

## PSICROMETRIA

Viene trattato il comportamento della miscela di aria e vapor d'acqua, con riferimento alle trasformazioni alla pressione atmosferica che interessano sia il benessere ambientale che l'interazione con le murature.

### MISCELE GAS PERFETTI

I gas perfetti hanno la caratteristica di non influenzarsi vicendevolmente, vale a dire di occupare i volumi a disposizione come se fossero soli; per ciascuno di essi vale quindi la relazione  $PV=mRT$  dove il volume e' quello complessivo, mentre la pressione e' quella che deriverebbe dal singolo gas, detta pressione parziale  $P_i$ .

Vale la **legge di Dalton** :

$$\sum P_i = P$$

#### Miscela di aria e vapor d'acqua

Per le condizioni usuali in cui si considerano queste miscele, si puo' considerare che i gas si comportino come gas perfetti; per ciascuno di essi si puo' quindi scrivere:

$$P_v V = m_v R_v T \quad ; \quad P_a V = m_a R_a T \quad (5.1)$$

Definiamo **titolo** o **umidita' assoluta** o **umidita' specifica** il rapporto tra le due masse dei gas:

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad (5.2)$$

che, usando le (5.1) e la relazione tra la costante del gas e la costante universale dei gas dà:

$$x = \frac{P_v R_a}{P_a R_v} = \frac{m_{vm} P_v R_0}{m_{am} P_a R_0} = \frac{18 P_v}{29 P_a} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (5.3)$$

dove 18 e 29 sono le masse molari del vapore e dell'aria.

Se definiamo **l'umidita' relativa** o **grado igrometrico** come il rapporto tra la pressione parziale del vapore nel volume considerato e quella che lo stesso avrebbe in condizioni di saturazione, cioè in presenza di vapore e liquido, alla medesima temperatura, tendo conto della (5.3):

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} = \frac{x(P - P_v)}{0,622 P_s} \quad (5.4)$$

Ci proponiamo ora di calcolare l'entalpia specifica della miscela, che indicheremo con J.

Utilizzando la proprietà additiva, essendo M la massa complessiva dell'aria e del vapore, avremo

$$Mh = m_a h_a + m_v h_v \quad (5.5)$$

Per l'aria, assumendo lo stato di riferimento a 0°C e 1 bar, avremo:

$$h_a = h_{0a} + c_{pa}(T-T_0) = c_{pa} t \quad (5.6)$$

con t temperatura in gradi centigradi.

Per il vapore analogamente assumiamo come riferimento lo stato del ghiaccio a 0°C e 1 bar ed otterremo:

$$h_v = h_{0v} + r_{v0} + c_{pv}(T-T_0) = r_{v0} + c_{pv} t \quad (5.7)$$

con  $r_{v0} = 2500 \text{ kJ/kg} = 597 \text{ kcal/kg}$

$$c_{pv} = 1,9 \text{ kJ/(kg K)} = 0,45 \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)}$$

$$c_{pa} = 1 \text{ kJ/(kg K)} = 0,24 \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)}$$

La (5.5) allora diviene:

$$Mh = m_a c_{pa} t + m_v (r_{v0} + c_{pv} t)$$

da cui dividendo per la massa dell'aria secca e ricordando la (5.2), si ottiene:

$$J = c_{pa} t + x(r_{v0} + c_{pv} t) \quad (5.8)$$

Utilizzando le (5.6) e (5.7) si può scrivere

$$J = h_a + x h_v \quad (5.9)$$

Oppure inserendo i valori numerici

$$J = t + x (2500 + 1,9 t) \quad \text{kJ/kg} \quad (5.10)$$

### La saturazione adiabatica

Consideriamo un apparato come quello di figura 1, che permette ad una corrente d'aria di venire in contatto con dell'acqua, ed indichiamo con 1 e 2 le sezioni di ingresso e di uscita dell'aria; definiamo volume di controllo quello compreso tra le pareti, le sezioni 1 e 2 e la superficie dell'acqua.

