

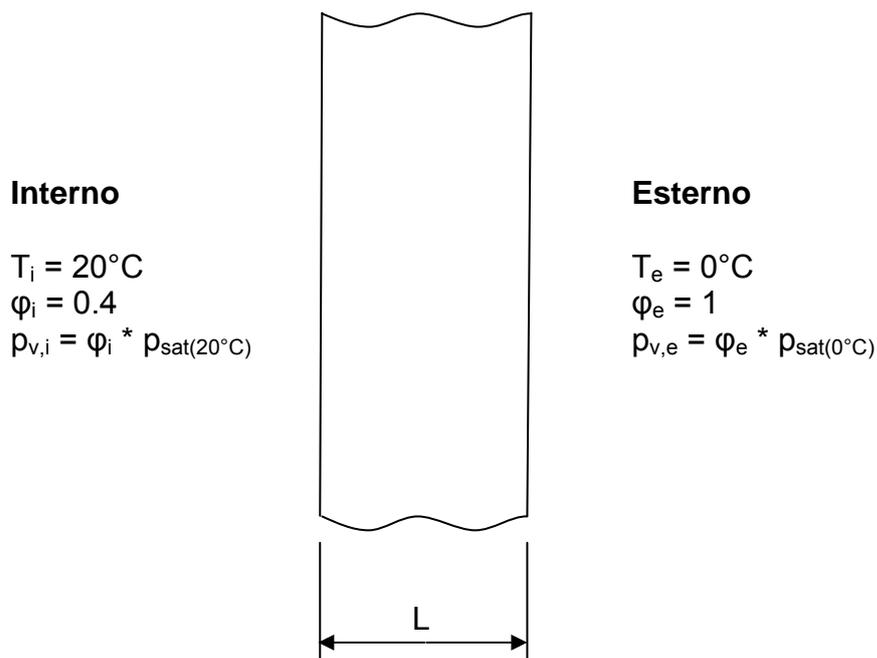
Indice

Diagramma di Glaser..... 1  
 Parete omogenea sottoposta a differenze termiche e diffusione ..... 1  
 Diagramma di Glaser per parete omogenea ..... 4  
 Diagramma di Glaser per parete multistrato ..... 5  
 Esercizio (costruzione diagramma di Glaser per parete frigorifera) ..... 9

## Diagramma di Glaser

### ***Parete omogenea sottoposta a differenze termiche e diffusione***

Consideriamo due ambienti, interno ed esterno rispettivamente, a diverse condizioni di temperatura  $T$ , umidità (espressa in termini di grado igrometrico  $\phi$ ) e pressione  $p_v$  del vapore d'acqua in essi contenuto (valutabile come prodotto del grado igrometrico  $\phi$  per la pressione di saturazione  $p_{sat}$  dell'acqua a quella temperatura); tali ambienti sono separati da una parete omogenea di spessore  $L$ .

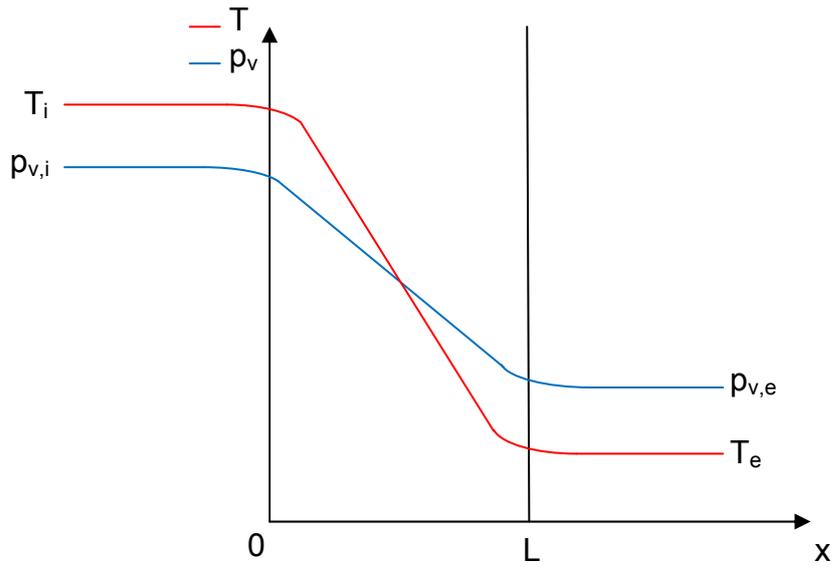


Di fronte ad una situazione del genere è facile pensare che l'umidità esterna tenda a diffondere, attraverso la parete, all'interno; in realtà avviene esattamente il contrario, in quanto la  $p_{sat}$  dell'acqua a  $20^\circ\text{C}$  è notevolmente superiore alla  $p_{sat}$  dell'acqua a  $0^\circ\text{C}$  (rispettivamente 2.334 kPa e 0.611 kPa), così come il prodotto  $\phi_i * p_{sat}(20^\circ\text{C}) (= p_{v,i})$  è maggiore del prodotto  $\phi_e * p_{sat}(0^\circ\text{C}) (= p_{v,e})$ .

