

Umidità

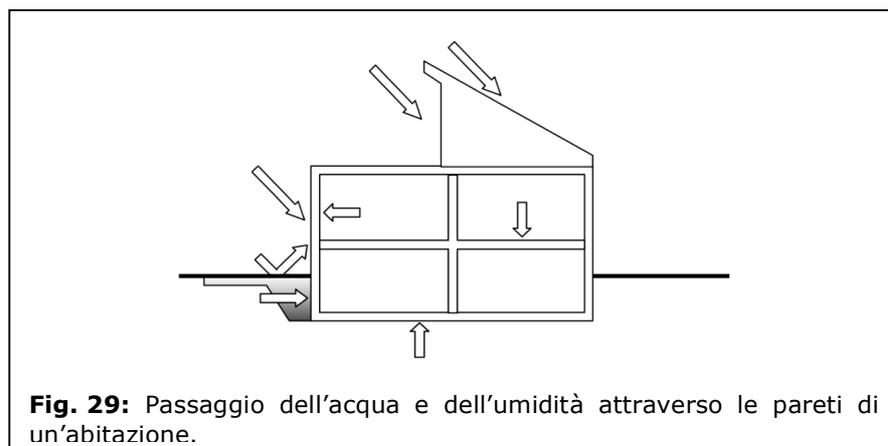
1. Acqua nelle costruzioni (opere edili)
2. Umidità dell'aria, pressione di vapore
3. Diffusione del vapore acqueo nelle opere edili in presenza di gradiente di temperatura e pressione

1. Acqua nelle costruzioni (opere edili)

L'acqua ha diversi effetti sulle opere edili. In molti casi si tratta di danno, ma può anche contribuire a migliorare il benessere nelle abitazioni.

L'acqua nelle opere edili può presentarsi in diversi punti :

- sulle superfici esterne per effetto dell'acqua battente (pioggia) e acqua sotterranea;
- alle superfici interne come condensato;
- all'interno degli elementi di costruzione (ad es. pareti) come vapore o condensato;
- nell'aria interna come "umidità relativa".



La conoscenza delle interazioni tra acqua e opere edili è di grande importanza, poiché alle normali condizioni ambientali l'acqua può presentarsi nelle opere edili nei suoi 3 strati di aggregazione:

- $T < 0$ °C, solido (ghiaccio):
effetto "esplosivo" a causa dell'aumento di volume
- $0 < T < 100$ °C, liquido:
acqua sotterranea, pioggia battente sulle facciate, correnti capillari, condensato nelle pareti e alle superfici delle stesse.
- A tutte le temperature, vapore acqueo nella fase gassosa:
Movimento del vapore acqueo per diffusione, umidità relativa dell'aria interna.

Pioggia battente

Le pareti più esposte alla pioggia possono facilmente inumidirsi soprattutto in presenza di vento, la cui forza può facilitare la penetrazione dell'umidità. In generale gli effetti della pioggia battente sono in stretta relazione con l'aerodinamicità degli edifici e dipende da eventuali difetti locali dell'involucro esterno. L'intonacatura esterna non ha soltanto la funzione estetica di garantire una copertura unitaria dell'edificio, bensì garantisce anche una protezione dagli effetti della pioggia battente, ed è soprattutto nel caso di materiali porosi irrinunciabile.

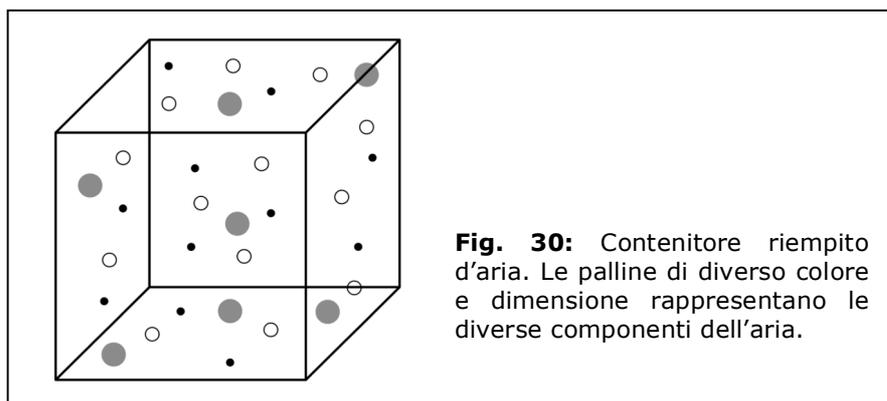
Per pareti particolarmente esposte si dovrebbero utilizzare intonaci idrorepellenti o perlomeno che inibiscano il trasporto dell'acqua. Gli stessi devono tuttavia garantire uno scambio di vapore sufficiente tra la parte interna della parete e l'ambiente esterno.

Per pareti con calcestruzzo a facciavista, un copri ferro insufficiente può provocare la ruggine del ferro con conseguente formazione di crepe e da ultimo eventualmente lo staccamento della copertura.

