

Termoigrometria

Massimo Garai



DIN - Università di Bologna

<http://acustica.ing.unibo.it>

Copyright (C) 2004-2014

Massimo Garai - Università di Bologna

1

Abitazione nella stagione fredda - Produzione di vapor d'acqua

- Esistono vari meccanismi di produzione di vapor d'acqua nell'ambiente interno:
 - respirazione e sudorazione delle persone
 - processi come cottura cibi, lavaggio pavimenti, lavaggio biancheria, uso bagni, ecc.
 - infiltrazioni di aria esterna più umida
 - ...
- Complessivamente: $2-3 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{m}^3)$

Produzione di vapore - Valori tipici

Attività	Vapore, g _v /h
Fornello a gas 5 cm	100
Fornello a gas 9 cm	200
Fornello a gas 16 cm	400
Pentola 20 cm in ebollizione - scoperta	900
Pentola 20 cm in ebollizione - coperta	350
Doccia calda	2000
Bagno caldo in vasca	300
Panni stesi 5 kg a 20 °C e 40% U.R.	200
Persona a riposo	50
Persona in attività leggera	100

Abitazione nella stagione fredda - Smaltimento del vapor d'acqua

➤ *Ricambio d'aria*

- valutabile in 0,8 volumi/h
- vapore allontanato: 2-4 g/m³ di alloggio
- meccanismo principale

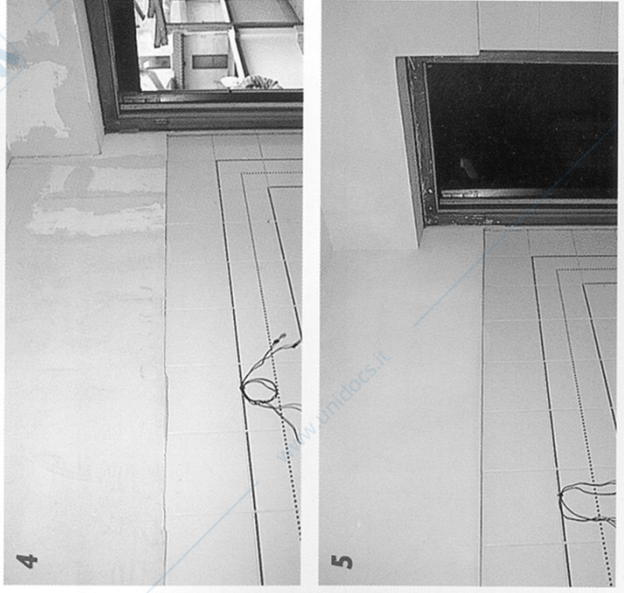
➤ *Condensazione su superfici fredde*

- sulle vetrate: solo volano equilibratore
- su superfici opache: formazione di *muffe* (per $\varphi \geq 0,80$) e degrado fisico di materiali sensibili e degrado delle prestazioni termiche
- da evitarsi

➤ *Migrazione attraverso le strutture edilizie*

- permeabilità contemporanea al calore ed al vapore
- possibilità di formazione di condensa interstiziale

Ponti termici e condensa



Migrazione del vapor d'acqua attraverso le strutture edilizie

➤ *Cause*

- gradienti di pressione in materiali porosi
- gradienti di pressione nell'acqua soggetta a capillarità
- gradienti di pressione osmotica dovuta ai sali disciolti
- gradienti di pressione dovuti a gradienti termici
- gradienti di pressione parziale nella fase vapore
- forza di gravità

