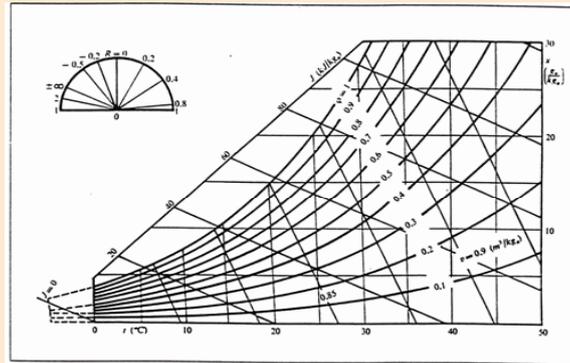


U.03A – Fenomeni di condensa



**CONDENSAZIONE
SUPERFICIALE**

MISCELE D'ARIA E VAPOR D'ACQUA: DEFINIZIONI

p_a pressione parziale dell'aria secca

p_v pressione parziale del vapore

p pressione totale della miscela:

$$p = p_a + p_v$$

m_a massa d'aria secca presente entro il volume V [kg_a/m^3]

m_v massa di vapore presente entro il volume V [kg_v/m^3]

x **umidità assoluta** (o umidità specifica o titolo) della miscela [kg_v/kg_a]:

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{18.0}{29.0} \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0.622 \cdot \frac{p_v}{p - p_v}$$

MISCELE D'ARIA E VAPOR D'ACQUA: DEFINIZIONI

p_s pressione parziale del vapor d'acqua in condizioni di **saturatione** [Pa]:

$$p_s = 610.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot t}{237.3 + t}\right) \quad \text{per } t \geq 0^\circ\text{C}$$

$$p_s = 610.5 \cdot \exp\left(\frac{21.875 \cdot t}{265.5 + t}\right) \quad \text{per } t < 0^\circ\text{C}$$

x_s **umidità assoluta** della miscela alla pressione totale p in condizioni di **saturatione** [kg_v/kg_a]:

$$x_s = 0.622 \cdot \frac{p_s}{p - p_s}$$

MISCELE D'ARIA E VAPOR D'ACQUA: DEFINIZIONI

φ (o *U.R.*) **umidità relativa** (o **grado igrometrico**): rapporto tra massa m_v di vapore contenuto entro il volume V e massa di vapore contenuto in V , alla stessa temperatura, in condizioni di saturazione, m_s :

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s} = \frac{\rho_v}{\rho_s} = \frac{p_v}{p_s}$$

Tra umidità assoluta e umidità relativa vale la relazione

$$x = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s}$$

grado di saturazione: rapporto tra umidità assoluta x della miscela ed x_s alla stessa temperatura ed alla stessa pressione totale della miscela:

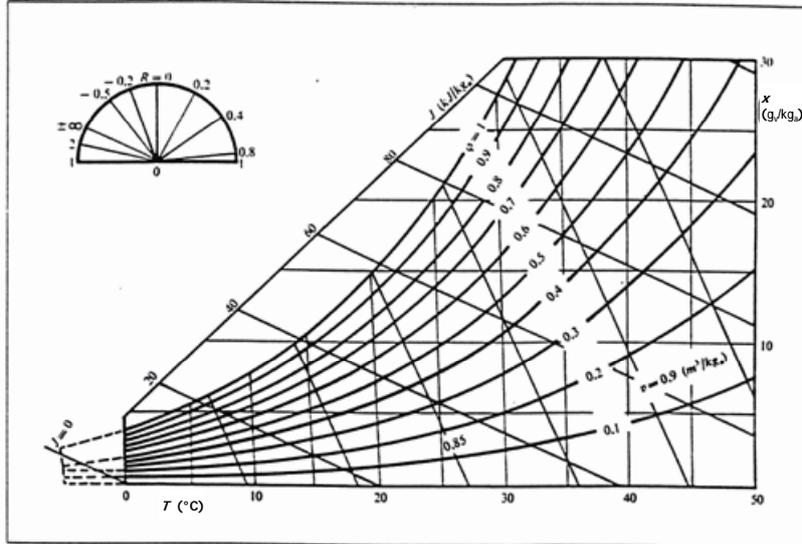
$$\psi = \frac{x}{x_s} = \varphi \cdot \frac{p - p_s}{p - \varphi \cdot p_s}$$

