

PSICROMETRIA

Aria Umida

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

L'aria atmosferica è una miscela gas-vapore e può essere assimilata a un sistema bi-componente composto da **aria secca** e **vapor d'acqua**, assumendo così il nome tecnico di ***aria umida***

Aria secca:

Azoto 78%, Ossigeno 21%, Altri gas 1% (Argon, anidride carbonica, ecc.)

Composizione standard dell'aria secca

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

Aria Umida = aria secca e vapor d'acqua

Aria secca

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.

Vapor d'acqua

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 °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 termo-igrometrico indoor**

Pertanto, il campo di interesse è:

- **Pressione $p_{\text{ambiente}} = 101.325 \text{ Pa} = 101 \text{ kPa}$**
- **Temperatura $T_{\text{ambiente}} = -10 \div 50 \text{ }^\circ \text{ C.}$**

In queste condizioni accade che:

- **L'aria secca si comporta da gas ideale ($T > T_c = -141^\circ \text{ C}$)**
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_{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

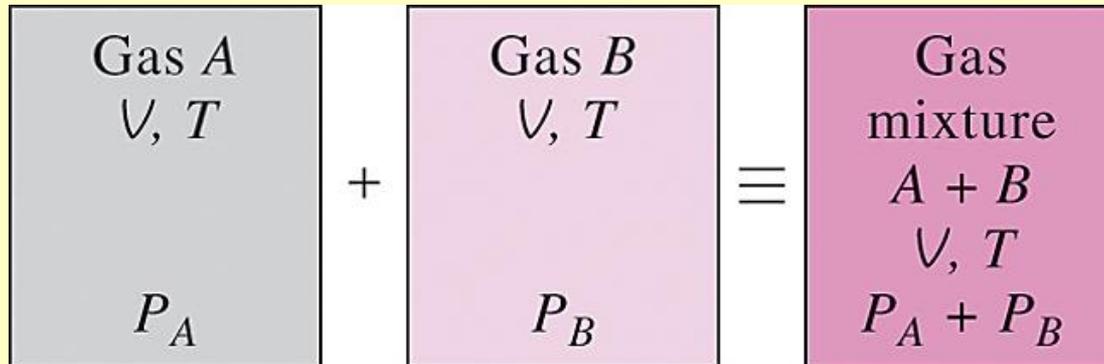


+

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.

$$p = p_a + p_v$$

Aria umida: **proprietà**

*Le **proprietà** specifiche dell'aria umida vengono calcolate riferendosi alla sola massa di aria secca, in quanto solo 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

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

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

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

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

ω è una grandezza
adimensionale

Quindi, **ω** = g/kg

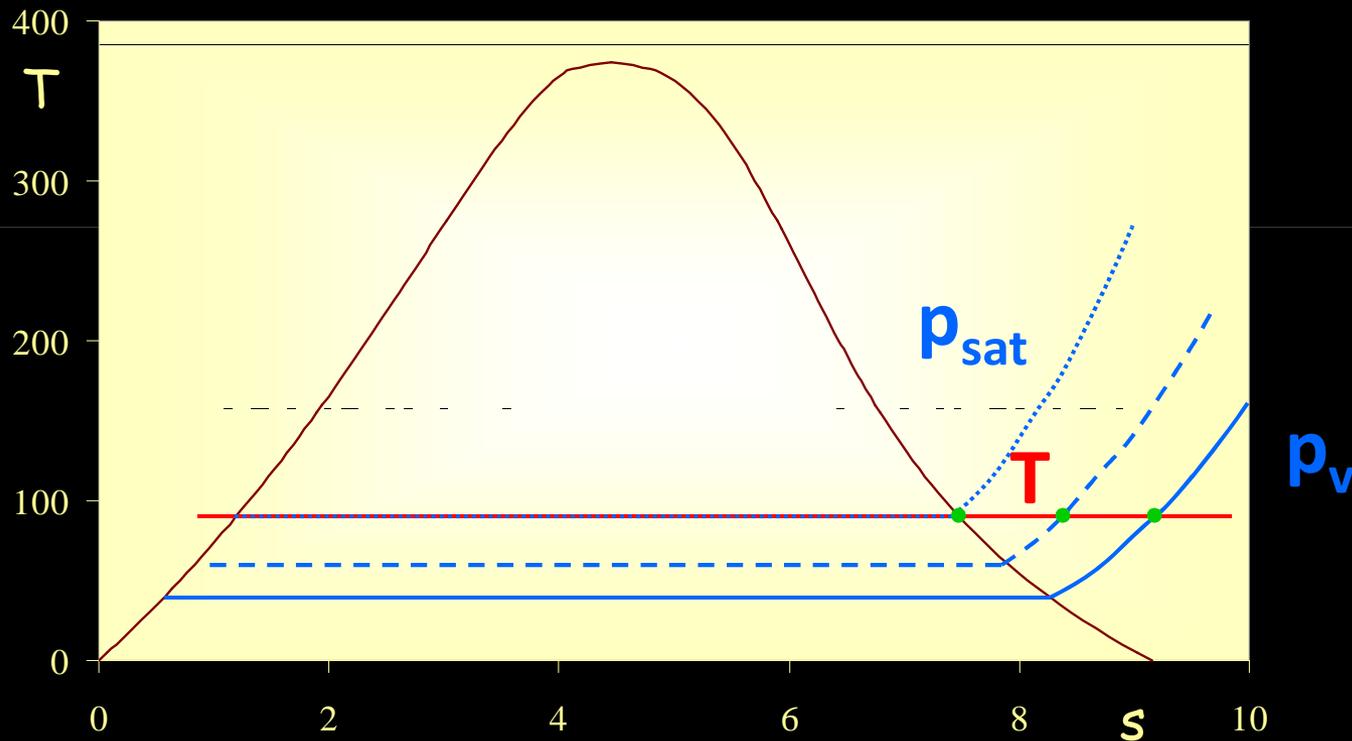
ω assume valori dell'ordine di 10^{-2} .

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

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”.

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

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

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

Φ 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:

$$H = m_a h_a + m_v h_v$$

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

$$\Delta H = H - H_0 = m_a h_a + m_v h_v$$

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 $T = 0^\circ\text{C}$ ($H = 0$) alla temperatura T :

$$h_a = c_p \Delta T = c_p (T - T_0) = c_p (T - 0) = c_p T$$

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

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

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

L' **entalpia latente di vaporizzazione** $\Delta h_{v,s}$ è la variazione di entalpia necessaria per portare l'acqua dalle condizioni di liquido saturo a 0° C a quelle di vapore saturo secco alla stessa temperatura di 0° C

$$\Delta h_{v,s} = h_{v,s} - h_l = 2500 \text{ kJ/kg}$$

Poi, in fase ormai aeriforme, aggiungiamo la variazione di entalpia per portare il vapore saturo secco da 0° C alla temperatura effettiva

$$\Delta h = c_{pv} T$$

Quindi

$$h_v = \Delta h_{v,s} + c_{pv} T$$

Entalpia specifica dell'aria umida

Entalpia specifica aria secca

$$h_a = c_{p,a} \Delta T$$

Entalpia specifica vapore

$$h_v = \Delta h_{v,s} + c_{p,v} T$$

Entalpia specifica aria umida

$$h = h_a + \omega h_v$$

$$h = c_{pa} \Delta T + \omega (\Delta h_{v,s} + c_{p,v} T)$$

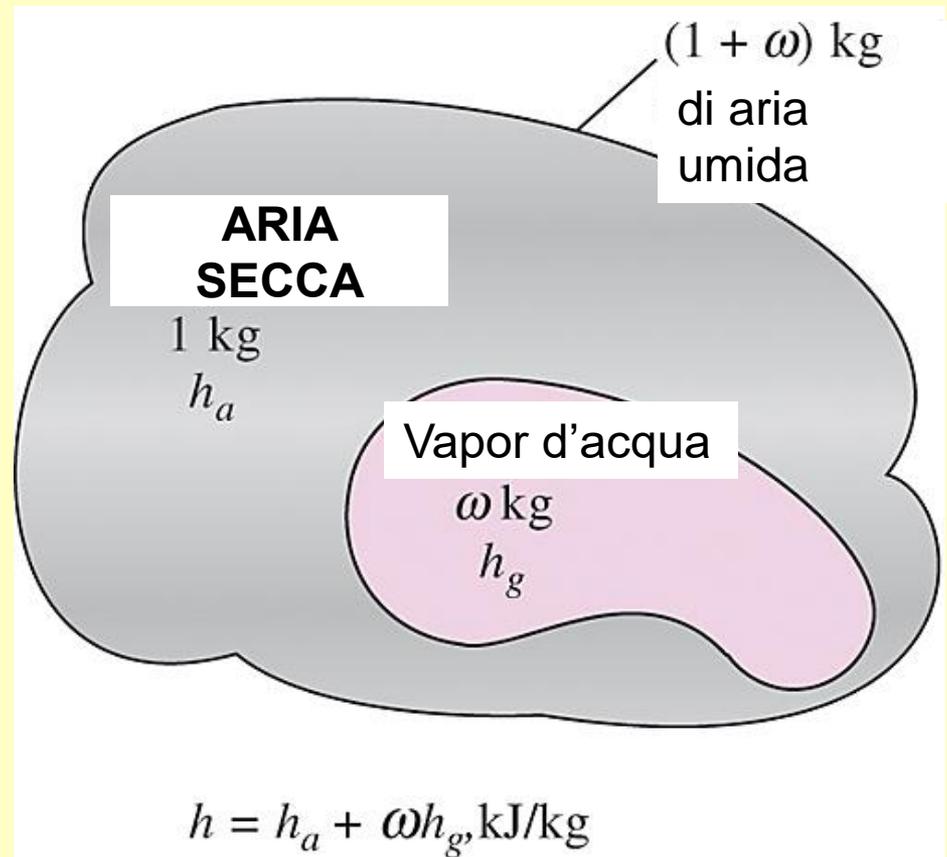
Essendo $c_{p,a} = 1,01 \text{ kJ/kgK}$, $\Delta h_{v,s} = 2500 \text{ kJ/kg}$, $c_{p,v} = 1,8 \text{ kJ/kgK}$:

$$h = 1,01 \Delta T + \omega (2500 + 1,8 T)$$

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*.



Volume specifico v

Il volume specifico dell'aria umida è definito come il ***volume occupato dall'unità di massa dell'aria secca***, in quanto questa rimane costante durante le trasformazioni dell'aria umida, mentre la massa di vapore d'acqua può variare (umidificazione e deumidificazione).

Pertanto il volume specifico dell'aria umida coincide con quello dell'aria secca.

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 pressione p e di umidità relativa ϕ , 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 .