La copertura necessaria dipende dal tipo di calcestruzzo, dallo spessore dei ferri di armatura e dalle grandezze degli inerti.

2. Umidità nell'aria, pressione di vapore

Alle temperature che si trovano normalmente nel nostro ambiente, nell'aria sono sempre presenti delle piccole quantità di acqua ce determinano l'umidità dell'aria. Assieme alle principali componenti dell'atmosfera – azoto (~78%), ossigeno (~21%), gas nobili, biossido di carbonio (~0.3%) – il vapore acqueo costituisce una componente importante dell'aria che respiriamo.



Se si prende un contenitore riempito con aria si creerà una pressione alle sue pareti per effetto degli urti dei costituenti dell'atmosfera. La pressione totale (p) è data dalla somma delle pressioni parziali che le singole componenti eserciterebbero in assenza delle altre, ossia:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (54)$$

Con la pressione parziale del vapore acqueo – indicato con il simbolo p_D – si può calcolare l'umidità assoluta, cioè la quantità ρ_D di vapore d'acqua presente in 1 m^3 . A tale scopo si utilizza la legge dei gas ideali, che per il vapore acqueo può essere scritta nel seguente modo:

$$p_D \cdot V = m_D \cdot R_D \cdot T \quad (55)$$

dove T è la temperatura in K, V è il volume del contenitore (ad esempio un locale), m_D è la massa di vapore acqueo in esso contenuto e R_D è la costante dei gas per il vapore acqueo:

$$R_D = 461.9 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (56)$$

Dall'equazione (55) si può dedurre la densità ρ_D del vapore acqueo:

$$\rho_D = \frac{m_D}{V} = \frac{P_D}{R_D \cdot T} \quad (57)$$

La quantità di vapore che può contenere l'aria non è tuttavia illimitata. Esiste un limite superiore che è la concentrazione di saturazione del vapore, la quale dipende dalla temperatura.

La concentrazione di saturazione ρ_{DS} e la corrispondente pressione di saturazione P_{DS} mostrano una dipendenza pronunciata dalla temperatura (v. figura 31). In generale nell'aria calda si può trovare più vapore acqueo che in quella fredda.

Se ad una determinata temperatura il contenuto di acqua ρ_D è più piccolo della corrispondente concentrazione di saturazione ρ_{DS} , con l'umidità relativa φ si indica la percentuale di vapore acqueo presente nell'aria rispetto al suo contenuto massimo, ossia:

$$\varphi = \frac{\rho_D}{\rho_{DS}} \cdot 100 = \frac{\text{quantità di vapore effettiva}}{\text{quantità di vapore di saturazione}} \cdot 100 [\%] \quad (58)$$

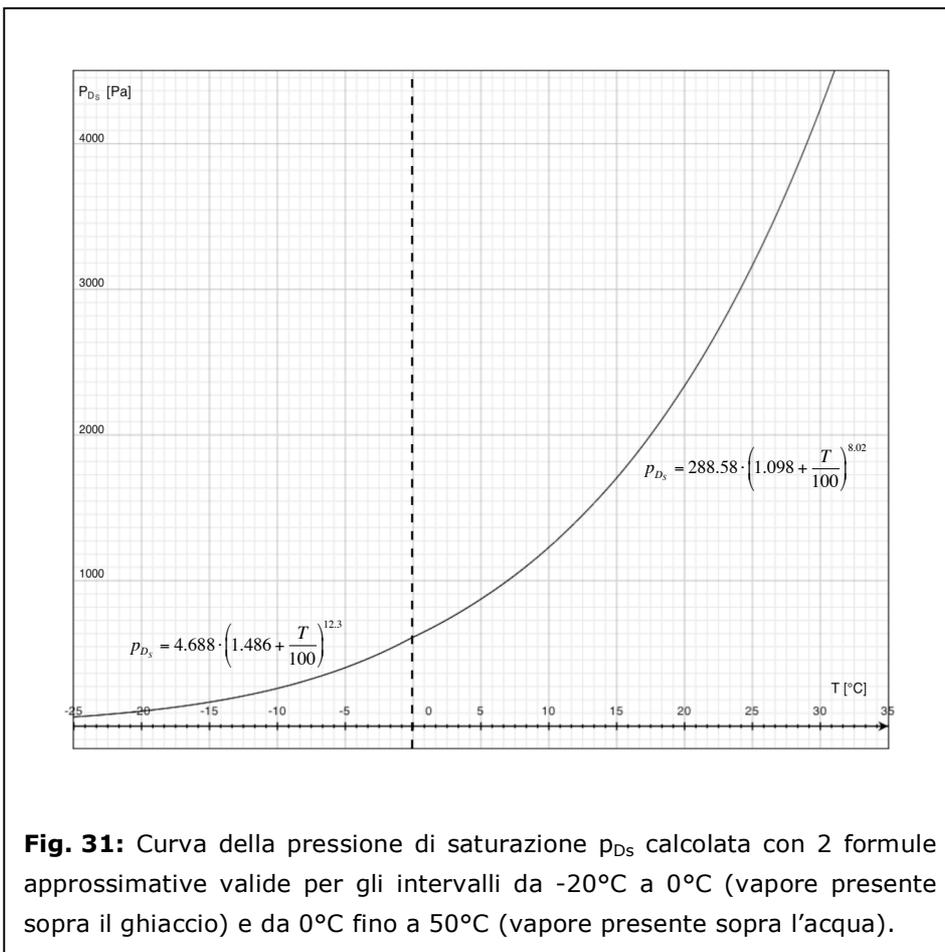
oppure, con l'aiuto dell'equazione (57) si ottiene:

$$\varphi = \frac{P_D}{R_D \cdot T} \cdot \frac{R_D \cdot T}{P_{DS}} \quad (59)$$

ossia:

$$\varphi = \frac{P_D}{P_{DS}} [\%] \quad (60)$$

Il grafico riportato in figura 31 mostra l'andamento della pressione di saturazione del vapore. Si può notare che se la temperatura aumenta, la quantità di vapore acqueo *solubile* in un determinato volume d'aria aumenta.



La tabella 5 riporta alcuni valori usuali per l'umidità relativa dell'aria.

Spazi/Condizioni	Umidità relativa dell'aria φ
Spazi interni	
<ul style="list-style-type: none"> • Salotti e studi (valori di comfort) • Stanze umide (bagni, lavanderie) • Aria secca (in inverno, senza umidificatore) 	$40\% < \varphi < 50\%$ (a 20°C) fino al 90% (valore di punta) $\varphi < 30\%$
Aria esterna	
<ul style="list-style-type: none"> • In inverno • In estate 	$70\% < \varphi < 90\%$ (a -10°C) $50\% < \varphi < 70\%$ (da $+10^{\circ}\text{C}$ a $+20^{\circ}\text{C}$)

Tabella 5: Valori tipici per l'umidità interna e esterna.

Quando l'aria umida viene raffreddata, la sua umidità relativa aumenta. Infatti la quantità del vapore acqueo è conservata, mentre la quantità di vapore di saturazione diminuisce. Se la soglia di saturazione è oltrepassata, l'acqua in eccesso condensa. La *temperatura limite*, a cui l'aria umida satura e l'acqua comincia a condensare, è chiamata temperatura del punto di rugiada. È importante sottolineare che la temperatura del punto di rugiada in generale non coincide con quella di fusione (o solidificazione) dell'acqua (cioè la temperatura con la quale il ghiaccio comincia a sciogliersi).

Nel seguente esempio l'aria di una stanza (25°C , $\varphi \approx 60\%$) viene raffreddata fino a 10°C . A 16.7°C la pressione parziale p_D corrisponde alla pressione del vapore di saturazione, raggiungendo così il punto di rugiada.