MISCELE D'ARIA E VAPOR D'ACQUA

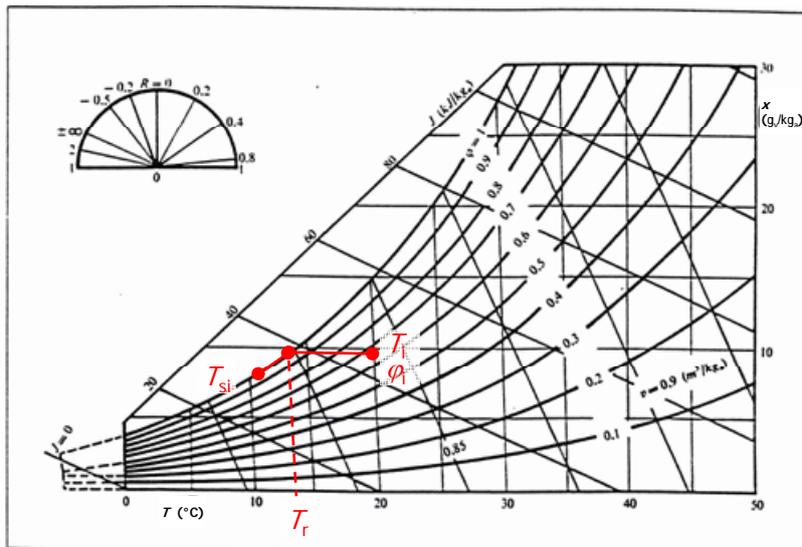
t (°C)	(mm Hg)	p_s (kPa)	x_s (g/kg _a)
-25	0,47	0,06	0,38
-20	0,77	0,10	0,63
-15	1,24	0,16	1,0
-10	1,94	0,26	1,6
- 5	3,01	0,40	2,5
0	4,58	0,61	3,8
5	6,5	0,87	5,4
10	9,2	1,23	7,6
15	12,8	1,70	10,6
20	17,5	2,34	14,7
25	23,8	3,17	20,0
30	31,8	4,24	27,2
35	42,2	5,62	36,6
40	55,3	7,37	48,8
45	71,9	9,58	65,0
50	92,5	12,33	86,2

($\varphi = 100\%$
 $p = 101.3 \text{ kPa}$)

DIAGRAMMA PSICROMETRICO



TEMPERATURA DI RUGIADA E CONDENSAZIONE SUPERFICIALE



CONDENSAZIONE SUPERFICIALE

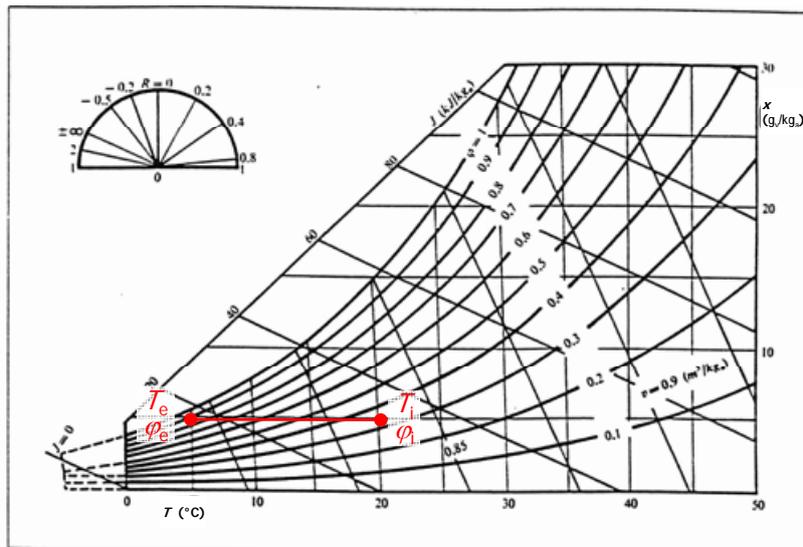
Si corre il rischio di **condensazione superficiale** tutte le volte che la temperatura di una superficie scende sotto la temperatura di rugiada (ad es. pari a circa 13°C con temperatura degli ambienti abitati pari a 20°C ed umidità relativa del 65% – valori di riferimento tipici).