Il bilancio delle masse applicato a tale volume fornisce:

$$m_{a1} = m_{a2} \quad (5.11)$$

$$m_{v1} + m_H = m_{v2}$$

In condizione di regime stazionario, il primo principio fornisce per lo stesso volume, assumendo nulli il calore (condizione di adiabaticità) ed il lavoro scambiati:

$$m_{a1}h_{a1} + m_{v1}h_{v1} + m_H h_H - m_{a2}h_{a2} - m_{v2}h_{v2} + (m_{a1} + m_{v1})(w_1^2/2 + gz_1) + (m_{a2} + m_{v2})(w_2^2/2 + gz_2) + m_H[(w_H^2 - w_2^2)/2 + g(z_H - z_1)] = 0 \quad (5.12)$$

Considerando trascurabili le variazioni di energia cinetica e quelle di energia potenziale ed utilizzando le (5.11) si può scrivere:

$$m_{a1}h_{a1} + m_{v1}h_{v1} + m_H h_H = m_{a2}h_{a2} + m_{v1}h_{v1} + (m_{v2} - m_{v1})h_H = m_{a2}h_{a2} + m_{v1}h_{v1} \quad (5.13)$$

da cui, dividendo per  $m_{a2}$ :

$$h_{a1} + x_1 h_{v1} + (x_2 - x_1)h_H = h_{a2} + x_2 h_{v2} \quad (5.14)$$

che in termini di entalpia della miscela diviene

$$J_1 + (x_2 - x_1)h_H = J_2 \quad (5.15)$$

Poiché in condizioni usuali alla temperatura di 20°C, la differenza tra i due titoli è di circa 1.10<sup>-2</sup> kg e l'entalpia dell'acqua

$$h_H = h_0 + c_{pH}(T - T_0) \approx 84 \text{ kJ/kg}$$

si considera che una trasformazione isoentalpica approssimi abbastanza bene una "umidificazione adiabatica".

La temperatura a cui esce l'aria dopo una simile trasformazione viene detta **temperatura di saturazione adiabatica**, quando l'aria risulti satura.

È questa la cosiddetta **temperatura di bulbo umido** perché ottenuta mediante un termometro con il bulbo umidificato da un opportuno sistema (garza imbevuta di acqua); la ventilazione viene ottenuta in genere con mezzi meccanici (psicrometro di Assmann).

### Diagrammi psicrometrici

Lo stato fisico della miscela dipende sempre dalle tre variabili P, v, T, quindi sarebbe necessario un diagramma tridimensionale per rappresentarne alcuni. Considerando costante la pressione ci si può ricondurre ad un diagramma bidimensionale sul piano. Poiché le trasformazioni tecnicamente importanti per le miscele aria-vapore d'acqua, avvengono principalmente alla pressione atmosferica, dalla (5.8) si ricavano diagrammi utili allo studio delle trasformazioni psicrometriche, che interessano tale tipo di miscele.

Sia il diagramma di Mollier che quello dell'A.S.H.R.A.E. sono diagrammi a coordinate oblique, poiché le coordinate principali sono J e x; sono tuttavia riportati assumendo come ascissa la retta a t=0°C, su cui è riportato il titolo e quindi appaiono come diagrammi

ortogonali. Si noti come il diagramma A.S.H.R.A.E. sia l'immagine speculare di quello di Mollier. Molti programmi di calcolo usano diagramma Carrier, che è simile a quello A.S.H.R.A.E., ma ha come coordinate direttamente  $x$  e  $t$  (Fig. 2)

La curva a grado igrometrico pari all'unità e' la curva limite di saturazione, sulla quale l'acqua condensa od evapora.

## L'IGROTERMIA

Normalmente il vapore d'acqua presente insieme all'aria in un ambiente non è nelle condizioni di saturazione; tutte le condizioni termoigrometriche possibili dell'aria sono raffigurabili mediante i diagrammi suddetti.

Supponiamo di avere dell'aria a 30 °C ed umidità relativa pari all'80% . Dal diagramma si può vedere che l'acqua contenuta in ogni kg di aria secca è pari a 22 g.

Se abbassiamo la temperatura dell'aria per contatto con superfici fredde, non ne alteriamo il contenuto di acqua e l'umidità relativa crescerà fino a raggiungere il 100%, ad una temperatura che prende il nome di **temperatura di rugiada o di saturazione**, in questo caso pari a 26,2 °C.

Raggiunta la temperatura di rugiada, un raffreddamento ulteriore determina la comparsa sulle superfici fredde di goccioline di acqua.

Questo è il tipico fenomeno che provoca in inverno l'appannarsi dei vetri allorché la temperatura superficiale di questi è inferiore alla temperatura di rugiada.

In generale si può dire che, ogni qualvolta la temperatura di un corpo è inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria che lo circonda, sulla superficie del corpo stesso condensa una quantità di acqua tale che nell'ambiente rimanga vapore alla pressione parziale corrispondente a quella temperatura.