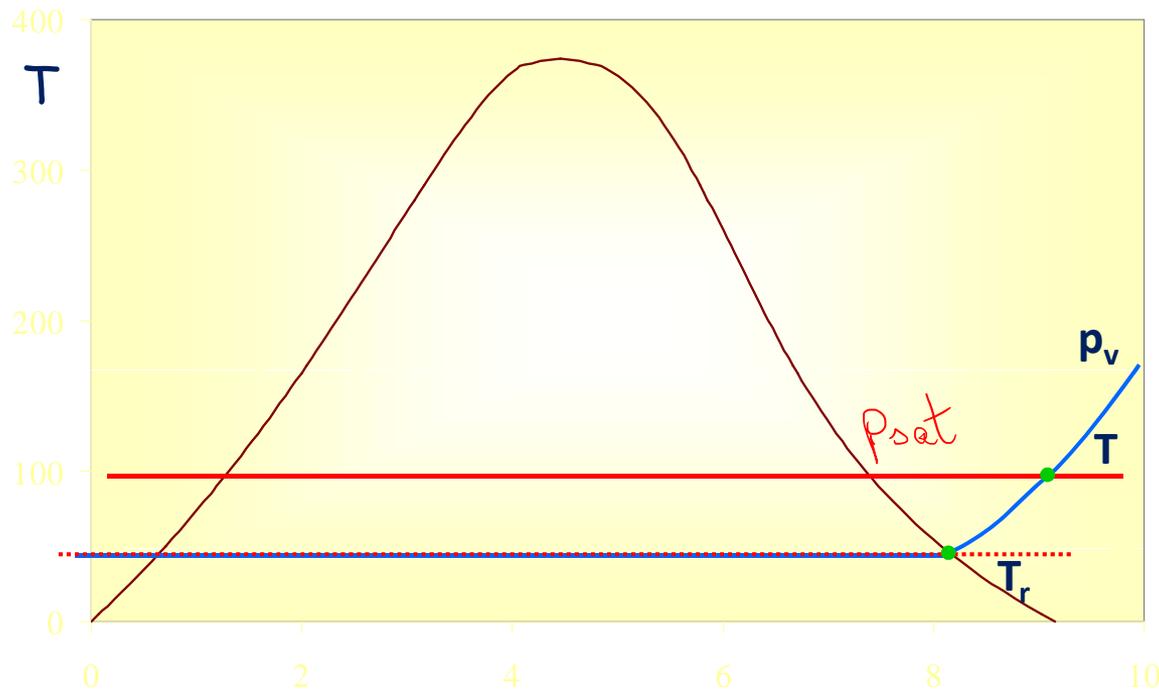
TEMPERATURA DI RUGIADA

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”.



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

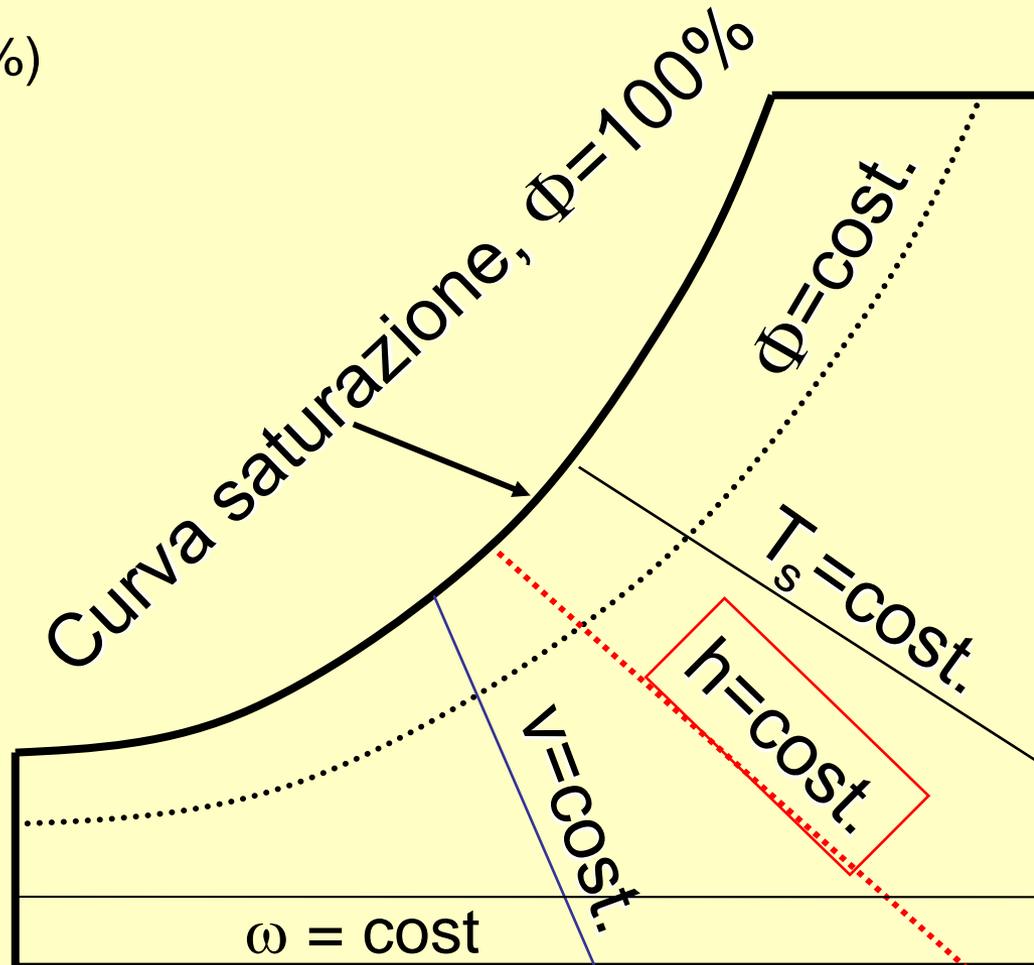
$$T_r \leq T$$

se l'aria è satura

$$T_r = T$$

Diagramma psicrometrico

ϕ (1%,100%)

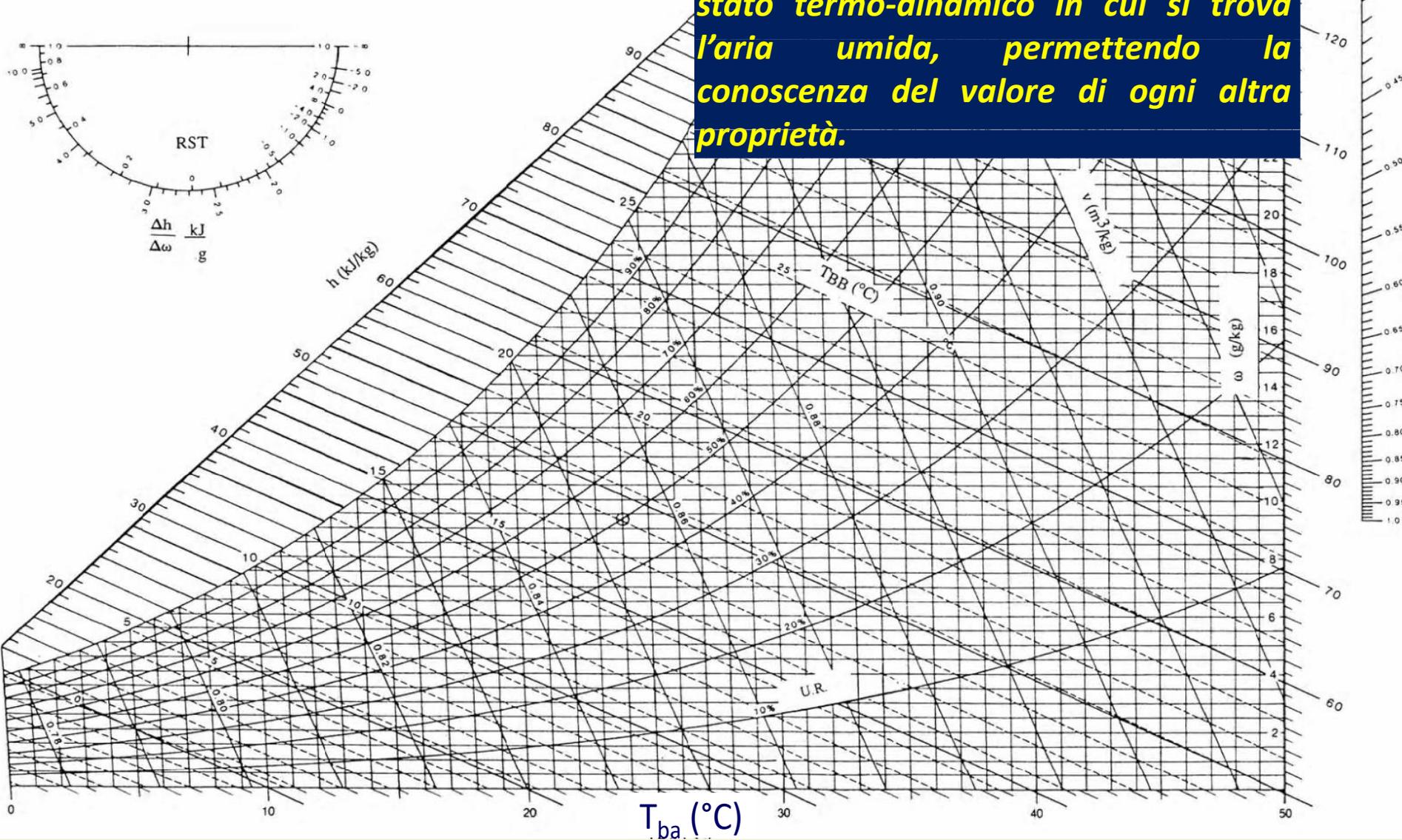
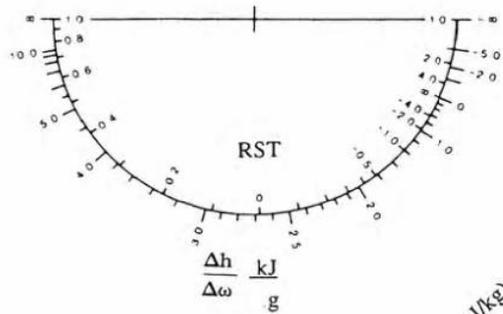


Umidità specifica ω

Temperatura bulbo asciutto, T_{ba}

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA

(Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)



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.