Al manifestarsi della condensazione superficiale si accompagna solitamente, sulle superfici interne dei tamponamenti opachi, la formazione di **muffe**, con gravi rischi per la **salubrità dei locali** (e di contenzioso tra proprietario e costruttore).

In edifici di **vecchia costruzione**, con involucro sostanzialmente non isolato, il rischio di condensazione superficiale è solitamente mitigato dalla **bassa tenuta all'aria dei serramenti** (spifferi), che fa sì che negli ambienti abitati l'**umidità relativa sia spesso molto bassa** (intorno al 30÷40%).

La causa è nella **ridotta umidità assoluta dell'aria** che dall'ambiente esterno trafile negli ambienti abitati.

VENTILAZIONE E UMIDITA' RELATIVA



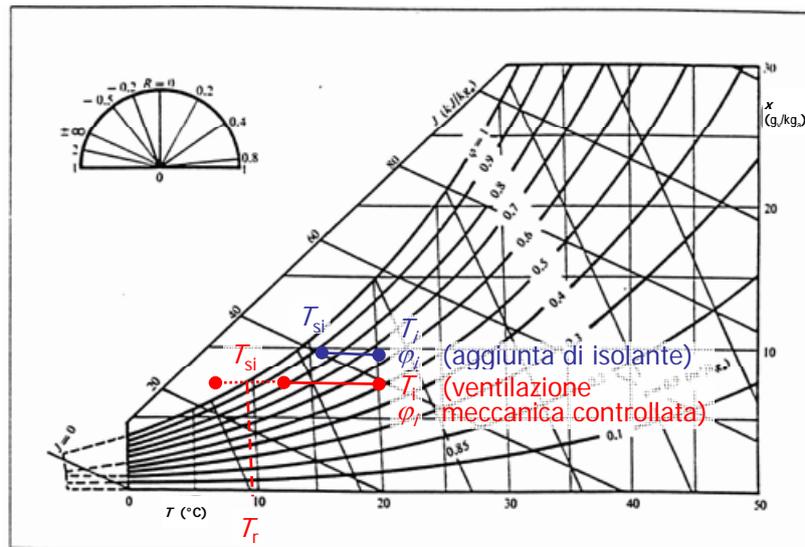
CONDENSAZIONE SUPERFICIALE

In edifici di vecchia costruzione, con involucro sostanzialmente non isolato, la condensazione superficiale tende a manifestarsi facilmente sulle superfici interne dei tamponamenti opachi in caso di sostituzione dei serramenti con nuovi serramenti a elevata tenuta dell'aria e/o di umidificazione invernale dei locali.

Rimedi possibili, meglio se attuati contestualmente: sono:

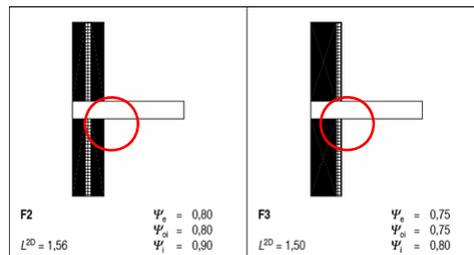
- la ventilazione meccanica controllata dei locali, finalizzata a limitare l'umidità relativa dei locali (ad es. al 50%, ma onerosa in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento, specie se non ben controllata e/o non associata al recupero di calore, e non sempre risolutiva)
- l'aggiunta di isolamento termico (efficace anche in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento, ma risolutiva solo in caso di intervento su tutti gli elementi dell'involucro a rischio)