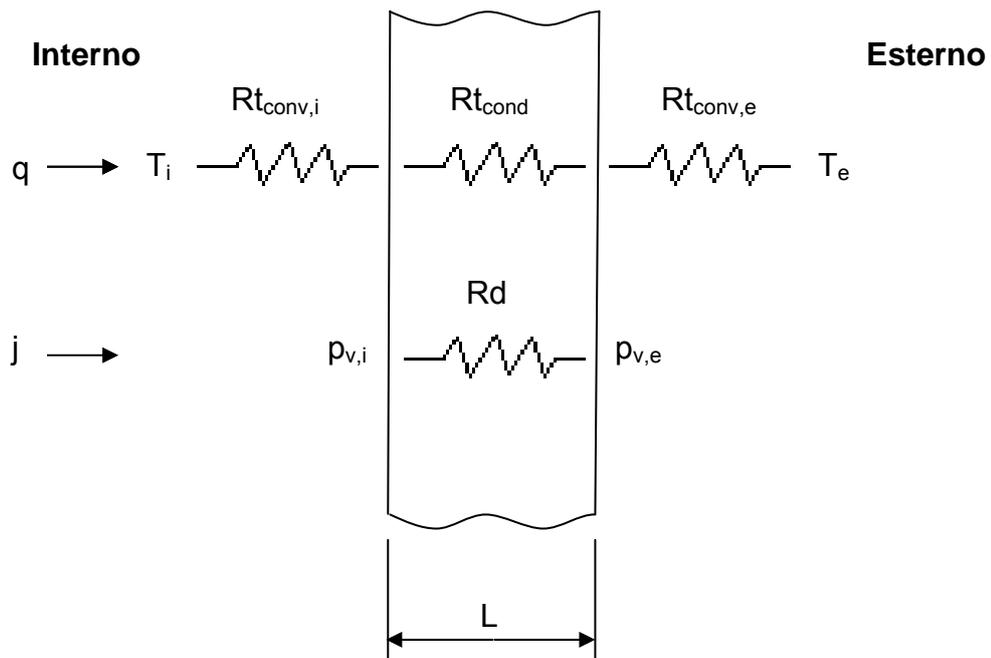
Il flusso di vapore d'acqua avviene quindi dall'interno verso l'esterno, così come il calore, motivo per cui l'applicazione di spessi strati di intonaci

isolanti sulle facciate esterne di pareti omogenee sarebbe inutile; se poi le pareti fossero multistrato gli isolamenti esterni sarebbero anche dannosi perchè non permetterebbero all'umidità di uscire dagli ambienti chiusi portando al problema della condensa interstiziale di cui si parlerà a breve: un errore, questo, tanto grossolano quanto diffuso ancora oggi nella normale pratica costruttiva edilizia.

Gli andamenti di temperatura  $T$  e pressione del vapore d'acqua  $p_v$  all'interno della parete sono quindi i seguenti:



Considerando la solita parete omogenea, vediamo ora quali resistenze incontrano il calore e il vapore nel passaggio da ambiente interno ad esterno.



Il calore, espresso in termini di densità di densità di flusso termico  $q$ , incontra tre resistenze in serie:

- la resistenza termica di convezione interna  $Rt_{conv,i}$ ;
- la resistenza termica di conduzione  $Rt_{cond}$ ;
- la resistenza termica di convezione esterna  $Rt_{conv,e}$ .

Le due resistenze di convezione sono espresse in funzione dei relativi coefficienti di convezione, interno  $h_i$  ed esterno  $h_e$ , di valori fissati per legge:

$$Rt_{conv,i} = \frac{1}{h_i}, \text{ con } h_i = 8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Rt_{conv,e} = \frac{1}{h_e}, \text{ con } h_e = 20 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

La resistenza di conduzione è invece espressa in funzione della conducibilità termica  $\lambda$  del materiale e dello spessore  $L$  di parete:

$$Rt_{cond} = \frac{L}{\lambda}$$

La resistenza termica totale  $Rt_{tot}$  è quindi data da:

$$Rt_{tot} = Rt_{conv,i} + Rt_{cond} + Rt_{conv,e}$$

La densità di flusso termico  $q$  è quindi esprimibile utilizzando l'analogia elettrica nota dall'ultima lezione:

$$q = \frac{\Delta T}{Rt_{tot}} = \frac{T_i - T_e}{Rt_{conv,i} + Rt_{cond} + Rt_{conv,e}} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

Il vapore d'acqua, espresso in termini di portata massica diffusiva per unità di superficie  $j$ , incontra di fatto soltanto la resistenza diffusiva  $Rd$  interna alla parete, espressa in funzione dello spessore  $L$  e della permeabilità  $\mathcal{D}_{AB}$ :

