

# **PSICROMETRIA**

## **Aria Umida**

# GAS PERFETTI

Definizione: il gas perfetto(o ideale) è un modello per rappresentare i gas reali, caratterizzato da molecole così distanti tra loro da non interagire, ovvero caratterizzato dal possedere una massa volumica abbastanza bassa.

Per i gas perfetti vale la legge:

$$pV=nR_0T$$

dove:

- $p$  è la pressione
- $V$  è il volume
- $n$  è il numero di moli
- $R_0 = 8,31\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  è la costante universale del gas ideale
- $T$  è la temperatura espressa in K

# GAS PERFETTI

Espressione in funzione della massa del gas:

$$pV=mRT$$

dove:

- $p$  è la pressione
- $V$  è il volume
- $m$  è la massa del gas
- $R$  è la costante caratteristica del gas ideale
- $T$  è la temperatura espressa in K

# MISCELE DI GAS-VAPORE

Si definiscono miscele gas-vapore i sistemi pluricomponenti, che, al variare di temperatura e pressione entro determinati intervalli, risultano costituiti da componenti incondensabili (o gas) e da componenti condensabili (o vapori).

La differenza fondamentale tra le miscele tra gas e quelle tra gas e vapori è la seguente:

- Per le miscele tra gas la composizione non varia al variare della temperatura
- Per le miscele tra gas e vapori una variazione della temperatura può portare (secondo che sia in aumento o in diminuzione) all'ulteriore evaporazione del liquido presente o alla condensazione di parte del vapore presente nella miscela.

## Aria umida: **generalità**

L'aria umida atmosferica è una miscela di gas, composta di aria secca e vapore acqueo:

Aria secca  
+ Acqua = ARIA UMIDA

Aria secca =

Azoto (78%)

Ossigeno (21%)

Argon

Anidride carbonica (1%)

Altri gas

## Composizione standard dell'aria secca

Gas	Contenuto (% vol.)	Variabilità del contenuto
Azoto (N <sub>2</sub> )	78.084	-
Ossigeno (O <sub>2</sub> )	20.9476	-
Argon (Ar)	0.934	-
Anid. Carb. (CO <sub>2</sub> )	0.0314	significativa
Neon (Ne)	0.001818	-
Elio (He)	0.000524	-
Krypton (Kr)	0.000114	-
Xenon (Xe)	0.0000087	-
Idrogeno (H <sub>2</sub> )	0.00005	non precisata
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.00015	significativa
Ossido Azoto (N <sub>2</sub> O)	0.00005	-
Ozono (O <sub>3</sub> )	0 a 0.000007 estate	significativa
	0 a 0.000002 inverno	significativa
Anid. Solf. (SO <sub>2</sub> )	0 a 0.0001	significativa
Bioss. Azoto (NO <sub>2</sub> )	0 a 0.000002	significativa
Ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	0 a tracce	significativa
Ossido Carb. (CO)	0 a tracce	significativa
Iodio (I <sub>2</sub> )	0 a 0.000001	significativa
Radio (Rn)	6 10 <sup>-18</sup>	non precisata

# Aria Umida

L'aria secca è l'aria atmosferica privata di tutti i vapori e agenti inquinanti; l'aria secca è assimilabile a un gas di composizione costante, dato che il condensato, in pratica, non scioglie i componenti incondensabili dell'aria.

Il vapor d'acqua è la quantità d'acqua presente nella miscela allo stato di vapore. Tale quantità essa varia da zero fino a un massimo che dipende dalla temperatura e dalla pressione.

Ai fini della nostra trattazione sia l'aria secca che il vapore possono essere considerati gas perfetti

## Aria umida: **generalità**

Nelle applicazioni di Fisica Tecnica, l'aria secca è considerata come un unico gas, a composizione chimica fissata.

Aria secca

Temperatura critica =  $-141\text{ °C}$

Pressione critica =  $37,7\text{ bar}$

$R=0,287\text{ kJ/kgK}$

Calore specifico a pressione costante ( $c_p$ ) =  $1,01\text{ kJ/kgK}$



## Aria umida: **generalità**

Acqua

Temperatura critica = 374 °C

Pressione critica = 221 bar

$R=0,462$  kJ/kgK

Calore specifico a pressione costante ( $c_p$ ) = 1,82 kJ/kgK

L'aria umida è una miscela di:

**ARIA SECCA**

+

**VAPORE ACQUEO**

# Modello di gas ideale

Vapor  
d'acqua

$$p_v \times v = R_v \times T \quad R_v = 0.462 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$$

Aria secca

$$p_a \times v = R_a \times T \quad R_a = 0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$$

## Aria umida: generalità

- Tra i vari motivi di interesse per lo studio dell'aria umida (climatologia, studi medici, etc...), vi è sono tutte le applicazioni relative alla **climatizzazione ambientale ed al comfort termohigrometrico indoor**

**Pertanto, il campo di interesse è:**

- **Pressione  $p_{\text{ambiente}} = 101 \text{ kPa}$**
- **Temperatura  $T_{\text{ambiente}} = -10 \div 50 \text{ }^\circ \text{C}$ .**

In queste condizioni accade che:

- **L'aria secca si comporta da gas ideale ( $T > T_c = -141 \text{ }^\circ \text{C}$ )  
L'acqua, con buona approssimazione, si comporta da gas ideale ( $p \ll p_c = 221 \text{ bar}$ )**

# LEGGE DI DALTON

## LEGGE DI DALTON

$$p_{\text{tot}} = p_a + p_v$$

$p_{\text{tot}}$  *pressione totale dell'aria umida*

$p_a$  *pressione parziale dell'aria secca*

$p_v$  *pressione parziale del vapor d'acqua*

Il vapore acqueo e l'aria secca si comportano come se da soli occupassero l'intero volume a disposizione

ARIA  
UMIDA



=

ARIA  
SECCA

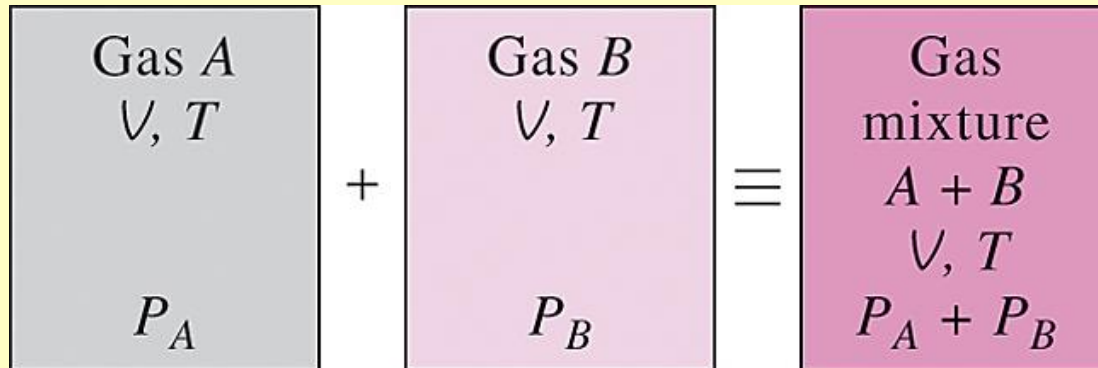


+

VAPORE  
ACQUEO



# MISCELE DI GAS: *P-v-T* LEGGE DI DALTON



Legge di Dalton sulle pressioni additive di una miscela di gas ideali.