CONDENSAZIONE SUPERFICIALE: RIDUZIONE DEL RISCHIO



CONDENSAZIONE SUPERFICIALE E PONTI TERMICI

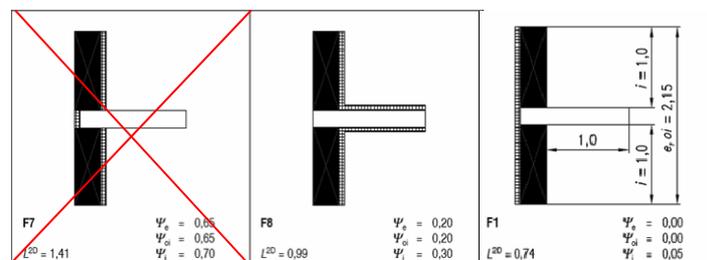
In edifici di nuova costruzione con involucro isolato, oppure quando viene aggiunto isolamento termico ai tamponamenti di un edificio di vecchia costruzione, la condensazione superficiale tende a manifestarsi facilmente sulle superfici interne più prossime agli eventuali ponti termici presenti (solai interpiano, solai passanti di balconi, ecc.), specialmente se si hanno serramenti ad elevata tenuta dell'aria.



CONDENSAZIONE SUPERFICIALE E PONTI TERMICI

Rimedi possibili, meglio se attuati contestualmente: sono:

- la ventilazione meccanica controllata dei locali, finalizzata a limitare l'umidità relativa dei locali (ad es. al 50%, ma onerosa in termini di fabbisogno energetico per riscaldamento, specie se non ben controllata e/o non associata al recupero di calore, e non sempre risolutiva)
- la correzione dei ponti termici (efficace anche in termini di fabbisogno energetico, ma risolutiva solo in caso di intervento ben congegnato)



CONDENSAZIONE
INTERSTIZIALE

DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA ATTRAVERSO LA PARETE

La potenza termica che attraversa tutta la parete attraversa anche i suoi singoli strati. Ciò consente, una volta calcolata la potenza termica per unità di superficie q'' [W/m²] che attraversa tutta la parete, caratterizzata da N strati omogenei e trasmittanza complessiva U [W/(m K)], la determinazione delle temperature alle interfacce tra i vari strati:

$$q'' = U \cdot \Delta T \equiv \frac{1}{R_{sf} + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \cdot (T_i - T_e)$$

In condizioni stazionarie, le temperature variano attraverso gli strati piani della parete in modo **lineare**.

$$T_{se} = T_e + R_{se} \cdot q''$$

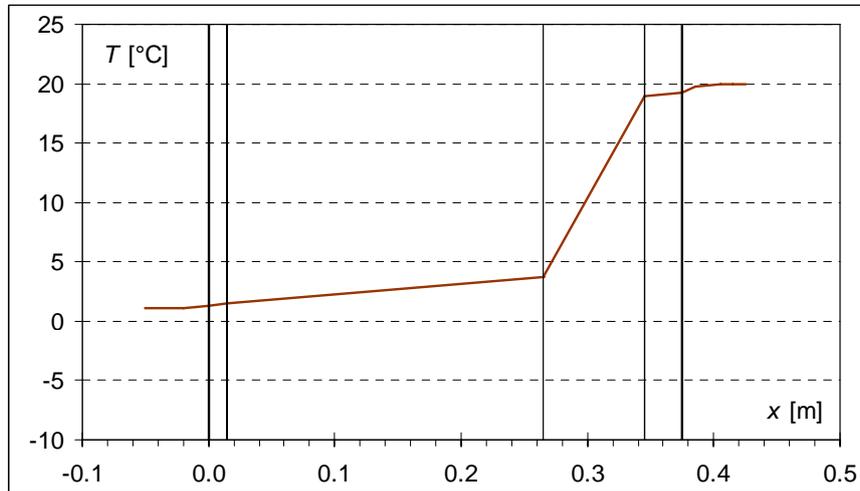
$$T_{12} = T_{se} + \frac{d_1}{\lambda_1} \cdot q''$$