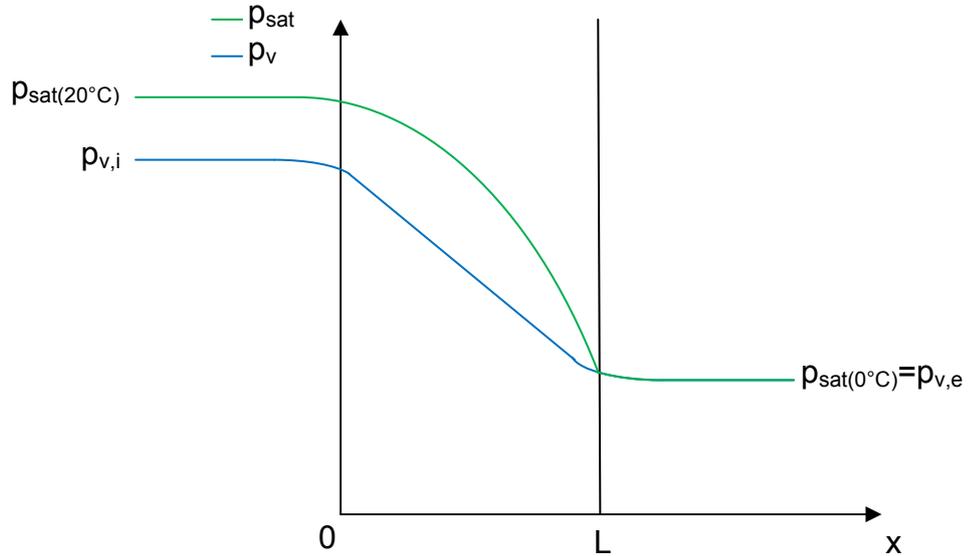
$$Rd = \frac{L}{\mathcal{D}_{AB}}$$

Le resistenze convettive interne ed esterne alla parete (rispettivamente date da  $1/h_{mi}$  e  $1/h_{me}$ , dove  $h_{mi}$  e  $h_{me}$  sono i coefficienti di convezione diffusiva o di trasporto materia interno ed esterno) sono infatti trascurabili, in quanto risultano inferiori a  $Rd$  di circa 3 ordini di grandezza; pertanto, in base alla solita analogia elettrica, la portata di vapore  $j$  è definita come segue:

$$j = \frac{\Delta p}{Rd} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{\frac{L}{\mathcal{D}_{AB}}}$$

### **Diagramma di Glaser per parete omogenea**

Il diagramma di Glaser rappresenta gli andamenti delle pressioni di vapore  $p_v$  e di saturazione  $p_{sat}$  dell'acqua all'interno di una parete sottoposta a differenze termiche e diffusione; l'andamento delle  $p_{sat}$  si ottiene da quello delle  $T$ , essendo  $p_{sat} = f(T)$ , per cui il diagramma riferito alla solita parete omogenea è il seguente:



Si noti che nell'ipotesi adottata di grado igrometrico esterno  $\varphi_e = 1$   $p_{sat}(0^\circ\text{C}) = p_{v,e}$ .

Il diagramma di Glaser per una parete omogenea è puramente dimostrativo, mentre risulta essere molto più utile ai fini pratici se riferito ad una parete multistrato come quelle normalmente impiegate nella normale pratica costruttiva edilizia.

### **Diagramma di Glaser per parete multistrato**

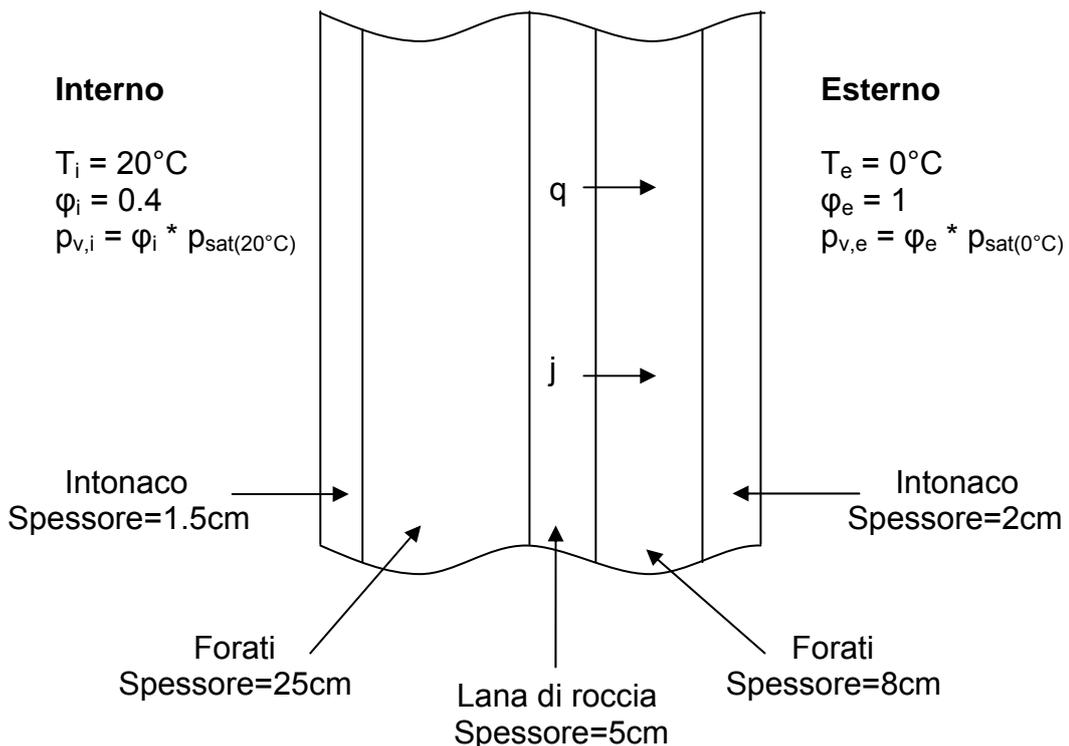
Le pareti multistrato possono essere interessate dal problema della condensa interstiziale: si tratta del fenomeno per cui in una certa porzione di spessore della parete la portata massica diffusiva di vapore entrante  $j_{in}$  supera la portata massica diffusiva di vapore uscente  $j_{out}$ , come conseguenza del fatto che in questa stessa porzione di spessore la pressione di vapore  $p_v$  supera la pressione di saturazione  $p_{sat}$  dell'acqua.