## Legge di Dalton:

**La pressione di una miscela di gas è uguale alla somma delle pressioni che ogni gas componente eserciterebbe se esistesse da solo al volume e alla temperatura della miscela.**

# LEGGE DI DALTON

- La pressione totale  $P$  della miscela di aria umida è la somma delle pressioni parziali dei singoli componenti.
- Si definisce pressione parziale di un componente generico in una miscela la pressione che il singolo componente eserciterebbe se occupasse l'intero volume occupato dalla miscela.

$$p = p_{as} + p_w$$

## Aria umida: **proprietà**

*Le **proprietà** specifiche dell'aria umida vengono calcolate riferendosi alla sola massa di aria secca, in quanto solc quest'ultima resta certamente costante essendo incondensabile nel campo di temperature considerato.*

## UMIDITA' SPECIFICA

Rappresenta una misura del valore assoluto di vapore presente in una massa di aria. E' definita dal rapporto di massa di vapore e massa di aria secca.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

## UMIDITA' SPECIFICA

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$p_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T$$

$$\omega = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{\text{tot}} - p_v}$$

**$\omega$**  è una grandezza  
adimensionale

Quindi,  **$\omega$**  = g/kg

**$\omega$**  assume valori dell'ordine di  $10^{-2}$ .

Pertanto, spesso accade che  $m_v$  sia espressa in grammi e  $m_a$  in kg

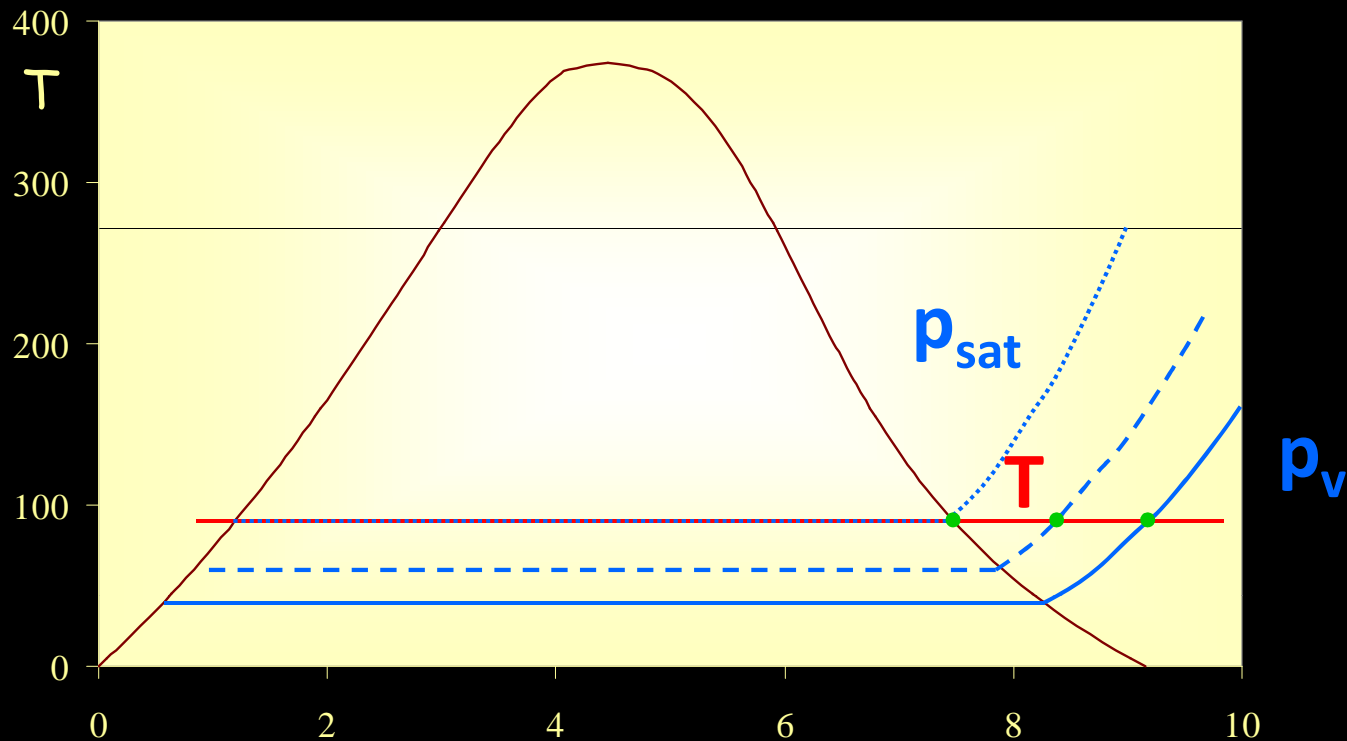


# UMIDITA' SPECIFICA

Se aumenta – a temperatura costante – la quantità di vapor d'acqua contenuta nella miscela, aumenta la sua pressione parziale ( $p_v$ ) e il punto si avvicina alla curva di saturazione alla quale avviene in passaggio in fase liquida.

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$p_{vs} \cdot V = m_{vs} \cdot R_v \cdot T$$



# UMIDITA' RELATIVA

L'umidità specifica ci dice quanta acqua c'è nell'aria (normalmente, circa una tazzina da caffè in un metro cubo).

Non ci dice nulla però su quanto siamo prossimi o meno al passaggio di questa in fase liquida.

Introduciamo, pertanto, l'UMIDITA' RELATIVA.

*“L'umidità relativa è espressa dal rapporto tra la massa di vapore presente in un campione di aria umida e quella che sarebbe presente se, nelle medesime condizioni di temperatura e pressione totale, il campione fosse costituito da aria umida satura”.*

$$p_{vs} \cdot V = m_{vs} \cdot R_v \cdot T$$

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{vs}} \iff \phi = \frac{p_v}{p_{vs}}$$

$\Phi$  è una grandezza adimensionale il cui valore è compreso tra 0 e 1

$\phi = 0$  (cioè, 0%) → ARIA SECCA

$\phi = 1$  (cioè, 100%) → ARIA SATURA

# Entalpia

L'**entalpia** dell'aria umida (essendo considerabile come miscela di gas perfetti) è:

$$H = m_{as}h_{as} + m_v h_v$$

Lo stato di riferimento è convenzionalmente fissato (per acqua e aria) a  $t=0^\circ$  C e alla pressione atmosferica ( $H_0=0$ ).

# ENTALPIA SPECIFICA

Nelle lezioni precedenti, abbiamo definito l'entalpia specifica come PROPRIETA' TERMODINAMICA delle sostanze, in quanto combinazione lineare di proprietà (u, p, v).

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{H_a + H_v}{m_a} = \frac{m_a h_a + m_v h_v}{m_a} = h_a + \omega h_v$$

$h_a$  (entalpia specifica) è l'energia termica che occorre fornire all'aria secca per portarla dalla temperatura di riferimento 0°C alla temperatura T:

$$h_a = c_p \Delta T = c_p (T-0) = c_p T$$

$$c_p = 1,01 \text{ kJ/kgK}$$

$$h_a = 1,01 \Delta T \quad (\text{kJ/kg}_a)$$

# ENTALPIA SPECIFICA

Nelle lezioni precedenti, abbiamo definito l'entalpia specifica come PROPRIETA' TERMODINAMICA delle sostanze, in quanto combinazione lineare di proprietà (u, p, v).