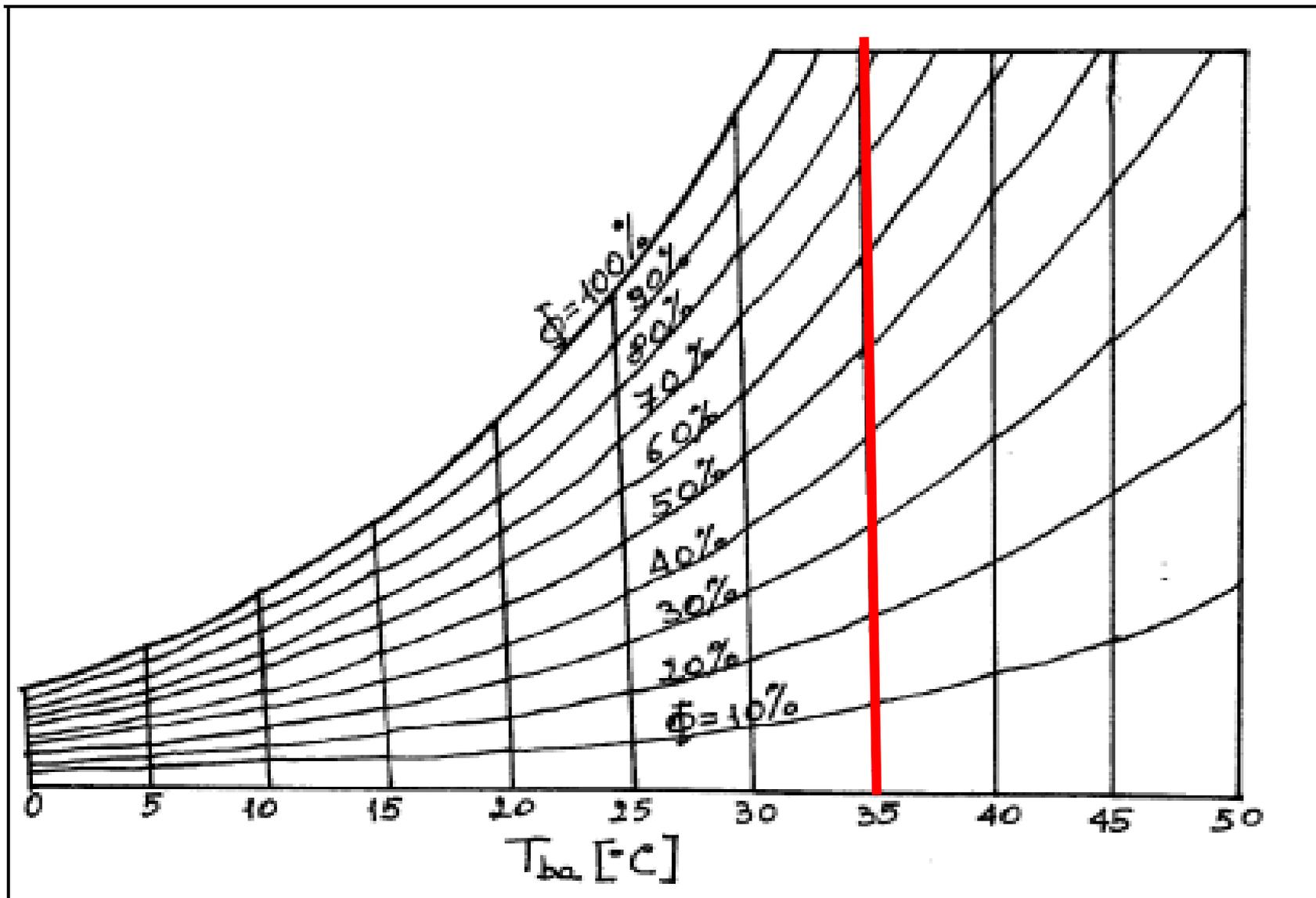
Proprietà dell'aria umida

Si definisce:

- Temperatura di bulbo asciutto T_{ba} la temperatura della miscela di aria umida misurata da un termometro dotato di un sistema di schermatura che riduca l'influenza degli scambi termici con l'esterno e favorisca lo scambio termico tra l'aria e il sensore.

Le curve a temperatura di bulbo asciutto costante hanno sul diagramma psicrometrico un andamento verticale, sono quindi ad andamento rettilineo.

Temperatura di bulbo asciutto T_{ba}

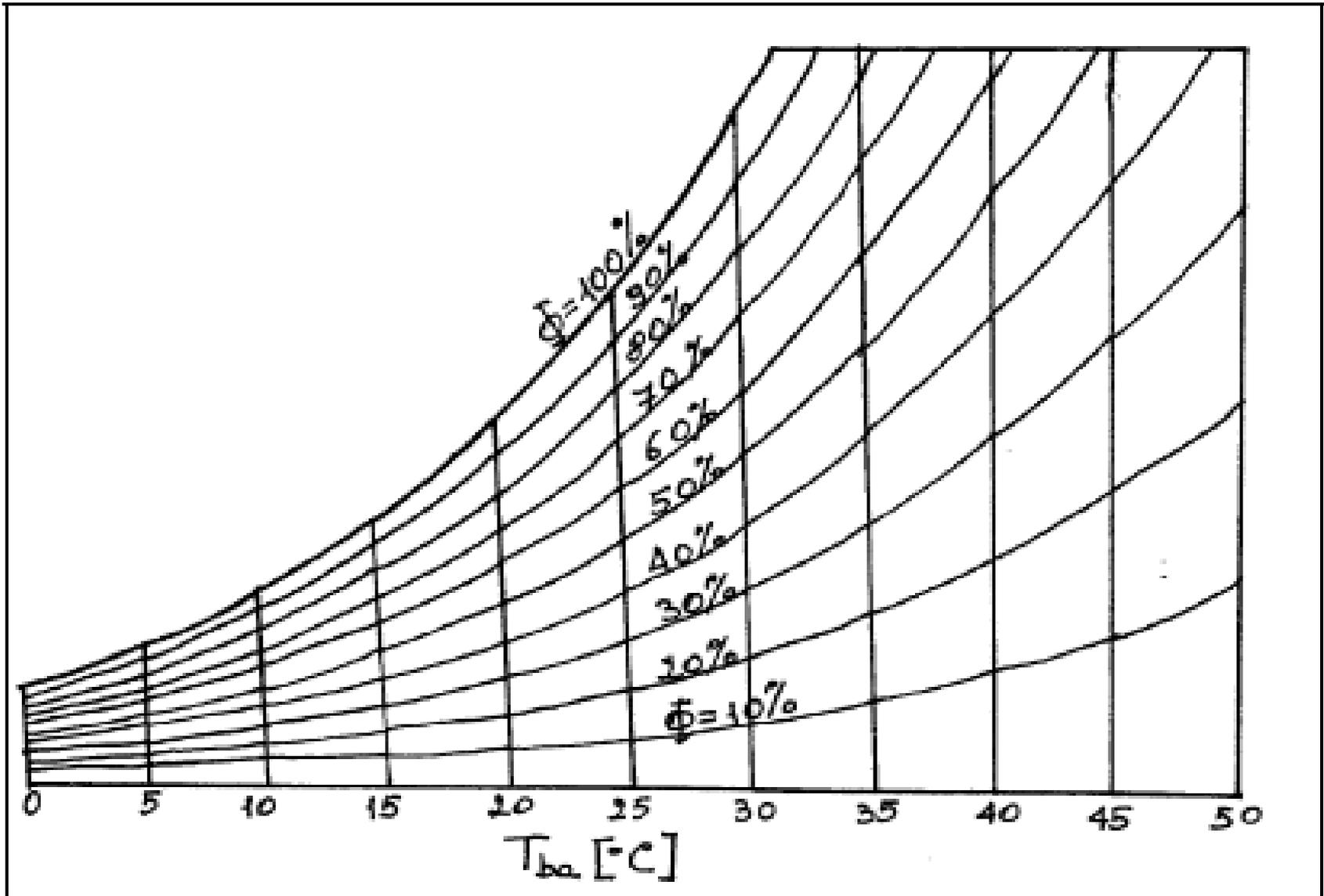


Umidità relativa U.R. o grado igrometrico ϕ

Rapporto tra la massa del vapore surriscaldato presente nella miscela a data temperatura e la massima quantità di vapore che la miscela può contenere alla data temperatura

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

Umidità relativa U.R. o grado igrometrico ϕ



Umidità specifica o assoluta ω

- E' definita come la massa di vapor d'acqua contenuta nell'unità di massa di aria secca:

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

Si esprime in **kg/kg_a**.

Sul diagramma psicrometrico le curve ad umidità specifica costante sono segmenti di retta orizzontali ed i valori sono riportati in g/kg

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

Applicando l'equazione di stato dei gas ideali a ciascun componente la miscela e la legge di Dalton, si ha:

UMIDITA' SPECIFICA

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

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

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

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

VOLUME SPECIFICO

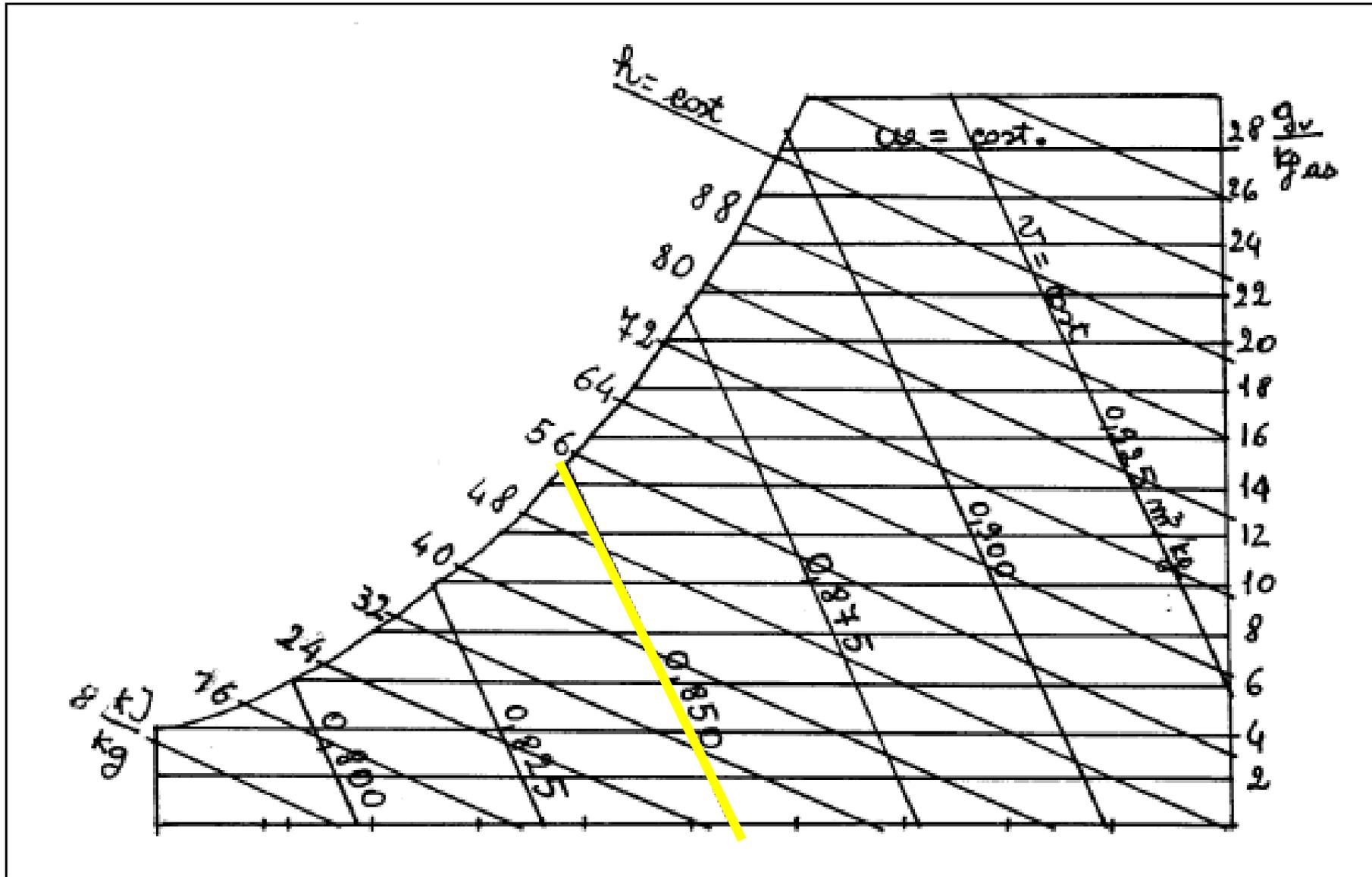
Anche in questo caso, si fa riferimento esclusivamente alla massa di aria secca.

