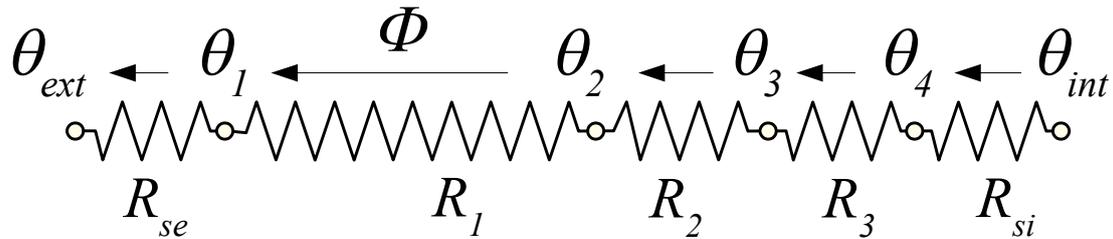




# Temperature alle interfacce



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

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

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

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



# Salti termici nella parete composta

## Temperature alle interfacce

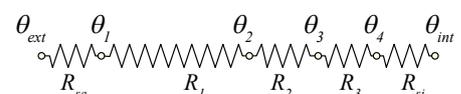
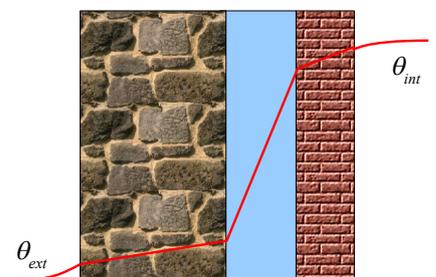
$$\theta_1 - \theta_{ext} = \frac{R_{se}}{R_{tot}} \cdot (\theta_{int} - \theta_{ext})$$

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

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

$N$  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 $\theta$

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

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

## legame tra $\theta$ 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

# Condizioni interne

Edifici residenziali

## temperatura

- $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  quando è in funzione l'impianto di riscaldamento
- $\theta_i = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  quando non è in funzione l'impianto di riscaldamento e  $\theta_e < 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\theta_i = \theta_e$  quando  $\theta_e \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$

## ricambi orari

$$n = 0,2 + 0,04 \theta_e \text{ [h}^{-1}\text{]} \quad \theta_e > 0 \text{ }^\circ\text{C}$$
$$n = 0,2 \quad \theta_e \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$n$  rinnovo aria

$\theta_e$  temperatura esterna media mensile

# Resistenze superficiali

## opache superficiali

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_{si} = 0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

## interstiziale e porte/finestre

Direzione flusso	Resistenza termica (m <sup>2</sup> K)/W
Verso l'alto	0,10
Orizzontale	0,13
Verso il basso	0,17