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{H_a + H_v}{m_a} = \frac{m_a h_a + m_v h_v}{m_a} = h_a + \omega h_v$$

$h_v$  (entalpia specifica) è l'energia termica che occorre fornire al vapore d'acqua per:

- Far evaporare a 0°C i grammi di acqua contenuti nell'aria umida;
- Riscaldare da 0°C a T i grammi di vapore;

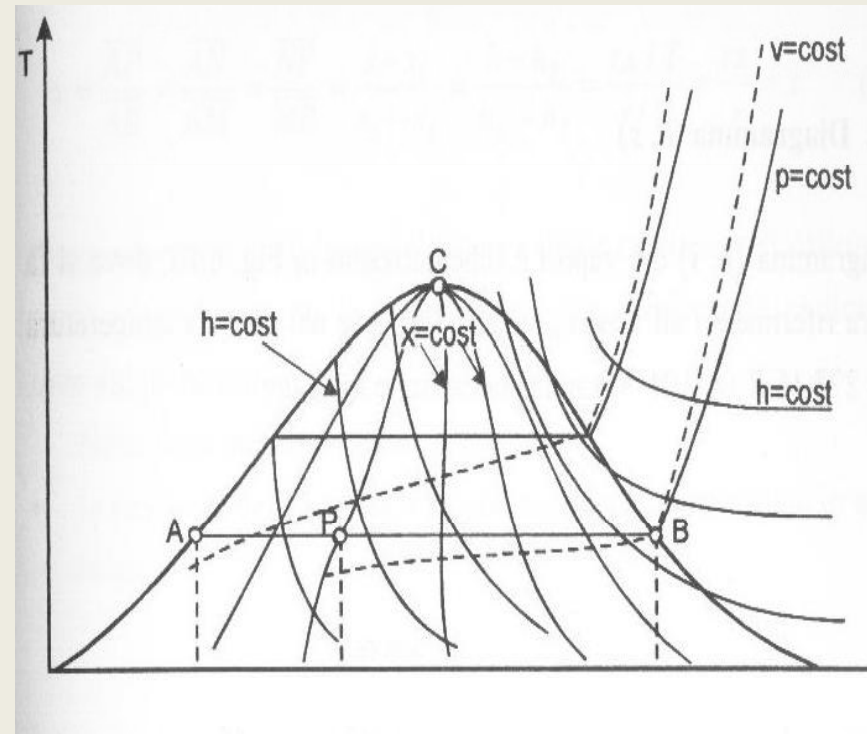
# ENTALPIA SPECIFICA

$$\Delta h_{vs} = h_{vs}(0^\circ\text{C}) - h_l(0^\circ\text{C}) = 2500 \text{ kJ / kg}$$

L' "entalpia latente di vaporizzazione" è la variazione di entalpia necessaria per portare l'acqua dalle condizioni di liquido saturo a  $0^\circ\text{C}$  a quelle di vapore saturo secco alla stessa temperatura di  $C^\circ$ . Questa è  $\Delta h_{vs}$

Poi, ormai in fase di aeriforme, aggiungiamo la variazione di entalpia per portare tale vapor saturo a  $0^\circ\text{C}$  alla nostra effettiva temperatura. Questo è  $C_{pv} \times T$ .

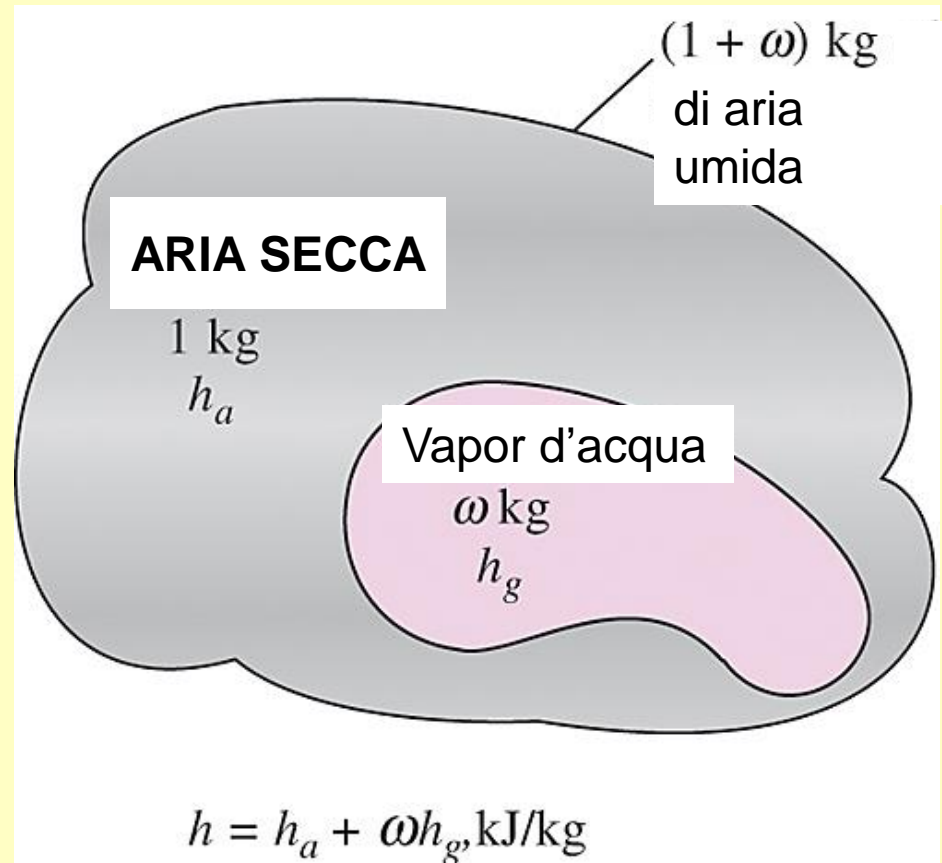
$$h_v = (\Delta h_{vs} + C_{pv} \cdot T)$$



Nelle applicazioni pratiche:

- la quantità d'aria secca nelle miscele di aria umida rimane costante
- la quantità di vapore cambia.

Allora le proprietà sono espresse *per unità di massa di aria secca*.



## ENTALPIA SPECIFICA

Nel campo di temperature considerato,  $c_{pv}$  è il calore specifico a pressione costante del vapore d'acqua, e può essere considerato costante e pari a 1.8 kJ/kgK.

$$h = h_a + \omega h_v$$

$$h_a = 1,01 \cdot T$$

$$h_v = 2500 + 1,805 \cdot T$$

$$h = 1,01 \cdot T + \omega (2500 + 1,805 \cdot T)$$



# VOLUME SPECIFICO

Anche in questo caso, si fa riferimento esclusivamente alla massa di aria secca.

Il volume specifico è quindi il volume occupato da una massa di aria umida pari ad 1 kg.

$$p_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T \quad \Rightarrow \quad p_a \cdot v = R_a \cdot T$$

$$v = \frac{V}{m_a} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{R_a \cdot T}{p_a} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{R_a \cdot T}{p_t - \phi \cdot p_{vs}}$$

Si definisce:

- "Temperatura di rugiada, la temperatura alla quale, per un dato valore di  $p$  e di  $\phi$ , si ha la saturazione dell'aria umida, ossia al di sotto della quale inizia la condensazione del vapor d'acqua.
- "Temperatura di saturazione adiabatica, la temperatura alla quale si ha la saturazione dell'aria umida per dati valori di pressione  $p$  e di entalpia  $h$ .