$$T_{23} = T_{12} + \frac{d_2}{\lambda_2} \cdot q''$$

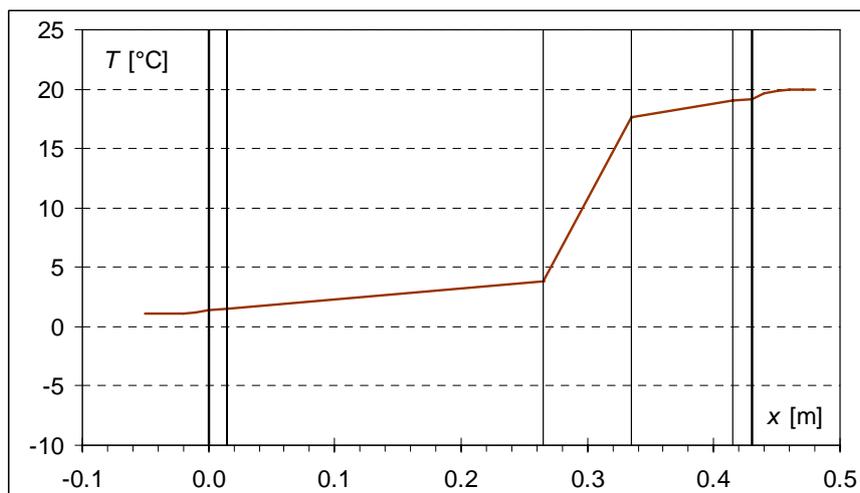
...

$$T_{si} = T_{(N-1)N} + \frac{d_N}{\lambda_N} \cdot q'' \equiv T_i - R_{si} \cdot q''$$

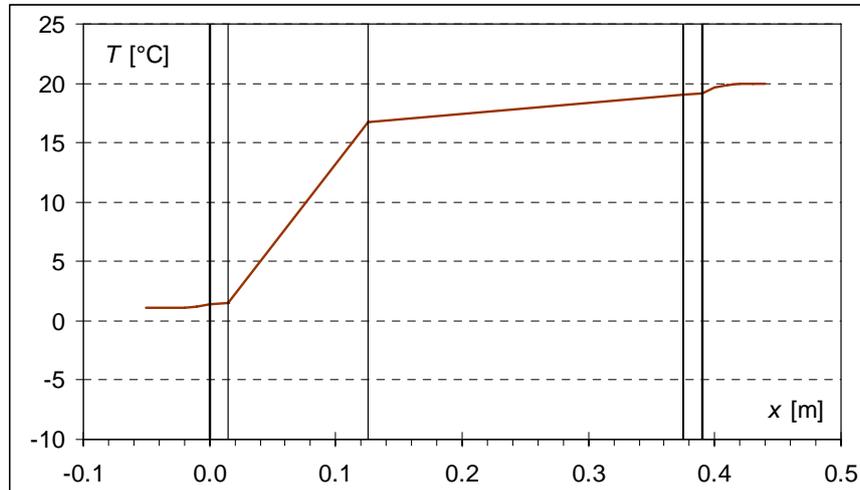
DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA: ISOLAMENTO INTERNO



DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA: ISOLAMENTO INTERMEDIO



DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA: ISOLAMENTO ESTERNO



CONDENSA INTERSTIZIALE: FLUSSO DI VAPORE

Legge di Fick sul trasporto di massa:

$$\Phi = -\pi \cdot A \cdot \frac{dp}{dx}$$

ove

Φ flusso di massa [kg/s]

π (o δ) permeabilità al vapor d'acqua del materiale (proprietà fisica) [kg/(m s Pa)]

$$\Phi = \Pi \cdot A \cdot \Delta p$$

Parete multistrato (N strati omogenei):

$$\Pi = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\pi_i}}$$

ove

Π permeanza della parete [kg/(m²s Pa)]

ANALOGIA FLUSSO TERMICO / FLUSSO DI MASSA

Come in trasmissione del calore (legge di Fourier)

$$\Delta T = \frac{d}{\lambda \cdot A} \cdot Q' \Leftrightarrow Q' = \frac{\lambda \cdot A}{d} \cdot \Delta T \Rightarrow Q' = U \cdot A \cdot \Delta T$$

così nel flusso di massa (legge di Fick)

$$\Delta p = \frac{d}{\pi \cdot A} \cdot \Phi \Leftrightarrow \Phi = \frac{\pi \cdot A}{d} \cdot \Delta p = \Pi \cdot A \cdot \Delta p \Rightarrow \Phi = \Pi \cdot A \cdot \Delta p$$