# Umidità

condizioni interne

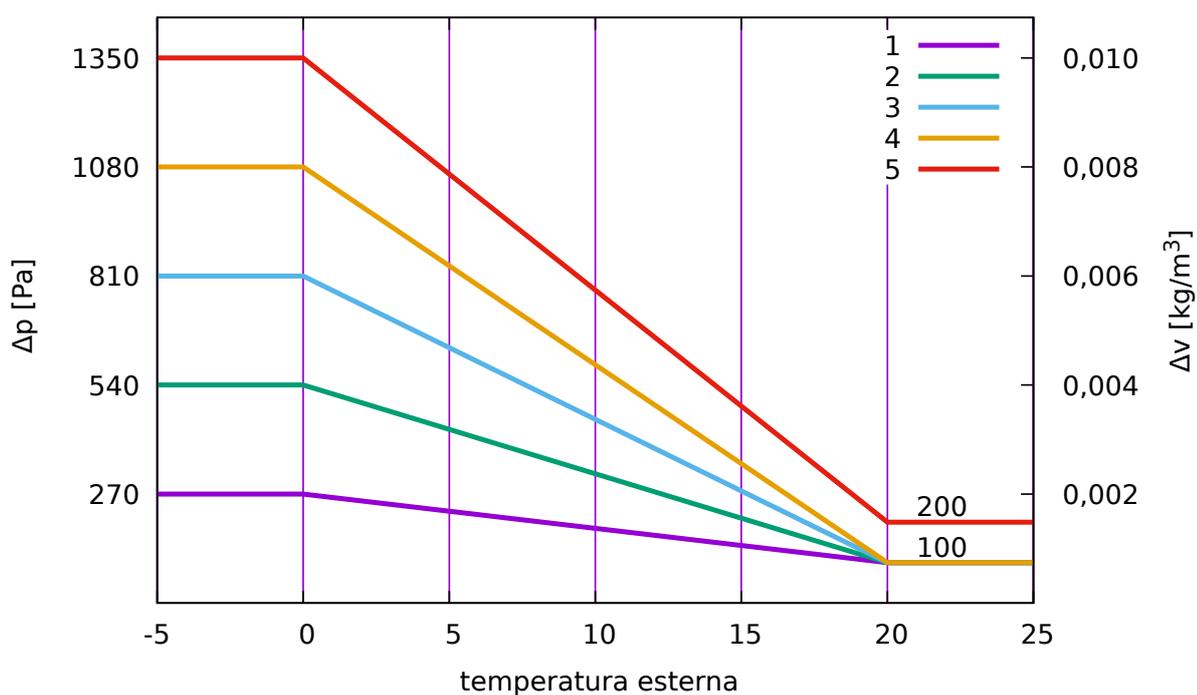
## classi di concentrazione

- 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  $\Delta v$  massa di vapore che  $\Delta p$  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

$\varphi$	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

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

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

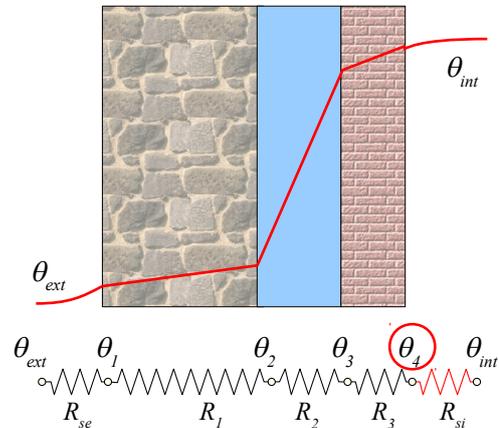
$$\theta_{si} = \theta_e + \frac{R_{tot} - R_{si}}{R_{tot}} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

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

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

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

- 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

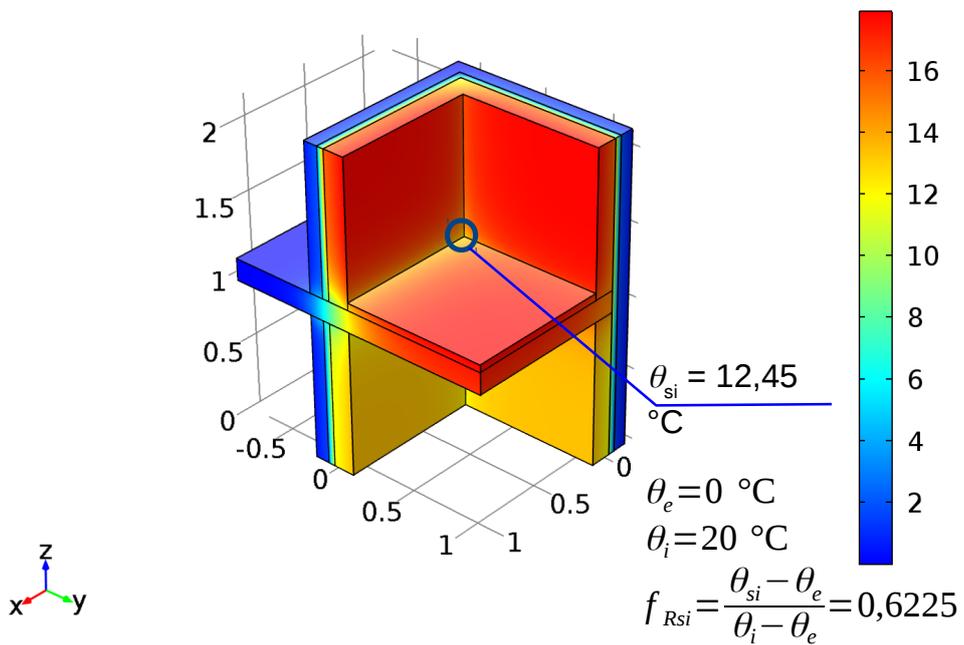
- il fattore di temperatura non dipende dalle condizioni climatiche
- il fattore di temperatura minimo dipende invece dalla temperatura
- il fattore  $f_{Rsi,min}$  non dipende dalla geometria, ma solo dalle temperature limite
- il fattore di temperatura può essere definito univocamente per i ponti termici



