

Prestazioni termoigrometriche dei componenti edilizi

M. Piller

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

18 aprile 2021

1 Generalità

Involucro edilizio - Generalità I

Funzioni principali

- Sicurezza strutturale, resistenza al fuoco
- Protezione degli individui dalle variazioni climatiche, agenti atmosferici, rumore
- Consentire l'interazione visiva con l'ambiente esterno
- Impiego della luce naturale
- Scopo degli impianti di climatizzazione ed illuminazione: realizzare condizioni termoigrometriche e visive confortevoli.

Involucro edilizio - Generalità II

Caratteristiche di isolamento termico delle strutture edilizie

- Elementi opachi: proteggono gli spazi interni dalle sollecitazioni termiche indotte dall'ambiente esterno.
- Elementi trasparenti (isolamento termico da 5 a 10 volte inferiori rispetto alle pareti opache.) Le superfici trasparenti costituiscono il 10%-15% della superficie dell'involucro edilizio.

Diffusione del vapore I

Vapore, condensa e muffa

- In inverno, il vapore d'acqua presente nei locali riscaldati può condensare su superfici perimetrali fredde.
- Caso tipico: pareti non adeguatamente isolate, ponti termici, finestre.
- Problematiche: gocciolamento con conseguente danneggiamento di intonaci e cartongessi, sviluppo di muffa.
- Il vapore può *diffondere* attraverso gli elementi opachi ed eventualmente condensare: *condensa interstiziale*.
- **Il vapore condensa quando la sua pressione parziale raggiunge il valore di saturazione corrispondente alla temperatura locale:**

$$p_v = p_{v,sat} \implies \text{condensazione!}$$

Diffusione del vapore II

Diffusione del vapore

- La maggior parte degli elementi opachi sono mezzi porosi a celle aperte.
- Il vapore d'acqua diffonde attraverso gli elementi opachi in presenza di gradienti di pressione parziale.
- La *legge di Fick* governa la diffusione del vapore.

Legge di Fick

Legge di Fick

$$\begin{aligned}
 g &= -\delta_P \frac{dp_v}{dx} \\
 &= -\frac{\delta_0}{\mu_P} \frac{dp_v}{dx}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- g flusso di massa di vapore [kg/s m]
- δ_P permeabilità al vapore del materiale P [kg/s m Pa]
- δ_0 permeabilità al vapore in aria, $\delta_0 = 193 \times 10^{-12}$ [kg/s m Pa] [kg/s m Pa]
- μ_P permeabilità relativa del materiale P [-]

Condizioni stazionarie monodimensionali I

Condizioni stazionarie monodimensionali

$$\begin{aligned}
 g &= -\delta_P \frac{\Delta p_v}{\Delta x} \\
 &= -\frac{\delta_0}{\mu_P} \frac{\Delta p_v}{\Delta x} \\
 &= -\delta_0 \frac{\Delta p_v}{\mu_P \Delta x}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Spessore equivalente s_d :

$$s_d \equiv \mu_P \Delta x$$

Resistenza al vapore:

$$Z_P \equiv \frac{\Delta x}{\delta_P}$$

Condizioni stazionarie monodimensionali II

Conduttanza:

$$K_P \equiv 1/Z_P$$

$$Z_P g = \Delta p_v \quad (3)$$

Condizioni stazionarie ed analogia elettrica I

Analogia elettrica

- Fick e Ohm: leggi formalmente identiche.
- Corrispondenze:

Ohm	Fick
ΔV	Δp_v
I	g
R	Z_P

Condizioni stazionarie ed analogia elettrica II

Serie e parallelo di resistenze

- Resistenze in serie:

$$Z_{eq} = \sum_j Z_j$$

- Resistenze in parallelo:

$$K_{eq} = \sum_j K_j$$

Andamento di p_v I

Andamento di p_v negli elementi piani

- In condizioni stazionarie il profilo di p_v in un elemento piano è lineare.
- Il gradiente di p_v è più elevato negli elementi a più bassa permeabilità al vapore.
- Con riferimento alla figura 1, si vede come l'applicazione di una barriera al vapore riduca/elimini il rischio di condensa interstiziale.

Andamento di p_v II

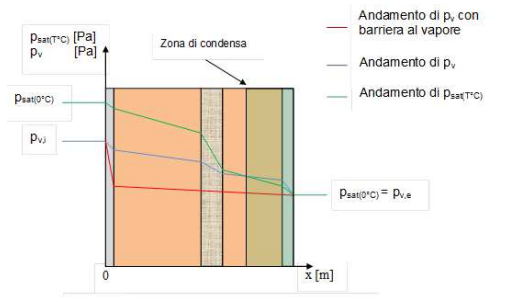


Figura: Andamento della pressione parziale del vapore in una parete multistrato, in presenza o meno di barriera al vapore.