### Condensa sulla superficie di una parete

Questo fenomeno interessa in modo particolare gli ambienti le cui pareti raggiungono temperature inferiori alla temperatura di rugiada.

Per evitare la condensa superficiale occorre verificare che la temperatura superficiale sia maggiore della temperatura di rugiada.

$$t_s > t_r$$

### Esempio.

Si consideri una parete in calcestruzzo da 15 cm che separi due ambienti a temperature rispettivamente 20 °C e -5 °C ed umidità relativa 60% e 80%.

Dalla figura 2 si ricava la temperatura di rugiada individuando il punto a 20 °C e 60% di umidità relativa leggendo il corrispondente valore di temperatura di rugiada ( $t_r$ ) sulla curva di saturazione con una trasformazione isotitolo:

$$t_r = 11,5 \text{ °C}$$

Occorre quindi calcolare la temperatura superficiale impostando un bilancio termico alla parete

$$Q = (t_i - t_e) / R = \alpha_i (t_i - t_s) \quad (5.16)$$

e quindi

$$t_s = t_i - (t_i - t_e) / (R \alpha_i) = 20 - (20 - 5) / (0,31 \cdot 7) = 8,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.17)$$

dove

$$R = 1/\alpha_i + 1/\alpha_e + s/k = 0,31 \text{ m}^2 \text{ h}^\circ\text{C/kcal} = 0,27 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (5.18)$$

e' la resistenza termica complessiva della parete.

Poichè

$$t_s = 8,5 \text{ } ^\circ\text{C} < 11,5 \text{ } ^\circ\text{C} = t_r$$

sulla superficie interna della parete ci sarà condensa.

Aumentando la resistenza termica totale della parete la temperatura superficiale aumenta.

Ponendo  $t_s = t_r$  nella (5.17), è possibile ricavare la resistenza termica del materiale isolante con cui andrà coibentata la parete per prevenire fenomeni di condensa superficiale.

Si ottiene:

$$R = (t_i - t_e) / [\alpha_i (t_i - t_r)] \quad (5.19)$$

dove:

$t_r$  = temperatura di rugiada dell'aria ambiente

$t_i$  = temperatura interna

$t_e$  = temperatura esterna

$\alpha_i$  = coefficiente liminare interno

## Pressione parziale e pressione di saturazione del vapore

Osservando il diagramma di fig.2 e ricordando i diagrammi P-v del fluido, si può notare che:

- considerando una trasformazione a temperatura definita, una isoterma, la pressione di saturazione è sempre maggiore o uguale alla pressione parziale;
- la pressione di saturazione dipende solo dalla temperatura
- la pressione parziale, a parità di  $\phi$ , diminuisce al diminuire della temperatura;
- quando, ad una determinata temperatura la pressione parziale assume lo stesso valore della pressione di saturazione, si ha formazione di condensa; l'umidità relativa ha raggiunto il 100%.

Quindi si verificherà il fenomeno della condensa quando:

$$P_r = P_s$$

Riferimenti bibliografici

C. Pizzetti - Condizionamento dell'aria e refrigerazione - Masson, Milano, 1975.  
G. Alfano, V. Betta - Fisica Tecnica - Liguori, Napoli, 1980.