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

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

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

Umidità specifica o assoluta ω



Entalpia specifica dell'aria umida

Entalpia specifica aria secca

$$h_a = c_{pa} T$$

Entalpia specifica vapore

$$h_v = \Delta h_{v,s} + c_{pv} T$$

Entalpia specifica aria umida

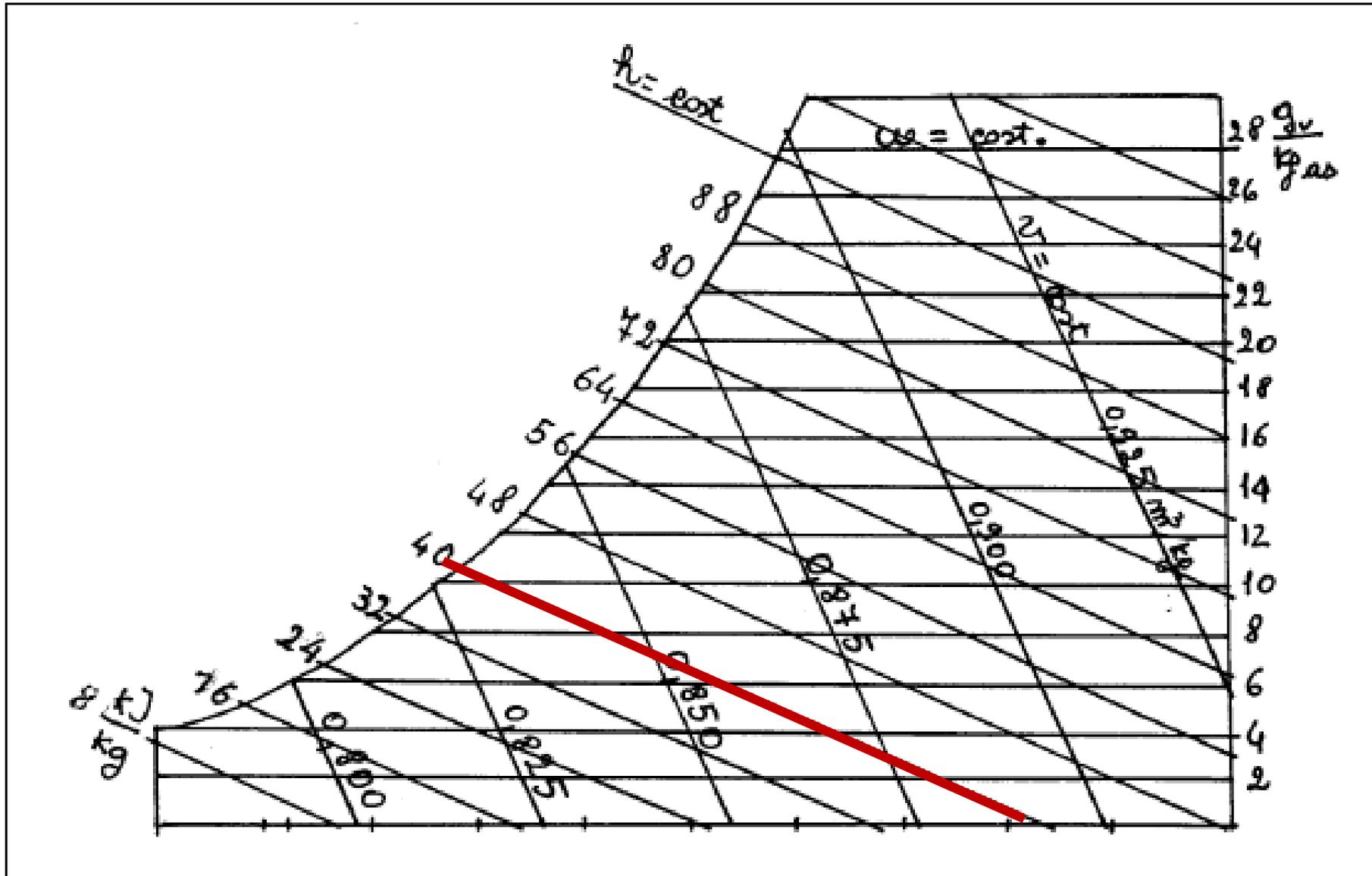
$$h = h_a + \omega h_v$$

$$h = c_{pa} \Delta T + \omega (\Delta h_{v,s} + c_{pv} T)$$

Essendo $c_{pa} = 1,01 \text{ kJ/kgK}$, $\Delta h_{v,s} = 2500 \text{ kJ/kg}$, $c_{pv} = 1,8 \text{ kJ/kgK}$:

$$h = 1,01 \Delta T + \omega (2500 + 1,8T)$$

Entalpia specifica h



Temperatura di rugiada T_r

Temperatura di una miscela di aria umida che ha raggiunto le condizioni di saturazione in seguito ad un raffreddamento a pressione e ad umidità specifica costanti.

Le condizioni per il vapor d'acqua contenuto nell'aria umida sono quindi di incipiente condensazione. La determinazione della temperatura di rugiada si può effettuare con l'ausilio di tabelle, ricordando che:

$$p_v(T) = p_s(T_r)$$

Temperatura di rugiada T_r

La temperatura di rugiada si può determinare per via grafica, utilizzando il diagramma psicrometrico. Dal punto di vista termodinamico, si traccia un segmento orizzontale nel verso delle temperature decrescenti fino all'intersezione con la curva di saturazione (punto S), simulando la trasformazione di raffreddamento a umidità associata costante e pressione costante, che è alla base della definizione di T_r .

La temperatura di bulbo asciutto, in corrispondenza di tale punto è il valore della temperatura di rugiada

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA
(Pressione 1.0131 bar = 10131 Pa)

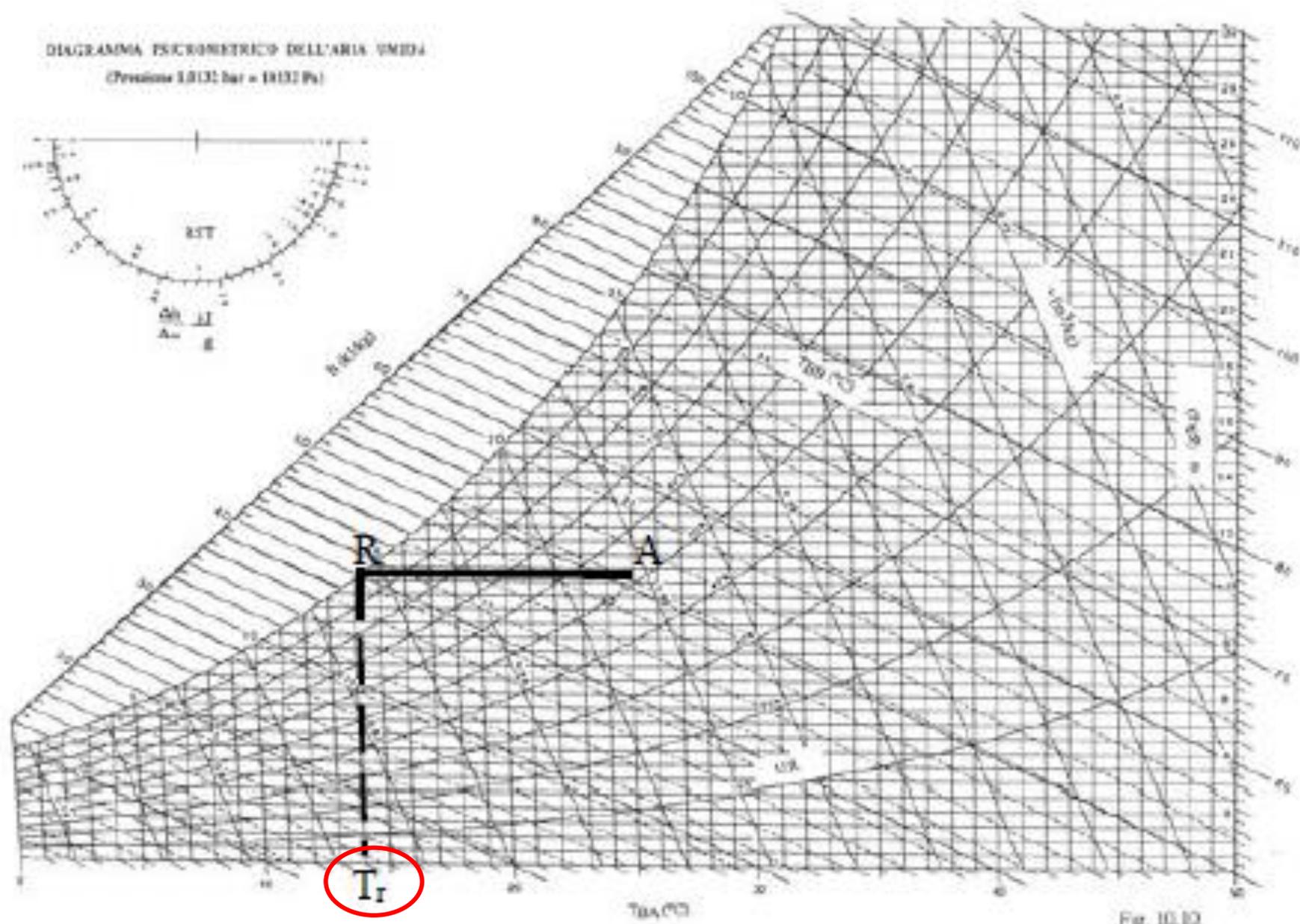
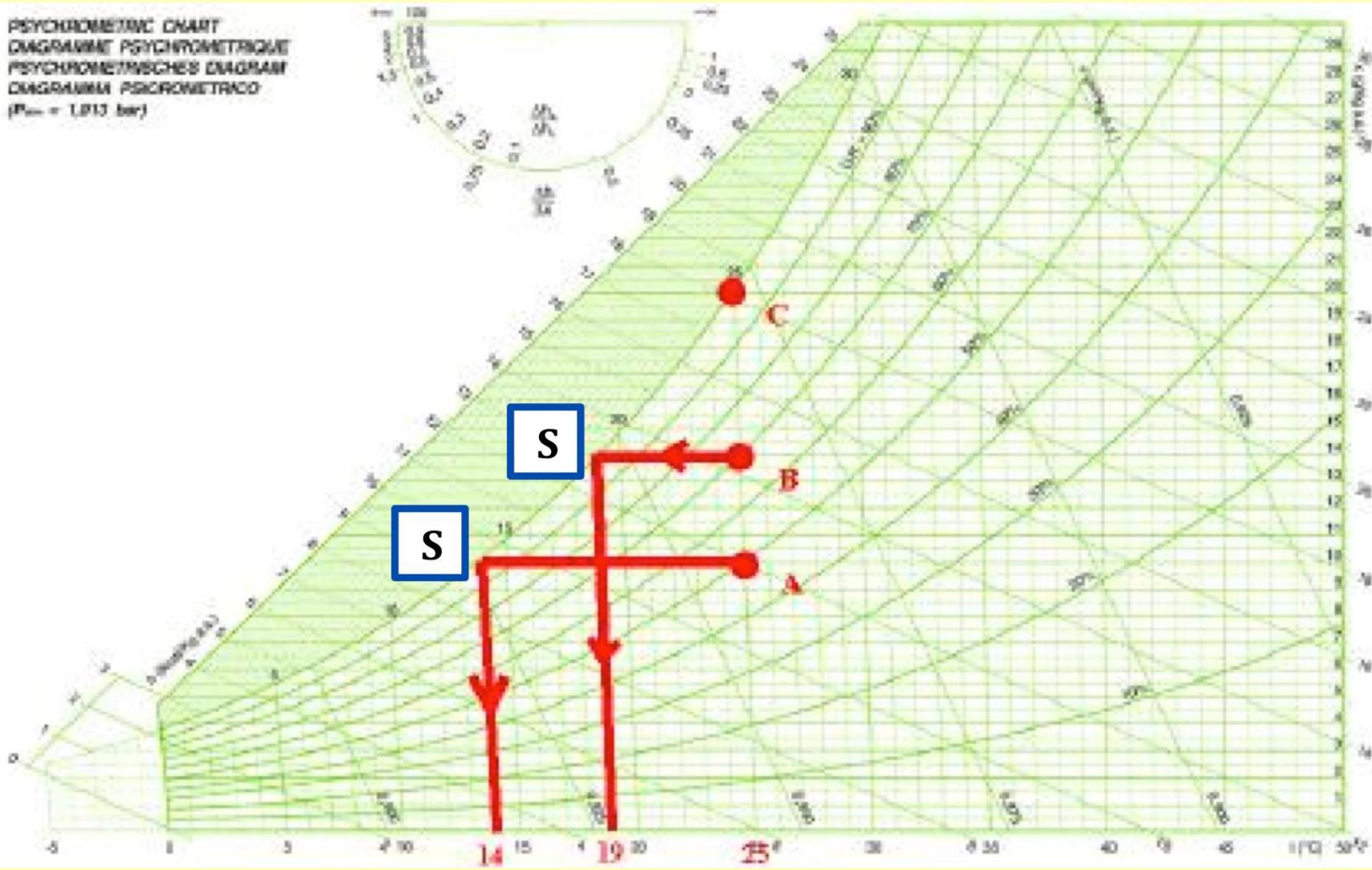