Il risultato è un accumulo di vapore che condenserà in questa zona interna alla parete, portando la struttura ad un veloce ed inevitabile degrado.

Il problema potrebbe essere particolarmente grave nelle pareti delle celle frigorifere, in cui in seguito alla condensazione del vapore d'acqua si avrebbe anche la sua successiva solidificazione e quindi la vera e propria rottura della parete per effetto dell'aumento di volume.

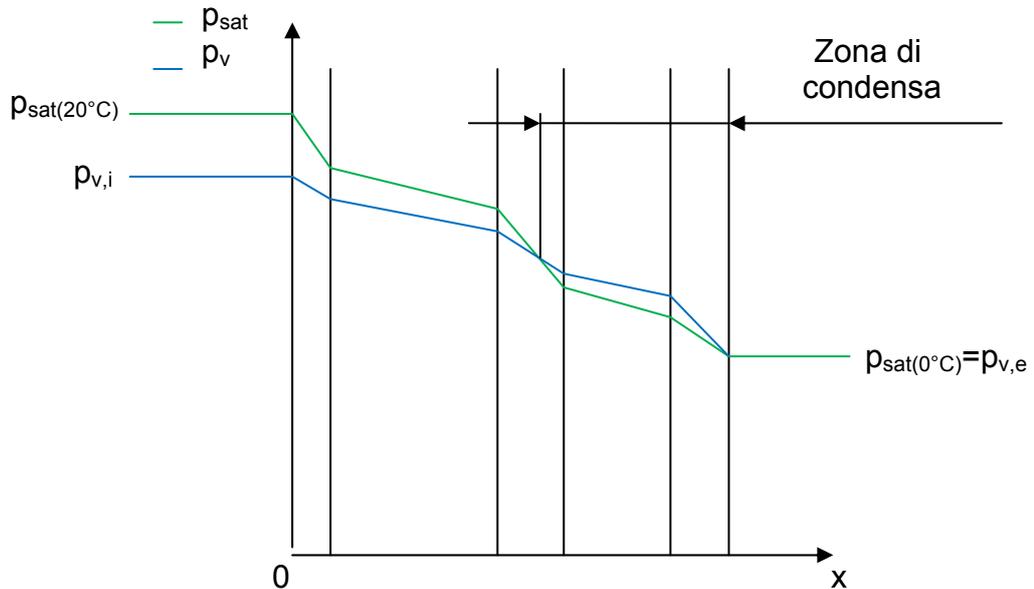
Il fenomeno della condensa interstiziale è dovuto ad un'inopportuna stratificazione della parete, tale da non permettere un sufficiente passaggio di vapore dall'ambiente più caldo, dove la  $p_{sat}$  dell'acqua è maggiore, a quello più freddo, dove la  $p_{sat}$  dell'acqua è minore.

Esempio:

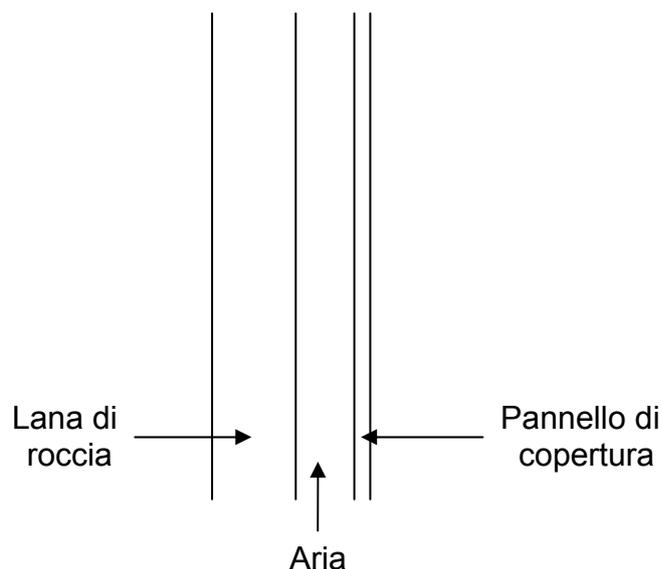


Questa parete di muratura è ottima dal punto di vista termico, perché è in grado di trattenere il calore all'interno anche dopo aver spento il riscaldamento, ma può dare problemi di condensa interstiziale in quanto il vapore d'acqua, dopo aver attraversato gli strati di forati e lana di roccia ad esso permeabili, si blocca prima di raggiungere l'intonaco esterno, e risentendo della sua temperatura particolarmente bassa porta la sua  $p_{sat}$  a valori inferiori alla  $p_v$ , quindi condensando: tale situazione è illustrata dal

corrispondente diagramma di Glaser, di cui è riportato un andamento puramente qualitativo.



