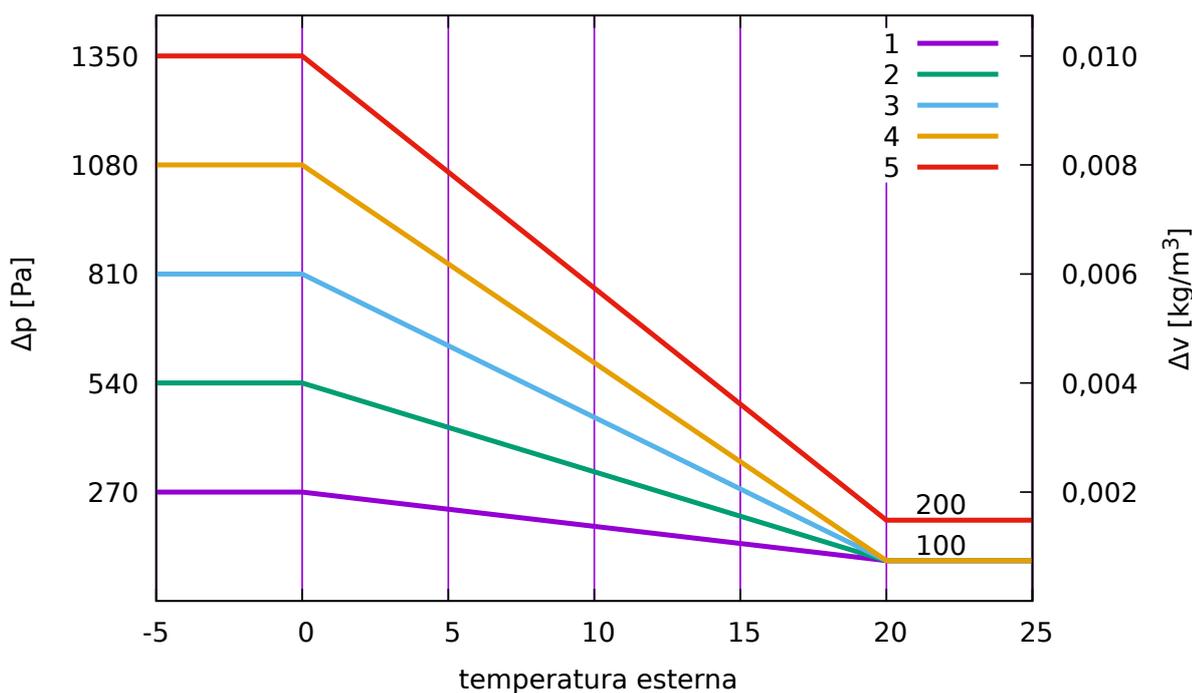
classi di concentrazione

- l'apporto di umidità viene suddiviso in classi di concentrazione
- l'apporto è funzione della temperatura esterna e della destinazione d'uso dell'edificio
- l'apporto è riportato sia in termini di incremento Δv massa di vapore che Δp aumento della pressione parziale
- i valori vanno riferiti alle condizioni esterne

Classi di umidità interna

Classe umidità	Edificio
1	Edifici non occupati, magazzini stoccaggio materiale secco
2	Uffici, alloggi con ventilazione meccanica controllata
3	Alloggi senza VMC, edifici con affollamento non noto
4	Palestre, cucine, mense
5	Edifici particolari, lavanderie, piscine, distillerie

classi di umidità interna



- si forma sulle pareti più fredde
- è causa di crescita delle muffe
- può provocare danneggiamento alle superfici
- non è necessario che si formi condensa per la crescita delle muffe, è sufficiente una umidità elevata
- non è importante l'umidità dell'ambiente quanto quella sulle superfici
- particolarmente importanti sono i ponti termici

Muffe

- nome generale che indica diversi tipi di funghi microscopici
- sono naturalmente presenti negli ambienti
- sono facilmente trasportabili per via aerea
- creano problemi solo nel momento in cui si verificano condizioni per la coltura
- le muffe secernono sostanze che possono danneggiare le strutture di deposito
- le spore sono molto resistenti, e anche se la superficie diventa secca possono rimanere in loco
- possono essere dannosi per la salute
 - irritazioni delle mucose
 - rossore
 - allergie
 - infezioni

umidità relativa sulle superfici

φ	situazione
$< 0,8$	superfici opache
$\leq 1,0$	porte e finestre
$\leq \varphi_{crit}$	per evitare corrosione (esempio $\varphi_{crit} = 0,6$)

Procedura

- definire la temperatura esterna
- definire l'umidità esterna
- definire la temperatura interna
- definire l'umidità interna (classi di concentrazione)
- calcolare il valore massimo della pressione di saturazione delle superfici
- determinare la temperatura superficiale minima accettabile $\theta_{si,min}$
- determinare il fattore di temperatura minimo

pressione di vapore sulle superfici

$$\begin{aligned}p_{si} &= p_i \\p_{si} &= \varphi_{si} \cdot p_{sat}(\theta_{si}) \\ \varphi_{si} &< \varphi_{si,cr} \\ p_{sat}(\theta_{si}) &> \frac{p_{si}}{\varphi_{si,cr}}\end{aligned}$$

temperatura

$$\begin{aligned}p_{sat}(\theta_{si,min}) &= \frac{p_{si}}{\varphi_{si,cr}} \\ \theta_{si} &> \theta_{si,min}\end{aligned}$$

confronto

fattore di temperatura

- non si confrontano direttamente le temperature
- si introducono i fattori di temperatura superficiale
- valori di riferimento indipendenti dalle condizioni climatiche

$$\begin{aligned}f_{Rsi} &= \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \\ f_{Rsi,min} &= \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \\ f_{Rsi} &> f_{Rsi,min}\end{aligned}$$