# Ponti Termici

angolo con balcone

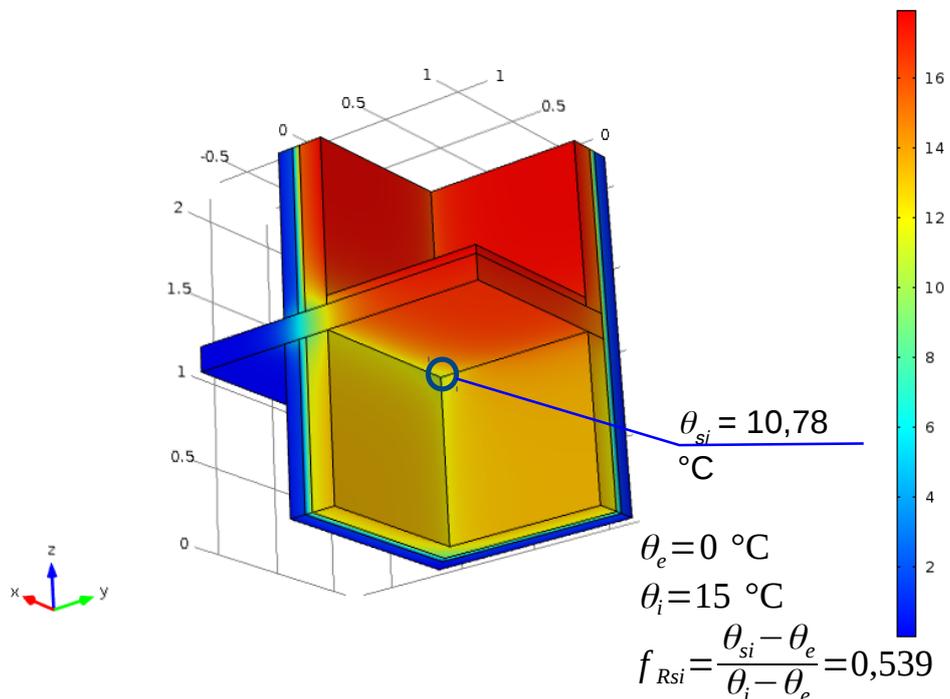
Superficie: Temperatura (degC)



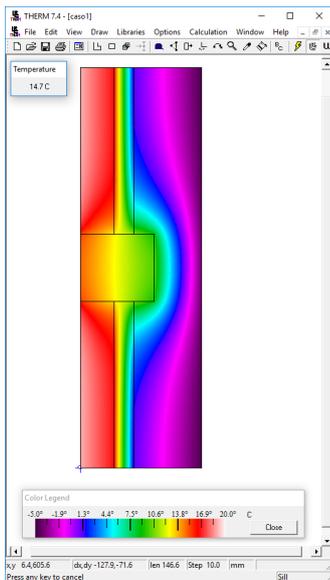
# Ponti Termici

angolo con balcone

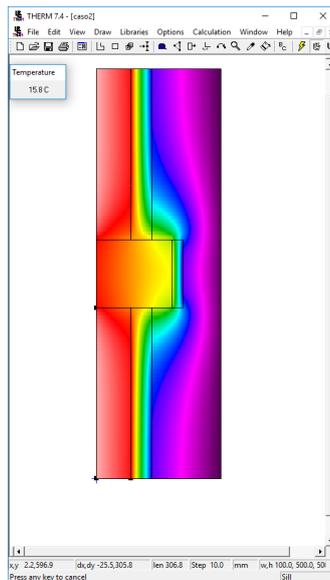
Superficie: Temperatura (degC)



# 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	$\lambda$	da ISO 10456 o
resistenza termica specifica	$R$	in accordo con ISO 10456
permeabilità al vapore	$\delta$	da UNI 10456 o
fattore di resistenza al vapore	$\mu$	in accordo con ISO 12572
spessore equivalente d'aria	$s_d$	

- $\lambda$  e  $\mu$  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

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

$\phi''$  flusso termico specifico

$\lambda$  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 [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]