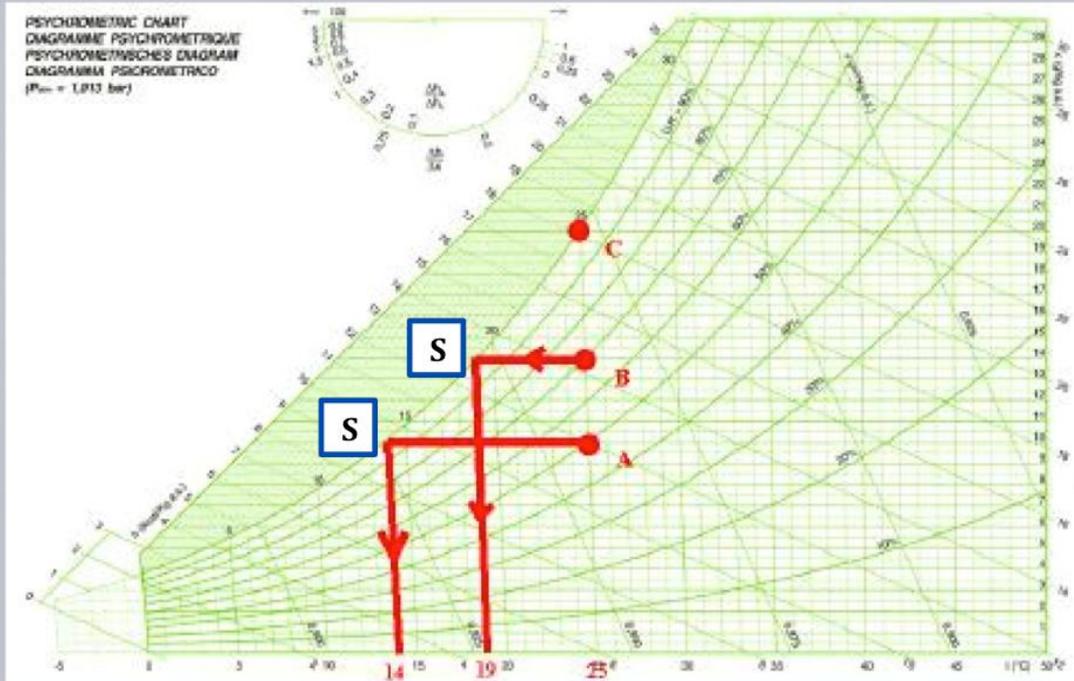
Fig. 10.13

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



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).

RICAPITOLANDO

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

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

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

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

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

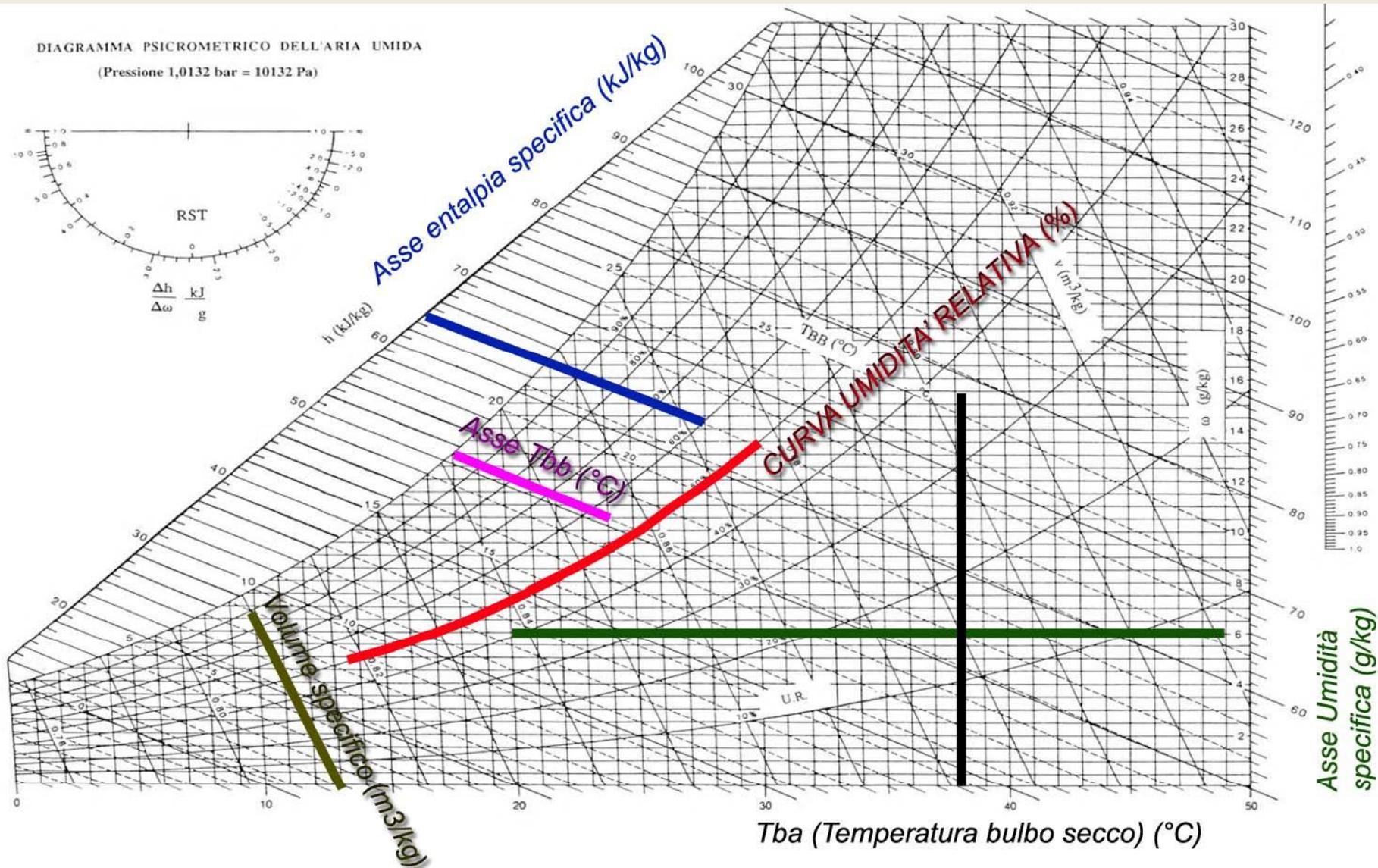
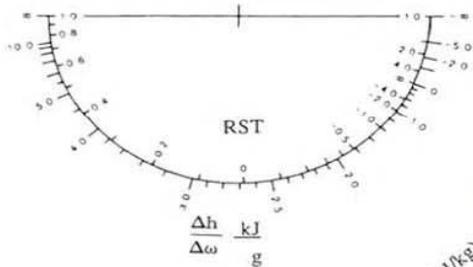
$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