Fattore di temperatura

Parete Composta

Temperatura interna

$$\theta_{si} = \theta_4$$

$$\theta_{si} = \theta_e + \frac{R_{se} + R_1 + R_2 + R_4}{R_{tot}} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

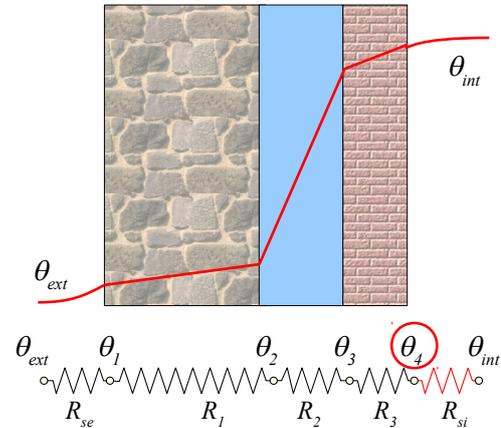
$$\theta_{si} = \theta_e + \frac{R_{tot} - R_{si}}{R_{tot}} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

$$\theta_{si} = \theta_e + (1 - R_{si} \cdot U) \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

$$\theta_{si} - \theta_e = (1 - R_{si} \cdot U) \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

$$f_{Rsi} = 1 - R_{si} \cdot U$$

- per una parete il fattore di temperatura superficiale dipende dalla struttura
- il fattore non dipende dalle condizioni climatiche
- è preferibile avere fattori alti \implies trasmittanze basse



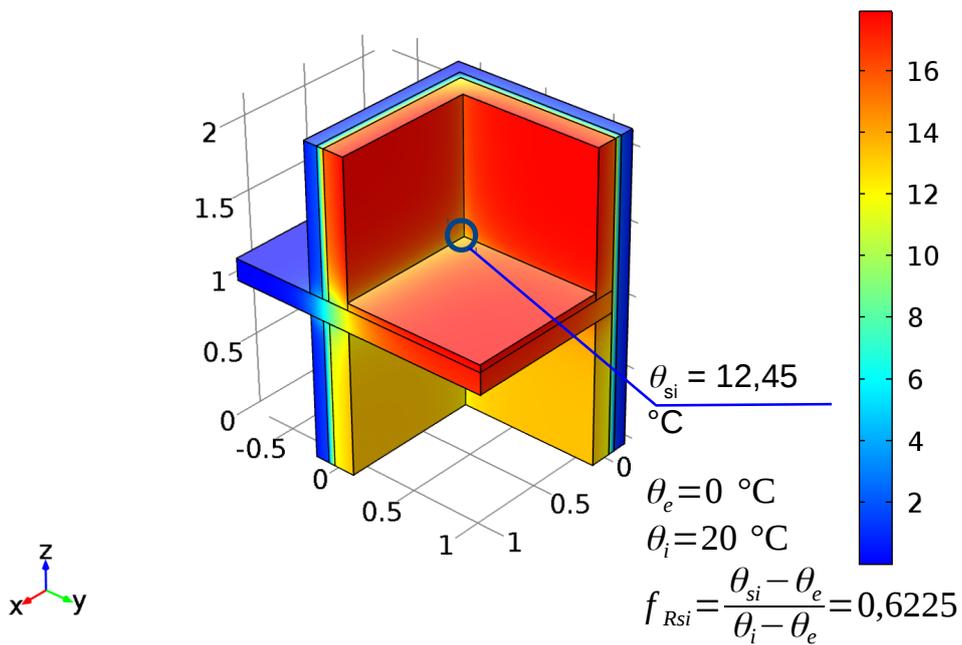
Ponti Termici

- il fattore di temperatura non dipende dalle condizioni climatiche
- il fattore di temperatura minimo dipende invece dalla temperatura
- il fattore $f_{Rsi,min}$ non dipende dalla geometria, ma solo dalle temperature limite
- il fattore di temperatura può essere definito univocamente per i ponti termici