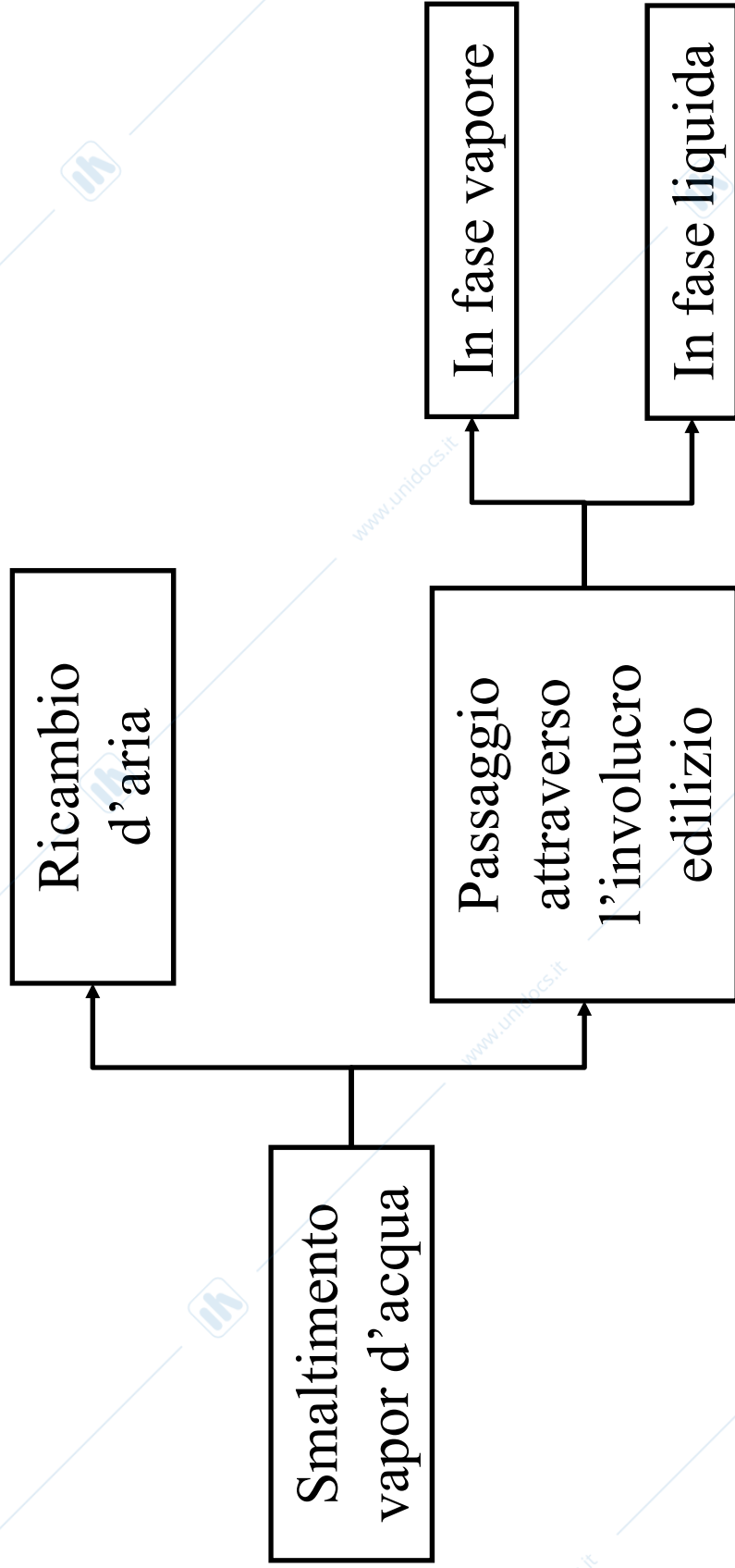
➤ *Trasporto in fase liquida*

- prodotto dalla capillarità

➤ *Trasporto in fase vapore*

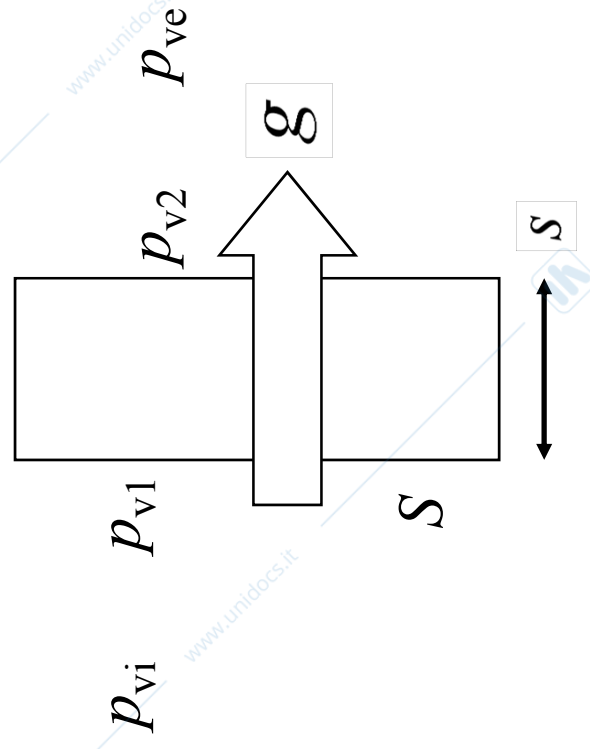
- funzione della microgeometria del sistema
- influenzato dalla quantità di acqua liquida presente
- dipende da pressione di saturazione e temperatura

