

VERIFICA TERMOIGROMETRICA DEGLI ELEMENTI DI INVOLUCRO

Trasmittanza

Nel momento in cui siamo in presenza di diverse modalità di scambio termico (convezione + irraggiamento + conduzione) si introduce il concetto di *coefficiente globale di scambio termico* (o *trasmittanza*) U .

Detto coefficiente riassume in sé le varie forme di scambio termico per conduzione, convezione ed irraggiamento, che sono sempre presenti nella realtà.

Al fine della valutazione della quantità di energia dispersa attraverso un componente edilizio che separa ambienti a temperatura diversa si può ricorrere a dei coefficienti, detti *coefficienti liminari di scambio termico* o *coefficienti di adduzione o adduttanza* h (Tabella 1).

Ad esempio per una struttura verticale si assumono in genere i seguenti valori, rispettivamente per la parete interna e per quella esterna:

$$h_i = 8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$h_e = 23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

A partire da queste considerazioni ed in condizioni di regime stazionario, la relazione della trasmissione del calore tra due fluidi separati da una parete può essere espressa dalla seguente relazione:

$$q = U (T_i - T_e) \quad (W) \quad [1]$$

dove U è la trasmittanza termica che tiene conto delle resistenze termiche offerte dalla parete per conduzione interna e all'adduzione del flusso termico sulle superfici interna ed esterna; T_i e T_e sono rispettivamente le temperature all'interno ed all'esterno dell'ambiente rilevate in posizione tale da non risentire degli effetti convettivi innescati dalle temperature superficiali della parete; S rappresenta la superficie della parete.

Si chiama *resistenza termica liminare*, la resistenza termica complessiva offerta dalle resistenze dovute all'irraggiamento ed alla convezione alla superficie del solido; per analogia elettrica si ha:

$$1/h = 1/(h_r + h_c)$$

dove h_r e h_c sono rispettivamente i coefficienti di scambio termico per irraggiamento e convezione, ed $1/h$ è la resistenza termica liminare.

La *resistenza termica per conduzione* è invece data dalla sommatoria delle resistenze termiche di ogni singolo materiale che costituisce il componente edilizio, cioè $\Sigma R_i = \Sigma (s_i / \lambda_i)$ con s_i = spessore del materiale i -esimo e λ_i = coefficiente di conduzione termica del materiale i -esimo.

La *resistenza termica globale* R_G è quindi data dalla sommatoria delle resistenze termiche liminari sulle due facce interna ed esterna del componente, $1/h_i$ e $1/h_e$, e dalla resistenza termica per conduzione ΣR_i , cioè:

$$R_G = 1/h_i + \Sigma R_i + 1/h_e \quad (m^2K/W) \quad [2]$$

ed il *coefficiente globale di scambio termico* (o trasmittanza) è dato da:

$$U = 1/R_G = 1/(1/h_i + \Sigma R_i + 1/h_e) \quad (W/m^2K)^{(1)} \quad [3]$$

Le relazioni suddette, in regime stazionario, valgono anche per la determinazione dell'andamento delle temperature superficiali ed all'interno delle strutture al fine di verificare eventuali fenomeni di condensazione interstiziale, cioè di formazione di condensa all'interno delle strutture edilizie.

Consideriamo il caso di una parete multistrato, del tipo di quella schematizzata nella figura 1, che separa due ambienti a temperatura diversa.

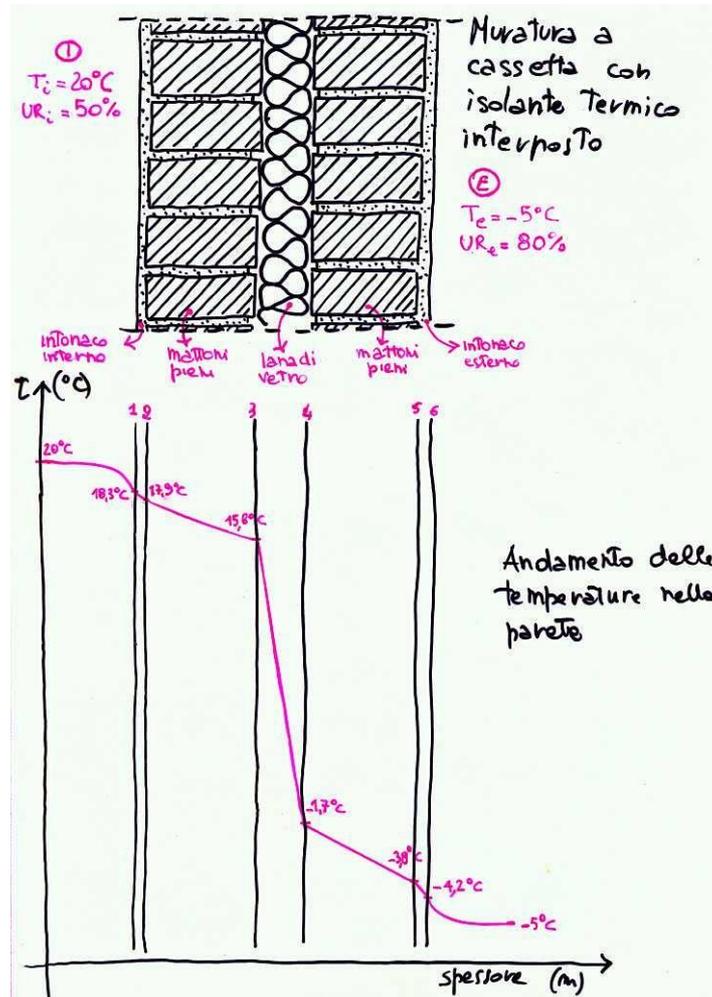
L'energia termica Q trasmessa tra i due fluidi è calcolata mediante la [1]; noti i valori del salto termico tra interno ed esterno e le caratteristiche fisiche dei componenti la parete si può calcolare il valore della trasmittanza U e successivamente l'energia termica dispersa attraverso la parete.

Siano $h_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $h_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T_i = 20^\circ\text{C}$, $T_e = -5^\circ\text{C}$, ed inoltre si assumono le seguenti caratteristiche geometriche e fisiche per i materiali costituenti la parete in questione:

- | | | |
|--|------------------------------|---|
| 1. intonaco interno ($\rho=1800 \text{ kg/m}^3$) | $\Rightarrow s= 2\text{cm}$ | $\Rightarrow \lambda = 0,80 \text{ W/mK}$ |
| 2. mattoni pieni ($\rho=2000 \text{ kg/m}^3$) | $\Rightarrow s= 12\text{cm}$ | $\Rightarrow \lambda = 0,81 \text{ W/mK}$ |
| 3. pannelli lana di vetro ($\rho=30 \text{ kg/m}^3$) | $\Rightarrow s= 5\text{cm}$ | $\Rightarrow \lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ |
| 4. mattoni pieni ($\rho=2000 \text{ kg/m}^3$) | $\Rightarrow s= 12\text{cm}$ | $\Rightarrow \lambda = 0,81 \text{ W/mK}$ |
| 5. intonaco esterno ($\rho=1500 \text{ kg/m}^3$) | $\Rightarrow s= 2\text{cm}$ | $\Rightarrow \lambda = 0,69 \text{ W/mK}$ |

¹ I valori dei parametri quali conducibilità termica, coeff. liminari di scambio termico ecc. sono riferiti a *differenze* unitarie di temperatura; pertanto è ininfluente operare con valori di temperatura espressi in K o $^\circ\text{C}$; per questo motivo in letteratura, ad esempio, i valori della conducibilità termica sono riportati sia in W/mK sia in $\text{W/m}^\circ\text{C}$.