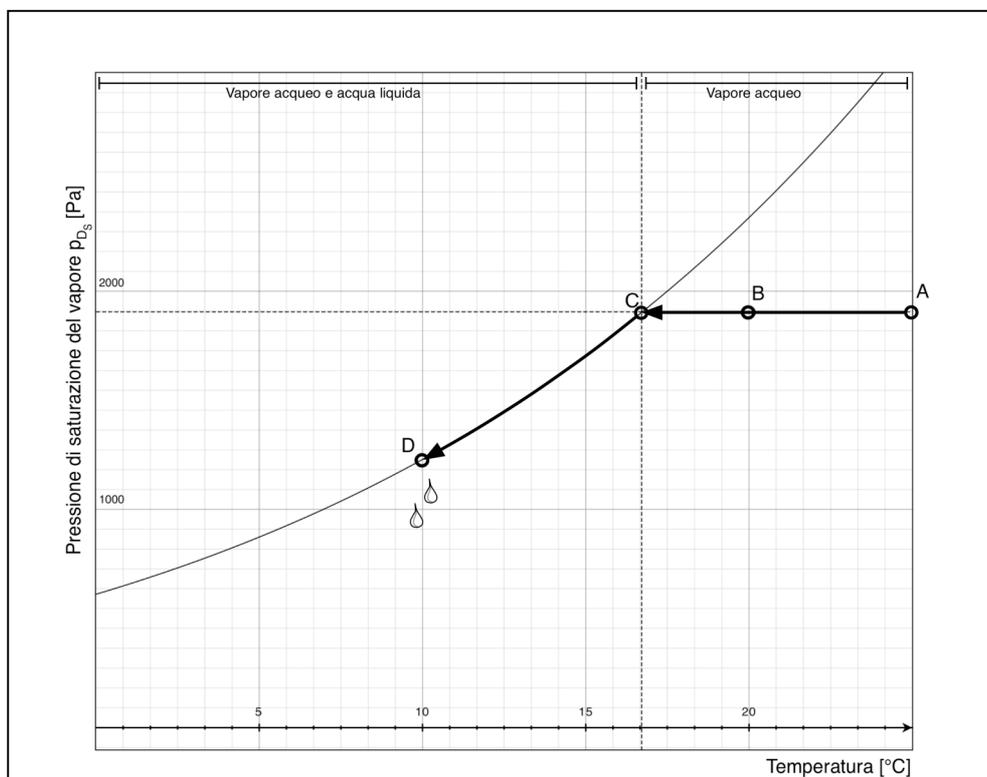


Fig. 32: Raffreddamento di aria umida fino al punto di saturazione (temperatura del punto di rugiada = 16.7°C) e condensazione del vapore acqueo con ulteriore raffreddamento fino a 10°C (con conseguente condensazione).

Punto	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Pressione parziale [Pa]	Umidità relativa [%]
A	25	1901	60
B	20	1901	82
C	16.7	1901	100

Sulle superfici laterali può formarsi dell'acqua condensata. Ciò si verifica quando la temperatura superficiale è più bassa della temperatura del punto di rugiada dell'aria nella stanza.

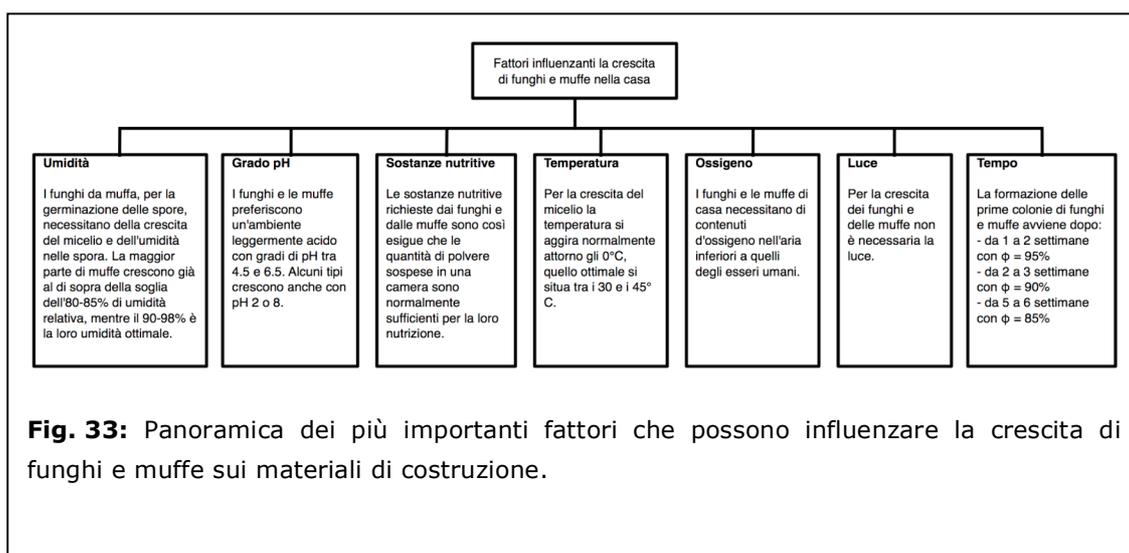
In modo analogo allo scambio di calore tra l'aria e un materiale, anche il vapore presente nell'aria tende ad entrare nei materiali passando dalle loro superfici secondo la seguente relazione:

$$\dot{q}_D = \beta \cdot (p_{Di} - p_{Do}) \left[\frac{mg}{h \cdot m^2} \right] \quad (61)$$

dove p_{Di} [Pa] è la pressione parziale del vapore dell'aria e p_{Do} [Pa] la pressione parziale del vapore sulla superficie del materiale e β [mg/(h·m²·Pa)] il **coefficiente di trasmissione superficiale** del vapore. Se p_{Do} coincide con la pressione di saturazione allora \dot{q}_D è la quantità di acqua che condensa in mg per ogni m² e ora.

Normalmente, su una parete isolata termicamente, non si presenta nessuna condensa superficiale, se non in locali con umidità eccessivamente alta dell'aria (come lavanderie, cucine o bagni). Tuttavia, occorre tenere in considerazione punti critici come i ponti termici che si possono trovare ovunque.

Studi sulle condizioni di crescita di funghi e muffe in casa hanno mostrato che, nell'intervallo di temperature normalmente riscontrate nelle costruzioni, soltanto per umidità relative superiori all'80% è da prendere in considerazione la crescita di funghi e muffe su parti estese della superficie e delle pareti, tenuto conto che il loro bisogno nutriente giornaliero è normalmente coperto dalla polvere. Ulteriori parametri come il grado di acidità (pH), la temperatura, ecc. possono favorire o inibire la crescita di muffe e funghi. Non potendo prendere delle misure protettive contro tutti questi fattori, l'unica soluzione consiste nel contenere i livelli di umidità all'interno delle zone critiche.