Corrispondenze:

$$\Delta T \leftrightarrow \Delta p, \quad \lambda \leftrightarrow \pi (\delta), \quad Q' \leftrightarrow \Phi, \quad U \cdot A \leftrightarrow \Pi \cdot A$$

PERMEABILITA' AL VAPOR D'ACQUA

Per verificare il rischio di condensa interstiziale di vapore d'acqua nelle strutture edilizie è necessario conoscere (da specifiche di prodotto o, in subordine, da norme come la UNI 10351 oppure la UNI EN 12524) la **permeabilità al vapore d'acqua** dei vari materiali che costituiscono la parete in esame.

In molti casi l'informazione è resa in forma adimensionale, in termini di rapporto μ tra la permeabilità al vapore d'acqua nell'aria in quiete π_a e la permeabilità al vapore d'acqua π del materiale considerato:

$$\mu = \frac{\pi_a}{\pi} \Leftrightarrow \pi = \frac{\pi_a}{\mu}$$

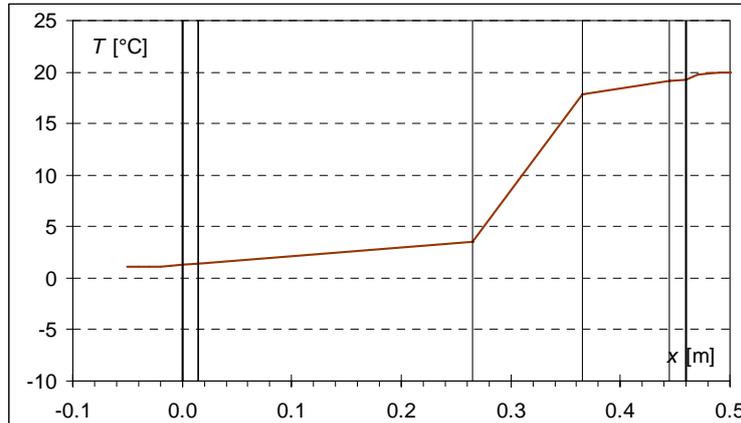
ove $\pi_a = 193 \cdot 10^{-12} \text{ kg}/(\text{m s Pa})$ a 20°C.

Se la permeabilità è data a campo asciutto (simbolo π_d oppure δ_d , $0 < \varphi < 50\%$) e a campo umido (simbolo π_u o δ_u , $50 \leq \varphi \leq 95\%$), nelle verifiche si usa π_d .

Quando è dato un **intervallo di variabilità**, è consigliato utilizzare i **valori minimi per il lato interno** (caldo) e i **valori massimi per il lato esterno** (freddo).

CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: DIAGRAMMA DI GLASER

1. Calcolo delle temperature ad ogni interfaccia, sulla base della temperatura esterna (UNI 10349, valore medio mensile):



CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: DIAGRAMMA DI GLASER

2. Calcolo (da formule o tabelle) delle pressioni di saturazione del vapor d'acqua corrispondenti alle temperature di interfaccia di cui al passo 1:

$$p_s = 610.5 \cdot \exp\left(\frac{17.269 \cdot T}{237.3 + T}\right) \quad T \geq 0^\circ C$$

$$p_s = 610.5 \cdot \exp\left(\frac{21.875 \cdot T}{265.5 + T}\right) \quad T < 0^\circ C$$

ove

p_s pressione parziale del vapor d'acqua in condizioni di saturazione [Pa]

T temperatura [°C]