Diagramma di Glaser I

Distribuzione di temperatura e pressione parziale di vapore in una parete piana multistrato, in condizioni stazionarie:

$$R_{t,eq} = \frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^6 \frac{\Delta x_j}{k_j} + \frac{1}{h_e}$$

$$Z_{eq} = \sum_{j=1}^6 \frac{\Delta x_j}{\delta_{p,j}}$$

$$q = \frac{T_{a,i} - T_{a,e}}{R_{t,eq}}$$

$$g = \frac{p_{v,i} - p_{v,e}}{Z_{eq}}$$

Diagramma di Glaser II

$$T(x_k) = T_{a,i} - \left[\frac{1}{h_i} + \sum_{j \leq k} \frac{\Delta x_j}{k_j} \right] q$$

$$p_v(x_k) = p_{v,i} - \left[\sum_{j \leq k} \frac{\Delta x_j}{\delta_{p,j}} \right] g$$

Calcolo della tensione di vapore:

$$p_{v,sat}(T) = 6.11 \cdot 10^{7.5 T / (237.7 + T)} \text{ [mbar]}, \quad T \text{ in } ^\circ\text{C}$$

Diagramma di Glaser III

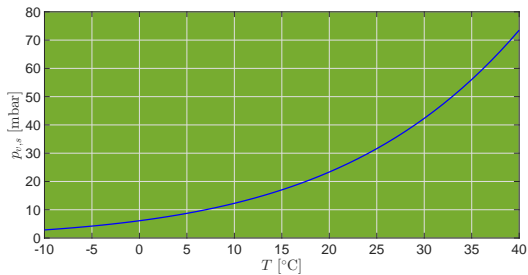


Figura: Tensione di vapore.

Caratteristiche di permeabilità dei materiali I

Materiale	l/mhPa	kg/msPa*10 ¹³
INTONACI		
malta di calce, malta di calce e cemento	0.043	12.00
calce e gesso	0.065	18.00
ELEMENTI DA COSTRUZIONE PORTANTI		
calcestruzzo normale struttura chiusa 2000 kg/m ³	0.007	2.00
calcestruzzo struttura aperta con argille espanse 1000 kg/m ³	0.090	25.00
PANNELLI DA COSTRUZIONE		
pannelli di cartongesso	0.083	23.00
pannelli in cemento armato	0.0315	8.75
MURATURE		
mattoncino forato, leggero, ad alta resistenza mecc.	0.108	30.00
- muro di pietra d'arenaria calcarea o mattoni pieni 1000 kg/m ³	0.128	35.42
ISOLANTI TERMICI		
isolanti a fibra minerale e vegetale	0.540	150.00
isolanti in sughero	0.0638	17.72
polistirolo espanso: 15 kg/m ³	0.032	9.00
- 20 kg/m ³	0.022	6.00
- 30 kg/m ³	0.016	4.50
poliuretano 30 kg/m ³	0.007	2.00
pannelli in legno truciolari	0.013	3.60
LEGNO E MATERIALI IN LEGNO		
quercia, faggio, abete rosso, pino perp. alle fibre	0.016	4.50
pannelli in legno compensato	0.036	10.00
pannelli in legno pressati	0.013	3.60
VARIE		
rivestimento murario esterno di mosaico di vetro ceramica	0.0032	0.89
intonaco ad isolamento termico	0.1275	35.42
aria	0.695	193.00
gesso	0.065	18.00
guaine	0.0000075	0.0021
Permeanze utili		
carta Kraft impregnata in bitume:	0.015	4.17
polietilene 100 µm	0.042	11.67
polietilene 300 µm	0.0105	2.92
foglio alluminio da 25 µm	0.0000075	0.00

Figura: Caratteristiche di permeabilità dei materiali.

Esempio: parete multistrato I

Verifichiamo una parete multistrato per la condensa interstiziale. Le proprietà dei materiali che costituiscono la parete sono riportati in tabella (dall'interno verso l'esterno).