Ponti Termici

angolo con balcone

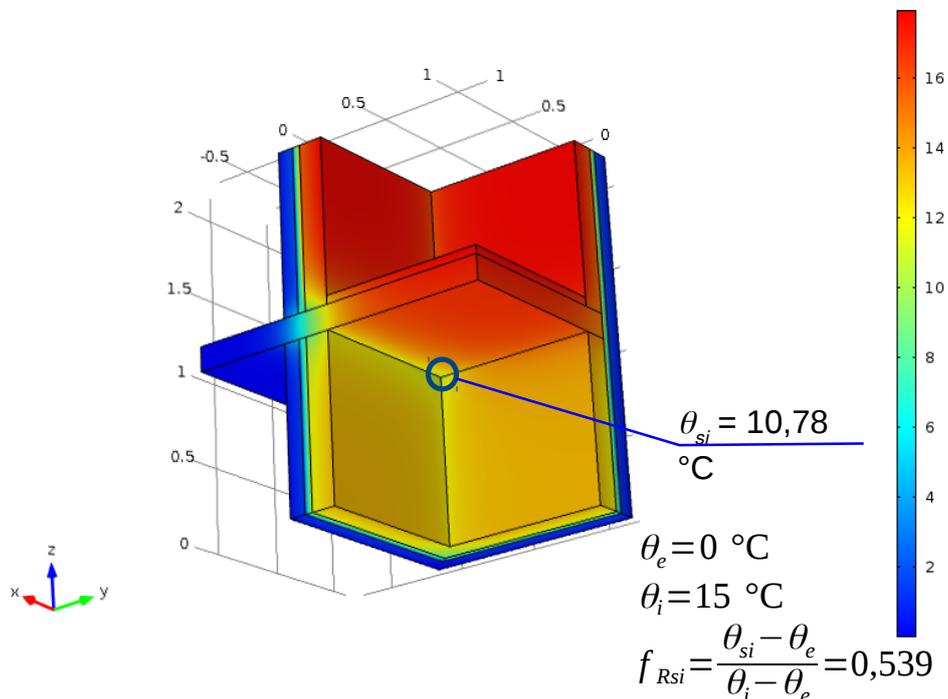
Superficie: Temperatura (degC)



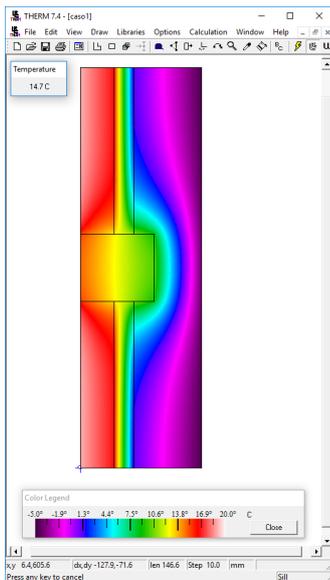
Ponti Termici

angolo con balcone

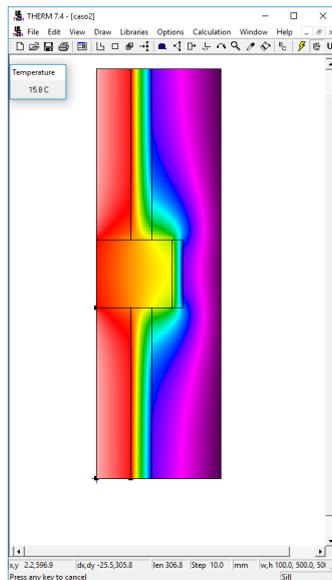
Superficie: Temperatura (degC)



Esempio Ponte termico



$$f_{Rsi} = 0,788$$



$$f_{Rsi} = 0,832$$



$$f_{Rsi} = 0,904$$

Condensa Interstiziale

- si forma all'interno delle pareti
- è legata alla distribuzione delle temperature
- la condensa può alterare le caratteristiche dei materiali
- si possono creare effetti di danneggiamento
- attualmente è da evitare
- precedentemente era ammessa nel caso ci fosse l'evaporazione della condensa nel periodo estivo

Calcolo Stazionario (Glaser) UNI 13788:2013

- si applica in regime stazionario
- le condizioni variano mese per mese
- considera la migrazione del vapore per diffusione
- dati dei materiali disponibili
- solo pareti piane

Calcolo dinamico UNI 15026

- più preciso, considera trasporto coniugato di massa ed energia
- considera effetti di capillarità e trasporto di acqua
- necessita di più dati sui materiali e climatici
- implementato in WUFI, COMSOL, ESP-r

Proprietà dei Materiali

metodo Glaser

Proprietà	Simbolo	Norme di riferimento
conduttività termica	λ	da ISO 10456 o
resistenza termica specifica	R	in accordo con ISO 10456
permeabilità al vapore	δ	da UNI 10456 o
fattore di resistenza al vapore	μ	in accordo con ISO 12572
spessore equivalente d'aria	s_d	

- λ e μ per materiali omogenei
- R e s_d per prodotti composti
- per strati d'aria

R da ISO 6946

$s_d = 0,01$ m indipendentemente dallo spessore reale

Trasporto di massa per diffusione

legge di Fick

flusso termico

$$\phi'' = -\lambda \frac{d\theta}{dx} = -\lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

ϕ'' flusso termico specifico

λ conducibilità termica

flusso di vapore

$$g = -\delta_p \frac{dp}{dx} = -\delta_p \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})]$$

g flusso di vapore [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

δ permeabilità al vapore

Δp differenza di pressione di vapore tra due superfici.