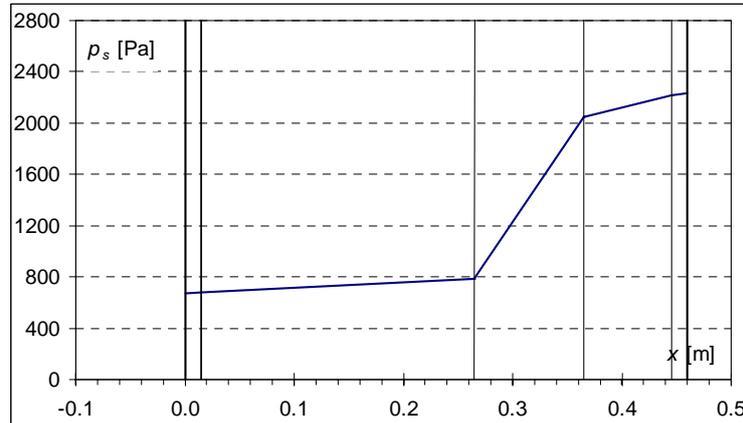
φ umidità relativa [%]

p_v pressione parziale del vapor d'acqua in aria [Pa]

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} \Leftrightarrow p_v = \varphi \cdot p_s$$

CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: DIAGRAMMA DI GLASER

2. Calcolo (da formule o tabelle) delle pressioni di saturazione del vapore d'acqua corrispondenti alle temperature di interfaccia di cui al passo 1:



CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: DIAGRAMMA DI GLASER

3. Determinazione della **pressione di vapore all'interfaccia aria esterna/parete**, $p_{v,e}$ [Pa] (da UNI 10349, valore medio mensile):

Modena					
Mese	T_e [°C]	$p_{v,e}$ [Pa]	Mese	T_e [°C]	$p_{v,e}$ [Pa]
Gennaio	1.4	570	Luglio	24.3	1989
Febbraio	3.5	628	Agosto	23.8	1979
Marzo	8.6	820	Settembre	20.1	1756
Aprile	13.3	1106	Ottobre	14.0	1265
Maggio	17.2	1395	Novembre	8.1	928
Giugno	21.8	1841	Dicembre	3.1	654

4. Calcolo della **pressione di vapore all'interfaccia parete/aria interna**, $p_{v,i}$ [Pa]:

$$p_{v,i} = \varphi_i \cdot p_s(T_i)$$

CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: DIAGRAMMA DI GLASER

5. Reperimento della permeabilità dei vari materiali costituenti la parete, indi calcolo della permeanza della parete e, infine, del **flusso di vapore**:

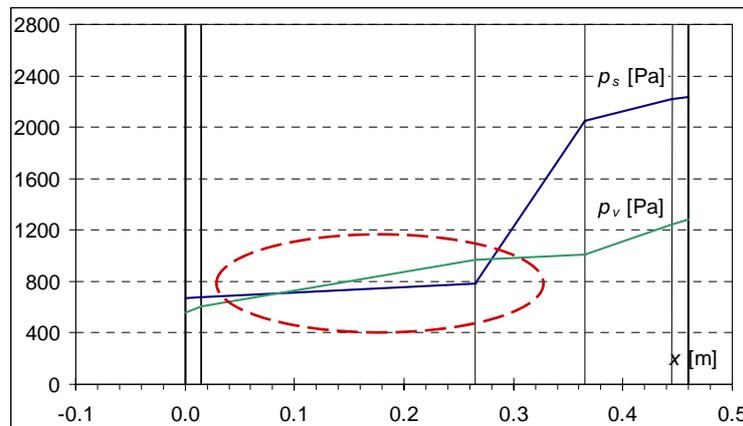
$$\Pi = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\pi_i}} \quad \Phi = \Pi \cdot A \cdot \Delta p$$

6. Calcolo, mediante la legge di Fick, della pressione di vapore ad ogni interfaccia interna alla parete, assumendo uniforme e stazionario il flusso di vapore:

$$\Delta p_i = \frac{s_i}{\pi_i} \cdot \frac{\Phi}{A}$$

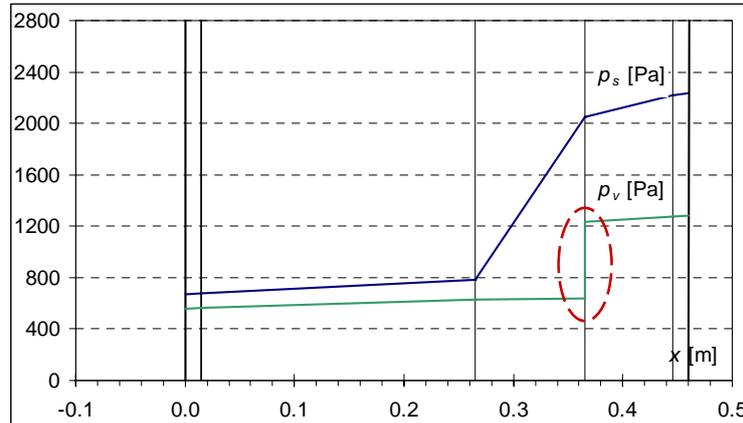
CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: VERIFICA