Smaltimento del vapor d'acqua



Legge di Fick

- Lastra piana seminfinita di materiale omogeneo isotropo, di area frontale S e spessore s
- Se $p_{v1} > p_{v2}$ il vapore fluisce spontaneamente dalla faccia 1 alla faccia 2



Legge di Fick

- Regime stazionario
- λ indipendente da φ
- δ_v indipendente da T
- T indipendente da r (calore latente)
- Si trascurano:
 - trasporto di vapore in fase liquida
 - igroscopicità dei materiali
 - solubilità in acqua di sali

Legge di Fick

➤ In analogia con la legge di Fourier

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

➤ Si pone per il flusso di vapor d'acqua

$$g = \frac{\delta_v}{s} (p_{v1} - p_{v2}) \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

Parametri caratteristici

- Permeabilità al vapor d'acqua

$$[\delta_v] = \left[\frac{gs}{(p_{v1} - p_{v2})} \right] = \left[\frac{kg_v}{s \cdot m \cdot Pa} \right]$$

- Resistenza (specifica) al flusso di vapor d'acqua

$$r_v = \frac{s}{\delta_v} = \frac{s\mu}{\delta_{v0}} = \frac{s'}{\delta_{v0}} \left[\frac{s \cdot m^2 \cdot Pa}{kg_v} \right] \iff r_T = \frac{s}{\lambda} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

Parametri caratteristici

- Permeabilità al vapor d'acqua dell'aria

$$\delta_{v0} = 1,9 \cdot 10^{-10} \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}} \right] = 6,8 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}} \right]$$

- Fattore di resistenza adimensionale

$$\mu = \frac{\delta_{v0}}{\delta_v}$$

- Spessore *equivalente* d'aria

$$s' = s\mu$$

Resistenze liminari

- Per il flusso di calore

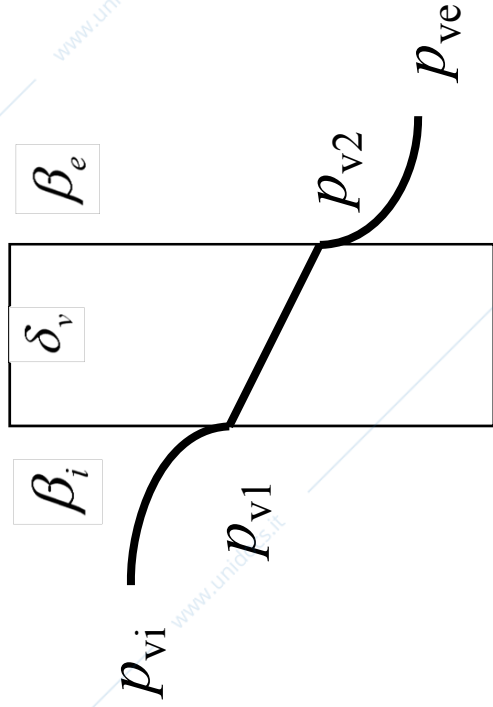
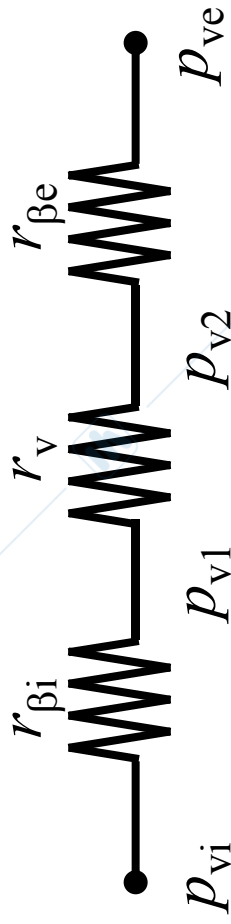
$$R_h = \frac{1}{hS} \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$r_h = \frac{1}{h} \left[\frac{\text{K} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right]$$