Trasporto di massa per diffusione

resistenze

flusso termico

$$\phi'' = -\lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = -\lambda \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}}$$

$$\phi'' = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R} \quad R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

R resistenza termica specifica

flusso di vapore

$$g = -\delta \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\delta \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1} = \frac{p_1 - p_2}{\frac{\Delta x}{\delta}}$$

$$g = \frac{p_1 - p_2}{R_v} \quad R_v = \frac{\Delta x}{\delta}$$

R_v resistenza al passaggio del vapore

Trasporto di massa per diffusione

resistenze

flusso termico

$$\phi'' = -\lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = -\lambda \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}}$$

$$\phi'' = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R} \quad R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

R resistenza termica specifica

flusso di vapore

$$g = -\delta \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\delta \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1} = \frac{p_1 - p_2}{\frac{\Delta x}{\delta}}$$

$$g = \frac{p_1 - p_2}{R_v} \quad R_v = \frac{\Delta x}{\delta}$$

R_v resistenza al passaggio del vapore

Trasporto di massa per diffusione

resistenze

flusso termico

$$\phi'' = -\lambda \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = -\lambda \frac{\theta_2 - \theta_1}{x_2 - x_1} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{\Delta x}{\lambda}}$$

$$\phi'' = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R} \quad R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

R resistenza termica specifica

flusso di vapore

$$g = -\delta \frac{\Delta p}{\Delta x} = -\delta \frac{p_2 - p_1}{x_2 - x_1} = \frac{p_1 - p_2}{\frac{\Delta x}{\delta}}$$

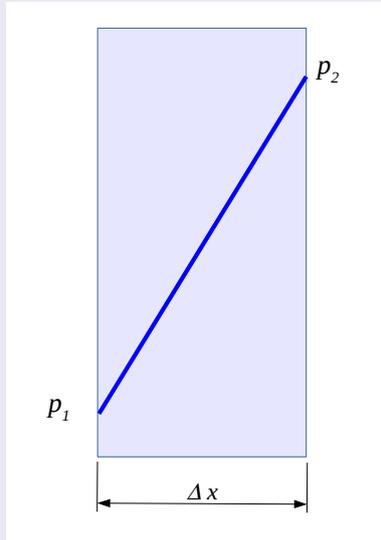
$$g = \frac{p_1 - p_2}{R_v} \quad R_v = \frac{\Delta x}{\delta}$$

R_v resistenza al passaggio del vapore

Trasporto di vapore

- la legge costitutiva è la stessa
- anche la soluzione è la stessa
- non si considerano resistenze superficiali

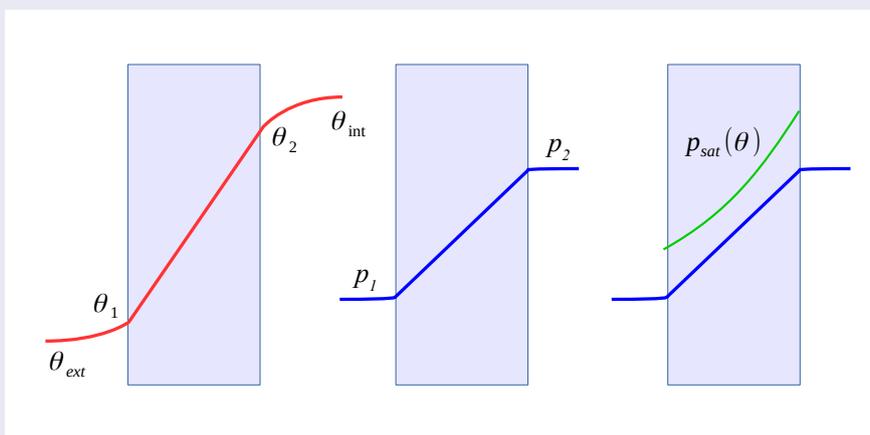
andamento della pressione in uno strato omogeneo



Pressione di vapore e pressione di saturazione

- nella parete abbiamo un andamento lineare della
 - temperatura
 - pressione di vapore
- l'andamento della pressione di saturazione non è lineare

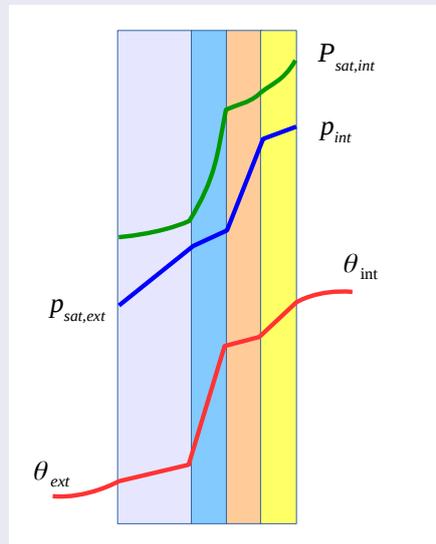
Andamento della temperatura e della pressione di vapore



Parete multistrato

- nella parete multistrato si ottiene un andamento lineare a tratti per
 - temperatura
 - pressione di vapore
- l'andamento della pressione di saturazione non è lineare a tratti

andamento di temperatura, pressione di vapore e pressione di saturazione



Parete Composta

analogia elettrotermica

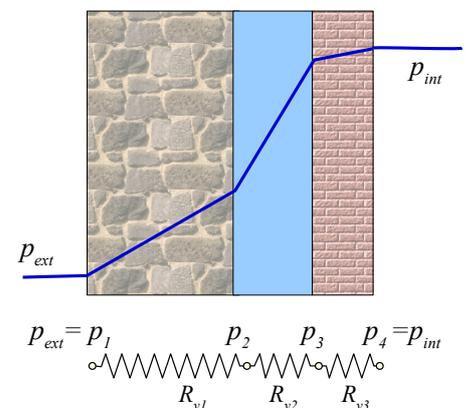
flusso di vapore

$$g = \frac{p_{int} - p_{ext}}{\sum_j \frac{L_j}{\delta_j}}$$

$$= \frac{p_{int} - p_{ext}}{\sum_j R_{v,j}} = \frac{p_{int} - p_{ext}}{R_{v,tot}}$$