Caso di studio 1/A: gennaio, parete verticale con semipieno 25 cm, **lana di roccia** [$d=10$ cm $\pi_g=150 \cdot 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa), $\lambda=0.04$ W/(m·K)], tramezza 8 cm



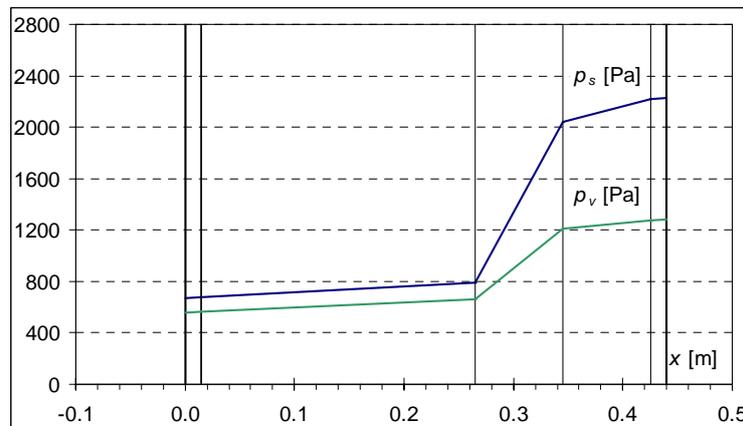
CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: VERIFICA

Caso di studio 1/B: introduzione di barriera al vapore in polietilene [$d=0.3$ mm, $\mu=40 \cdot 10^{-3}$]



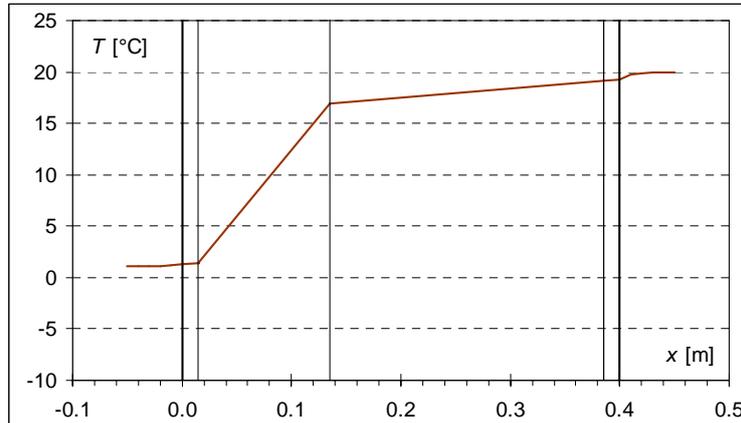
CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: VERIFICA

Caso di studio 1/C: sostituzione strato termoisolante con poliuretano [$d=8$ cm, $\pi_g=1 \div 2 \cdot 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa), $\lambda=0.032$ W/(m·K)]



CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: VERIFICA

Caso di studio 2/A: gennaio, parete verticale con semipieno 25 cm, cappotto esterno in pannelli ($d=12$ cm, $\pi_a=150 \cdot 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa), $\lambda=0.046$ W/(m·K)) – profilo della temperatura



CONDENSAZIONE INTERSTIZIALE: VERIFICA

Caso di studio 2/A: gennaio, parete verticale con semipieno 25 cm, cappotto esterno in pannelli ($d=12$ cm, $\pi_a=150 \cdot 10^{-12}$ kg/(m·s·Pa), $\lambda=0.046$ W/(m·K)) - profilo delle pressioni di vapore