Figura 1 - Schema muratura a cassetta con interposto isolante termico e relativo andamento delle temperature interne (scala originale 1:10).



Il valore della trasmittanza U sarà:

$$U = 1/R_G = 1/(1/\alpha_i + \sum R_i + 1/\alpha_e)$$

$$U = 1/(1/8 + 0,02/0,80 + 0,12/0,81 + 0,05/0,04 + 0,12/0,81 + 0,02/0,69 + 1/23) = 1/1,77 = 0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Il valore del flusso termico disperso, per una superficie unitaria di parete sarà:

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

$$q = 0,56 \cdot [20 - (-5)] = 14 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Il calcolo della temperatura superficiale di ogni strato ed il conseguente andamento della temperatura all'interno della struttura si determina mediante la seguente relazione:

$$T_j = T_i - q \cdot R_j \quad (^\circ\text{C}) \quad [4]$$

pertanto, si ha:

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

⇒

$$T_1 = T_{pi} = 20 - 14 \cdot (1/8) = 18,3 \text{ °C}$$

$$T_1 = T_i - q \cdot (1/h_i + s_1/\lambda_1)$$

⇒

$$T_2 = 20 - 14 \cdot (1/8 + 0,02/0,80) = 17,9 \text{ °C}$$

$$T_2 = T_i - q \cdot (1/h_i + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2)$$

⇒

$$T_3 = 20 - 14 \cdot (1/8 + 0,02/0,80 + 0,12/0,81) = 15,8 \text{ °C}$$

$$T_3 = T_i - q \cdot (1/h_i + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3)$$

⇒

$$T_4 = 20 - 14 \cdot (1/8 + 0,02/0,80 + 0,12/0,81 + 0,05/0,04) = - 1,7 \text{ °C}$$

$$T_4 = T_i - q \cdot (1/h_i + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3 + s_4/\lambda_4)$$

⇒

$$T_5 = 20 - 14 \cdot (1/8 + 0,02/0,80 + 0,12/0,81 + 0,05/0,04 + 0,12/0,81) \\ = - 3,8 \text{ °C}$$

$$T_{s,e} = T_i - q \cdot (1/h_i + s_1/\lambda_1 + s_2/\lambda_2 + s_3/\lambda_3 + s_4/\lambda_4 + s_5/\lambda_5)$$

⇒

$$T_{se} = 20 - 14 \cdot (1/8 + 0,02/0,80 + 0,12/0,81 + 0,05/0,04 + 0,12/0,81 \\ + 0,02/0,69) = - 4,2 \text{ °C}$$

per verifica:

$$T_{s,e} = T_e + q \cdot 1/h_e$$

⇒

$$T_{s,e} = - 5 + 14 \cdot (1/23) \cong - 4,2 \text{ °C}$$

Nella Figura 1 è riportato l'andamento delle temperature calcolato per la parete in esame.

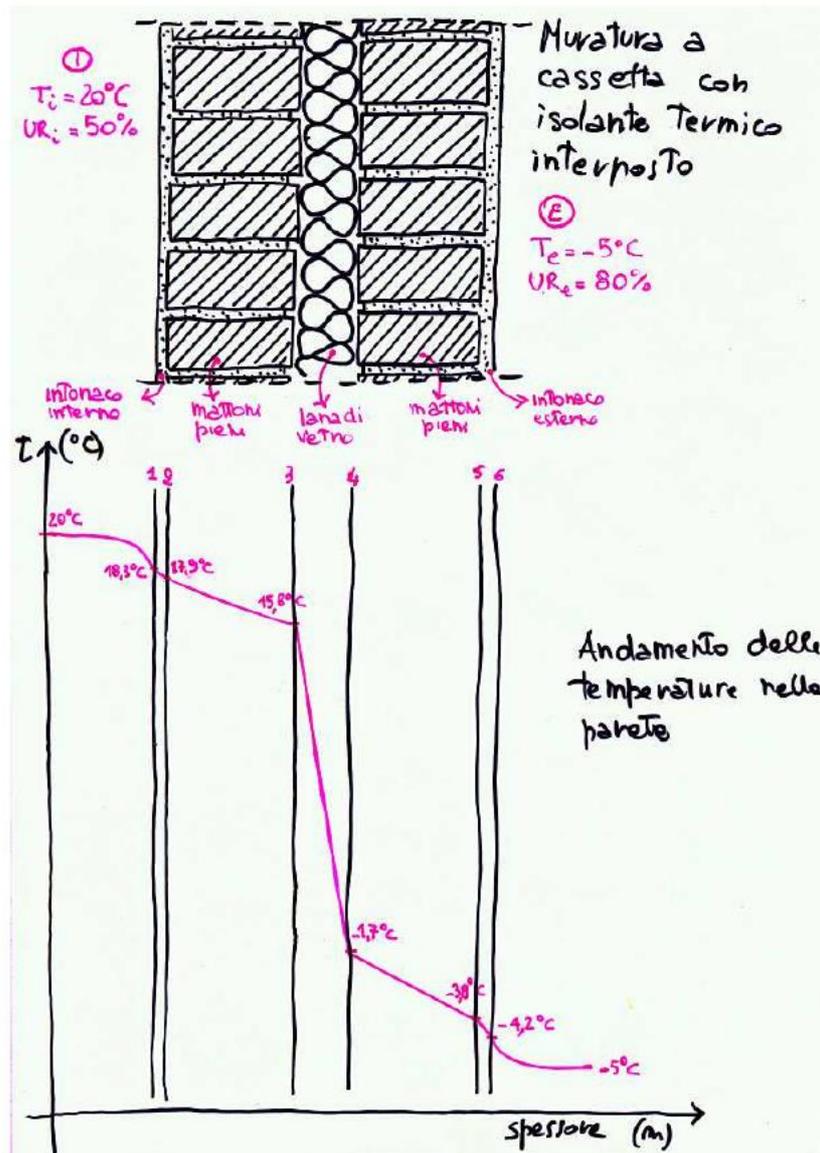


Figura 1

La condensazione del vapor d'acqua nelle strutture edilizie

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.