$\delta$  permeabilità al vapore

$\Delta p$  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

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

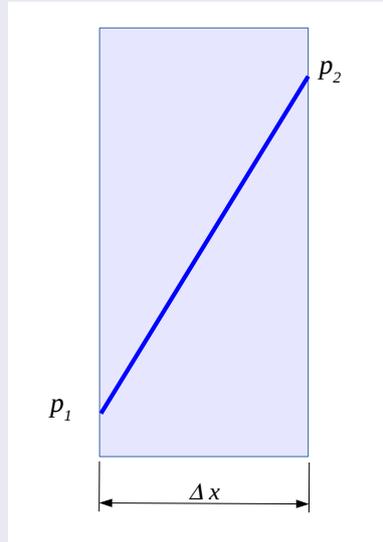
$$g = \frac{p_1 - p_2}{R_v} \quad R_v = \frac{\Delta x}{\delta}$$

$R_v$  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

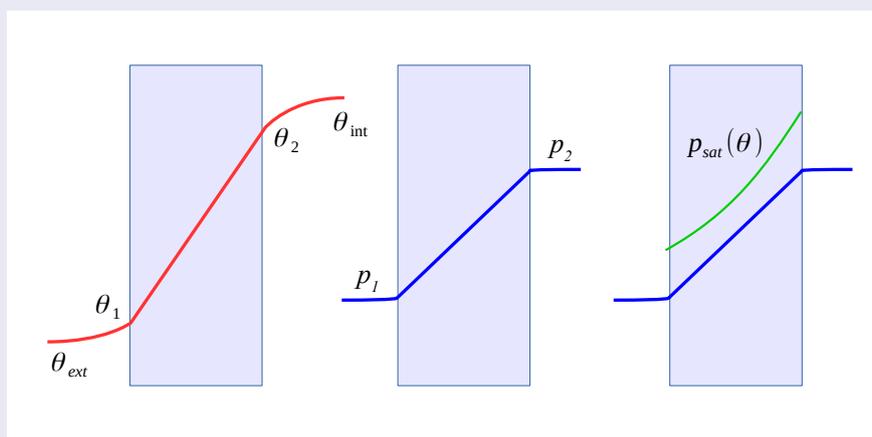
## andamento della pressione in uno strato omogeneo



# 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

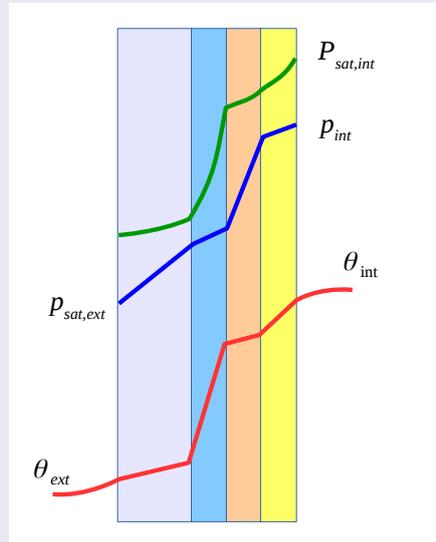
## Andamento della temperatura e della pressione di vapore



# 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

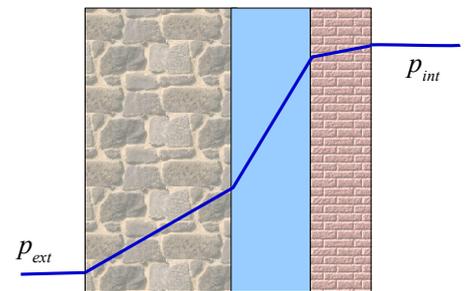
flusso di vapore

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

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

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

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

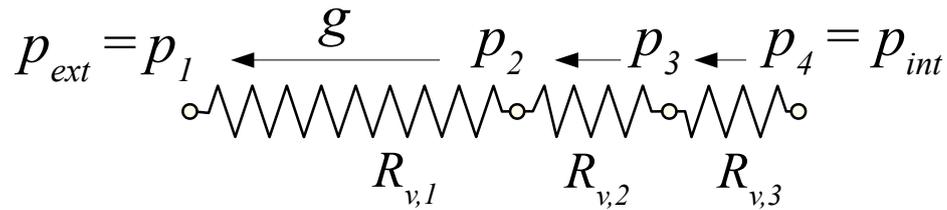


$$p_{ext} = p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 = p_{int}$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{R_{v1}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{R_{v2}} \quad \underbrace{\hspace{10em}}_{R_{v3}}$$