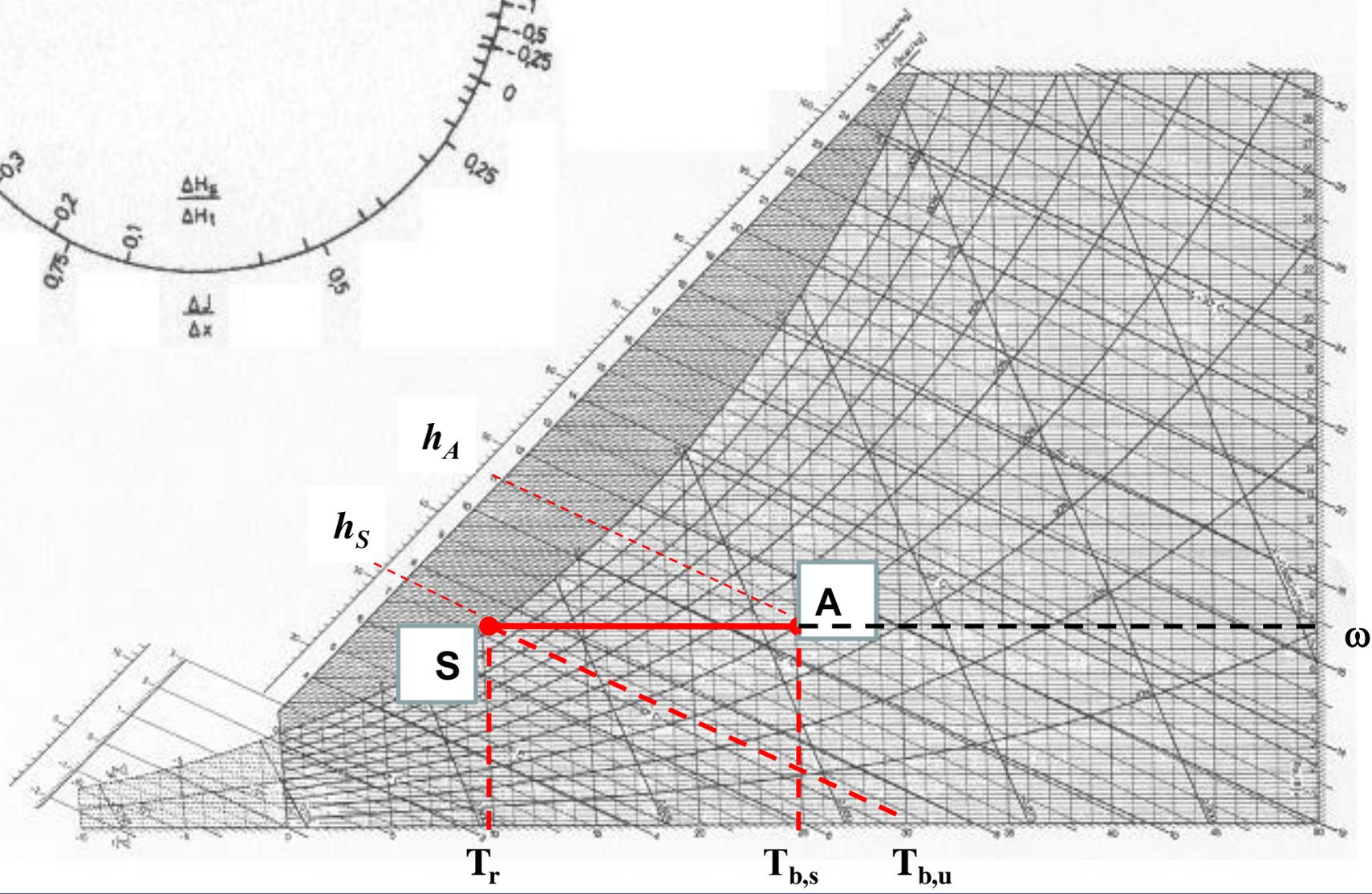
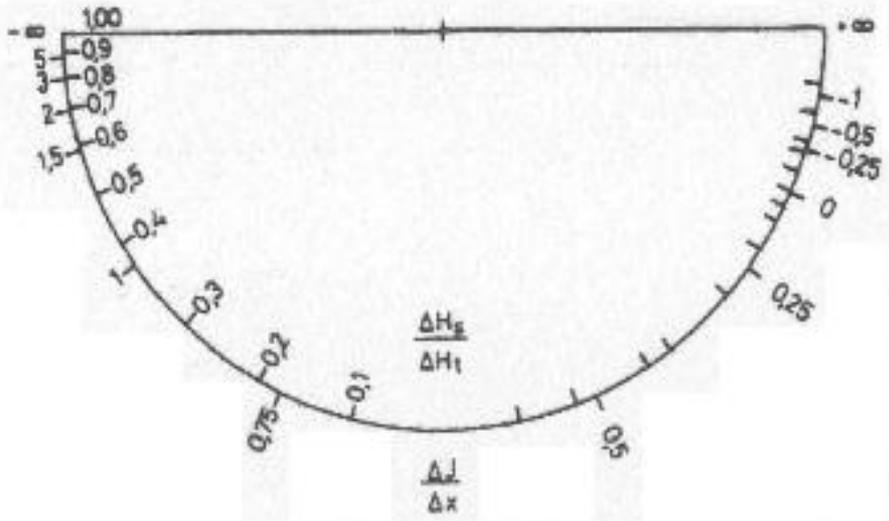
$$h = 1,0 \cdot T + \omega (2500 + 1,8 \cdot T)$$

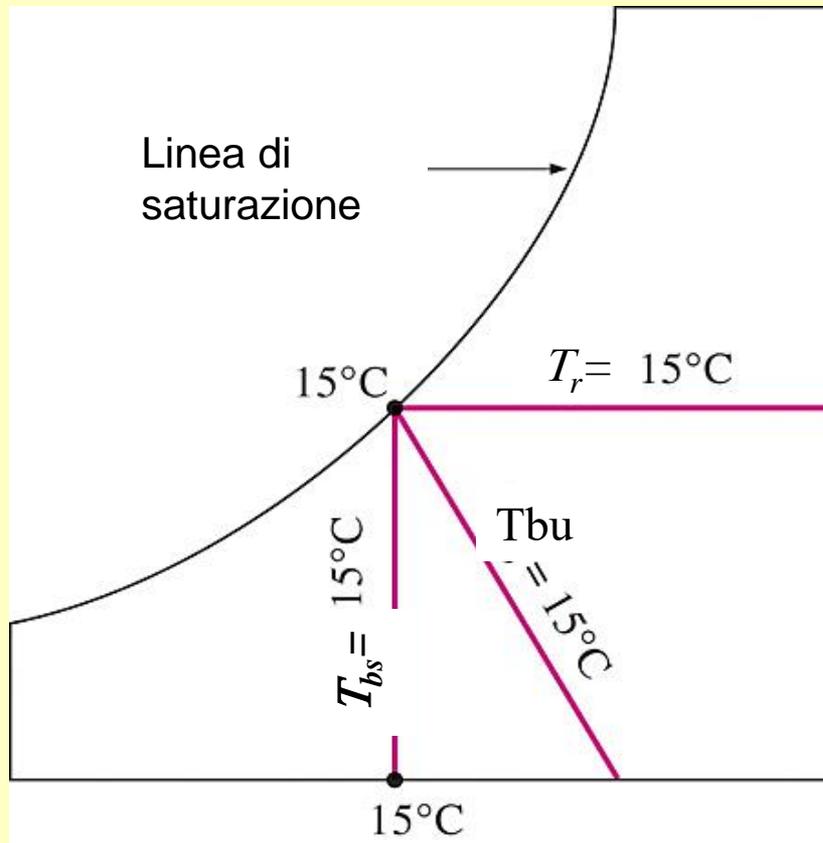
*NB. Ai fini del corso di Fisica
Tecnica Ambientale, si prediligerà
l'uso del diagramma
psicrometrico ai fini del calcolo
delle proprietà.*

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA

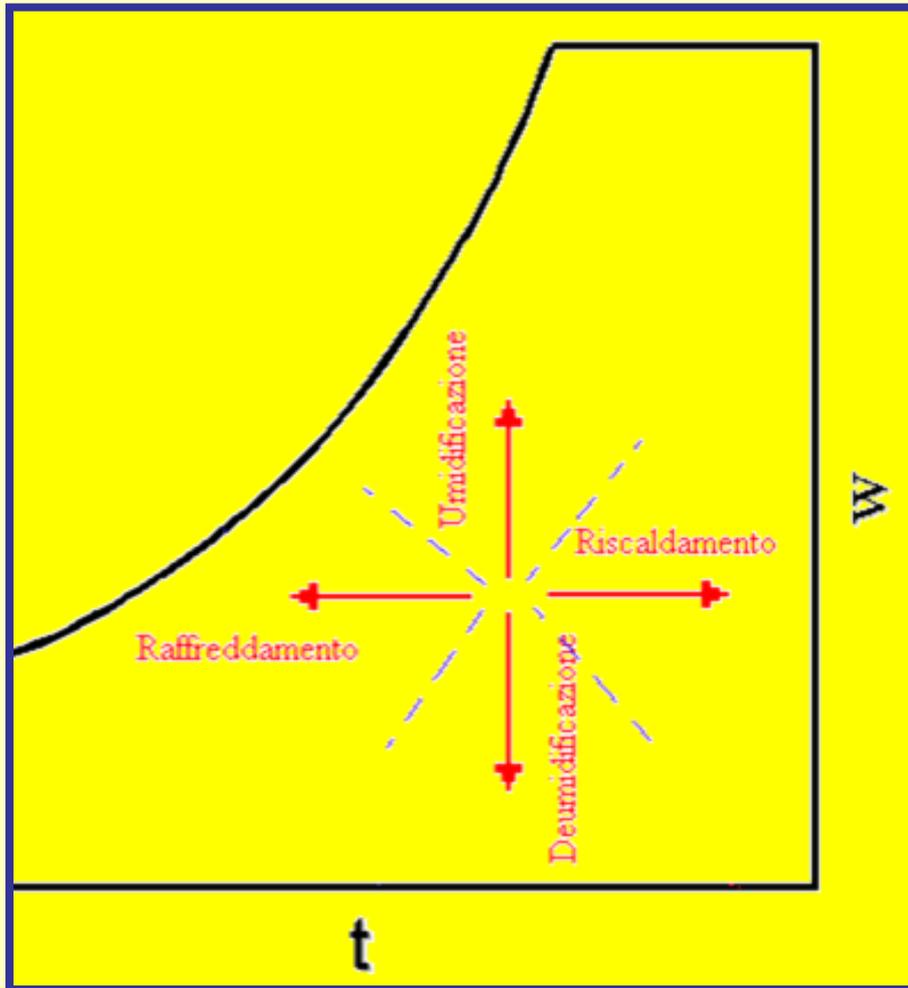
(Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)