Tra le soluzioni a questo problema potrebbe esserci l'adozione del così detto "isolamento a cappotto", che consiste nel terminare il lato freddo della parete (esterno in questo caso) con uno strato di lana di roccia e, staccato di circa 5 cm da quest'ultimo, un pannello di copertura decorativo (in materiale plastico ad esempio).



Il vapore d'acqua riesce così ad attraversare più agevolmente la parete e non risulta più esposto alla condensazione causata dalla presenza del freddo strato di intonaco esterno visto prima.

Un'altra soluzione al problema può essere rappresentata dall'applicazione sul lato caldo della parete (interno in questo caso) di uno strato di materiale con bassa permeabilità al vapore, in modo che la  $p_v$  scenda al di sotto della corrispondente  $p_{sat}$ : tale strato prende il nome di

“barriera al vapore” e può essere costituito da pannelli di polietilene o di alluminio (questi ultimi, con una permeabilità al vapore dell’ordine dei  $10^{-15}$  kg/m·Pa·h bloccano di fatto il passaggio di vapore d’acqua).

In tabella vengono riportati, per ogni specifico materiale, i valori di permeabilità al vapore, qui indicati con  $\mathcal{D}_V$ , e i rapporti  $\mu$  tra la permeabilità dell’aria  $\mathcal{D}_{V,0}$  e la permeabilità  $\mathcal{D}_V$  dei materiali stessi.

Materiale	$D_v \cdot 10^9$ (kg / m h Pa)	$\mu$
<b>Aria</b>	670	1
<b>Calcestruzzo</b>		
Magro, di sabbia e ghiaia	7	100
Armato, di sabbia e ghiaia	14	50
Di argilla espansa ( $\rho = 1100$ kg/m <sup>3</sup> )	65	10
<b>Intonaco</b>		
Plastico, per esterno	45	15
Gesso	85	8
Cemento e sabbia	22	30
<b>Muratura</b>		
Mattoni pieni	65	10
Blocchi cementizi	75	9
Laterizio forato	85	8
Pietra naturale ( $\rho = 2000$ kg/m <sup>3</sup> )	25	28
<b>Pannelli lignei</b>		
Legno duro, compatto	14	50
Legno compensato	3,5	200
Truciolare collato	14	50
Truciolare fortemente collato	7	100
<b>Fibre minerali</b>		
Fibra di vetro ( $\rho = 30$ kg/m <sup>3</sup> )	330	2
Fibra di coppa di altoforno ( $\rho = 100$ kg/m <sup>3</sup> )	135	5
<b>Materie plastiche</b>		
Polistirolo espanso ( $\rho = 30$ kg / m <sup>3</sup> )	7	100
Poliuretano espanso ( $\rho = 40$ kg/m <sup>3</sup> )	11	60
<b>Barriere al vapore</b>		
Polietilene ( $s = 0,1$ mm)	0,017	$40 \times 10^3$
Polietilene ( $s = 0,3$ mm)	0,005	$120 \times 10^3$
Alluminio ( $s = 0,025$ mm)	$0,190 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^9$
Bitume	0,011	$60 \times 10^3$

Si noti, ad esempio, il valore di  $\mu$  per il calcestruzzo magro (100), a significare che le proprietà isolanti garantite da 1 cm di questo materiale sono le stesse date da 100 cm di aria.

Si potrebbe quindi considerare il diagramma di Glaser relativo ad una parete equivalente fittizia costituita interamente da strati d’aria di spessore determinato dai coefficienti  $\mu$  relativi ad ogni materiale di cui è costituita la parete vera.

Ad esempio, considerando una parete di questo tipo:

**Interno**

$$T_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\varphi_i = 0.4$$

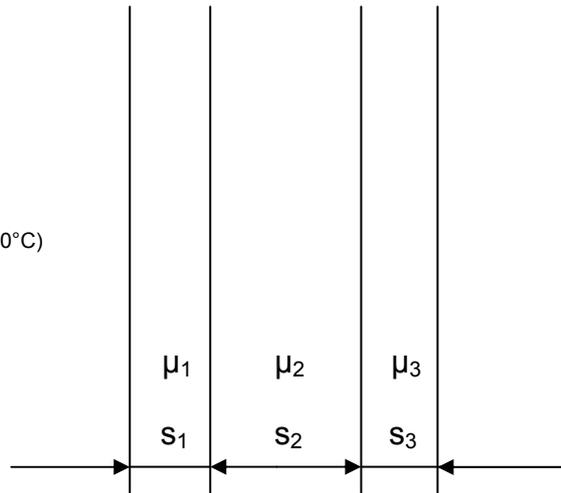
$$\rho_{v,i} = \varphi_i \cdot \rho_{\text{sat}}(20^\circ\text{C})$$