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

# 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

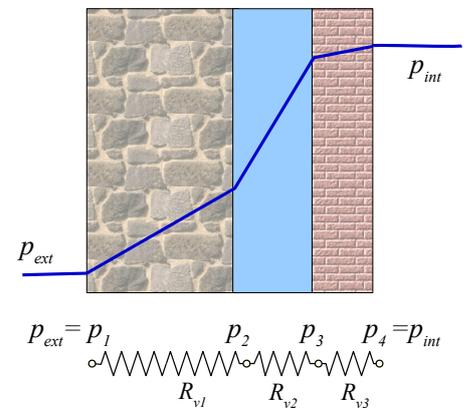
$$p_1 - p_{ext} = 0$$

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

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

$N$  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

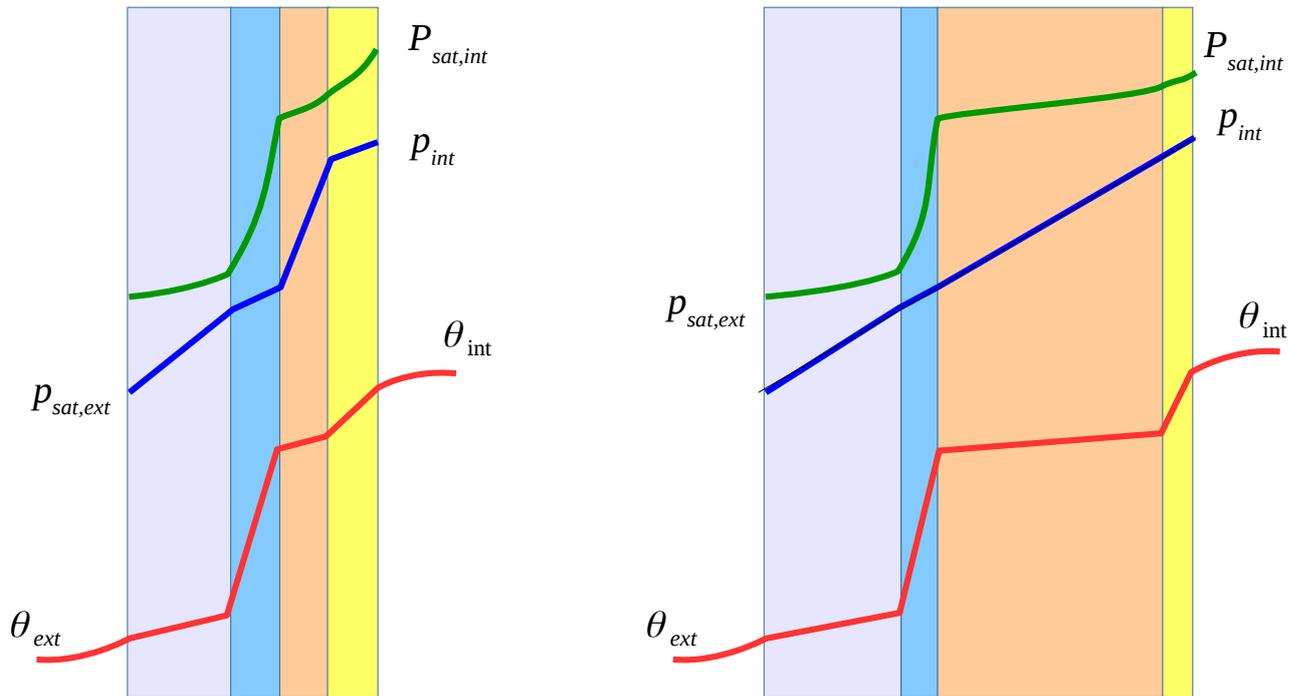
## Spessori equivalenti

- 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  $\theta$
- nel caso di strati ad elevata resistenza termica li si suddivide ulteriormente con strati di resistenza massima  $R = 0.25$  (m<sup>2</sup> · K)/W