3. Diffusione del vapore acqueo nelle opere edili in presenza di gradiente di temperatura e pressione

3.1 Diffusione del vapore acqueo nell'aria

Se in una parte di un recipiente contenente un liquido viene aggiunto un colorante, esso si diffonderà verso le zone non colorate. In maniera del tutto analoga si comporta il vapore acqueo nell'aria. Un esempio interessante consiste nel considerare due zone tenute a concentrazioni diverse di vapore acqueo (pressioni parziali p_{D1} e p_{D2}). In una simile situazione si instaura una corrente \dot{Q}_D di molecole di vapore in direzione della parte con la concentrazione più bassa (v. figura 34).

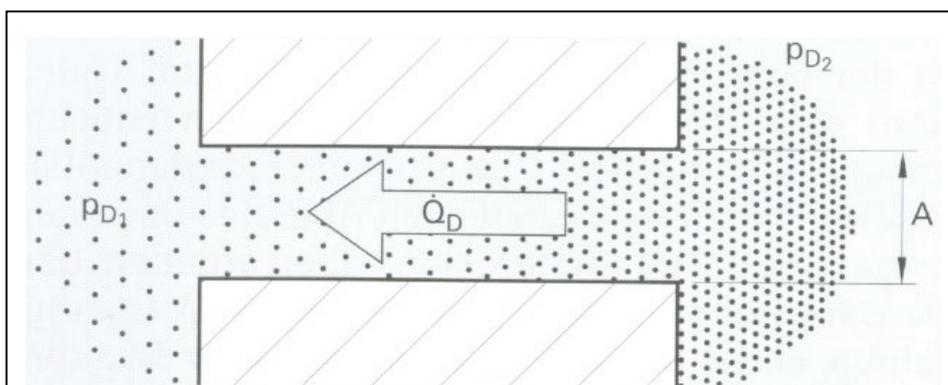


Fig. 34: Diffusione del vapore all'interno di un corpo cavo di sezione A grazie alla differenza di pressione $\Delta p_D (= p_{D2} - p_{D1})$.

L'entità di questa corrente dipende dalla differenza di pressione Δp_D tra le due zone, ed è descritta dalla legge di Fick:

$$\dot{Q}_D = \frac{\Delta Q_D}{\Delta t} = \lambda_D \cdot A \cdot \frac{\Delta p_D}{\Delta x} \quad (62)$$

dove A e ΔX sono rispettivamente la sezione e la lunghezza del passaggio esistente tra le 2 zone e λ_D [mg/(m·h·Pa)] il **coefficiente di conducibilità di umidità o coefficiente di conducibilità del vapore**. Quest'ultimo dipende dal materiale nel quale si diffonde il vapore. Nel caso dell'aria *ferma* la conducibilità del vapore viene indicata con il simbolo λ_{DL} , ed è uguale alla quantità di acqua (in mg) che in 1 ora attraversa una sezione di 1 m², se lungo una linea di diffusione di 1 m la differenza di pressione è di 1 Pa. λ_{DL} , come mostrato dalla tabella 5, dipende dalla temperatura e dalla pressione dell'aria.

T [°C]	Conducibilità del vapore nell'aria ferma [mg/(m·h·Pa)]	
	P = 1013 mbar	P = 945 mbar
+30	0.695	0.745
+10	0.658	0.705
0	0.639	0.685
-20	0.600	0.644

Tabella 5: Dipendenza dalla temperatura e dalla pressione del coefficiente di conduzione del vapore nell'aria ferma.

Con l'equazione dei gas applicata al vapore (v. equazione (57)) la legge di Fick può anche essere scritta nel modo seguente:

$$\dot{Q}_D = \lambda_{DL} \cdot A \cdot \frac{\Delta(\rho_D \cdot T \cdot R_D)}{\Delta x} \quad (63)$$

Essendo R_d una costante, nel caso in cui la temperatura T sia costante (indipendente dalla posizione x), si può anche scrivere:

$$\dot{Q}_D = D_L \cdot A \cdot \frac{\Delta \rho_D}{\Delta x} \left[\frac{mg}{h} \right] \quad (64)$$

dove

$$D_L = \lambda_{DL} \cdot R_D \cdot T \quad (65)$$

è il **coefficiente di diffusione del vapore nell'aria**, che dipende anch'esso dalla temperatura e dalla pressione dell'aria.

3.2 La diffusione del vapore nei materiali di costruzione

Analogamente alla diffusione del vapore nell'aria, anche per i materiali da costruzione si possono definire dei coefficienti di conducibilità del vapore λ_D . Nella tabella 6 sono riportati i valori di λ_D determinati sperimentalmente per alcuni materiali da costruzione.

Materiali	Coefficiente di conducibilità del vapore λ_D [mg/(m·h·Pa)]
Beton	0.010 fino 0.004
Muro di mattoni	0.175 fino 0.100
Legno (abete), fibra	0.035 fino 0.015
Lana di pietra	0.640 fino 0.320
Polistirolo	0.030 fino 0.015

Tabella 5: Valori di λ_D determinati sperimentalmente per alcuni materiali da costruzione.