Non è raro infatti imbattersi nella formazione di muffe, o assistere alla disgregazione di intonaci e murature proprio a causa dei fenomeni suddetti. In anni relativamente recenti la necessità di contenere le dispersioni termiche ha favorito l'adozione indiscriminata 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 ulteriore aggravio del problema in esame causato dall'aumento dell'umidità presente nell'aria ambiente.

E' poi molto diffuso l'uso nelle cucine di cappe filtranti, prive di collegamenti a condotti di espulsione delle fumane, che 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 (ponti termici), può peraltro manifestarsi anche in presenza di strutture ben isolate dove però la collocazione dello strato isolante è malposta rispetto alla permeabilità degli strati rimanenti.

Occorre inoltre porre attenzione a non confondere fenomeni di condensazione con quelli dovuti alla presenza di infiltrazioni d'acqua, per esempio per risalita capillare dal terreno, per pioggia battente,

per rottura di tubazioni idriche, ecc.

Per quanto sopra detto si intravede la complessità della trattazione del fenomeno, la cui risoluzione dipende comunque dalla esatta comprensione delle cause che lo determinano.

Come si ricorda dalla trattazione delle miscele d'aria secca e vapor d'acqua, la condensazione del vapor d'acqua si verifica quando la pressione parziale dello stesso raggiunge la pressione di saturazione, quest'ultima funzione della temperatura (temperatura di condensazione o di rugiada); a parità di temperatura, più alto è il contenuto di vapore, e quindi più alta l'umidità relativa, maggiori sono i rischi della formazione di condensa (la condensazione può manifestarsi anche in presenza di modesti raffreddamenti dell'aria ambiente). Nella tabella 2 sono riportati i valori della pressione parziale del vapore d'acqua nelle condizioni di saturazione (p_s) in funzione della temperatura della miscela di aria umida; per valori diversi della temperatura la corrispondente p_s può essere determinata per interpolazione lineare.

TABELLA 15.II. Pressione di saturazione del vapor d'acqua in funzione della temperatura

°C	Pa	mm Hg	°C	Pa	mm Hg
-10	260	1,95	8	1073	8,05
-9	284	2,13	9	1148	8,61
-8	309	2,32	10	1228	9,21
-7	337	2,53	11	1312	9,84
-6	368	2,76	12	1416	10,62
-5	401	3,01	13	1497	11,23
-4	437	3,28	14	1599	11,99
-3	476	3,57	15	1705	12,79
-2	517	3,88	16	1817	13,63
-1	563	4,22	17	1937	14,53
0	611	4,58	18	2064	15,48
1	657	4,93	19	2197	16,48
2	705	5,29	20	2337	17,53
3	759	5,69	21	2486	18,65
4	813	6,1	22	2644	19,83
5	872	6,54	23	2809	21,07
6	935	7,01	24	2984	22,38
7	1001	7,51			

Al fine di verificare l'insorgere o meno della condensa occorre pertanto controllare che la temperatura, superficiale e/o interna alla parete, sia maggiore della relativa temperatura di condensazione (ovvero che la pressione parziale del vapore sia maggiore della pressione di saturazione). Nel caso specifico, l'analisi del fenomeno fisico attiene alla diffusione molecolare di un gas (il vapor d'acqua) in un solido ed è esprimibile mediante la legge di Fick; le semplificazioni che ne derivano unitamente al poter considerare il vapor d'acqua un gas perfetto, fanno sì che la determinazione del flusso di vapore che si diffonde all'interno di un solido può essere espressa in termini del gradiente di pressione che si instaura a causa delle variazioni di temperatura e quindi della densità (o in altri termini al variare della concentrazione del vapor d'acqua nell'aria); la trattazione del problema diviene allora del tutto analoga dal punto di vista fisico ed analitico a quanto visto per la trasmissione del calore:

<i>Trasmissione del calore</i>			<i>Diffusione del vapore</i>		
<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità misura</i>	<i>Nome</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Unità misura</i>
<i>trasmissione</i>	$U = 1/R_G = 1/\sum R_i$	(W/m ² K)	<i>permeanza</i>	$M = 1/R_{vt} = 1/\sum R_{vi}$	(g/m ² s Pa)
<i>conducibilità termica</i>	λ	(W/mK)	<i>permeabilità al vapore</i>	δ	(g/m s Pa)
<i>resistenza termica</i>	$R_i = s_i / \lambda_i$	(m ² K/W)	<i>resistenza al flusso di vapore</i>	$R_{vi} = s_i / \delta_i$	(m ² s Pa/g)
<i>differenza di temperatura</i>	ΔT	(K) o (°C)	<i>differenza di pressione</i>	Δp	(Pa)
<i>potenza termica</i>	$Q = U * \Delta T = \Delta T / R_G$	(W)	<i>flusso di vapore</i>	$g_v = \Delta p / R_{v,t}$	(g/s)

Il nuovo parametro fisico che caratterizza i componenti è quindi la permeabilità al vapore o diffusività δ (kg / m s Pa) ovvero un coefficiente che rappresenta la quantità di vapore che passa nell'unità di tempo attraverso un materiale di spessore unitario, a causa di una differenza unitaria di pressione; nella Tabella 3 sono riportati i valori di permeabilità di alcuni tipici materiali da costruzione desunti dalle norme UNI 10351 (in tali norme sono riportati congiuntamente anche i valori di conducibilità termica).

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

Tabella 3 - Valori indicativi medi della permeabilità al vapore δ (D_v) e della resistenza al flusso di vapore μ per alcuni materiali di usuale impiego in edilizia

Sovente in letteratura i valori della resistenza al flusso di vapore si trovano espressi in forma adimensionale mediante il parametro μ , detto fattore di resistenza alla diffusione al vapore, dato dal rapporto tra la resistenza al flusso di vapore del materiale in esame e quella di riferimento assunta pari alla resistenza alla diffusione del vapore offerta dall'aria a parità di spessore. Allo stesso modo esso si definisce come rapporto fra la permeabilità dell'aria ($186-190 \times 10^{-12}$ kg/s m Pa) e la permeabilità del materiale (numero adimensionale sempre maggiore di 1). Ovviamente per l'aria vale $\mu = 1$.

δv - permeabilità al vapore;

rappresenta la quantità di vapore che passa nell'unità di tempo attraverso

una sezione unitaria di una parete di spessore unitario sotto una determinata differenza di pressione. (g/s m Pa – grammo/secondo metro Pascal)

Ad esempio una resistenza $\mu = 10$ di una muratura in mattoni pieni priva di intonaco, significa che il materiale in esame ha un valore di permeabilità 10 inferiore a quello dell'aria; la convenienza nell'adozione dei valori μ suddetti, avendo a che fare con valori molto piccoli della permeabilità, sta nella maggiore semplicità nei calcoli e quindi nel minor rischio di commettere errori con le unità di misura.