# Spessori equivalenti

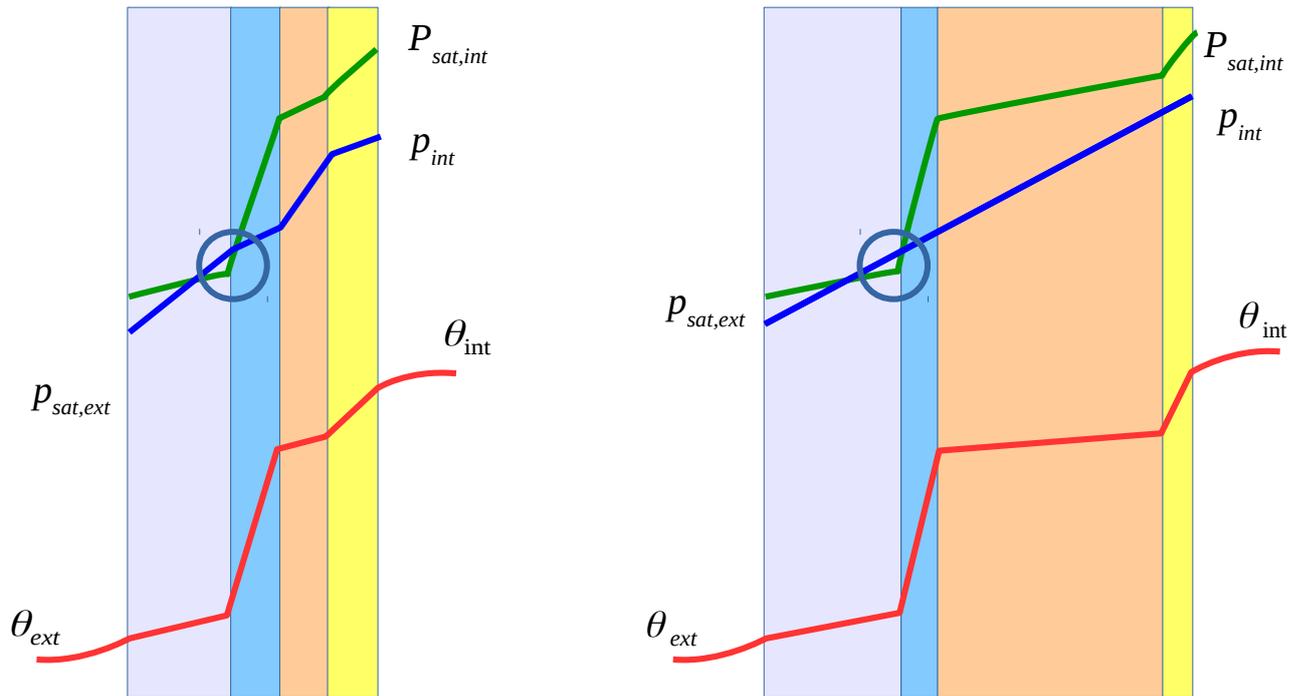


# Formazione di condensa

## 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

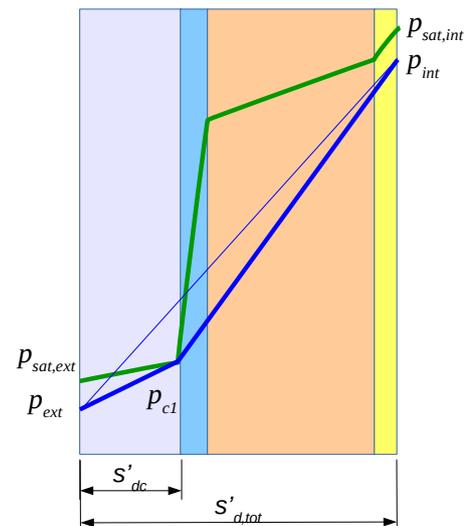
## Portata di vapore condensato

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