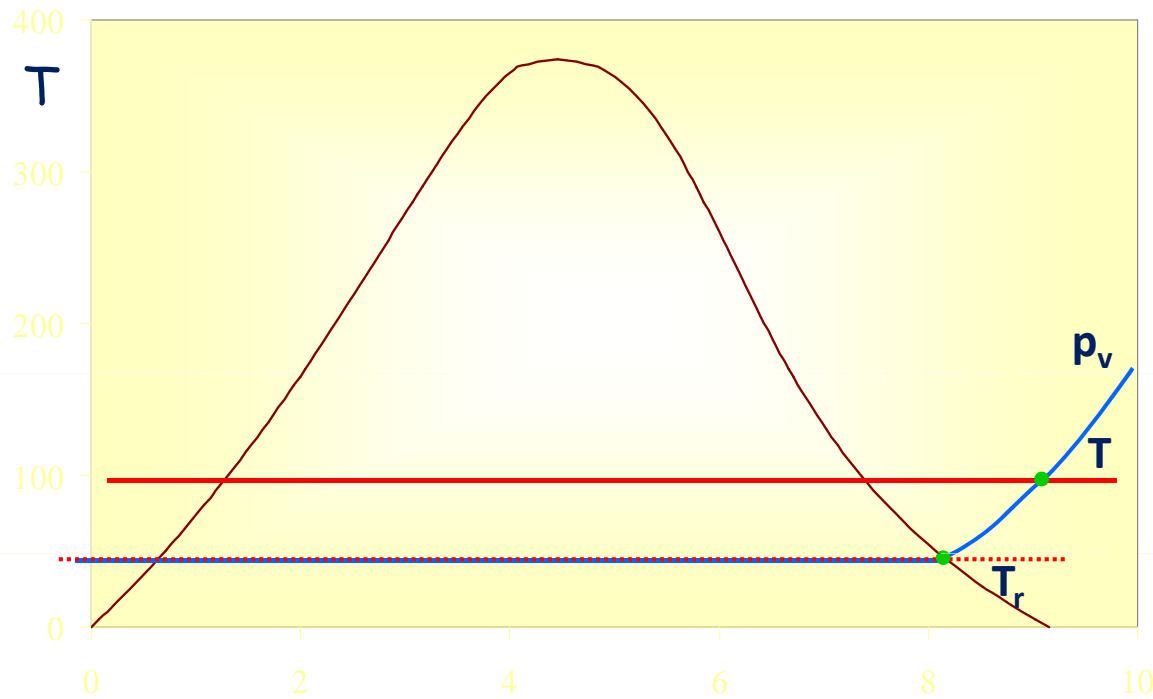
# TEMPERATURA DI RUGIADA

La temperatura di rugiada è la temperatura di saturazione alla pressione parziale del vapor d'acqua.

Cioè, è la minima temperatura (fissando l'umidità specifica) compatibile con il vapore in fase aeriforme (fissando umidità specifica e pressione totale).

Al di sotto della  $T_r$ , il vapore condensa.

Pertanto, la  $T_r$  è anche detta “temperatura di incipiente condensazione”.