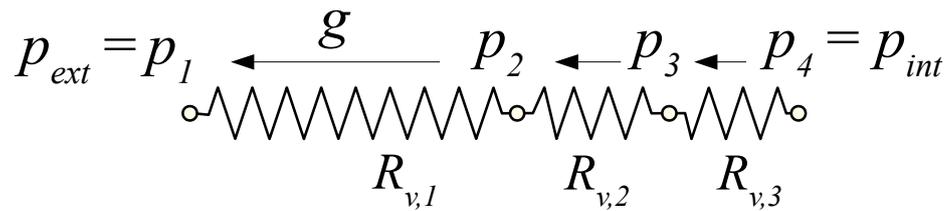
g flusso specifico di vapore [$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$]

$R_{v,j}$ resistenza al passaggio del vapore del j -esimo strato [$\text{Pa m}^2 \text{ s}/\text{kg}$]



$$R_{v,tot} = \sum_j \frac{L_j}{\delta_j} = \sum_j R_{v,j}$$

Pressioni alle interfacce



$$g = \frac{p_{int} - p_{ext}}{R_{v,tot}}$$

$$g = \frac{p_2 - p_1}{R_{v,1}} = \frac{p_3 - p_2}{R_{v,2}} = \frac{p_4 - p_3}{R_{v,3}}$$

$$p_1 = p_{ext} \quad p_2 = p_1 + \frac{R_{v,1}}{R_{v,tot}} \cdot (p_{int} - p_{ext})$$

$$p_3 = p_2 + \frac{R_{v,2}}{R_{v,tot}} \cdot (p_{int} - p_{ext}) \quad p_4 = p_3 + \frac{R_{v,3}}{R_{v,tot}} \cdot (p_{int} - p_{ext})$$



Parete Composta

Pressione alle interfacce

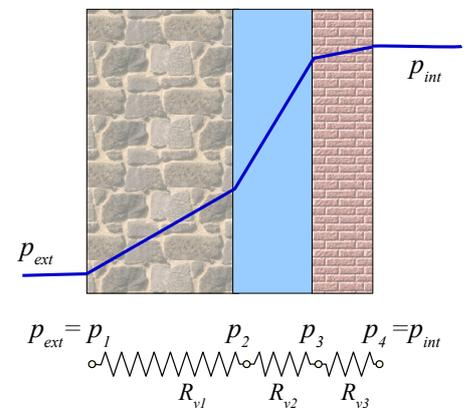
$$p_1 - p_{ext} = 0$$

$$p_{j+1} - p_j = \frac{R_{v,j}}{R_{v,tot}} \cdot (p_{int} - p_{ext})$$

$$p_{int} - p_{N+1} = 0$$

N numero di strati

- il salto di pressione è proporzionale alla resistenza al passaggio del vapore
- elevati salti di pressione avvengono negli strati ad elevata resistenza
- barriere al vapore



Spessore equivalente

- si introduce un spessore equivalente di aria
- il cambio di variabile semplifica il calcolo
- lo spessore d'aria è tale da garantire la stessa resistenza al passaggio del vapore R_v

$$R_{v,j} = \frac{\Delta x_j}{\delta_j} = \frac{s_{d,j}}{\delta_0}$$
$$s_{d,j} = \frac{\delta_0}{\delta_j} \quad \Delta x_j = \mu_j \cdot \Delta x_j$$

s_d spessore equivalente

$\mu_j = \frac{\delta_0}{\delta_j}$ fattore di resistenza al vapore dello strato

$\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10}$ [kg/(m s Pa)] permeabilità al vapore dell'aria