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

$\theta_c$  temperatura all'interfaccia di condensa

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



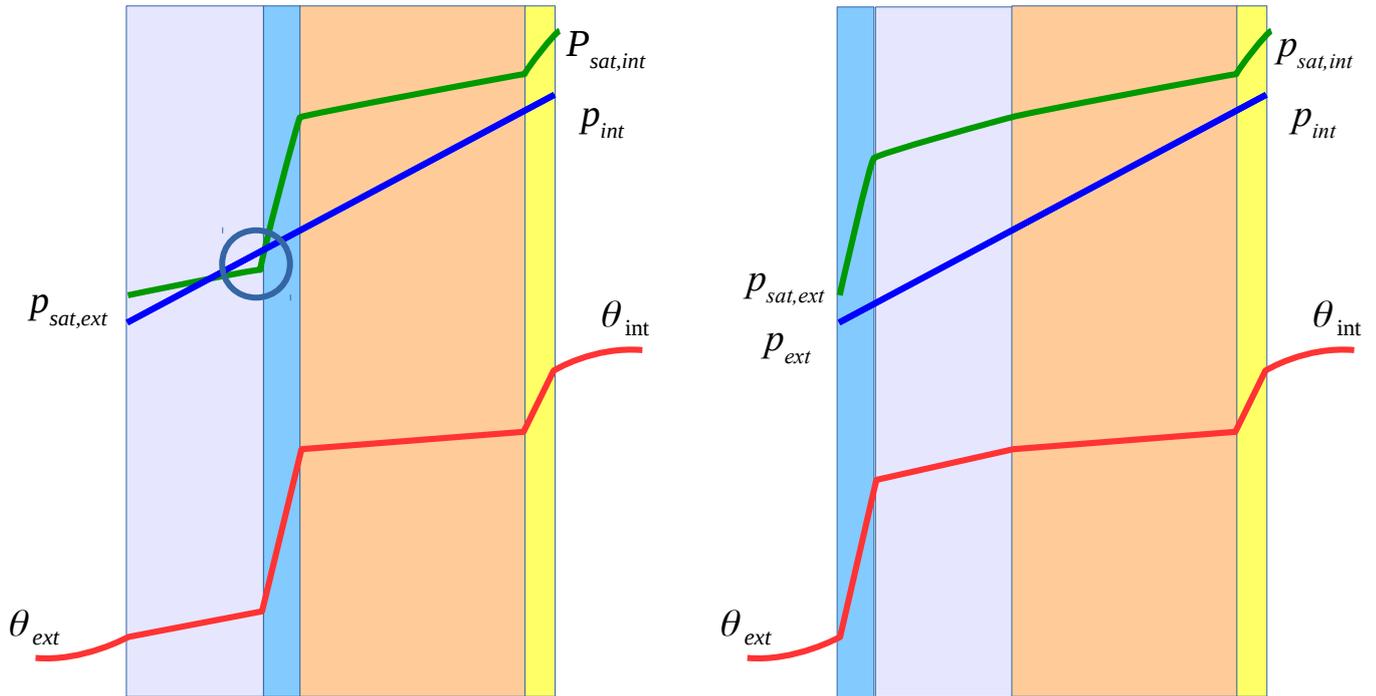






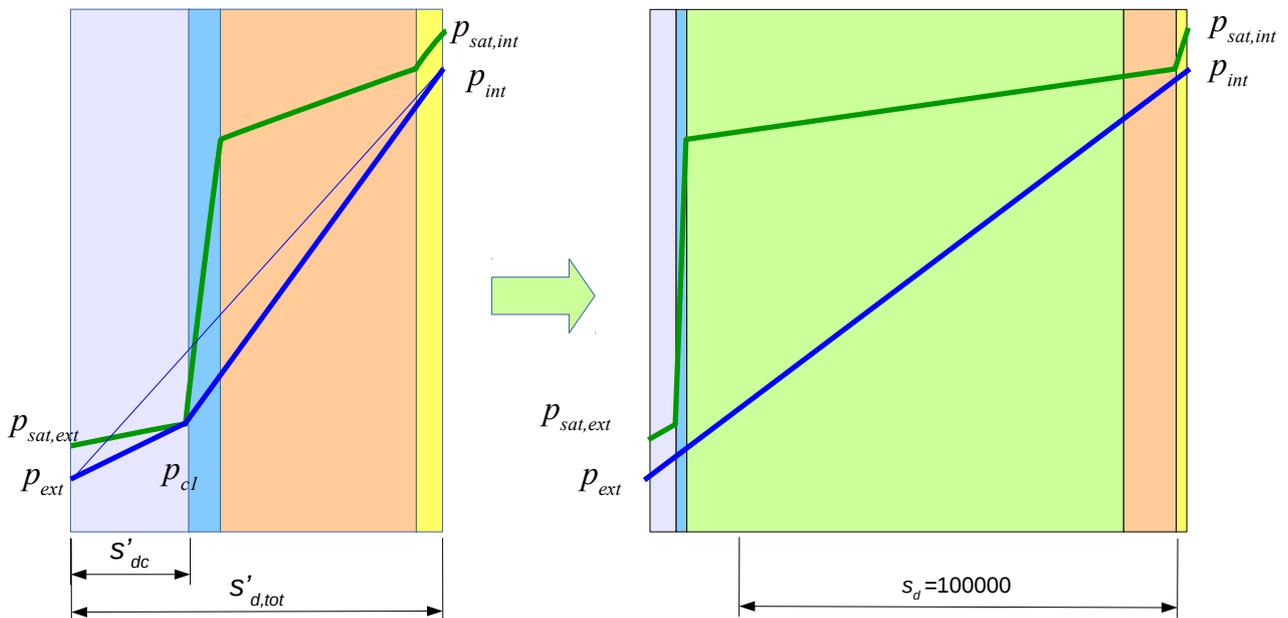
# posizione strati di isolamento

il posizionamento