Per quanto attiene le resistenze superficiali al passaggio di vapore, queste possono essere ritenute del tutto trascurabili a fronte della resistenza offerta dagli altri componenti edilizi, pertanto la pressione parziale del vapore sulle facce interna ed esterna del componente si assumono eguali alla pressione parziale del vapore dell'aria a contatto della superficie.

Il flusso di vapore ha luogo quando si crea un differenziale di pressione; il verso del flusso va dagli ambienti più caldi a quelli più freddi (al maggior contenuto di vapore dei primi corrisponde una maggiore pressione), e quindi si verifica generalmente dall'interno verso l'esterno degli ambienti sia nei mesi estivi che invernali.

In generale si rileva che la condensazione interna non ha luogo nelle pareti omogenee ma in quelle multistrato. In particolare si osserva che se lo strato rivolto verso l'ambiente caldo è più ricco di vapore d'acqua presenta una maggiore conducibilità termica; in tal caso la pressione parziale del vapore d'acqua p_v raggiunge valori elevati in zone della parete che (a causa della bassa resistenza termica) si trovano a temperature relativamente basse e di conseguenza con valori della pressione di saturazione p_s modesti: tali zone si considerano pertanto ad elevato rischio di condensazione ($p_v \cong p_s$).

Il problema, come si vedrà, può essere affrontato disponendo uno strato isolante verso il lato freddo (isolamento a cappotto), innalzando così il valore della temperatura e quindi della pressione di saturazione; in alternativa, ma solo nei casi non altrimenti risolvibili, si può disporre una *barriera al vapore* verso il lato caldo della parete e quindi abbassando il valore della pressione parziale del vapore.

Le barriere al vapore sono costituite da materiali di spessore sottile, aventi valori di permeabilità fino a 100.000 volte inferiori a quella dell'aria; tipiche barriere al vapore sono costituite da fogli di polietilene, cloruro di vinile, cartonfeltro bitumato, guaine bituminose usate come impermeabilizzanti nelle coperture, ecc.

Per valutare il rischio di condensa si può percorrere la strada analitica attraverso la legge di Fick determinando la quantità di vapore eventualmente condensato, oppure si può risolvere il problema graficamente ricorrendo al *Diagramma di Glaser*; tale diagramma consiste nel rappresentare unitamente all'andamento dei valori di temperatura all'interno della struttura anche i relativi valori della pressione di saturazione; confrontando questi ultimi con i valori delle pressioni parziali si è in grado di stabilire, seppure con un grado di incertezza piuttosto elevato, la possibilità di rischi di condensazione.

Applichiamo il procedimento per la costruzione del diagramma di Glaser all'esempio della parete multistrato precedente, schematizzata nella figura 1:

1. si calcola il valore della pressione parziale del vapore nelle condizioni di saturazione p_s in corrispondenza della superficie di ogni strato di materiale, in funzione della temperatura superficiale di ogni singolo strato utilizzando la tabella 2 ed interpolando:

$$\begin{aligned}
T_1 = T_{s,i} = 18,3 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s,i} = 2103 \text{ Pa} \\
T_2 = 17,9 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s2} = 2049 \text{ Pa} \\
T_3 = 15,8 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s3} = 1794 \text{ Pa} \\
T_4 = - 1,7 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s4} = 530 \text{ Pa} \\
T_5 = - 3,8 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s5} = 445 \text{ Pa} \\
T_6 = T_{s,e} = - 4,2 \text{ }^\circ\text{C} & \quad \Leftrightarrow \quad p_{s,e} = 429 \text{ Pa}
\end{aligned}$$

2. si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè $s'_i = s_i \cdot \mu_i$:

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{\text{isolante}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

3. si calcola il valore della pressione parziale del vapore corrispondente alla superficie interna ed esterna della parete per i relativi valori di umidità relativa e di temperatura, cioè:

per l'interno: $T_{s,i} = 18,3 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s,i} = 2103 \text{ Pa}$

$$UR_i = 50\% \quad \Leftrightarrow \quad UR_i = 0,5$$

$$UR_i = p_{v,i} / p_{s,i} \quad \Leftrightarrow \quad p_{v,i} = \varphi_i \cdot p_{s,i} = 0,5 \cdot 2103 \text{ Pa} = 1051 \text{ Pa}$$

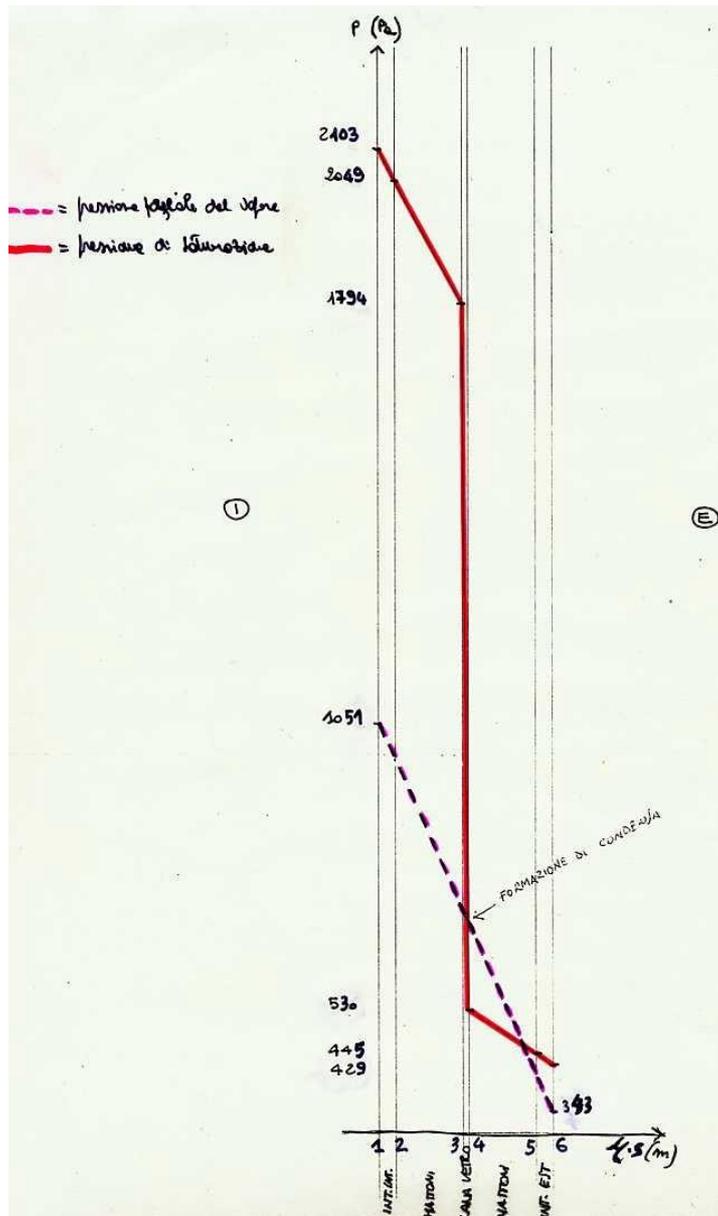
per l'esterno: $T_{s,e} = - 4,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s,e} = 429 \text{ Pa}$

$$UR_e = 80\% \quad \Rightarrow \quad UR_e = 0,8$$

$$UR_e = p_{v,e} / p_{s,e} \quad \Rightarrow \quad p_{ve} = UR_e \cdot p_{s,e} = 0,8 \cdot 429 \text{ Pa} = 343 \text{ Pa}$$