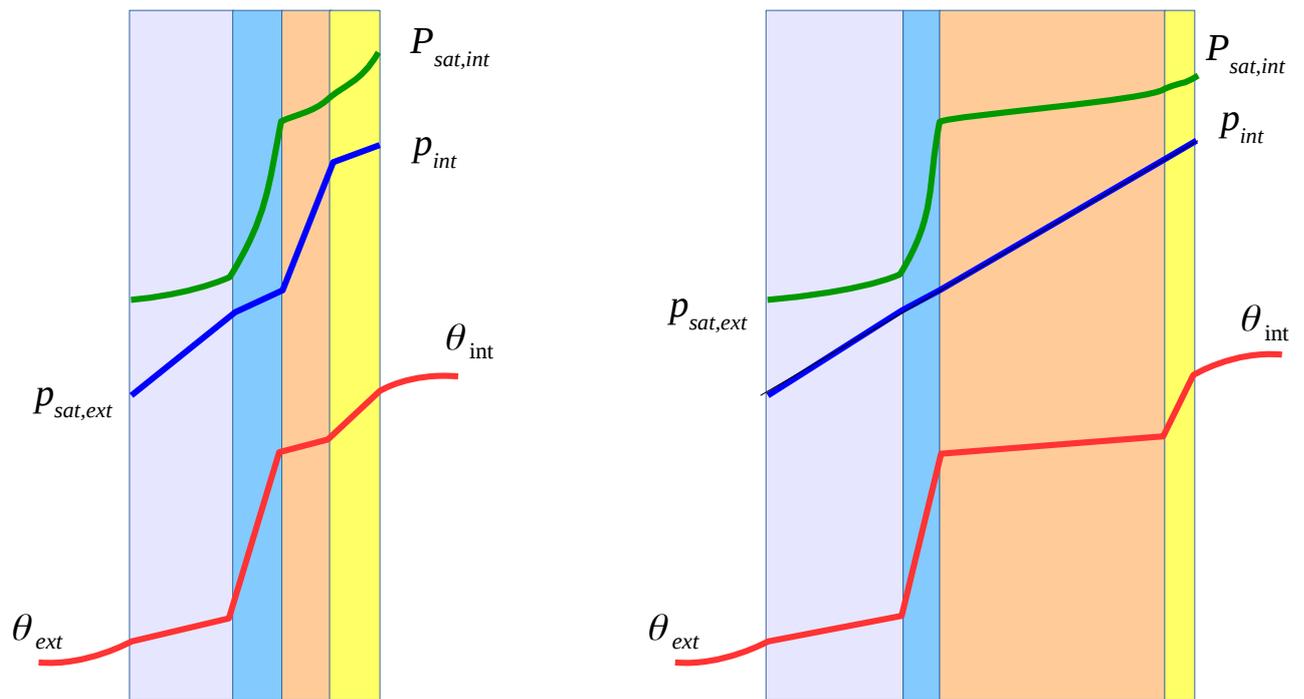
Spessori equivalenti

- utilizzando gli spessori equivalenti la parete è costituita dallo stesso materiale
- l'andamento della pressione di vapore è una linea non spezzata
- l'andamento della temperatura è sempre lineare a tratti
- l'andamento della pressione di saturazione è non lineare

pressione di saturazione

- l'andamento della pressione di vapore può essere linearizzato
- lo scostamento maggiore si ha per forti gradienti di θ
- nel caso di strati ad elevata resistenza termica li si suddivide ulteriormente con strati di resistenza massima $R = 0.25$ (m² · K)/W

Spessori equivalenti

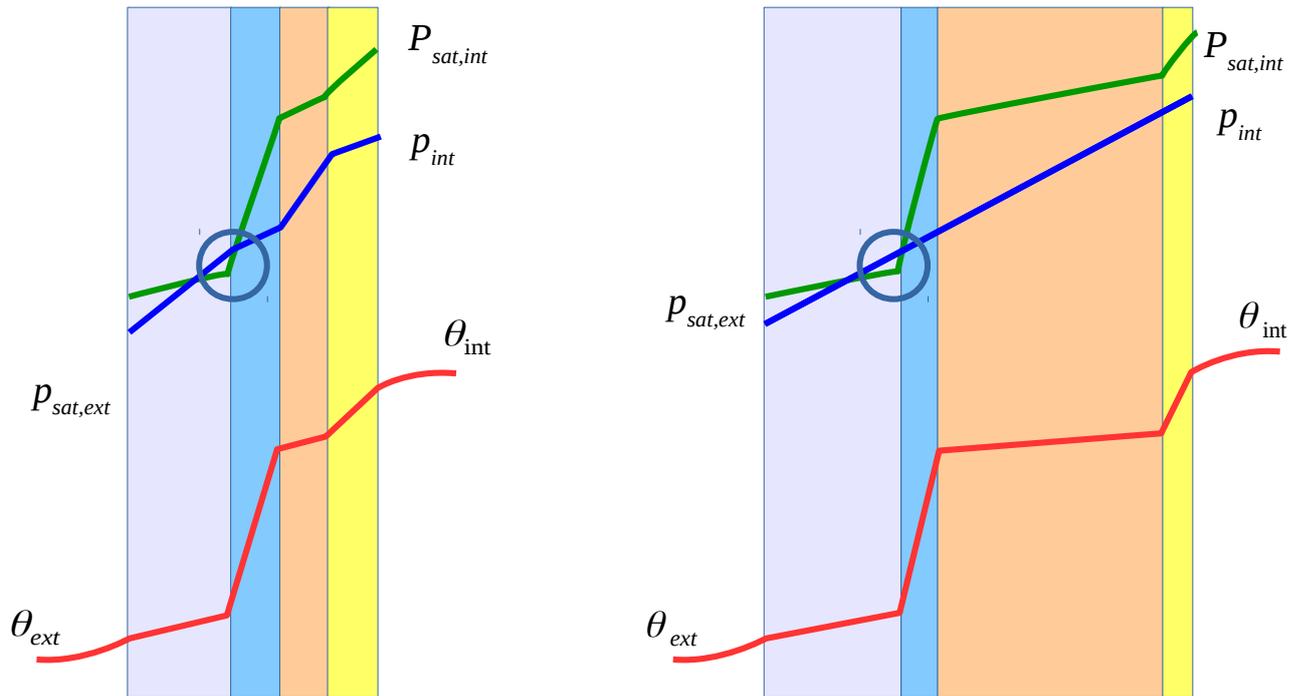


Formazione di condensa

Perchè si forma la condensa?