**Esterno**

$$T_e = 0^\circ\text{C}$$

$$\varphi_e = 1$$

$$\rho_{v,e} = \varphi_e \cdot \rho_{\text{sat}}(0^\circ\text{C})$$



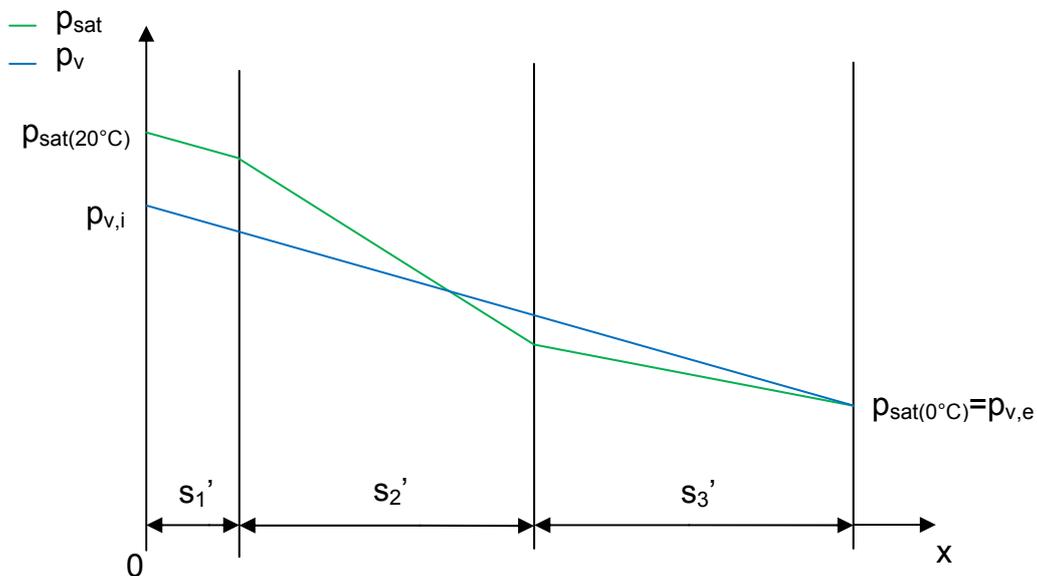
Con:

$$s_1 = 0.05\text{m}, \mu_1 = 5;$$

$$s_2 = 0.1\text{m}, \mu_2 = 10;$$

$$s_3 = 0.05\text{m}, \mu_3 = 20;$$

Il diagramma di Glaser costruito sulla parete equivalente fittizia formata da strati d'aria di spessori maggiorati  $s_1', s_2', s_3'$  è il seguente:



Con:

$$s_1' = s_1 \cdot \mu_1 = 0.05 \cdot 5 = 0.25\text{m};$$

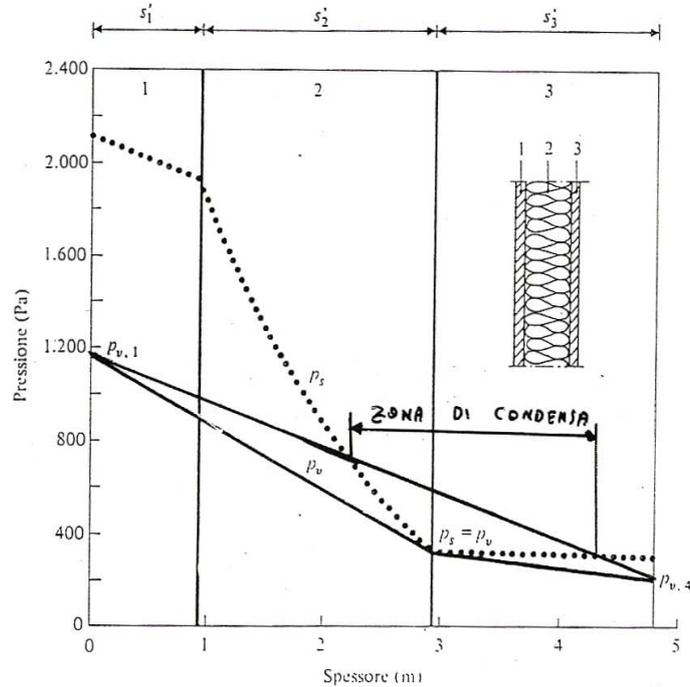
$$s_2' = s_2 \cdot \mu_2 = 0.1 \cdot 10 = 1\text{m};$$

$$s_3' = s_3 \cdot \mu_3 = 0.05 \cdot 20 = 1\text{m};$$

Si noti come la curva della  $\rho_v$  non cambi la propria pendenza nell'attraversare i vari strati fittizi d'aria, quindi con la stessa permeabilità al vapore: di fatto la  $\rho_v$  ha andamento rettilineo.

### Esercizio (costruzione diagramma di Glaser per parete frigorifera)

Si riportano i dati relativi ad una parete utilizzata per la costruzione di una cella frigorifera; si richiede la costruzione del relativo diagramma di Glaser.