$$T_r = T_{\text{sat}}(p_v)$$

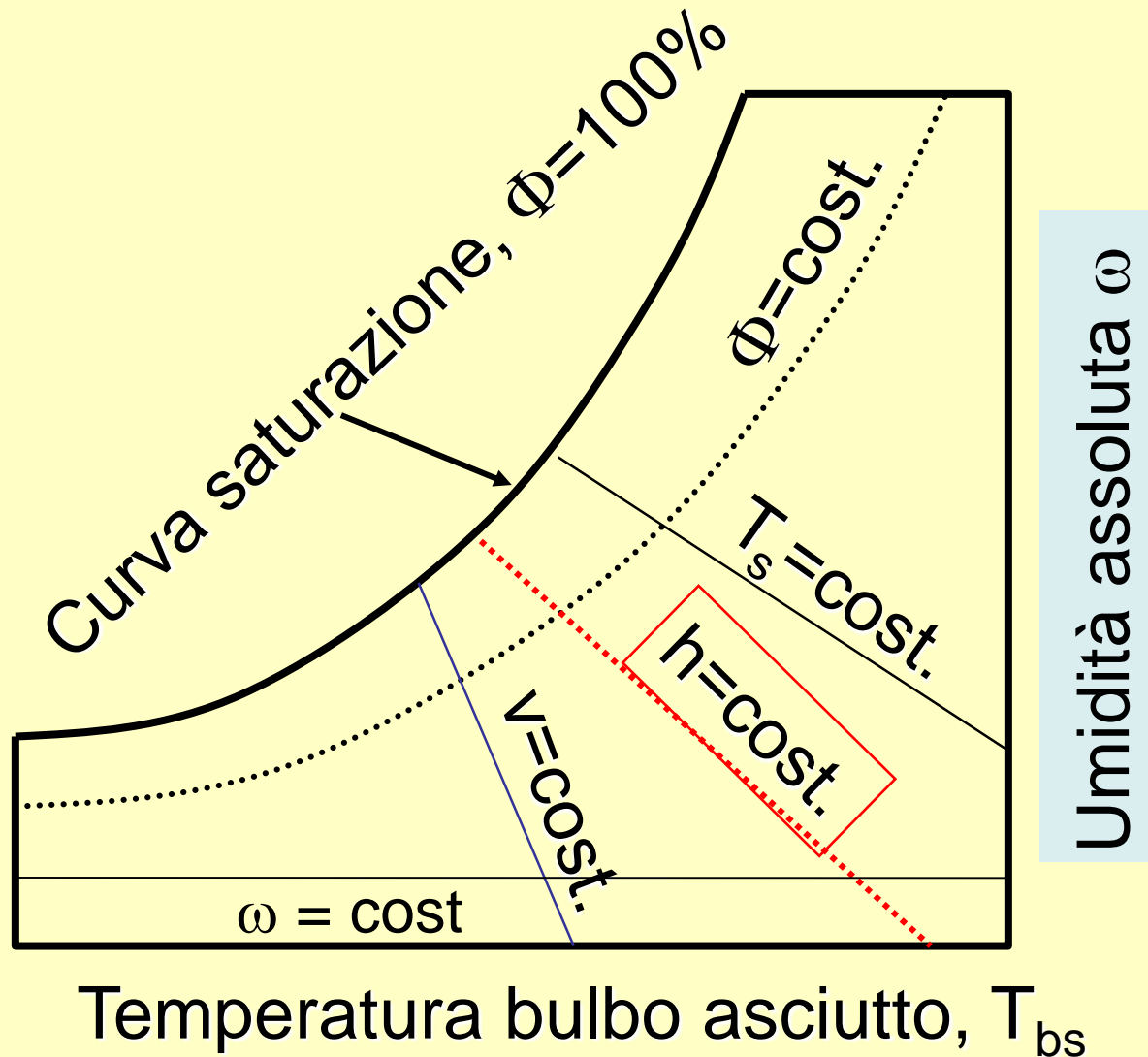
$$T_r \leq T$$

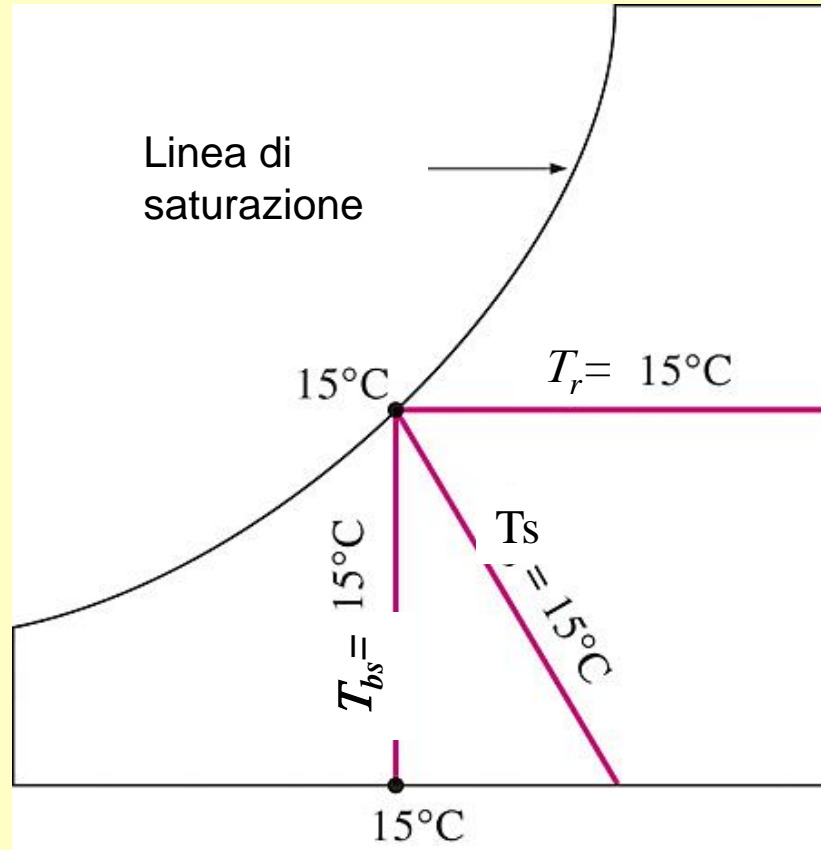
se l'aria è satura

$$T_r = T$$

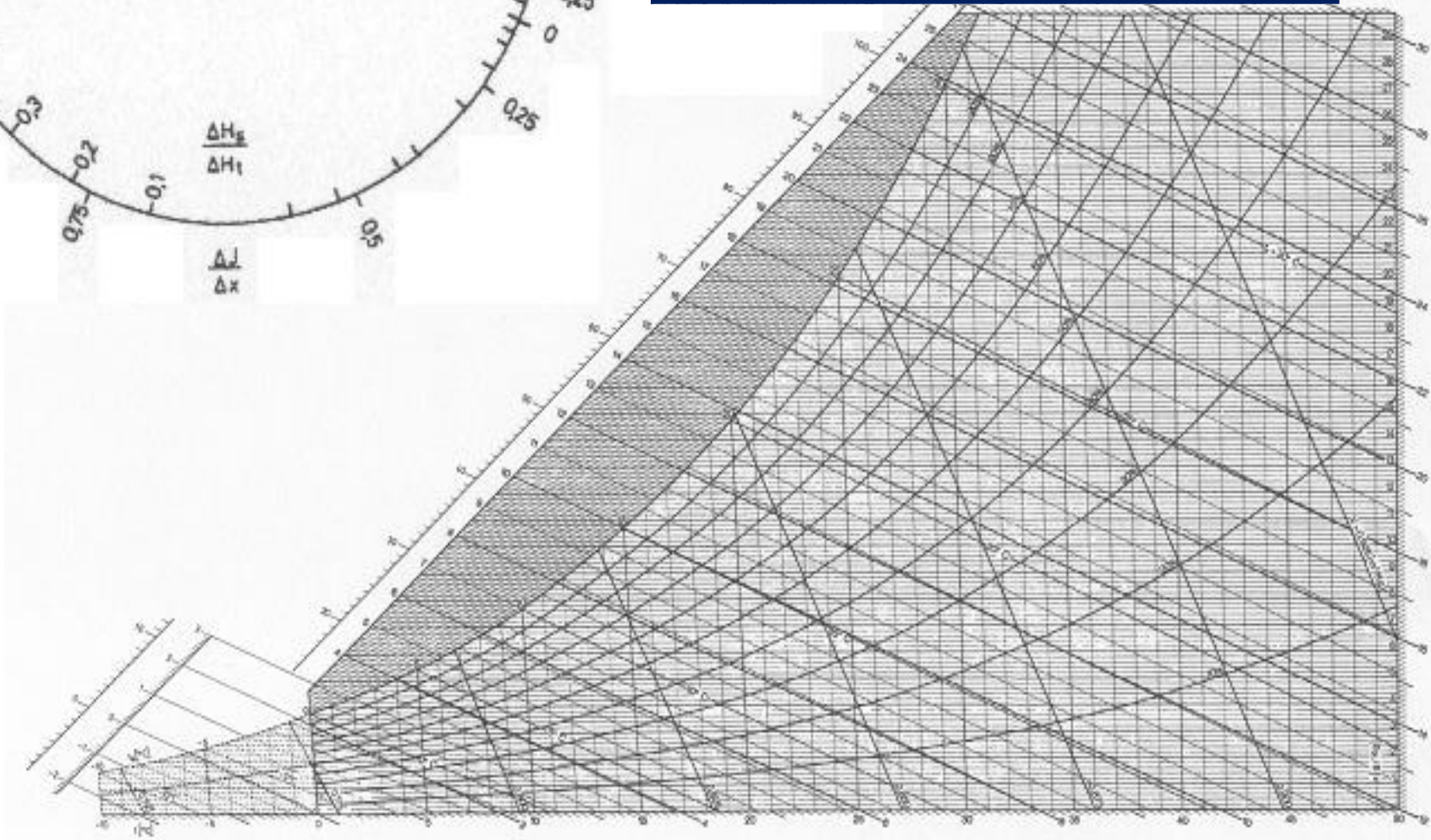
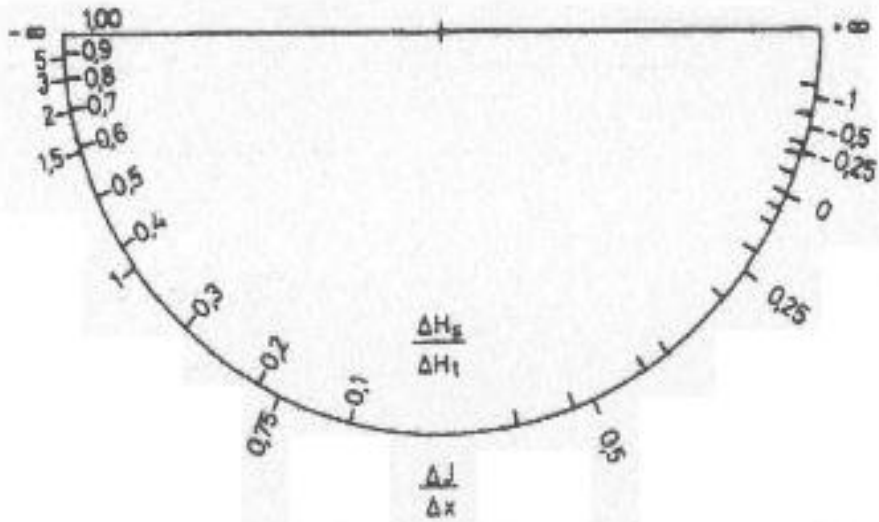
# Diagramma psicrometrico