Trasformazioni aria umida

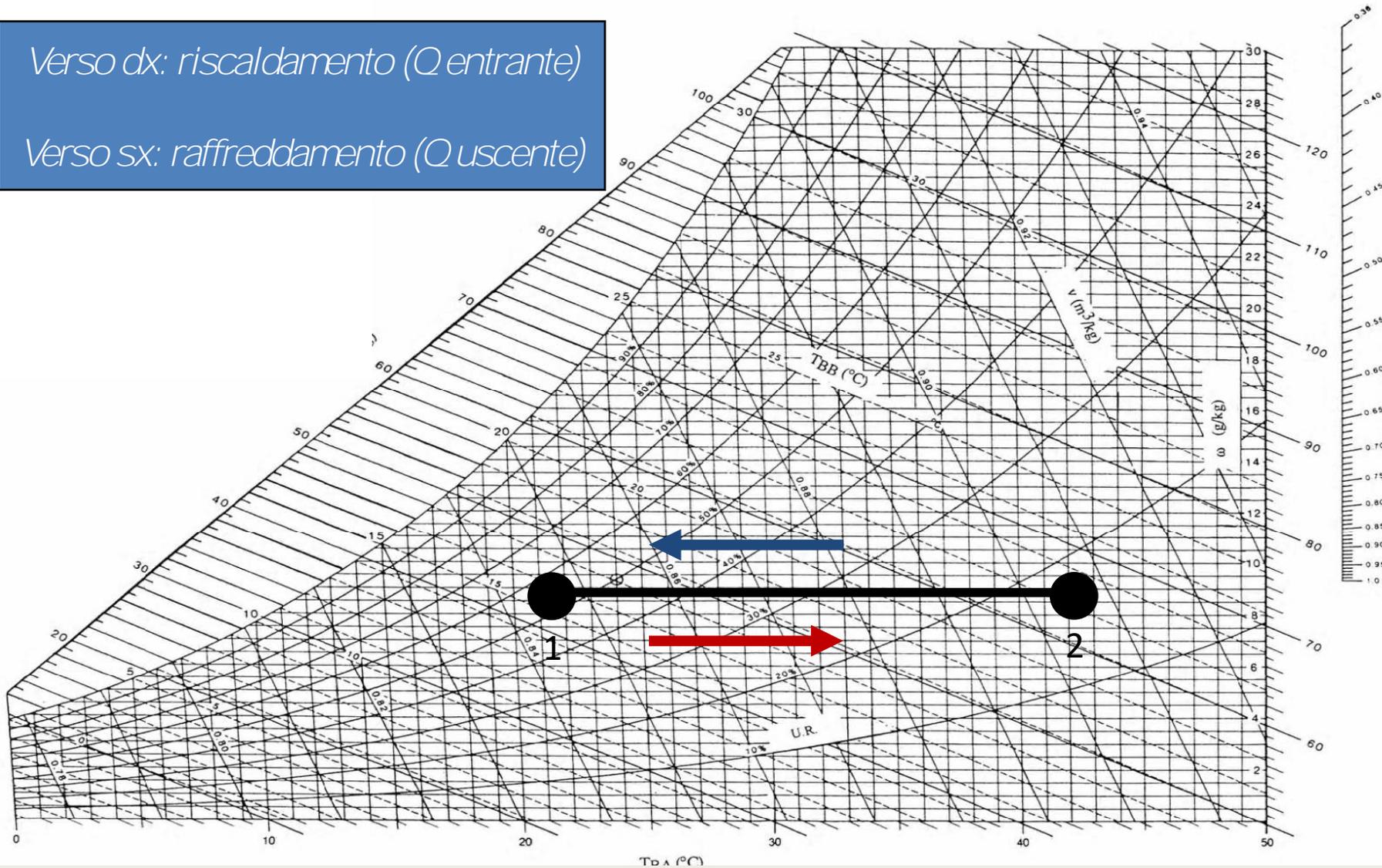


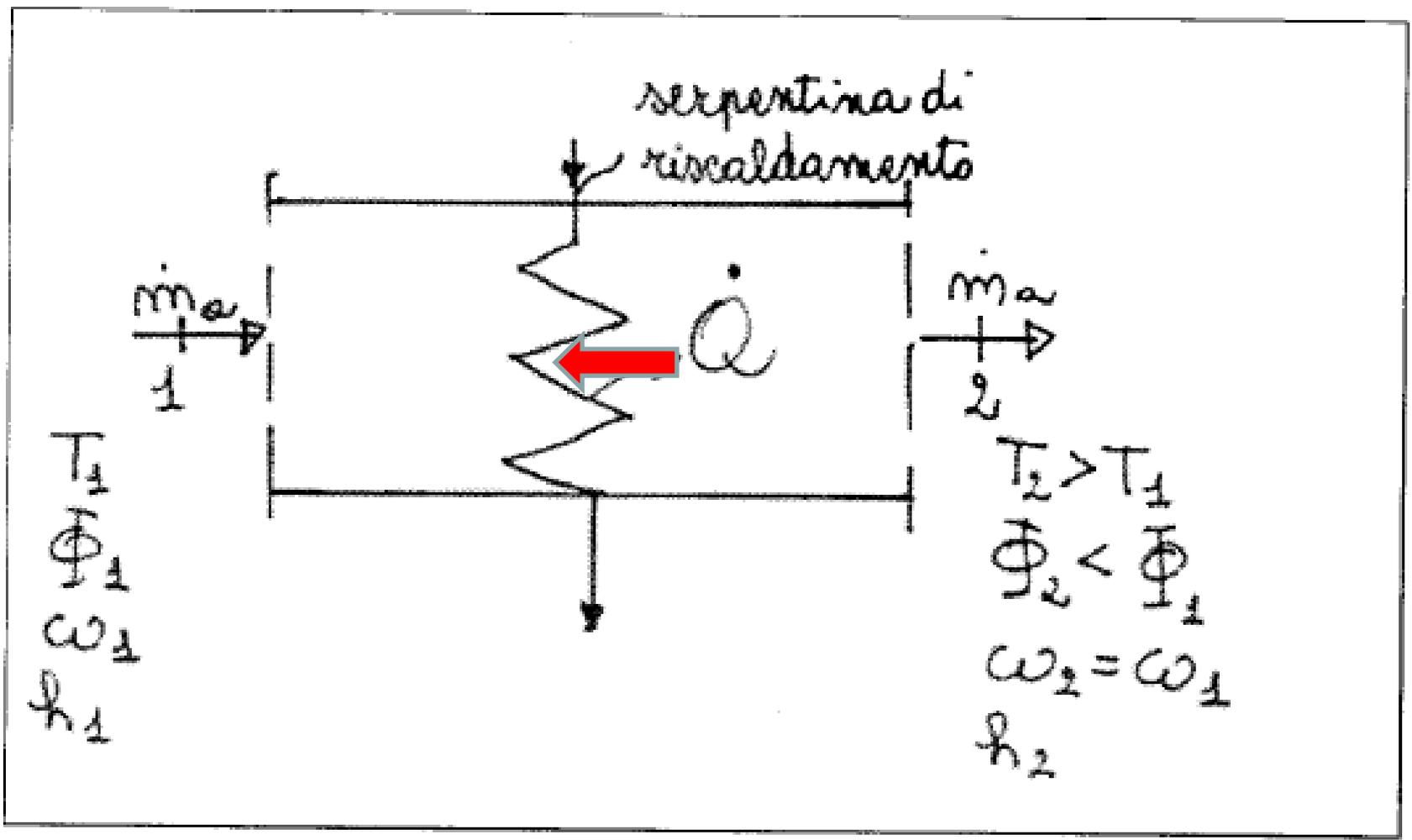
- Riscaldamento o raffreddamento a titolo costante
- Miscelazione adiabatica di due correnti di aria
- Deumidificazione
- Umidificazione adiabatica

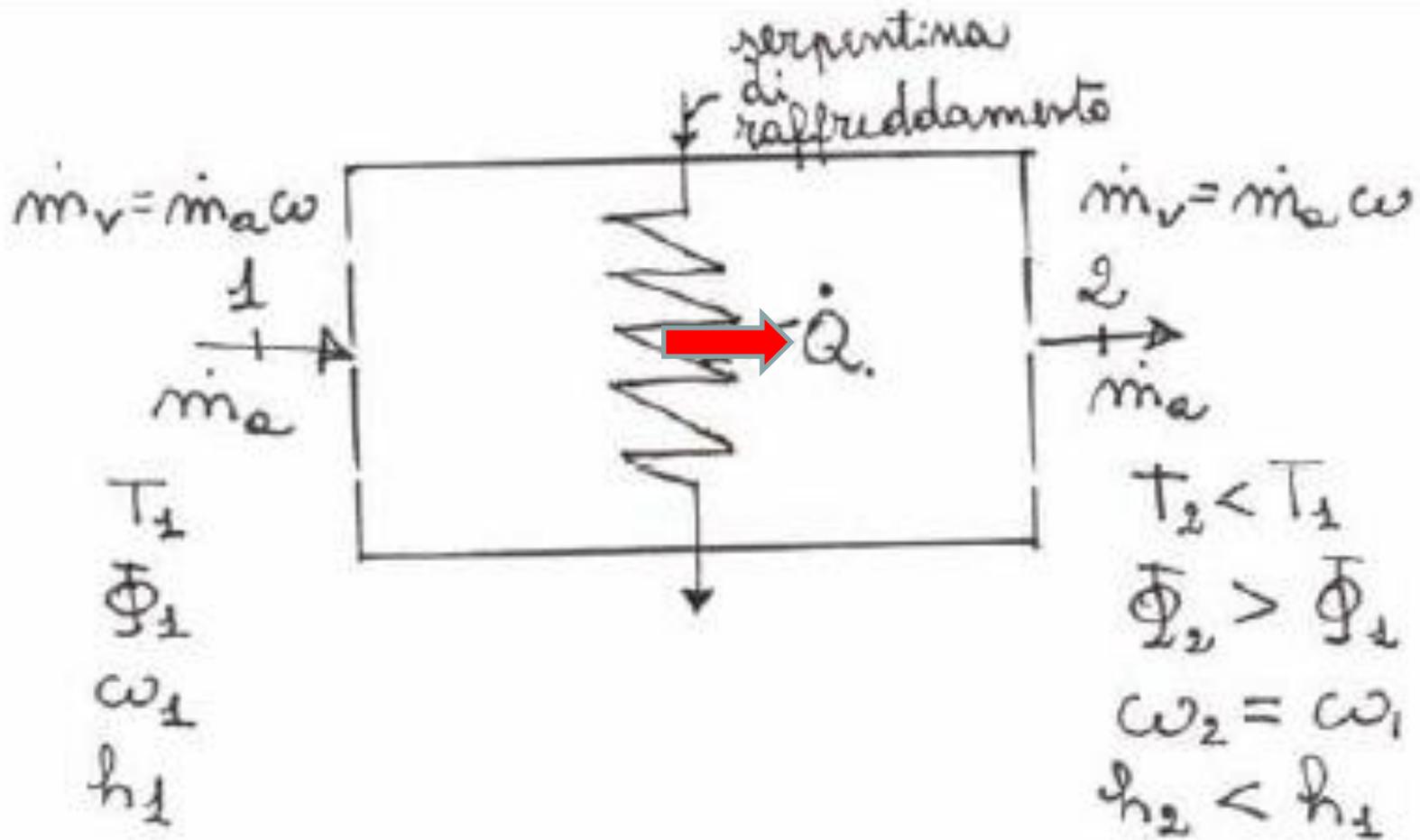
RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO SENSIBILE

Verso dx: riscaldamento (Q entrante)

Verso sx: raffreddamento (Q uscente)



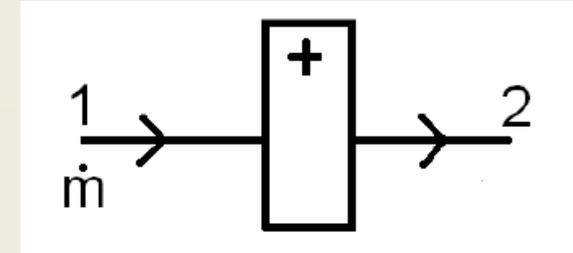




SEMPLICE RISCALDAMENTO E SEMPLICE RAFFREDDAMENTO.