N	Strato	$s_i$ (m)	$\mu_i$	$s'_i$ (m)	$\lambda_i$ (W/m·K)	$R_i$ (m <sup>2</sup> ·K/W)	$\vartheta$ (°C)	$p_s$ (Pa)
	Aria interna $\varphi = 50\%$	—	—	—	—	0,13	20,0	2400
1	Truciolare collato	0,019	50	0,95	0,13	0,15	18,7	1963
2	Polistirolo espanso	0,10	20	2,00	0,04	2,50	17,2	1963
3	Truciolare fortemente collato	0,019	100	1,90	0,13	0,15	-7,7	318
	Aria esterna $\varphi = 80\%$	—	—	—	—	0,08	-9,2	279
							-10,0	260

$$\sum s_d = 4,85 \text{ m} \quad R_{v,T} = 3,01 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

Per prima cosa si calcolano la densità di flusso termico  $q$  e la portata massica diffusiva per unità di superficie  $j$  che attraversano la parete.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{t, \text{tot}}}$$

$$j = \frac{\Delta p}{R_d}$$

La  $Rt_{tot}$  necessaria al calcolo di  $q$  è il risultato di 5 resistenze termiche in serie, 2 di convezione (interna ed esterna) e 3 di conduzione:

$$Rt_{conv,i} = \frac{1}{h_i} = 0.13 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$Rt1_{cond} = \frac{s_1}{\lambda_1} = \frac{0.019}{0.13} = 0.15 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$Rt2_{cond} = \frac{s_2}{\lambda_2} = \frac{0.10}{0.04} = 2.5 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$Rt3_{cond} = \frac{s_3}{\lambda_3} = \frac{0.019}{0.13} = 0.15 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$Rt_{conv,e} = \frac{1}{h_e} = 0.08 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$Rt_{tot} = Rt_{conv,i} + Rt1_{cond} + Rt2_{cond} + Rt3_{cond} + Rt_{conv,e} = 3.01 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Sfruttando l'ormai nota analogia elettrica:

$$q = \frac{\Delta T}{Rt_{tot}} = \frac{T_i - T_e}{Rt_{tot}} = \frac{20 - (-10)}{3.01} \cong 10 \frac{W}{m^2}$$

La  $Rd$  necessaria al calcolo di  $j$  è il risultato delle sole 3 resistenze diffusive in serie, interne alla parete (resistenze convettive interne ed esterne trascurabili):

$$Rd1 = \frac{s_1}{\wp_{v,1}} = \frac{s_1 \cdot \mu_1}{\wp_{v,0}} = \frac{0.019 \cdot 50}{670 \cdot 10^{-9}} \cong 1417910 \frac{Pa \cdot m^2 \cdot h}{kg}$$

$$Rd2 = \frac{s_2}{\wp_{v,2}} = \frac{s_2 \cdot \mu_2}{\wp_{v,0}} = \frac{0.10 \cdot 20}{670 \cdot 10^{-9}} \cong 2985075 \frac{Pa \cdot m^2 \cdot h}{kg}$$

$$Rd3 = \frac{s_3}{\wp_{v,3}} = \frac{s_3 \cdot \mu_3}{\wp_{v,0}} = \frac{0.019 \cdot 100}{670 \cdot 10^{-9}} \cong 2835821 \frac{Pa \cdot m^2 \cdot h}{kg}$$

$$Rd = Rd1 + Rd2 + Rd3 = 7238806 \frac{Pa \cdot m^2 \cdot h}{kg}$$

Il calcolo di  $j$  richiede ora la determinazione delle pressioni di vapore interna  $p_{v,i}$  ed esterna  $p_{v,e}$ :

$$p_{v,i} = \varphi_i \cdot p_{sat(20^\circ C)} = 0.5 \cdot 2334 = 1167 Pa$$

$$p_{v,e} = \varphi_e \cdot p_{sat(-10^\circ C)} = 0.8 \cdot 286 \cong 229 Pa$$

Quindi, dalla solita analogia elettrica:

$$j = \frac{\Delta p}{Rd} = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Rd} = \frac{1167 - 229}{7238806} = 1.296 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

Noti  $q$  e  $j$  è ora possibile calcolare i valori di  $T$  e  $p_v$  a valle delle singole resistenze termiche e diffusive rispettivamente:

$$T_1 = T_i - Rt_{conv,i} \cdot q = 20 - 0.13 \cdot 10 = 18.7^\circ C$$

$$T_2 = T_1 - Rt1_{cond} \cdot q = 18.7 - 0.15 \cdot 10 = 17.2^\circ C$$

$$T_3 = T_2 - Rt2_{cond} \cdot q = 17.2 - 2.5 \cdot 10 = -7.8^\circ C$$

$$T_4 = T_3 - Rt3_{cond} \cdot q = -7.8 - 0.15 \cdot 10 = -9.3^\circ C$$

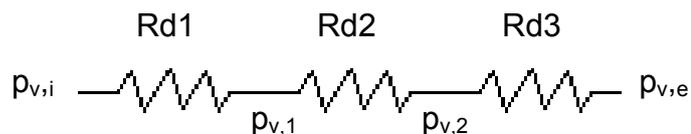
$$T_e = T_4 - Rt_{conv,e} \cdot q = -9.3 - 0.08 \cdot 10 \cong -10^\circ C$$



$$p_{v,1} = p_{v,i} - Rd1 \cdot j = 1167 - 1417910 \cdot 1.296 \cdot 10^{-4} \cong 983 Pa$$

$$p_{v,2} = p_{v,1} - Rd2 \cdot j = 983 - 2985075 \cdot 1.296 \cdot 10^{-4} \cong 596 Pa$$

$$p_{v,e} = p_{v,2} - Rd3 \cdot j = 596 - 2835821 \cdot 1.296 \cdot 10^{-4} \cong 229 Pa$$