$\phi$  (1%,100%)



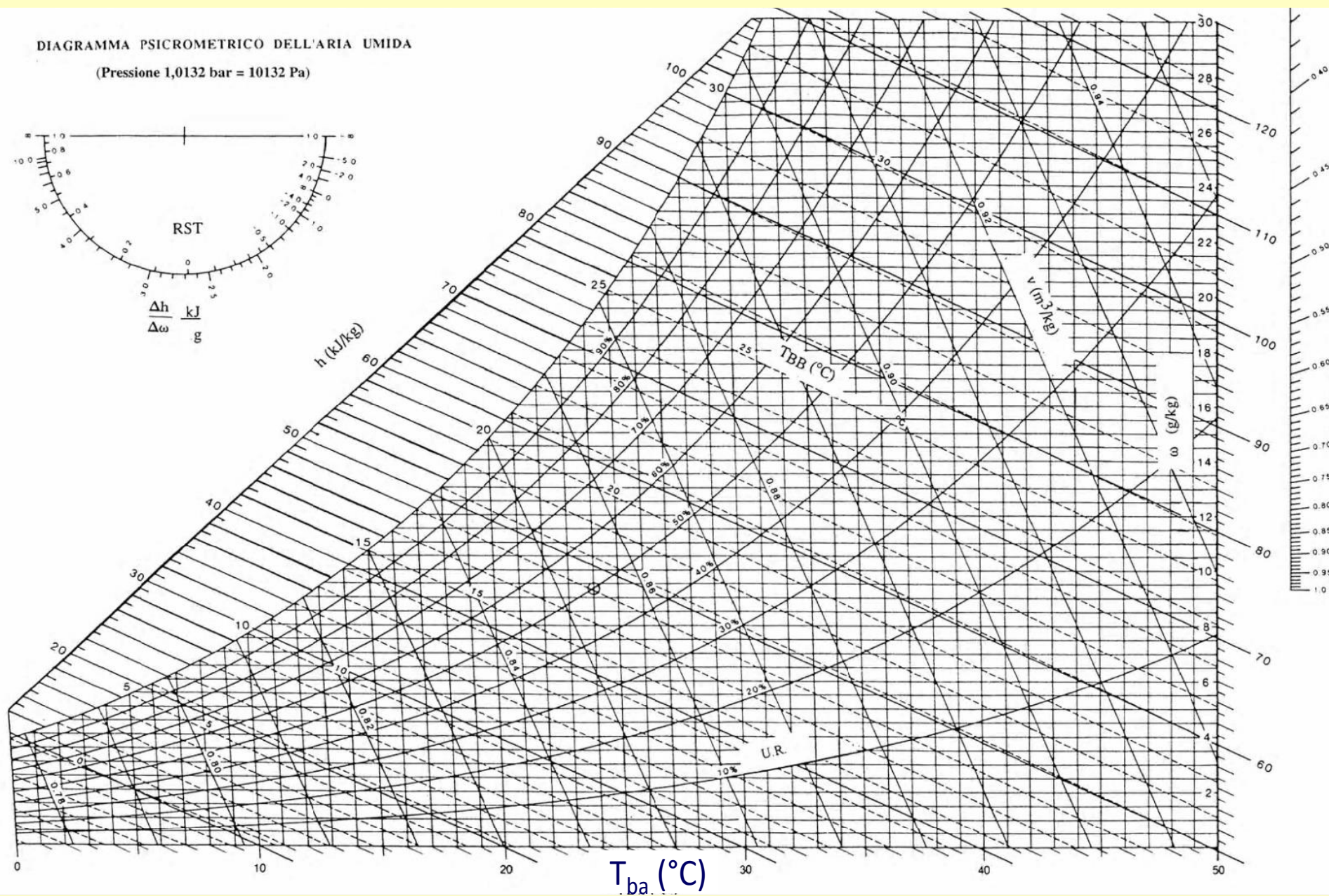
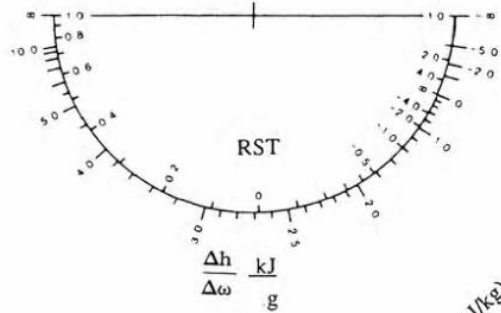


***Noto il valore di 2 proprietà qualsiasi (essendo fissata la pressione totale), consente la lettura completa dello stato termo-dinamico in cui si trova l'aria umida, permettendo la conoscenza del valore di ogni altra proprietà.***