Si definiscono “sensibili”, cioè non hanno effetti sull’umidità specifica dell’aria umida.

Pertanto, ω resta costante. Affinché avvenga ciò, in caso di raffreddamento, la temperatura superficiale della batteria di scambio termico deve essere non inferiore alla T di rugiada dell’aria umida.



RISCALDAMENTO

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad \text{BILANCIO MASSA ARIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + \dot{Q}_{BC} = \dot{m}_a \cdot h_2 \quad \text{BILANCIO ENERGIA}$$

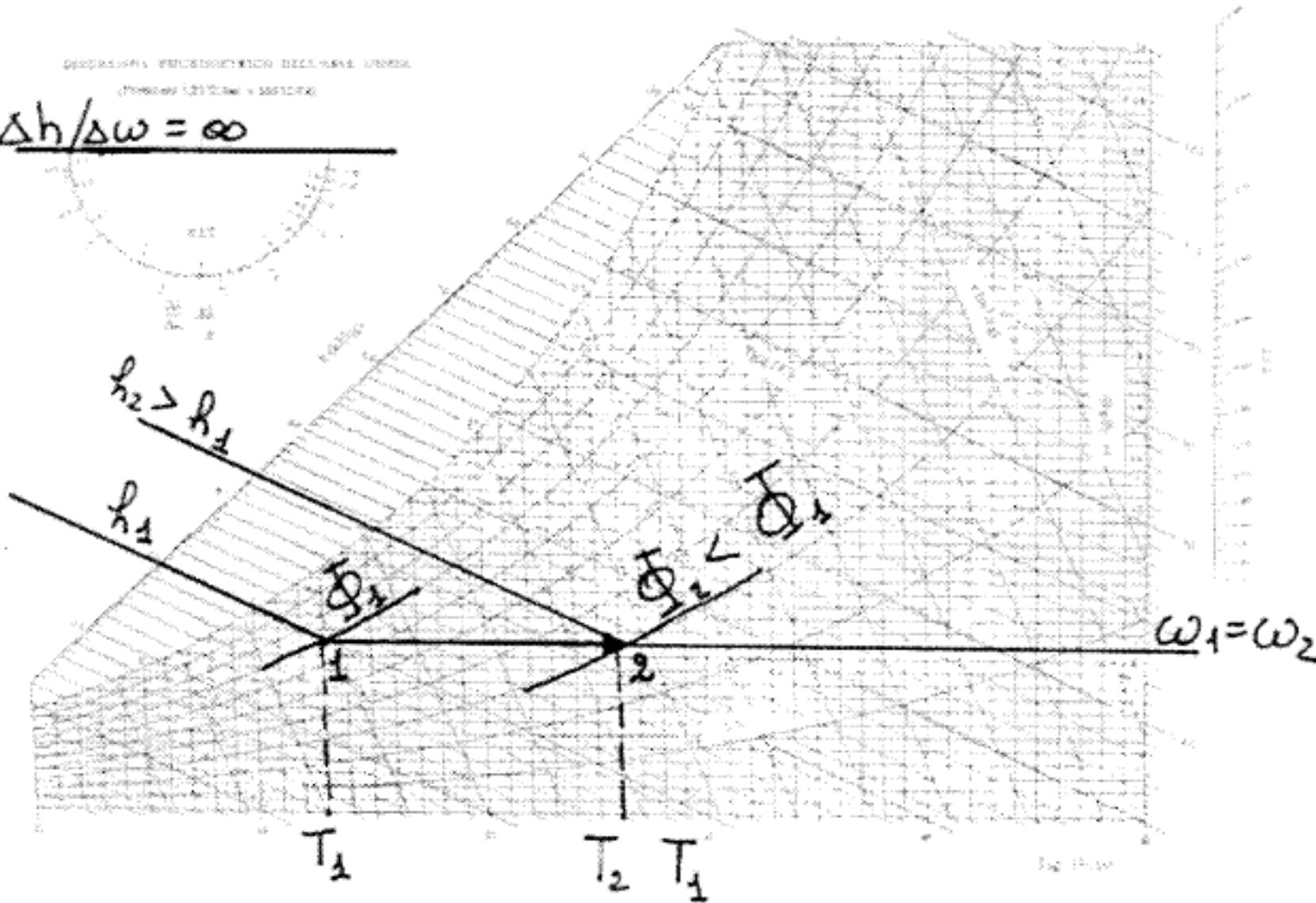
$$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2 \quad \text{BILANCIO MASSA ACQUA}$$

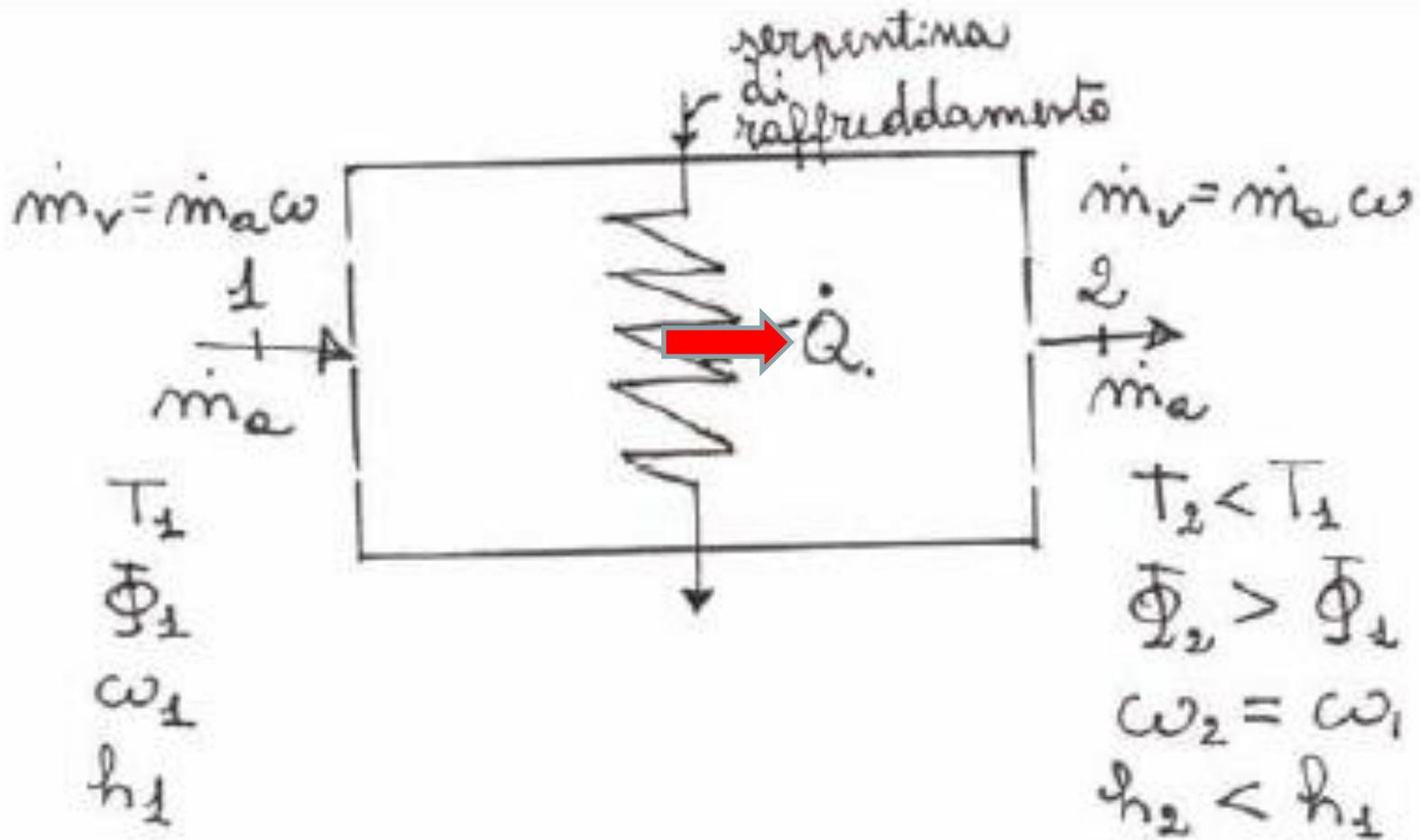
Dal bilancio di energia si ricava la potenza fornita all’aria umida, da parte di una batteria calda (\dot{Q}_{BC})

$$\dot{Q}_{BC} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m}_a \cdot c_p (T_2 - T_1)$$

Riscaldamento a umidità specifica costante ($\omega=0$)

$\Delta h / \Delta \omega = \infty$





RAFFREDDAMENTO SEMPLICE (senza deumidificazione)

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

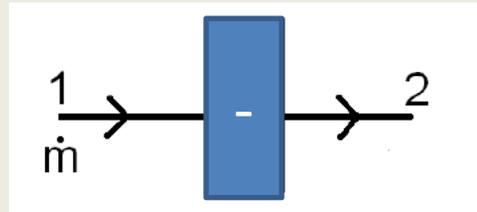
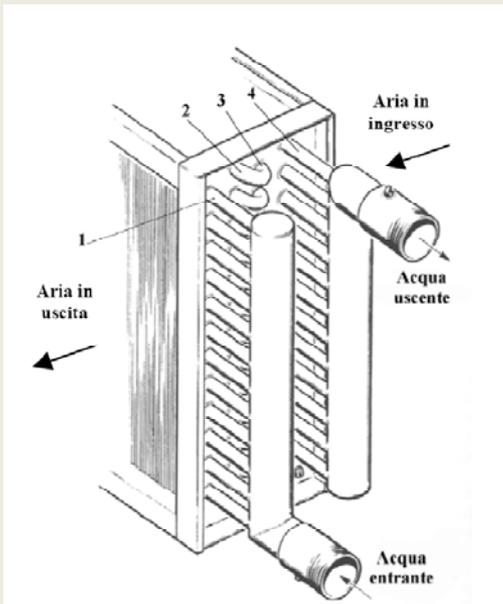
$$\dot{m}_a \cdot h_1 = \dot{m}_a \cdot h_2 + Q_{BF}$$

$$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2$$

BILANCIO MASSA ARIA

BILANCIO ENERGIA

BILANCIO MASSA ACQUA



Dal bilancio di energia si ricava la *potenza sottratta all'aria umida*, da parte di una batteria fredda (Q_{BF})

$$Q_{BF} = \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_a \cdot c_p (T_1 - T_2)$$