Dai valori di  $T$  appena calcolati si ottengono le relative pressioni di saturazione dell'acqua, da confrontare con le corrispondenti pressioni di vapore.

$$p_{sat(20^{\circ}C)} = 2334Pa; p_{v(20^{\circ}C)} = 1167Pa$$

$$p_{sat(18.7^{\circ}C)} = 2153Pa; p_{v(18.7^{\circ}C)} = 1167Pa;$$

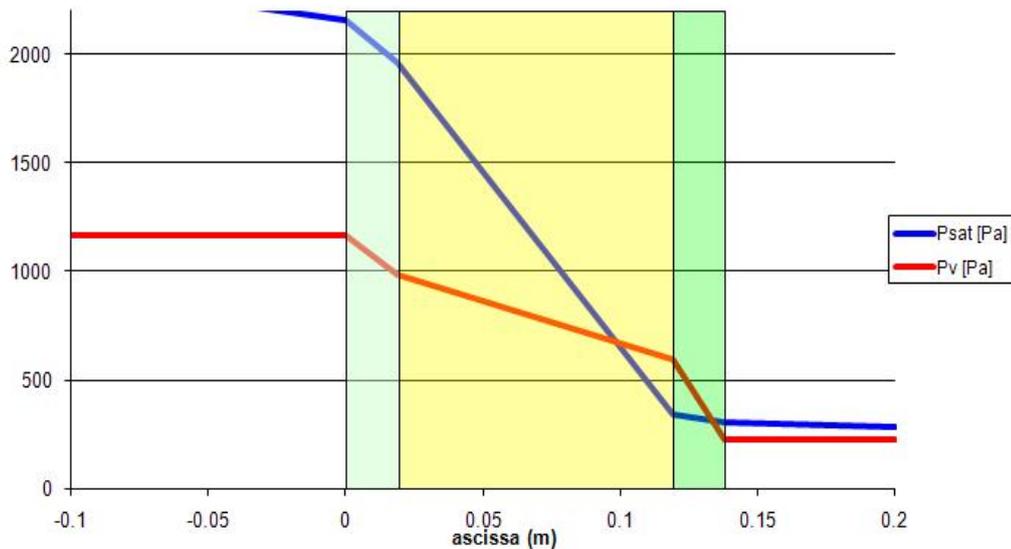
$$p_{sat(17.2^{\circ}C)} = 1959Pa; p_{v(17.2^{\circ}C)} = 983Pa;$$

$$p_{sat(-7.8^{\circ}C)} = 340Pa; p_{v(-7.8^{\circ}C)} = 596Pa;$$

$$p_{sat(-9.3^{\circ}C)} = 302Pa; p_{v(-9.3^{\circ}C)} = 229Pa;$$

$$p_{sat(-10^{\circ}C)} = 286Pa; p_{v(-10^{\circ}C)} = 229Pa;$$

Si può notare, quindi, che la parete è interessata dal fenomeno della condensa interstiziale tra il secondo strato, in polistirolo espanso, ed il terzo, in truciolare fortemente collato, dovuto al superamento della  $p_{sat}$  da parte della  $p_v$  in questa stessa zona, come riportato dal relativo diagramma di Glaser.



La quantità di condensa accumulata all'interno della parete  $\Delta j$  è data dalla differenza tra la portata massica diffusiva entrante di vapore per unità di superficie,  $j_{in}$ , e quella uscente,  $j_{out}$ :

$$j_{in} = \frac{p_{v(20^{\circ}C)} - p_{sat(-7.8^{\circ}C)}}{Rd1 + Rd2} = \frac{1167 - 340}{1417910 + 2985075} = 1.878 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

$$j_{out} = \frac{p_{sat(-7.8^{\circ}C)} - p_{v(-10^{\circ}C)}}{Rd3} = \frac{340 - 229}{2835821} = 3.914 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

$$\Delta j = j_{in} - j_{out} = 1.878 \cdot 10^{-4} - 3.914 \cdot 10^{-5} = 1.487 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m^2 \cdot h}$$

Essendo questa una parete per cella frigorifera, la formazione di condensa interstiziale risulta particolarmente dannosa per i motivi precedentemente citati a pag. 5.

La soluzione al problema può essere rappresentata dall'applicazione, sul lato più caldo della parete, di una barriera al vapore, costituita da un pannello di alluminio dello spessore di 0.025 mm: il grado di isolamento garantito da questa sottile pellicola è equivalente a quello dato da uno spessore fittizio di aria di ben 87.5 km:

$$s' = s_{barriera} \cdot \mu_{barriera} = 0.025 \cdot 10^{-3} \cdot 3.5 \cdot 10^9 = 87500m = 87.5km$$