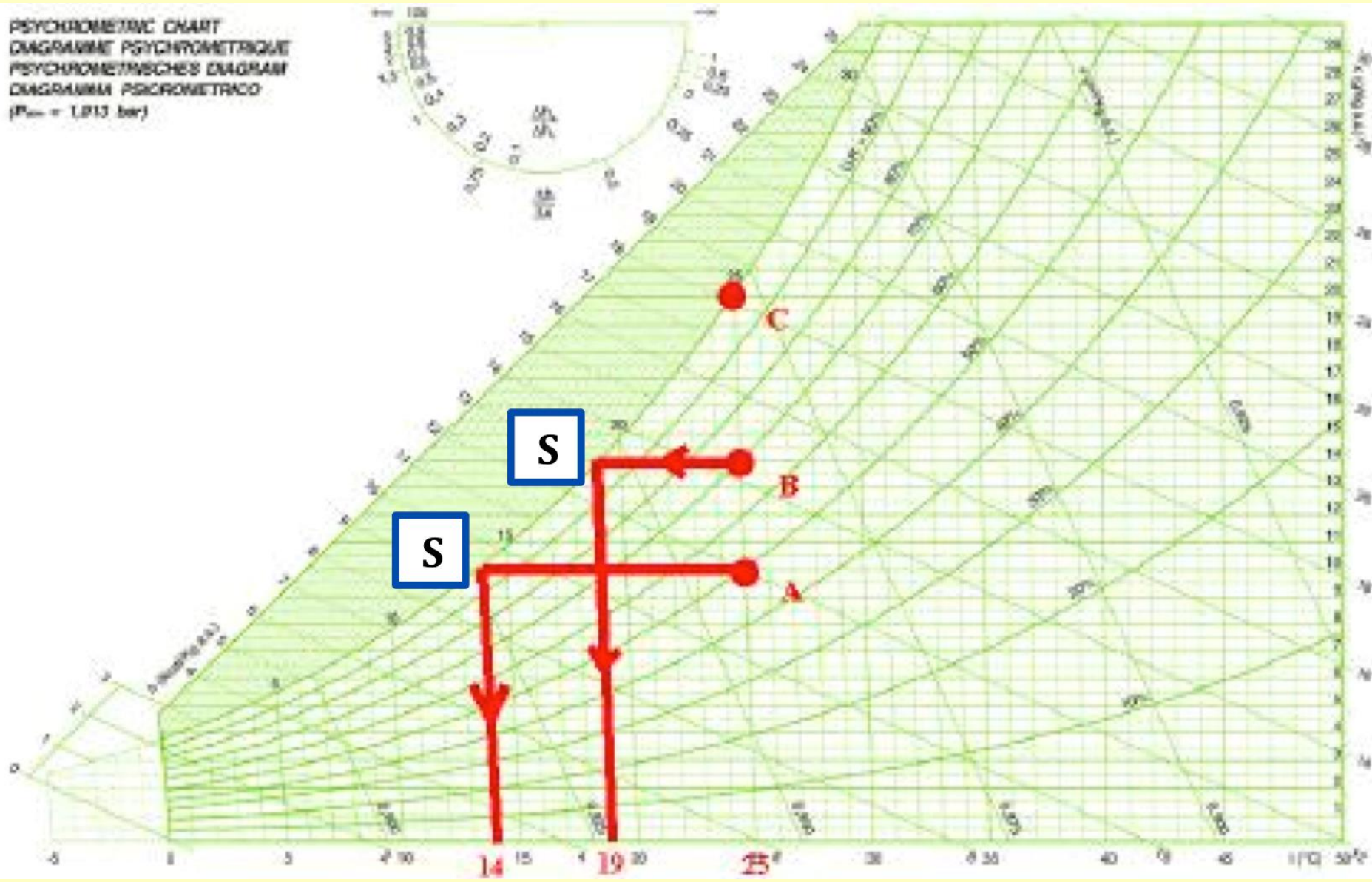


# DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA

(Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)



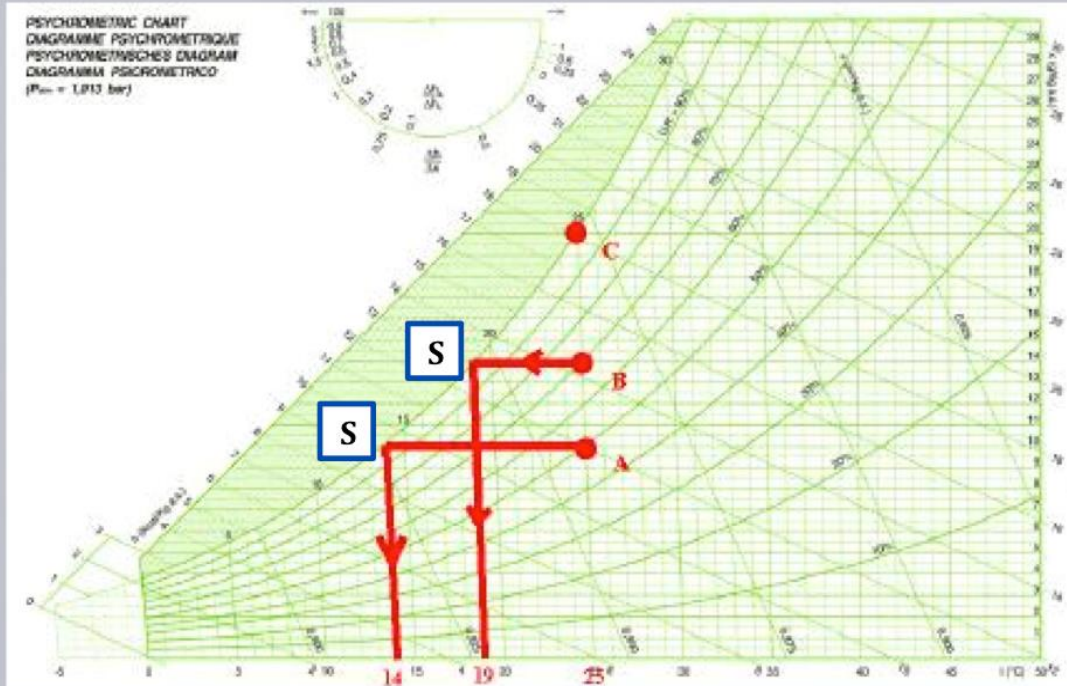
PSYCHROMETRIC CHART  
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM  
DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
( $P_{tot} = 1.013 \text{ bar}$ )