- Per il flusso di vapor d'acqua

$$r_\beta = \frac{1}{\beta} \left[\frac{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}}{\text{kg}_v} \right]$$

Resistenza globale al flusso di vapor d'acqua



Resistenza (specifica) globale al flusso di vapor d'acqua

$$r_{vT} = \frac{1}{\beta_i} + r_v + \frac{1}{\beta_e}$$

$$r_{vT} = \frac{1}{\beta_i} + \frac{s}{\delta_v} + \frac{1}{\beta_e}$$

$$r_{vT} = \frac{1}{\beta_i} + \frac{s\mu}{\delta_{v0}} + \frac{1}{\beta_e}$$

$$r_{vT} = \frac{1}{\beta_i} + \frac{s'}{\delta_{v0}} + \frac{1}{\beta_e}$$

Valori tipici

Materiale	$\delta_v \cdot 10^9 \text{ kg}_v / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$	μ
Aria	680	1
Calcestruzzo armato	14	50
Intonaco di gesso	85	8
Mattoni pieni	65	10
Blocchi cementizi	75	9
Laterizi forati	85	8
Lana di vetro 30 kg/m ³	330	2
Polistirolo esp. 30 kg/m ³	7	100
Polietilene 0,3 mm	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^5$

Legge di Fick e permeanza

➤ In analogia con la legge

$$\dot{Q} = US(T_1 - T_2) \quad [\text{W}]$$

➤ Si pone

$$\dot{G} = M_v S (p_{v1} - p_{v2}) \quad \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{s}} \right]$$

➤ Definendo la permeanza al vapor d'acqua

$$[M_v] = \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \text{Pa}} \right]$$

Permeanza al flusso di vapor d'acqua

$$M_v = \frac{1}{r_{vT}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{s}{\delta_v} + \frac{1}{\beta_e}} \approx \frac{1}{\frac{s}{\delta_v}} \left(\frac{1}{\beta_i} \approx \frac{1}{\beta_e} \approx 0 \right)$$

$$M_v = \frac{1}{\frac{1}{s\mu} + \frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{\delta_{v0}} + \frac{1}{\beta_e}} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{\delta_{v0}} + \frac{1}{\beta_e}}$$