4. ora è possibile disegnare il diagramma in opportuna scala e verificare la presenza di eventuale formazione di condensa all'interno della parete, come riportato in figura 2, dove si vede che in corrispondenza dello strato di mattoni verso l'esterno c'è la possibilità che si verifichi il fenomeno della condensa in quanto i valori della pressione parziale del vapore superano quelli della pressione di saturazione.

Figura 2 – Costruzione del diagramma di Glaser per la parete schematizzata in figura 1 (scala originale 1:10).



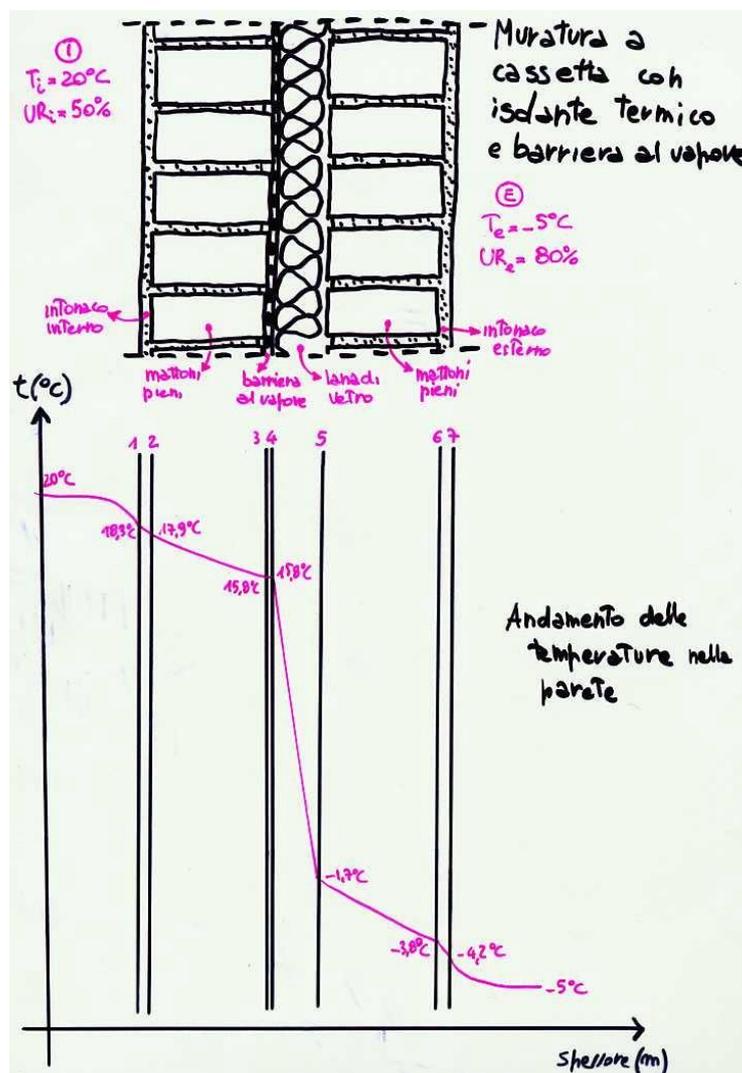
Come già accennato, il problema può essere risolto operando in diverse maniere, per esempio disponendo una *barriera al vapore* verso il lato caldo della parete e quindi abbassando il valore della pressione parziale del vapore, oppure disponendo uno strato isolante verso il lato freddo, facendo cioè

un isolamento a cappotto, innalzando così il valore della temperatura e quindi della pressione di saturazione. Vediamo questi due casi graficamente costruendone i relativi diagrammi di Glaser.

Caso 1 – utilizzo di una barriera al vapore in polietilene dello spessore di 0,1 mm posizionata sul lato caldo della parete, cioè partendo dall'interno, prima dell'isolante termico (figura 3).

0. dal punto di vista termico, tale barriera determina un apporto trascurabile avendo una resistenza termica molto bassa, per cui si può considerare inalterato il valore della trasmittanza e della potenza termica trasmessa attraverso la parete rispetto al caso iniziale descritto in figura 1; di conseguenza rimangono invariati i valori delle temperature superficiali in corrispondenza di ogni singolo strato della parete e quindi anche l'andamento delle stesse, con l'unica differenza che si avrà uno strato di materiale in più.

Figura 3 – Schema muratura a cassetta con isolante termico e barriera al vapore e relativo andamento delle temperature interne (scala originale 1:10).



Come si evince dall'andamento delle temperature, in corrispondenza dello strato isolante si ha l'abbassamento maggiore di temperatura e quindi qui è notevole il rischio di condensazione; i materiali isolanti come le fibre minerali, dotati di un'elevata permeabilità vengono per questo commercializzati con una faccia rivestita di uno strato *barriera vapore* (ad esempio carta bitumata o polietilene).

Riprendendo l'esempio suddetto si ipotizzi di inserire tra i mattoni e l'isolante un foglio di polietilene dello spessore di 0,1 mm; la resistenza termica di questo nuovo strato è trascurabile pertanto l'andamento delle temperature rimane invariato (figura 3). Viceversa aumenta sensibilmente la resistenza al passaggio del vapore dato che la permeanza del polietilene è bassissima.