- La condensa interstiziale si forma quando la pressione di vapore risulta maggiore della pressione di saturazione
- la condensa può avvenire su uno o più strati
- si forma per particolari combinazioni di distribuzione di temperatura e di pressione
- dipende dalle condizioni climatiche interne ed esterne

Formazione di condensa



Condensazione su una interfaccia

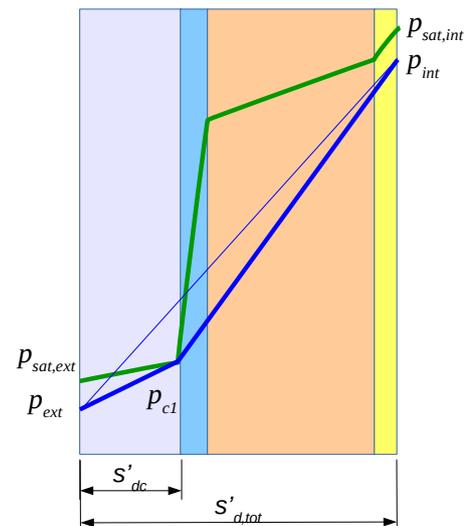
Portata di vapore condensato

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right)$$

p_c pressione di vapore nell'interfaccia di condensa $p_c = p_{sat}(\theta_c)$

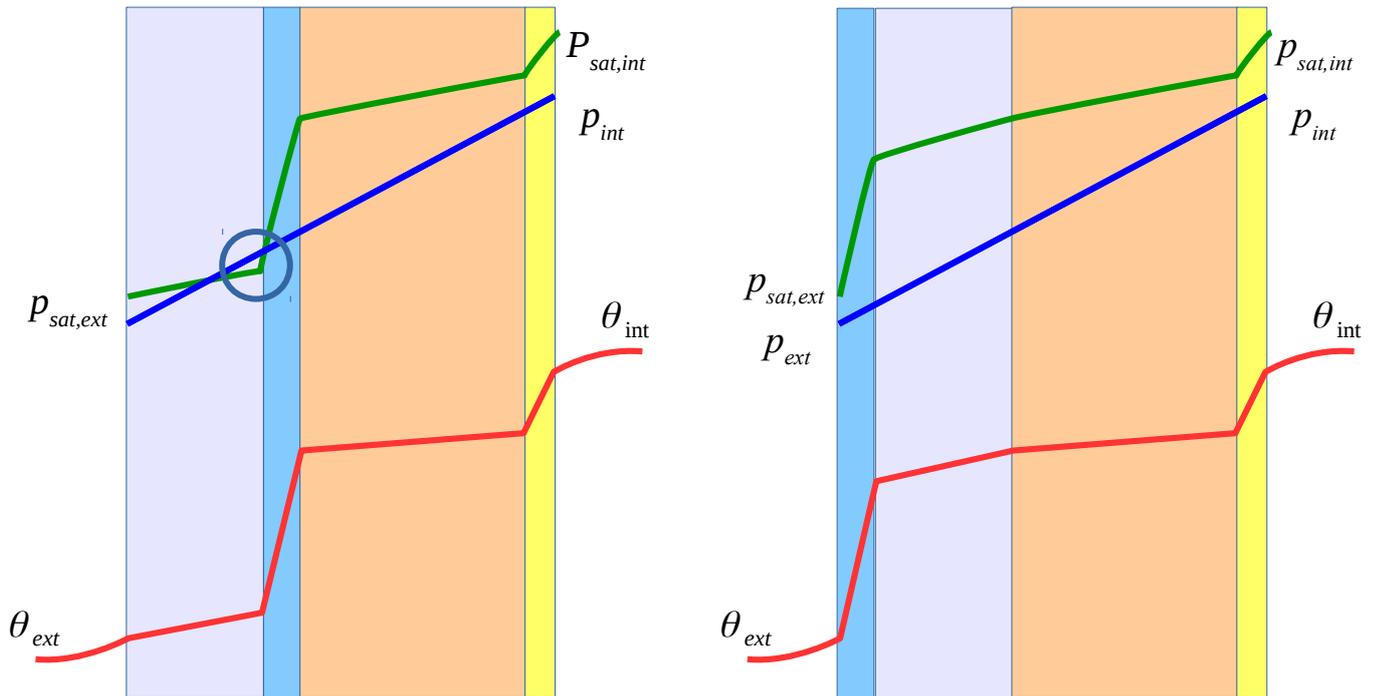
θ_c temperatura all'interfaccia di condensa