In maniera del tutto analoga a quanto visto per il calore (confronta eq. (11)), si può introdurre una resistenza alla diffusione del vapore acqueo:

$$R_D = \frac{d}{\lambda_D} \quad (66)$$

dove d è lo spessore del materiale.

Il rapporto tra R_D e la resistenza R_{DL} opposta da uno strato dello stesso spessore d di aria è detto coefficiente di resistenza alla diffusione (μ):

$$\mu = \left(\frac{d}{\lambda_D} \right) : \left(\frac{d}{\lambda_{DL}} \right) = \frac{\lambda_{DL}}{\lambda_D} \quad (67)$$

Il coefficiente μ di resistenza alla diffusione indica di quante volte un materiale oppone più resistenza al vapore rispetto all'aria (per uno strato dello stesso spessore d e alla stessa temperatura).

Per i materiali da costruzione si ha $\mu > 1$:

- cemento armato 70-150,
- legno 20-40,
- ferro 5-10,
- "fogli" di PVC 20'000-50'000,
- "fogli" di polietilene 100'000.

In generale nella costruzione si hanno delle successioni di strati di materiali diversi, che separano ambienti con temperature diverse e umidità relative diverse. Si hanno quindi di regola gradienti di concentrazione del vapore, che generano una corrente di molecole d'acqua attraverso le pareti. Dato che la diffusione del vapore e la conduzione del calore da un punto di vista formale ubbidiscono a leggi simili, il passaggio del vapore attraverso una parete può essere trattato in maniera analoga a quella presentata per il calore.

La differenza di pressione di vapore $\Delta p_{D,tot}$ tra l'ambiente interno e quello esterno si ottiene sommando le differenze di pressione $\Delta p_{D,a}$ e $\Delta p_{D,i}$ alle superfici della parete con la caduta di pressione Δp_D all'interno della parete:

$$\Delta p_{D,tot} = \Delta p_{D,a} + \Delta p_D + \Delta p_{D,i} \quad (68)$$

Allo stato stazionario il flusso di vapore

$$\dot{q}_D = \frac{\dot{Q}_D}{A} \quad \left[\frac{mg}{m^2 \cdot h} \right] \quad (69)$$

non dipende da dove lo si misura. In particolare il flusso che alla superficie entra nel materiale è uguale a quello che lo attraversa (in ogni sua sezione) e a quello che si trova all'uscita. Con le equazioni (61), (66) e (68) si può quindi scrivere:

$$\Delta p_{D,tot} = \dot{q}_D \cdot \frac{1}{\beta_a} + \dot{q}_D \cdot \frac{d}{\lambda_D} + \dot{q}_D \cdot \frac{1}{\beta_i} = \dot{q}_D \left(\frac{1}{\beta_a} + \frac{d}{\lambda_D} + \frac{1}{\beta_i} \right) \quad (70)$$

Introducendo **coefficiente U_D (totale) di trasmissione del vapore**, come

$$\Delta p_{D,tot} = \frac{\dot{q}_D}{U_D} \quad (71)$$

confrontando le 2 equazioni si ottiene:

$$\dot{q}_D \cdot \frac{1}{U_D} = \dot{q}_D \left(\frac{1}{\beta_a} + \frac{d}{\lambda_D} + \frac{1}{\beta_i} \right) \quad (72)$$

ossia:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{\beta_a} + \frac{d}{\lambda_D} + \frac{1}{\beta_i} \quad (73)$$

Nel caso di una parete con n strati, si può generalizzare la formula nel seguente modo:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{\beta_a} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_{Dj}} + \frac{1}{\beta_i} \quad (74)$$

L'unità di misura di U_D è $\frac{mg}{m^2 \cdot h \cdot Pa}$.