1. rimanendo inalterato l'andamento delle temperature interne alla parete, non cambia il valore della pressione parziale del vapore nelle condizioni di saturazione p_s in corrispondenza della superficie di ogni strato di materiale, con la differenza che ora si avrà uno strato di materiale in più:

$$T_1 = T_{s,i} = 18,3 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$$

$$T_2 = 17,9 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s2} = 2049 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 15,8 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s3} = 1794 \text{ Pa}$$

$$T_4 = 15,8 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s4} = 1794 \text{ Pa}$$

$$T_5 = - 1,7 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s5} = 530 \text{ Pa}$$

$$T_6 = - 3,8 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s6} = 445 \text{ Pa}$$

$$T_7 = T_{s,e} = - 4,2 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s,e} = 429 \text{ Pa}$$

2. si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè $s'_i = s_i \cdot \mu_i$; dalla tabella 3 si vede che la resistenza al passaggio del vapore del polietilene di spessore $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ è pari a $40 \cdot 10^3$, per cui si avrà:

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{\text{isolante}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{\text{barriera}} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^3 = 4 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,12 \cdot 10 = 1,2 \text{ m}$$

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

3. non variando le temperature superficiali in corrispondenza della superficie interna ed esterna della parete, i valori della pressione parziale del vapore corrispondenti rimangono invariati, cioè:

$$\text{per l'interno:} \quad T_1 = T_{s,i} = 18,3 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$$

$$UR_i = 50\% \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_i = 0,5$$

$$\varphi = p_v / p_s \quad \Leftrightarrow \quad p_{vi} = \varphi_i \cdot p_{s1} = 0,5 \cdot 2103 \text{ Pa} = 1051 \text{ Pa}$$

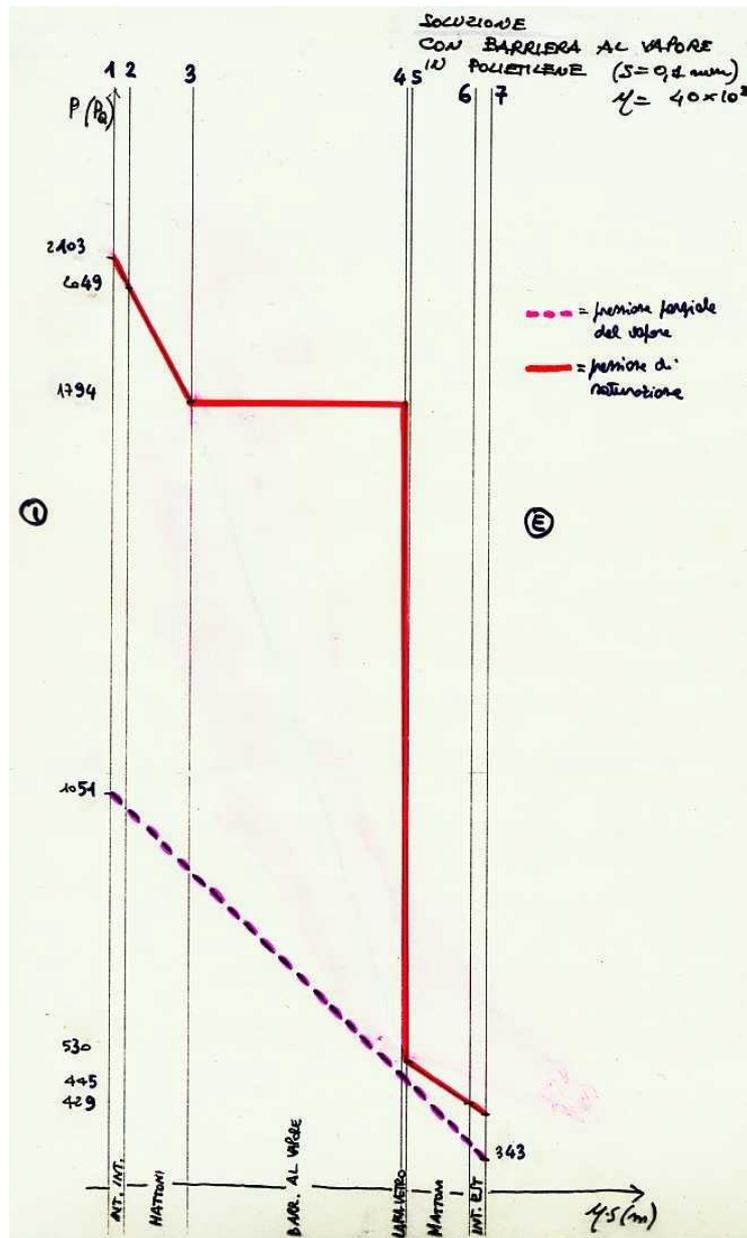
$$\text{per l'esterno:} \quad T_7 = T_{pe} = - 4,2 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s7} = 429 \text{ Pa}$$

$$UR_e = 80\% \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_e = 0,8$$

$$\varphi = p_v / p_s \quad \Leftrightarrow \quad p_{ve} = \varphi_e \cdot p_{s7} = 0,8 \cdot 429 \text{ Pa} = 343 \text{ Pa}$$

4. nella figura 4 è riportato il relativo diagramma di Glaser, la cui scala originaria è 1:10, da cui è possibile verificare che il rischio di formazione di condensa è scongiurato

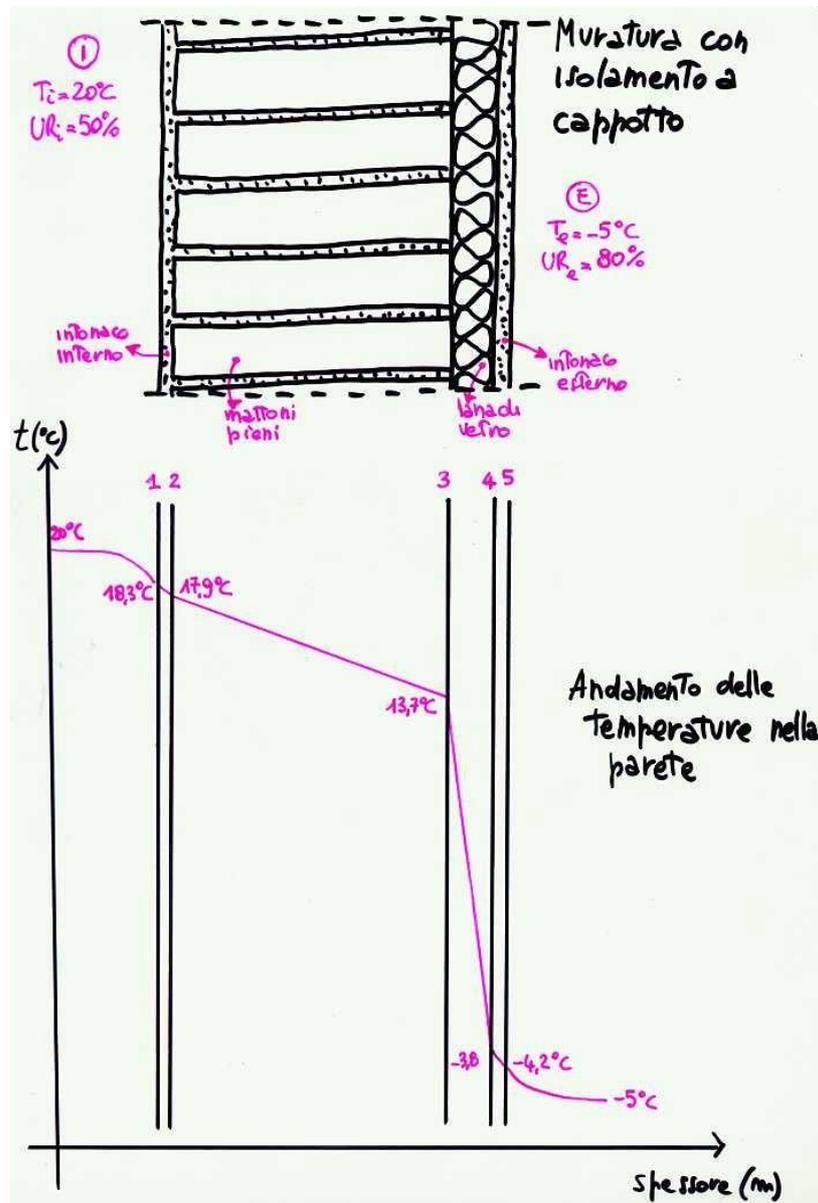
Figura 4 – Costruzione del diagramma di Glaser per la parete schematizzata in figura 3 (scala originale 1:10).