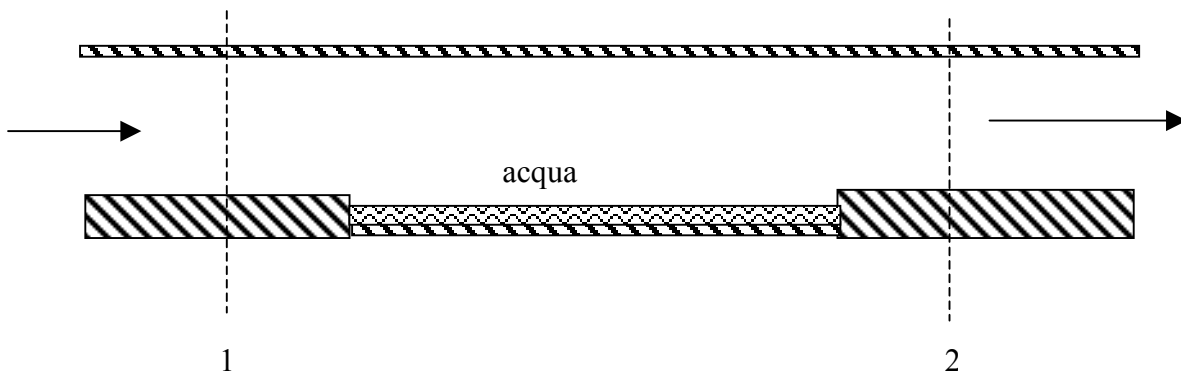


Fig. 1 - Schema apparato per umidificazione adiabatica

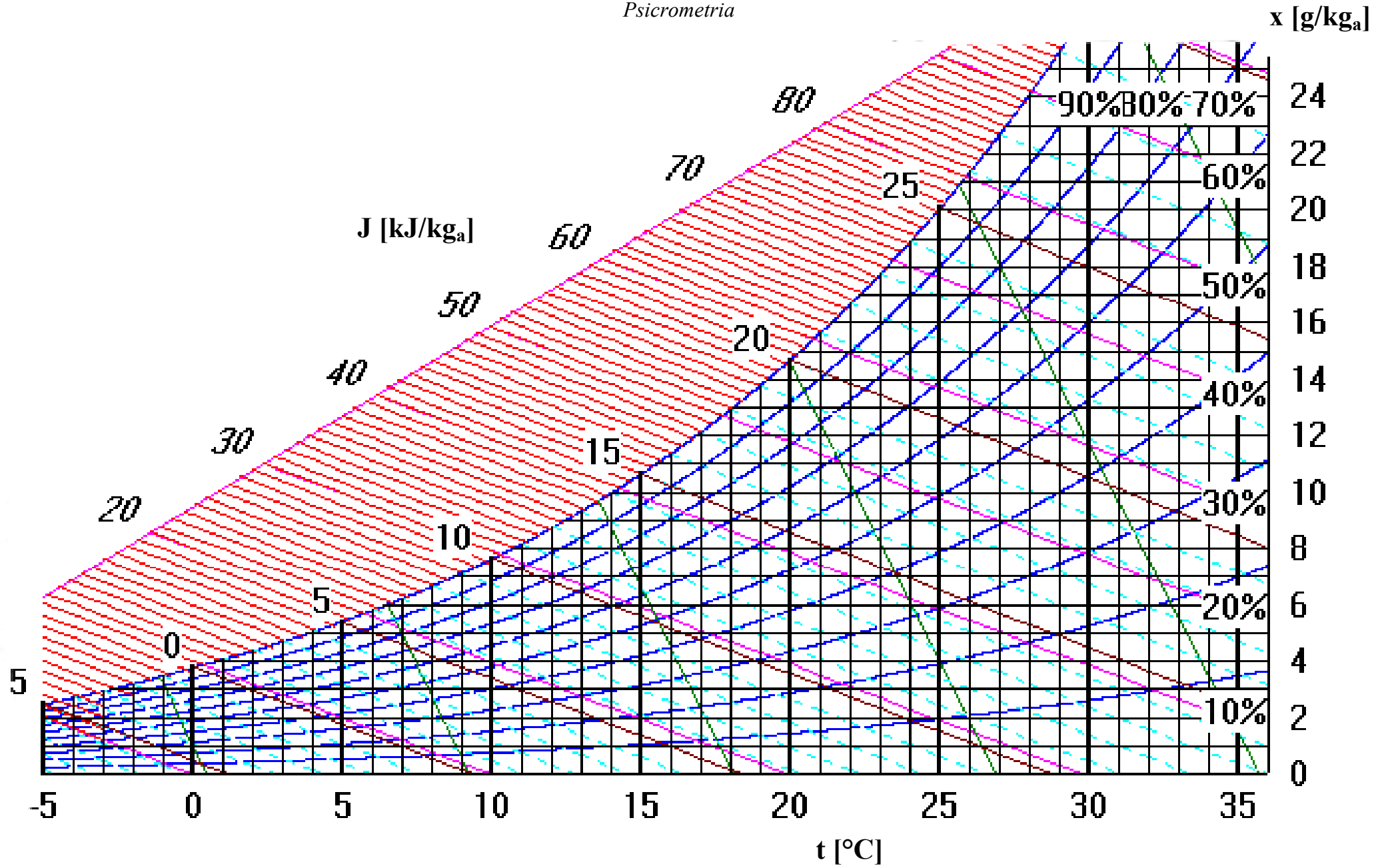


Fig.2 Diagramma psicrometrico Carrier