$s'_{d,c}$ spessore equivalente dall'esterno all'interfaccia di condensa



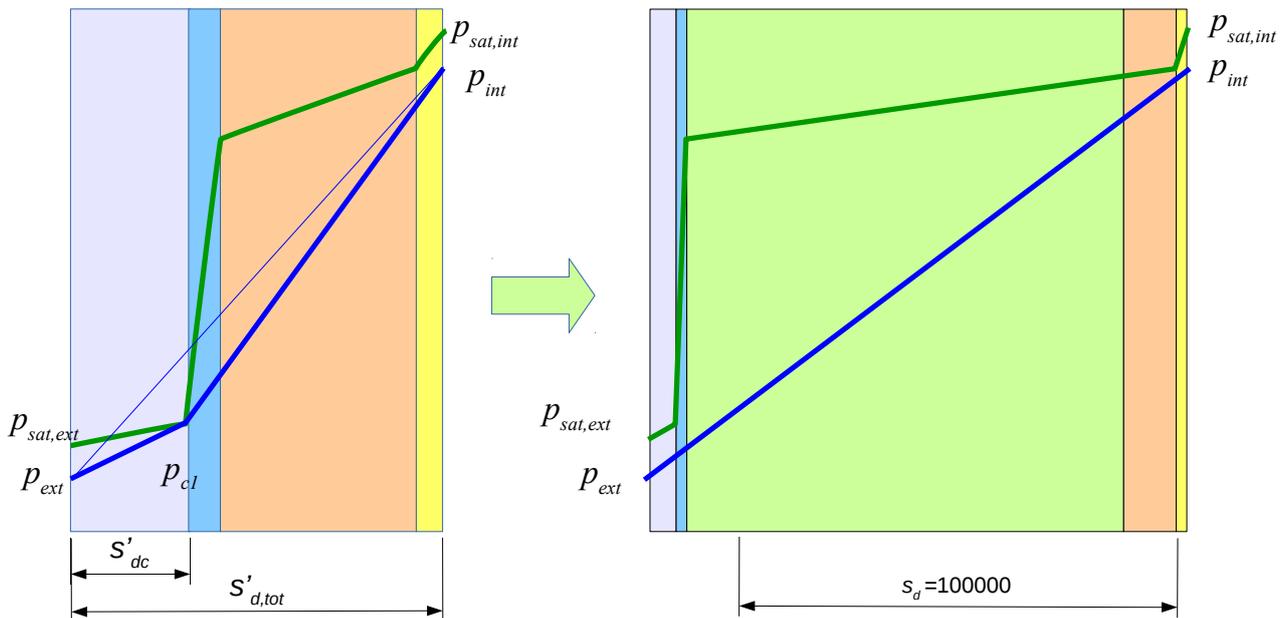
posizione strati di isolamento

il posizionamento dell'isolante all'esterno evita la condensa



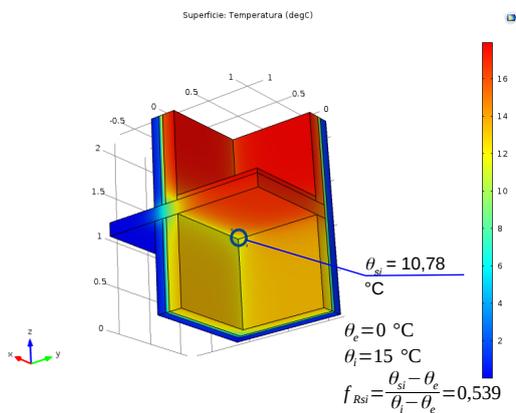
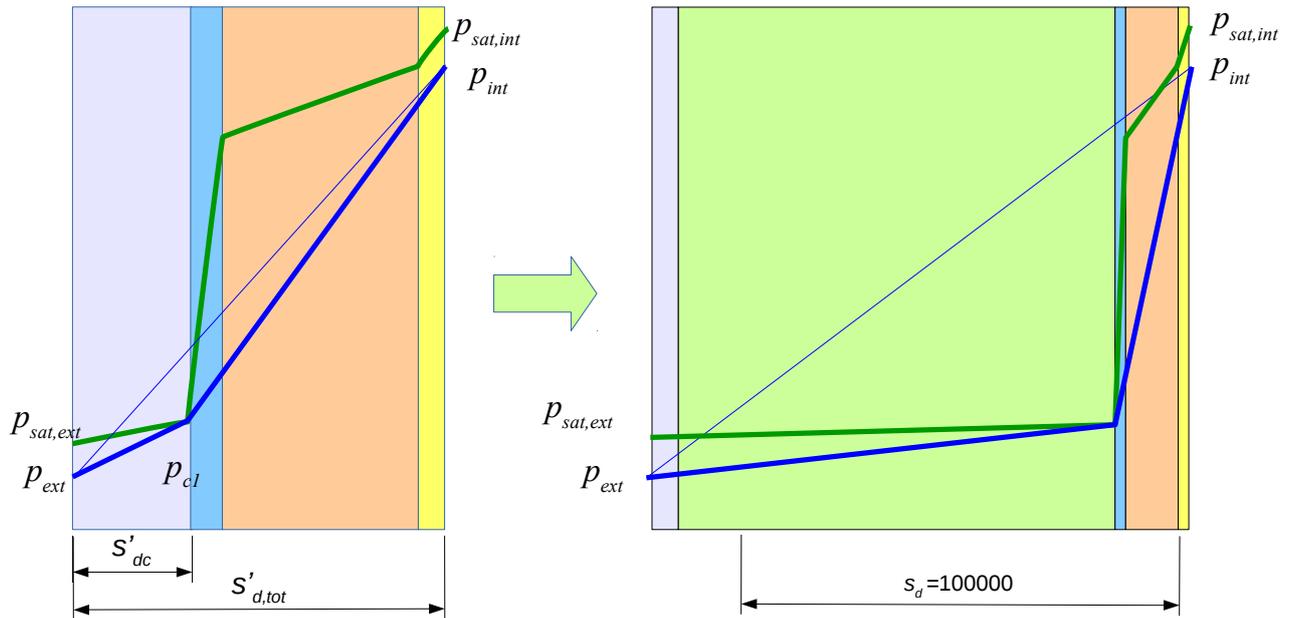
barriera al vapore

posizionamento dal lato caldo



barriera al vapore, installazione errata

posizionamento dal lato freddo



Grazie per
l'attenzione