Materiale	Spessore [cm]	λ [W/m ^{°C}]	R [°C m ² /W]	δ_p [kg/s m Pa]
Intonaco	2.0	0.35	---	18.0
Mattoni forati	8.0	0.30	---	30.0
Isolante	s_j	0.030	---	4.50
Aria	30	---	0.18	193
Laterizio	20.0	0.5	---	31.25
Intonaco	2.0	0.35	---	18.0

I coefficienti di scambio termico convettivo:

$$h_{c,i} = 8 \text{ W/m}^2\text{°C}; \quad h_{c,e} = 23 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Temperature esterna/interna:

$$t_i = 20\text{°C}; \quad t_e = -10\text{°C}$$

Esempio: parete multistrato II

Lo spessore di materiale isolante che consente di disperdere verso l'esterno un flusso termico $q'' = 11 \text{ W/m}^2$ si calcola in base all'equazione di Fourier in regime stazionario, ottenendo:

$$s_i = 4.8 \text{ cm}$$

Possiamo quindi calcolare le temperature interstiziali in corrispondenza alle superfici di separazione tra i diversi materiali che costituiscono la parete:

Strato Δx [cm]	0	2	8	4.8	30	20	2
t [°C]	18.6	18.0	15.1	-2.5	-4.5	-8.9	-9.5

Note le temperature interstiziali possiamo calcolare le corrispondenti pressioni parziali del vapore a saturazione:

Esempio: parete multistrato III

Strato Δx [cm]	0	2	8	4.8	30	20	2
p_{vs} [kPa]	2.145	2.062	1.711	0.506	0.437	0.311	0.296

Utilizzando la legge di Fick possiamo calcolare la pressione parziale del vapore in corrispondenza alle superfici di separazione tra i diversi materiali che costituiscono la parete:

Strato Δx [cm]	0	2	8	4.8	30	20	2
p_v [kPa]	1.024	0.978	0.867	0.425	0.360	0.095	0.047

Esempio: parete multistrato IV

Si ottiene inoltre un flusso di vapore interno-esterno pari a

$$g_v = 0.15 \text{ g}_v/\text{h m}^2$$

Confrontando i dati delle due ultime tabelle possiamo verificare che non si manifesta condensazione interstiziale. Per altro, le muffe si sviluppano in presenza di umidità relativa superiore al 80%.

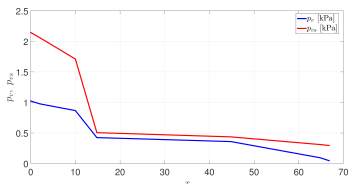
Facendo il rapporto delle pressioni parziali di vapore calcolate nelle due ultime tabelle ricaviamo l'umidità relativa:

Strato Δx [cm]	0	2	8	4.8	30	20	2
Φ [— — —]	47.7	47.4	50.7	84.0	82.4	30.5	15.9

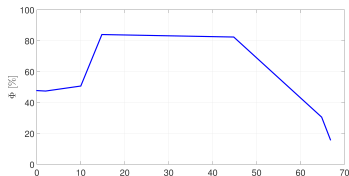
Esempio: parete multistrato V

L'andamento di p_v e p_{vs} è riportato in figura 4a. L'umidità relativa interstiziale è riportata in figura 4b. Si nota come la forte riduzione di temperatura in corrispondenza allo strato isolante abbia comportato una corrispondente forte riduzione di tensione di vapore; d'altro canto, lo strato termicamente isolante non costituisce una altrettanto efficace barriera al vapore (si noti la riduzione relativamente modesta di p_v attraverso lo strato isolante). Ciò comporta un sensibile aumento dell'umidità relativa attraverso lo strato isolante.

Esempio: parete multistrato VI



(a)



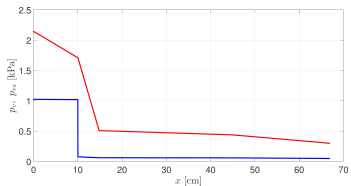
(b)

Disponendo uno strato di barriera al vapore di spessore 0.2mm, $\delta_p = 0.0003 \times 10^{-12} \text{ kg/s m Pa}$, tra il mattone forato e l'isolante termico, trascurando la resistenza termica associata alla barriera, si calcola un flusso di vapore

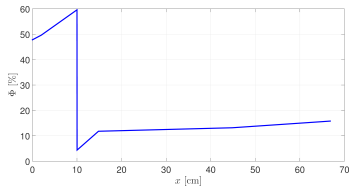
$$g_v = 0.005 \text{ g}_v/\text{h m}^2$$

Si ottiene la distribuzione di vapore e di umidità relativa riportate in figura ???. In questo caso non si prevede insorgenza di muffa.

Esempio: parete multistrato VII



(a)



(b)