L'esempio mostrato chiarisce l'importanza della disposizione degli strati che deve essere curata non solo dal punto di vista termico ma anche igrometrico al fine di eliminare o quantomeno contenere i rischi di condensazione all'interno delle pareti. Le recenti disposizioni normative nel campo del contenimento dei consumi energetici (v. L.10/91) prevedono peraltro obbligatoriamente la verifica termoigrometrica delle tipologie di parete esterne.

Caso 2 – si cambia la stratigrafia dei materiali costituenti la parete (figura 5) ed anziché posizionare l'isolante all'interno della muratura si realizza un isolamento a cappotto, utilizzando lo stesso materiale del caso iniziale.

Figura 5 – Schema muratura con isolamento a cappotto e relativo andamento delle temperature interne (scala originale 1:10).



0. dal punto di vista del funzionamento della parete in regime stazionario, il cambiamento della stratigrafia della muratura, a parità di spessori, di materiali utilizzati e delle condizioni al contorno, non influenza il valore della trasmittanza e della potenza termica trasmessa attraverso la parete rispetto al caso iniziale descritto in figura 1; cambiano invece i valori delle temperature superficiali in corrispondenza di ogni singolo strato della parete e quindi anche l'andamento delle stesse, che diventa il seguente:

$$T_1 = T_{pi} = 20 - 14 \cdot (1/8) = 18,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 18,3 - 14 \cdot (0,02/0,80) = 17,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_3 = 17,9 - 14 \cdot (0,24/0,81) = 13,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_4 = 13,7 - 14 \cdot (0,05/0,04) = - 3,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_5 = - 3,8 - 14 \cdot (0,02/0,69) = - 4,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{per verifica: } T_6 = T_e = - 4,2 - 14 \cdot (1/23) \cong - 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2. si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè $s'_i = s_i \cdot \mu_i$:

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,24 \cdot 10 = 2,4 \text{ m}$$

$$s'_{\text{isolante}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

3. non variando le temperature superficiali in corrispondenza della superficie interna ed esterna della parete, i valori della pressione parziale del vapore corrispondenti rimangono invariati, cioè:

per l'interno: $T_1 = T_{pi} = 18,3 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$

$$UR_i = 50\% \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_i = 0,5$$

$$\varphi = p_v / p_s \quad \Leftrightarrow \quad p_{vi} = \varphi_i \cdot p_{s1} = 0,5 \cdot 2103 \text{ Pa} = 1051 \text{ Pa}$$

per l'esterno: $T_5 = T_{pe} = - 4,2 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s5} = 429 \text{ Pa}$

$$UR_e = 80\% \quad \Leftrightarrow \quad \varphi_e = 0,8$$

$$\varphi = p_v / p_s \quad \Leftrightarrow \quad p_{ve} = \varphi_e \cdot p_{s5} = 0,8 \cdot 429 \text{ Pa} = 343 \text{ Pa}$$

4. nella figura 6 è riportato il diagramma di Glaser, la cui scala originaria è 1:10, da cui è possibile verificare che il rischio di formazione di condensa è scongiurato

Caso 3 – si cambia la stratigrafia dei materiali costituenti la parete (figura 7) ed anziché posizionare l'isolante all'interno della muratura si posiziona verso l'ambiente interno, utilizzando lo stesso materiale del caso iniziale.

0. dal punto di vista del funzionamento della parete in regime stazionario, il cambiamento della stratigrafia della muratura, a parità di spessori, di materiali utilizzati e delle condizioni al contorno, non influenza il valore della trasmittanza e della potenza termica trasmessa attraverso la parete rispetto al caso iniziale descritto in figura 1; cambiano invece i valori delle temperature superficiali in corrispondenza di ogni singolo strato della parete e quindi anche l'andamento delle stesse, che è il seguente:

$$T_1 = T_{pi} = 20 - 14 \cdot (1/8) = 18,3 \text{ °C}$$

$$T_2 = 18,3 - 14 \cdot (0,02/0,80) = 17,9 \text{ °C}$$

$$T_3 = 17,9 - 14 \cdot (0,05/0,04) = 0,4 \text{ °C}$$

$$T_4 = 0,4 - 14 \cdot (0,24/0,81) = - 3,8 \text{ °C}$$

$$T_5 = - 3,8 - 14 \cdot (0,02/0,69) = - 4,2 \text{ °C}$$

per verifica: $T_6 = T_e = - 4,2 - 14 \cdot (1/23) \cong - 5 \text{ °C}$

1. si calcola il valore della pressione parziale del vapore nelle condizioni di saturazione p_s in corrispondenza della superficie di ogni strato di materiale, in funzione della temperatura superficiale di ogni singolo strato utilizzando la tabella 2 ed interpolando:

$$T_1 = T_{pi} = 18,3 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s1} = 2103 \text{ Pa}$$