Condensazione interstiziale

Diagramma di Glaser

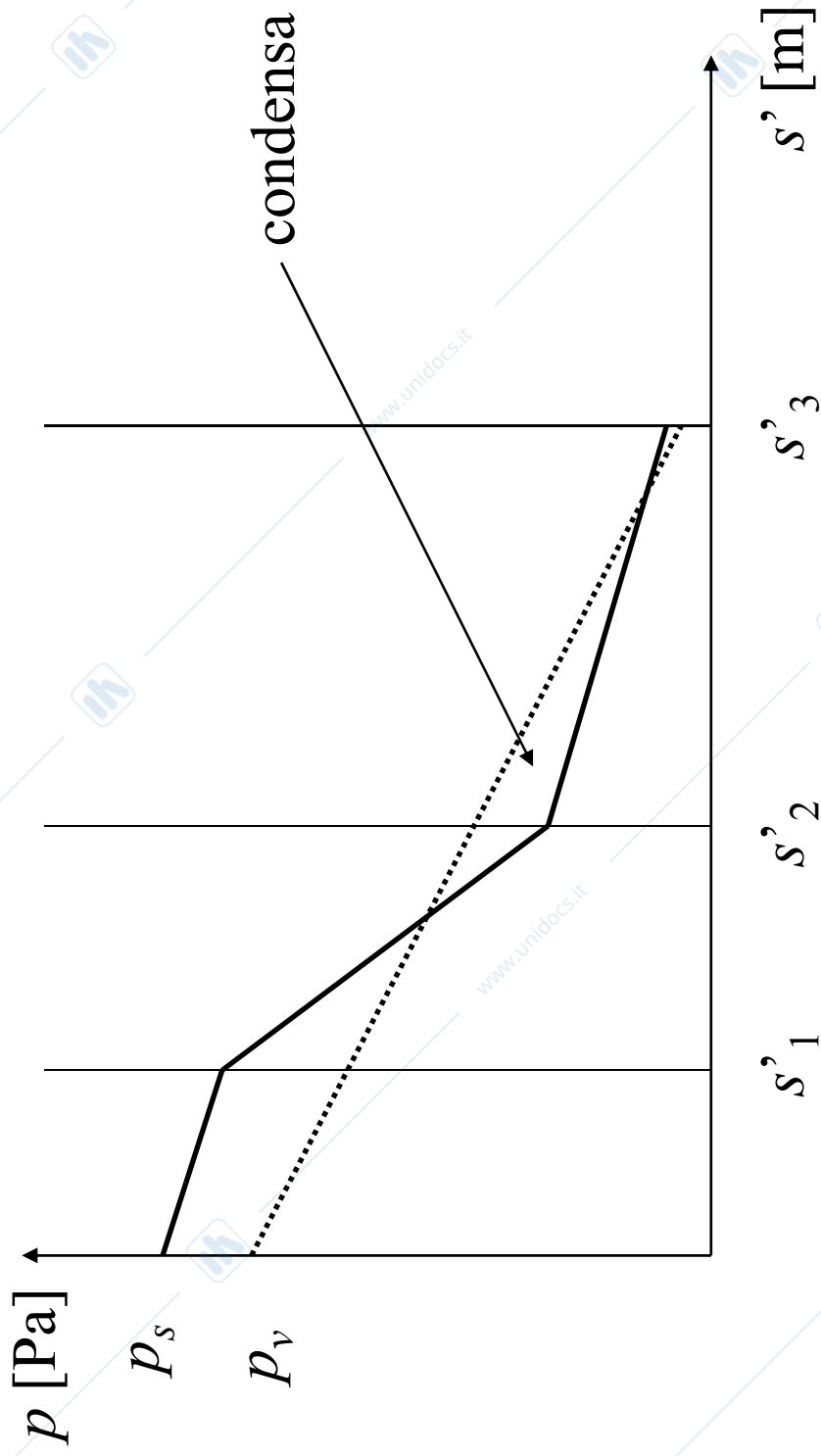


Diagramma di Glaser

➤ 1. Andamento della temperatura, note T_i e T_e

$$q = \frac{(T_i - T_e)}{r_T} = h_i (T_i - T_1)$$

$$T_1 = T_i - \frac{1}{h_i} q = T_i - \frac{1}{h_i} \frac{(T_i - T_e)}{r_T}$$

Diagramma di Glaser

➤ 1. Andamento della temperatura, note T_i e T_e

$$q = \frac{(T_i - T_e)}{r_T} = \frac{(T_k - T_{k+1})}{r_{T,k}} \quad (k = 1, \dots, n)$$

$$T_{k+1} = T_k - r_{T,k} \frac{(T_i - T_e)}{r_T} \quad (k = 1, \dots, n)$$

Diagramma di Glaser

➤ 2. Andamento della pressione di saturazione, utilizzando le tabelle del vapor d'acqua

$$\begin{array}{l} T_i \rightarrow p_{si}(T_i) \\ T_1 \rightarrow p_{s1}(T_1) \\ \dots \\ T_k \rightarrow p_{sk}(T_k) \\ \dots \\ T_e \rightarrow p_{se}(T_e) \end{array}$$

Diagramma di Glaser

➤ 3. Andamento della pressione parziale del vapor d'acqua

➤ 3a. Segmento singolo

$$p_{vi} = \varphi_i p_{si}(T_i) \rightarrow p_{v1} \approx p_{vi} \quad (1/\beta_i \approx 0)$$

$$p_{ve} = \varphi_e p_{se}(T_i) \rightarrow p_{vn} \approx p_{ve} \quad (1/\beta_e \approx 0)$$

➤ e si congiungono p_{v1} e p_{vn} con un segmento

Diagramma di Glaser

➤ 3b. Poligonale

$$p_{vi} = \varphi_i p_{si}(T_i) \rightarrow p_{v1} \approx p_{vi} \quad (1/\beta_i \approx 0)$$

$$p_{ve} = \varphi_e p_{se}(T_i) \rightarrow p_{vn} \approx p_{ve} \quad (1/\beta_e \approx 0)$$

$$g = \frac{(p_{vi} - p_{ve})}{r_{vT}} = \frac{(p_{v,k} - p_{v,k+1})}{r_{v,k}} \quad (k = 1, \dots, n)$$

$$p_{v,k+1} = p_{v,k} - r_{v,k} \left(\frac{p_{vi} - p_{ve}}{r_{vT}} \right) \quad (k = 1, \dots, n)$$