dell'isolante all'esterno evita la condensa



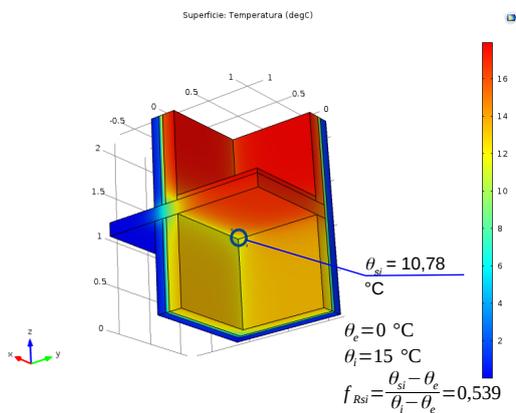
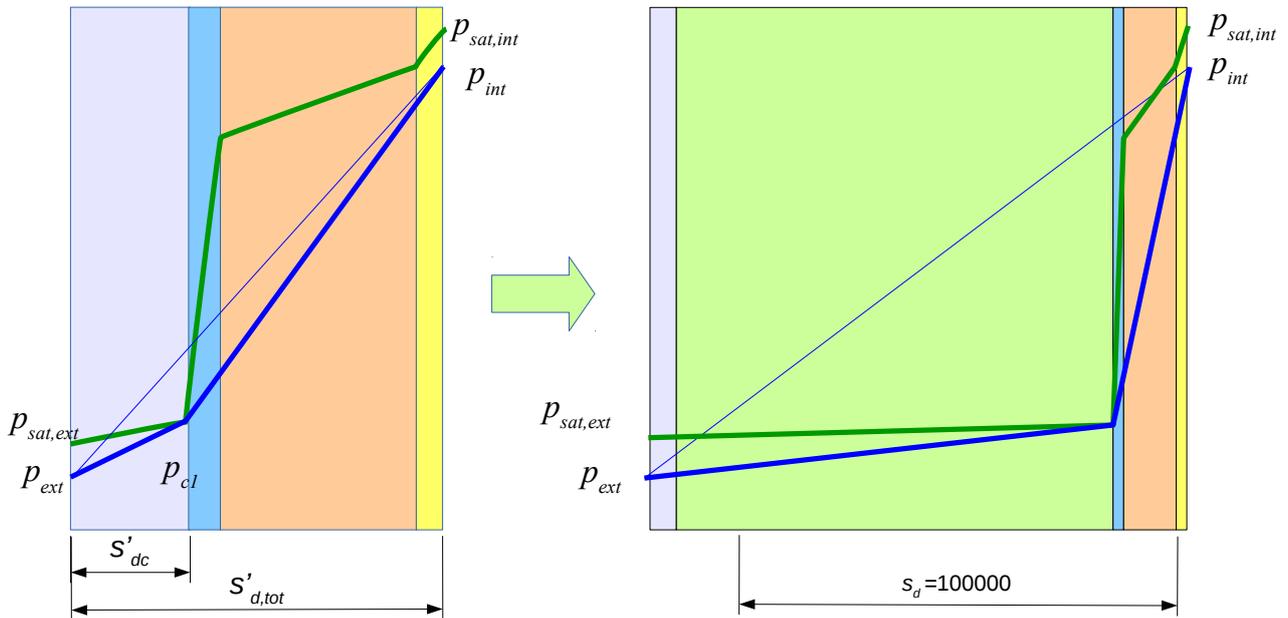
# barriera al vapore

posizionamento dal lato caldo



# barriera al vapore, installazione errata

posizionamento dal lato freddo



Grazie per  
l'attenzione