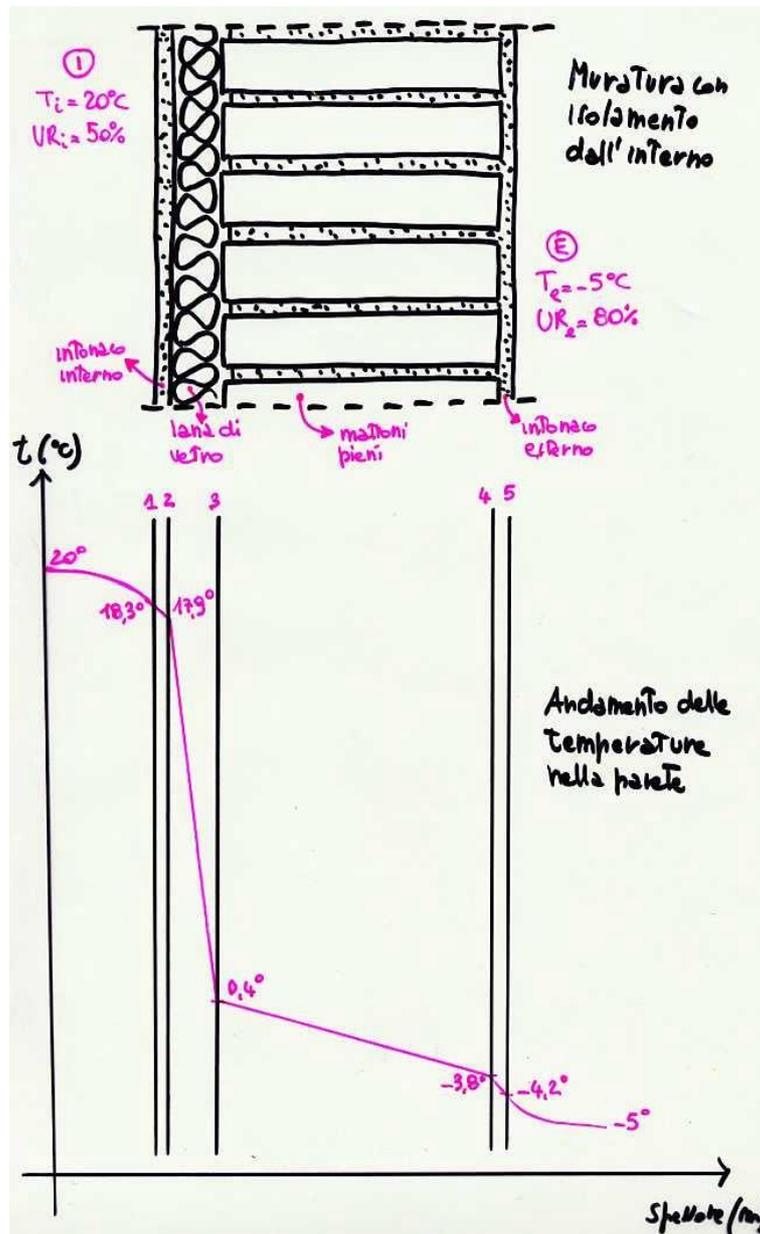
$$T_2 = 17,9 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s2} = 2049 \text{ Pa}$$

$$T_3 = 0,4 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s3} = 621 \text{ Pa}$$

$$T_4 = - 3,8 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s4} = 445 \text{ Pa}$$

$$T_5 = T_{pe} = - 4,2 \text{ °C} \quad \Leftrightarrow \quad p_{s5} = 429 \text{ Pa}$$

Figura 7 – Schema muratura con isolamento dall'interno e relativo andamento delle temperature interne (scala originale 1:10).



2. si calcola il valore degli spessori equivalenti di ogni singolo strato di materiale, definiti come il prodotto dello spessore reale del materiale per il corrispondente valore della resistenza al passaggio del vapore del relativo materiale, cioè $s'_i = s_i \cdot \mu_i$:

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

$$s'_{\text{isolante}} = 0,05 \cdot 2 = 0,1 \text{ m}$$

$$s'_{\text{mattoni}} = 0,24 \cdot 10 = 2,4 \text{ m}$$

$$s'_{\text{intonaco}} = 0,02 \cdot 15 = 0,3 \text{ m}$$

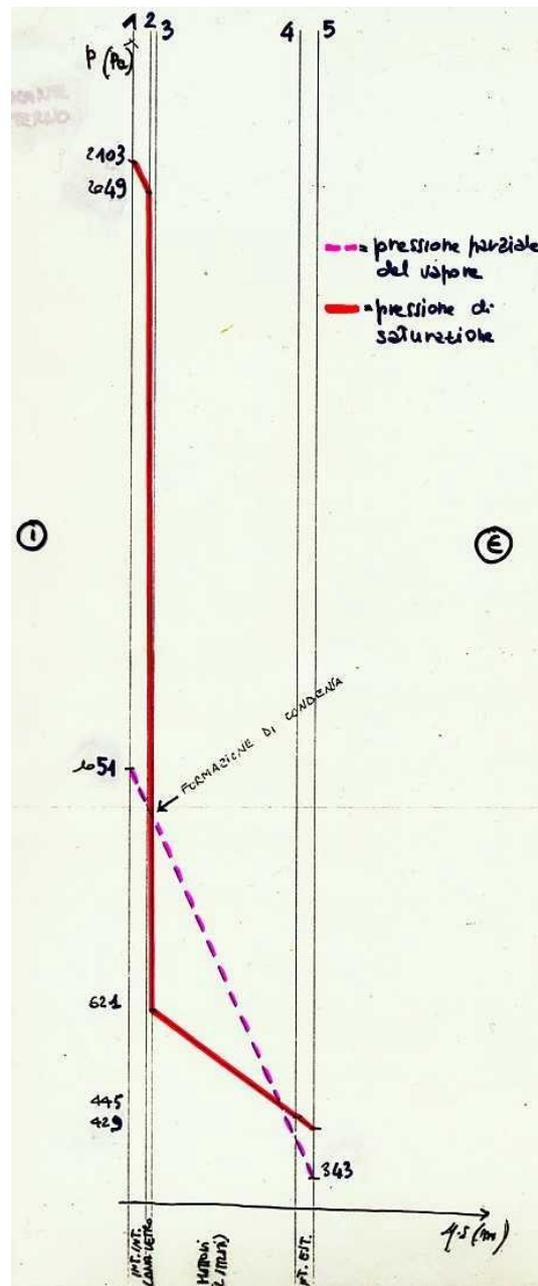
3. non variando le temperature superficiali in corrispondenza della superficie interna ed esterna della parete, i valori della pressione parziale del vapore corrispondenti rimangono invariati, cioè:

$$\text{per l'interno: } p_{vi} = \varphi_i \cdot p_{s1} = 0,5 \cdot 2103 \text{ Pa} = 1051 \text{ Pa}$$

$$\text{per l'esterno: } p_{ve} = \varphi_e \cdot p_{s5} = 0,8 \cdot 429 \text{ Pa} = 343 \text{ Pa}$$

4. nella figura 8 è riportato il diagramma di Glaser, la cui scala originaria è 1:10, da cui è possibile verificare che il rischio di formazione di condensa aumenta, e c'è possibilità di formazione di condensa nell'isolante e nello strato in mattoni. Volendo quindi fare un isolamento dall'interno risulta quasi sempre necessario l'utilizzo di una barriera al vapore che va sempre posizionata sul lato caldo dell'isolante e deve essere continua lungo tutta la parete.

Figura 8 – Costruzione del diagramma di Glaser per la parete schematizzata in figura 7 (scala originale 1:10).



Bibliografia di riferimento:

Cocchi A., "Elementi di Termofisica Generale e Applicata", Ed. Esculapio, Bologna 1990
 Cellai GF., "Dispense del corso E – Fisica Tecnica ed Impianti"