Diagramma di Glaser

- Quando la curva di p_v incrocia quella di p_s si ha la formazione di condensa
- Flusso di vapor d'acqua entrante

$$g_{in} = \frac{(p_{vi} - p_{v,c})}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{\delta_{v0}} \sum_{k=1}^c s'_k} \approx \frac{(p_{vi} - p_{v,c})}{\delta_{v0}} \sum_{k=1}^c s'_k$$

Diagramma di Glaser

➤ Flusso di vapor d'acqua uscente

$$g_{out} = \frac{(p_{v,c} - p_{ve})}{\frac{1}{\delta_{v0}} \sum_{k=c}^n s'_k + \frac{1}{\beta_e}} \approx \frac{(p_{v,c} - p_{ve})}{\frac{1}{\delta_{v0}} \sum_{k=c}^n s'_k}$$

➤ Flusso condensato

$$g_c = g_{in} - g_{out} \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

Diagramma di Glaser

➤ Quantità di condensato (in d giorni) per unità di superficie

$$g_c d \left[\frac{\text{kg}_v}{\text{m}^2} \right]$$

➤ Quantità di condensato (in d giorni) totale

$$G_c = g_c S d \quad [\text{kg}_v]$$

➤ Deve essere

$$\begin{cases} G_c(60) \leq G_{ev}(90) \\ G_c(60) \leq G_{\max} \end{cases}$$

Quantità limite di condensa alla fine del periodo di condensazione (da UNI EN ISO 13788)

Materiale	Densità ρ , kg/m ³	G_{\max}/V , g/m ³
Laterizi	600 - 2000	500
Calcestruzzi	400 - 2400	500
Legnami e derivati	500 - 800	$30 \cdot \rho \cdot s$
Intonaci e malte	600 - 2000	$30 \cdot \rho \cdot s$
Fibre minerali	10 - 150	$5000 \cdot \rho \cdot s [\lambda / (1 - 1,7\lambda)]$
Materie plastiche cellulari	10 - 80	$5000 \cdot \rho \cdot s [\lambda / (1 - 1,7\lambda)]$

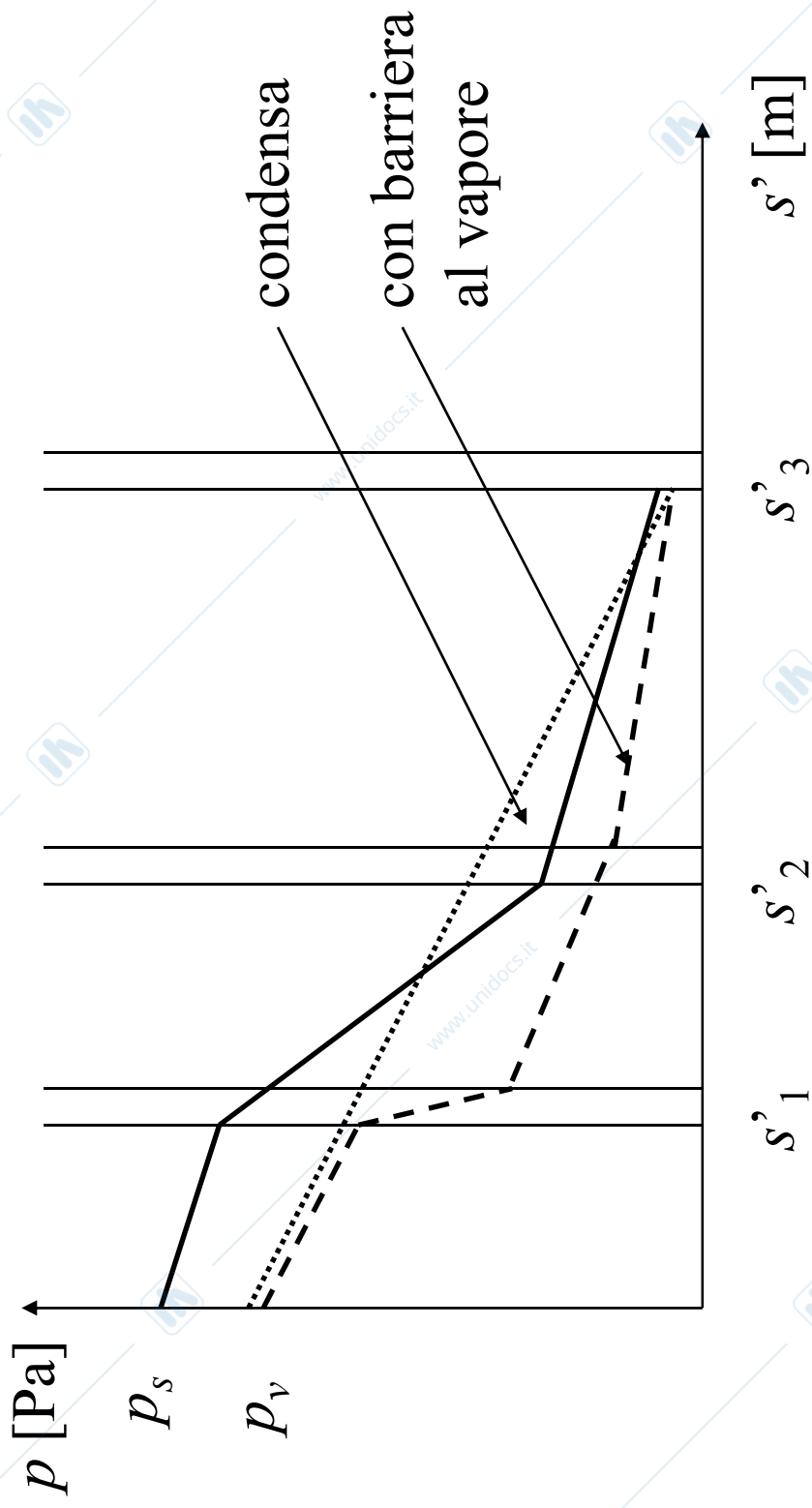
Contenuto critico di umidità (da UNI EN ISO 13788)