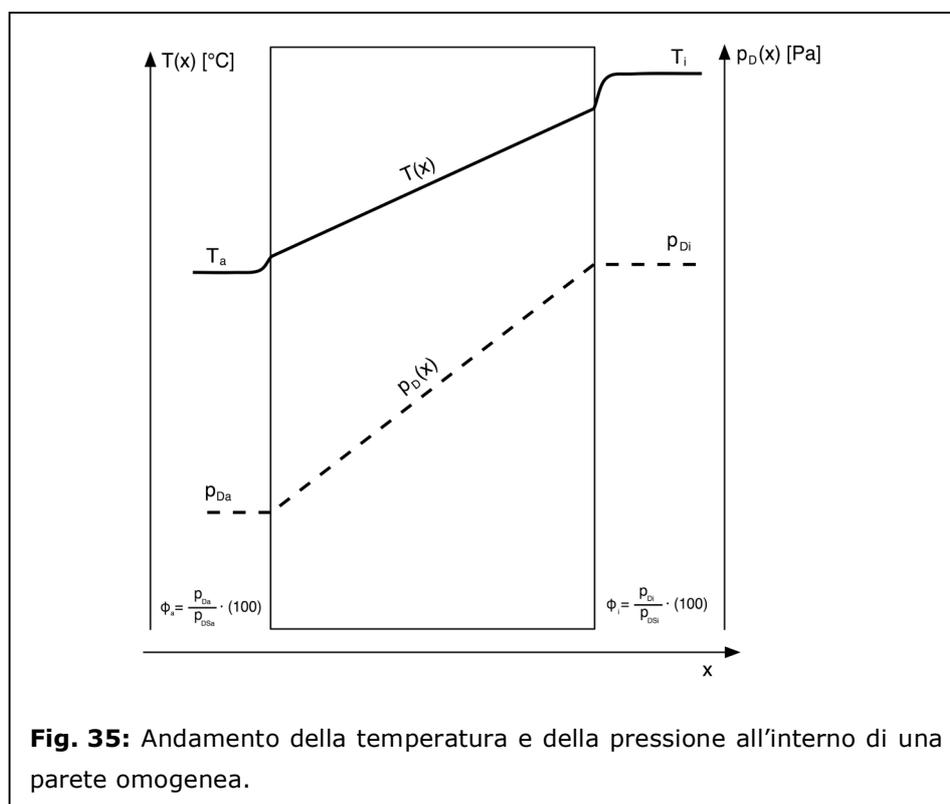
Utilizzando il coefficiente μ di resistenza alla diffusione dei materiali, la resistenza R_{Dj} di uno strato (j) alla diffusione del vapore si lascia esprimere nel modo seguente:

$$R_{Dj} = \frac{d_j}{\lambda_{Dj}} = \frac{\lambda_{DL}}{\underbrace{\lambda_{Dj}}_{\mu_j}} \cdot \frac{d_j}{\lambda_{DL}} = \mu_j \cdot d_j \cdot \frac{1}{\lambda_{DL}} = S_{Dj} \cdot \frac{1}{\lambda_{DL}} \quad (75)$$

dove è stato introdotto un parametro S_{Dj} , che ha il significato dello spessore di uno strato d'aria equivalente dal profilo della diffusione a quello dello strato di materiale j. Il coefficiente β è normalmente così grande, rispettivamente $1/\beta$ è così piccolo che nei calcoli della diffusione può essere trascurato.

3.3 Analisi di una parete omogenea

È ora interessante combinare il comportamento della temperatura con quello del vapore. Infatti, all'interno di una parete sia la quantità di vapore che la temperatura formano un gradiente. Nella figura 35 è illustrata la situazione in cui la temperatura e l'umidità dell'ambiente interno superano i rispettivi valori misurati dell'ambiente esterno.



Anche se l'umidità relativa ϕ_i dell'aria interna e ϕ_a dell'aria esterna sono inferiori al 100%, in considerazione della dipendenza della pressione di saturazione p_{DS} del vapore della temperatura, è importante verificare se all'interno della parete esiste una zona dove l'umidità relativa raggiunge il 100%, vale a dire $p_D(x) = p_{DS}(T(X))$ e nella quale una parte del vapore condensa. In simili casi, oltre a conoscere la posizione esatta della condensazione, è importante verificare i seguenti aspetti:

- quantità del condensato;
- stato di aggregazione del condensato;
- spazi a disposizione per il condensato (ad es. pori);
- possibile quantità di vapore rilasciata durante "l'essiccazione";
- effetti del condensato (p. es. rischio di corrosione, formazione di ruggine, ...).

Non potendo superare la pressione di saturazione, nel caso di condensazione, l'andamento della pressione di vapore nel materiale è disturbato e in particolare non diminuisce più lungo una linea retta.

($\delta p_D / \delta x$). A tale scopo si corregge la retta della pressione di vapore in maniera che partendo dai valori superficiali (p_{Di} e p_{Da}) essa incontri tangenzialmente la curva di saturazione. I punti p_{DSki} e p_{DSka} sulla curva di saturazione, nei quali la tangente alla stessa passa per p_{Di} e rispettivamente per p_{Da} , delimitano quindi la zona di saturazione e assieme alla pressione di vapore superficiale, il comportamento della pressione di vapore all'esterno della zona di condensazione. All'interno di quest'ultima – delimitata dai punti p_{DSki} e p_{DSka} – la pressione parziale del vapore segue la curva della pressione di saturazione e ci si deve attendere la formazione d'acqua condensata (allo stato liquido o solido a dipendenza dalla temperatura). La quantità condensata si calcola sottraendo dal flusso di vapore che entra nella zona di condensazione (nel punto p_{DSki}):

$$\dot{q}_{Dk\downarrow} = \frac{\lambda_D}{d_i} \cdot (p_{Di} - p_{DSki}) \left[\frac{mg}{m^2 \cdot h} \right] \quad (77)$$

quello che esce (nel punto p_{DSka}):

$$\dot{q}_{Dk\uparrow} = \frac{\lambda_D}{d_a} \cdot (p_{DSka} - p_{Da}) \left[\frac{mg}{m^2 \cdot h} \right] \quad (78)$$