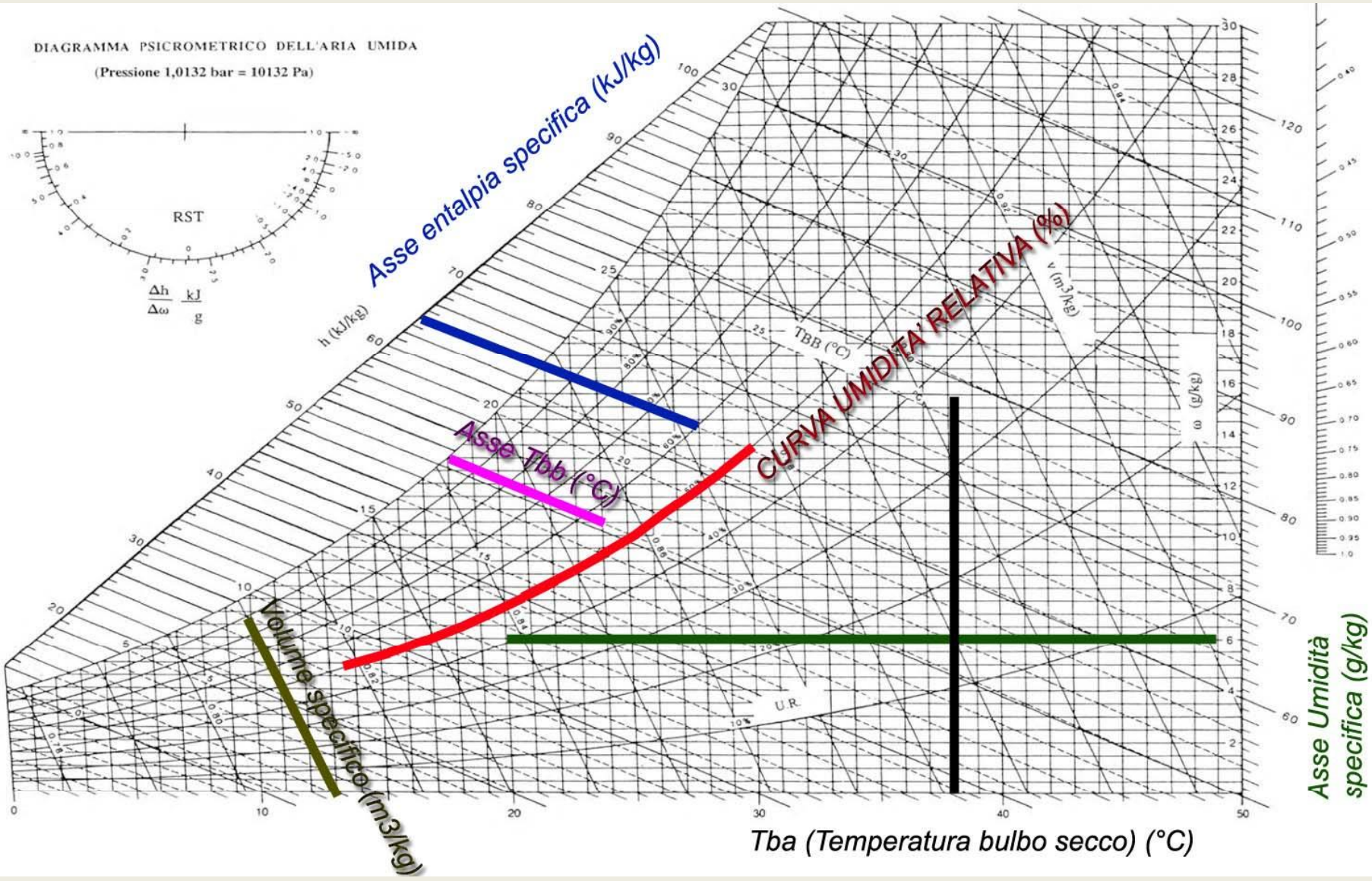
## La temperatura di rugiada

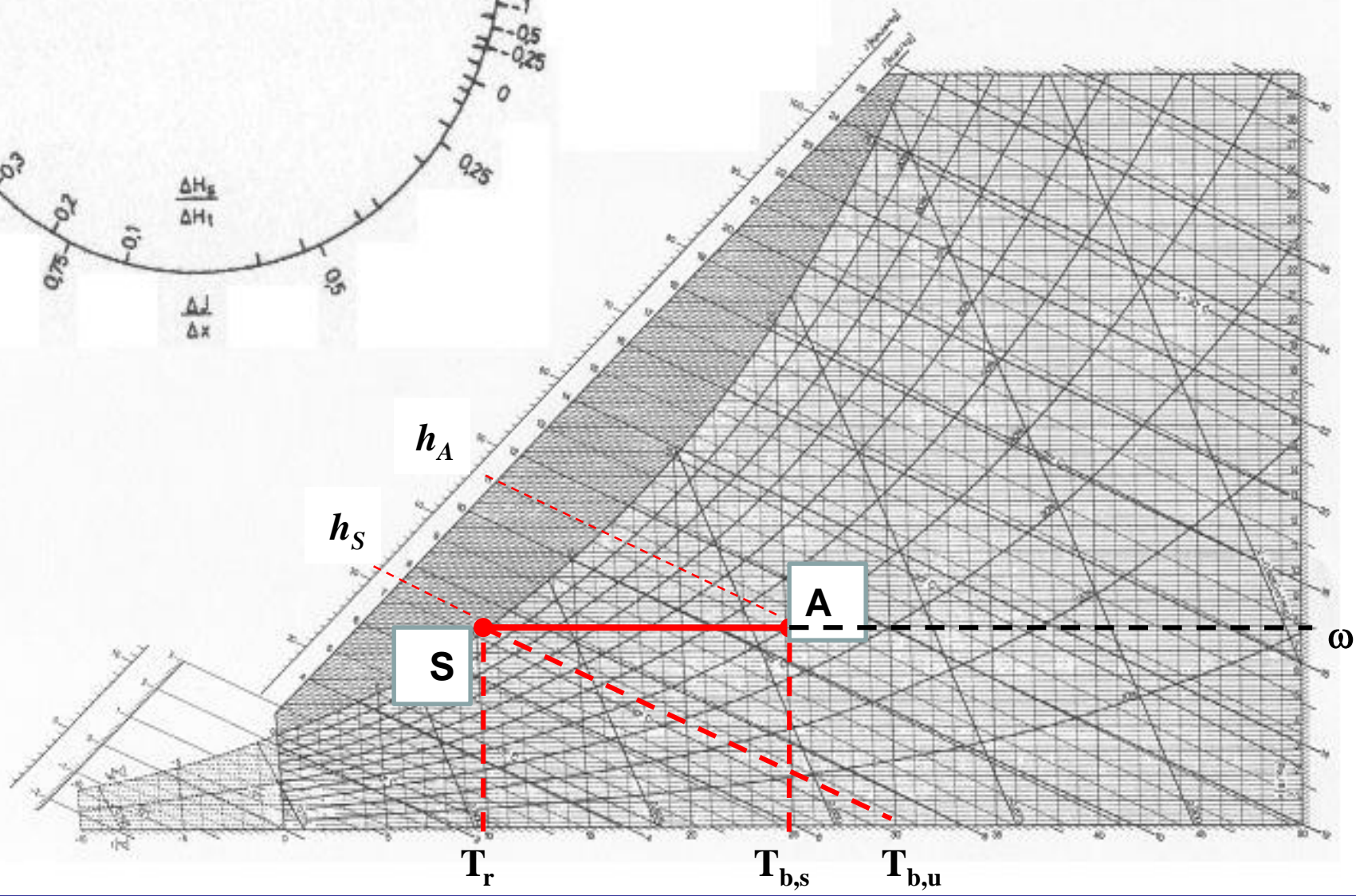
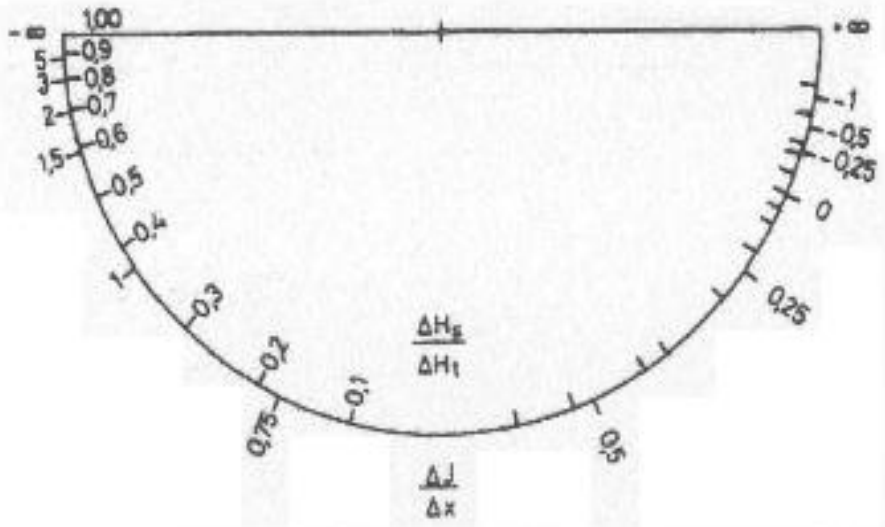
Temperatura alla quale l'aria raggiunge le condizioni di saturazione (U.R.=100%): su ogni elemento che si trova ad una temperatura appena inferiore alla temperatura di rugiada si forma condensa.



La temperatura di rugiada è maggiore, a parità di temperatura a bulbo secco, al crescere dell'umidità relativa iniziale: l'aria a maggiore umidità relativa necessita di un minore raffreddamento per giungere a saturazione (Tratto BS più corto di BS).

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA  
 (Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)





## RICAPITOLANDO

$$p_{\text{tot}} = p_a + p_v$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{\text{VS}}} \iff \phi = \frac{p_v}{p_{\text{VS}}}$$

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a}$$

$$\omega_2 = 0,622 \frac{\phi_2 \cdot p_{\text{sat}}(T_2)}{p_{\text{tot}} - \phi_2 \cdot p_{\text{sat}}(T_2)}$$

$$V = \frac{V}{m_a} = \frac{R_a \cdot T}{p_a} = \frac{R_a \cdot T}{p_t - \Phi \cdot p_{\text{VS}}}$$

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$h = 1,0 \cdot T + \omega (2500 + 1,8 \cdot T)$$

*NB. Ai fini del corso di Fisica  
Tecnica Ambientale, si prediligerà  
l'uso del diagramma  
psicrometrico ai fini del calcolo  
delle proprietà.*