Materiale	Contenuto critico di umidità, kg/m³
Calcestruzzo autoclavato aerato	120
Mattone	60 - 130
Malta cementizia	180
Calcestruzzo	125
Mattone di sabbia calcarea	80 - 110

➤ Al superamento di questo valore ha inizio il trasporto di acqua in fase liquida

Barriera al vapore

Posta sulla “faccia calda” dell’isolante termico per bloccare il flusso di vapore all’interno della struttura



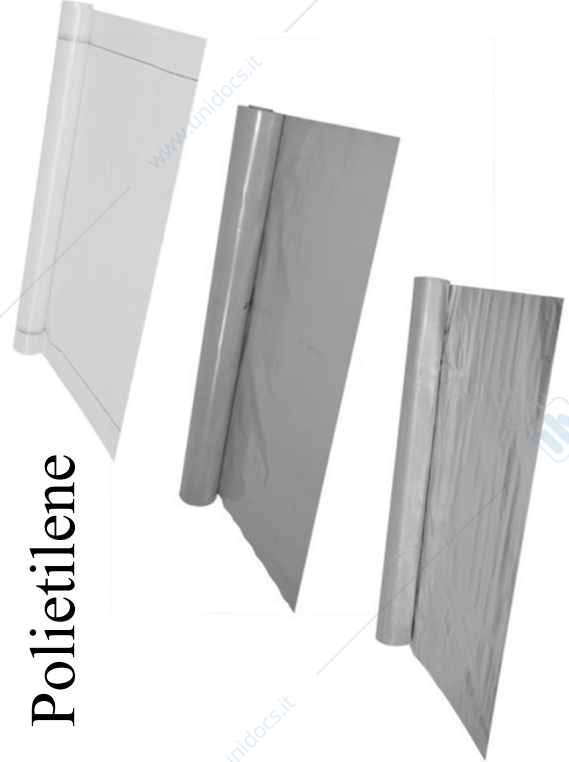
Materiali per barriera al vapore

Materiale	$\delta_v \cdot 10^9 \text{ kg}_v / (\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})$	μ
Bitume	$11 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^4$
Polietilene 0,1 mm	$17 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^5$
Polietilene 0,3 mm	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^5$
Alluminio 25 μm	$0,19 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^9$

Materiali per barriera al vapore



**Guaina
bituminosa**



Polietilene



Alluminio



Alluminio

Termoigrometria

Fine 

Massimo Garai

DIN - Università di Bologna

<http://acustica.ing.unibo.it>

Copyright (C) 2004-2014

Massimo Garai - Università di Bologna

34