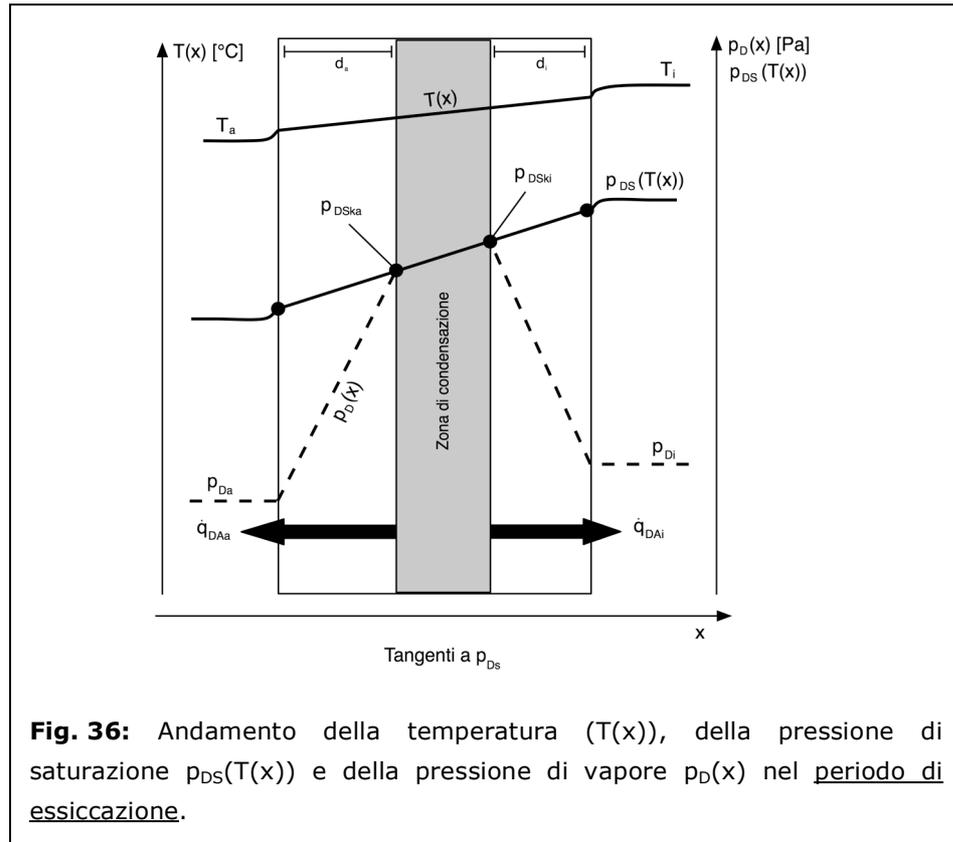
dove d_i e d_a sono lo spessore della zona interna e rispettivamente di quella esterna senza condensazione (v. figura 36).

Durante la durata Δt_k del periodo di condensazione, nella zona interessata si accumula quindi la seguente quantità di acqua (mg per m^2 di superficie):

$$q_k = (\dot{q}_{Dk\downarrow} - \dot{q}_{Dk\uparrow}) \cdot \Delta t_k \left[\frac{mg}{m^2} \right] \quad (79)$$

Nel periodo di "essiccazione" – caratterizzato in genere da temperature più elevate e quasi uniformi attraverso l'intera parete – la pressione parziale del vapore nella zona di condensazione ($\varphi = 100\%$) supera quella alla superficie. Ciò ha come conseguenza, che l'acqua condensata in precedenza diffonderà lentamente verso le superfici della parete.

Il profilo della temperatura e della pressione nel periodo di essiccazione è illustrato nella figura 37.



Alle superfici della zona di condensazione la pressione del vapore è determinata dalle pressioni di saturazione p_{DSki} e p_{DSka} . Essendo più elevati rispetto ai valori superficiali p_{Di} e p_{Da} , si instaura un flusso di vapore

$$\dot{q}_{DAi} = \frac{p_{DSki} - p_{Di}}{d_i} \cdot \lambda_D \quad (80)$$

verso l'interno e

$$\dot{q}_{DAa} = \frac{p_{DSka} - p_{Da}}{d_a} \cdot \lambda_D \quad (81)$$

verso l'esterno.

Se Δt_e è la durata del periodo di essiccazione, la quantità di vapore che evaporerà per m^2 di superficie si calcola nel seguente modo:

$$q_e = (\dot{q}_{DAa} + \dot{q}_{DAi}) \cdot \Delta t_e \left[\frac{mg}{m^2} \right] \quad (82)$$

Se durante l'intero anno q_e è maggiore o uguale a q_{kr} , allora la parete riesce sempre ad asciugare. In caso contrario si avrà un accumulo di acqua nella parete.