

Cognome .....	Nome .....	Matricola .....
---------------	------------	-----------------

**Ing. Navale, Ing. Civile e Ambientale**  
Prova scritta di Fisica Tecnica – Termodinamica – 13.11.2025

**Esercizio**

Una portata di aria umida ( $\dot{m}_{as} = 0.5 \frac{\text{kg}_{as}}{\text{s}}$  riferita all'aria secca,  $as$ ) a temperatura  $t_1$  ed umidità relativa  $\phi_1 = 0.9 = 90\%$  subisce un trattamento di deumidificazione con post-riscaldamento costituito dalle due seguenti trasformazioni a pressione costante  $p = 10^5 \text{ Pa}$ :

- 1 – 2 (raffreddamento con deumidificazione): la corrente di aria umida viene raffreddata fino ad una temperatura  $t_2 = 12^\circ\text{C}$  asportando una potenza termica  $|\dot{Q}_{12}^-|$ , assumendo condizioni di saturazione all'uscita ( $\phi_2 = 1 = 100\%$ ). Nel raffreddamento si ha la condensazione di una portata  $\dot{m}_{liq}$  di liquido.
- 2 – 3 (post-riscaldamento): la corrente di aria umida viene riscaldata fino alla temperatura iniziale  $t_3 = t_1$  fornendo una potenza termica  $\dot{Q}_{23}^+$ .

Tema	$t_1 [\text{ }^\circ\text{C}]$
A	20
B	22

0. Rappresentare schematicamente le trasformazioni in un diagramma psicrometrico.
1. Calcolare pressioni (saturazione e vapore), umidità assoluta, entalpia di miscela e temperatura di rugiada del punto 1.
2. Calcolare pressioni (saturazione e vapore), umidità assoluta ed entalpia di miscela del punto 2.
3. Calcolare la portata  $\dot{m}_{liq}$  di liquido condensato e la potenza termica asportata  $|\dot{Q}_{12}^-|$ . Nel calcolo di  $|\dot{Q}_{12}^-|$  trascurare il contributo entalpico del liquido condensato.
4. Calcolare la potenza termica fornita  $\dot{Q}_{23}^+$  e l'umidità relativa finale  $\phi_3$ .

Usare le seguenti relazioni per la pressione di saturazione  $p_v$  [Pa] e per la corrispondente temperatura  $t$  [ $^\circ\text{C}$ ] dell'acqua:

$$p_v(t) = 611 \cdot e^{\frac{17.3 \cdot t}{237+t}} \quad t(p_v) = \frac{237}{\frac{17.3}{\log(p_v/611)} - 1}$$

ed utilizzare i seguenti valori per la valutazione dell'entalpia di miscela dell'aria umida:

- calori specifici (costanti) a pressione costante:  $c_{p,as} = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ ,  $c_{p,vap} = 1.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- calore latente di vaporizzazione a  $0^\circ\text{C}$ :  $h_{lv} = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

**Teoria**

Per un gas perfetto con calori specifici costanti:

- ricavare la legge che lega pressione e volume specifico per una trasformazione isoentropica;
- scrivere la legge che lega pressione e volume specifico per una trasformazione politropica (parametro/esponente  $n$ ) e mostrare per quali valori di  $n$  si ottengono trasformazioni isoterme, isobare, isocore e isoentropiche, rappresentandole nei piani  $p - v$  e  $T - s$ .

## Soluzione

1. Pressioni di saturazione e vapore:

$$p_{v,1}(t_1) = 611 \cdot e^{\frac{17.3 \cdot t_1}{237+t_1}} = 2348 \text{ Pa (A)}, \quad 2656 \text{ Pa (B)}$$

$$p_{vap,1} = \phi_1 \cdot p_{v,1} = 2113 \text{ Pa (A)}, \quad 2390 \text{ Pa (B)}$$

1. Umidità assoluta:

$$\omega_1 = 0.622 \frac{p_{vap,1}}{p - p_{vap,1}} = 13.4 \frac{\text{g}_{\text{vap}}}{\text{kg}_{\text{as}}} \text{ (A)}, \quad 15.2 \frac{\text{g}_{\text{vap}}}{\text{kg}_{\text{as}}} \text{ (B)}$$

1. Entalpia di miscela:

$$J_1 = c_{p,as} \cdot t_1 + \omega_1 \cdot (c_{p,vap} \cdot t_1 + h_{lv}) = 54.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \text{ (A)}, \quad 60.7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}} \text{ (B)}$$

1. Temperatura di rugiada attraverso formula inversa con  $p_v = p_{vap,1}$ :

$$t_{R,1} = \frac{237}{\frac{17.3}{\log(p_{vap,1}/611)} - 1} = 18.3 \text{ }^\circ\text{C (A)}, \quad 20.3 \text{ }^\circ\text{C (B)}$$

2. Pressioni di saturazione e vapore:

$$p_{vap,2} = p_{v,2}(t_2) = 611 \cdot e^{\frac{17.3 \cdot t_2}{237+t_2}} = 1406 \text{ Pa}$$

2. Umidità assoluta:

$$\omega_2 = 0.622 \frac{p_{vap,2}}{p - p_{vap,2}} = 8.87 \frac{\text{g}_{\text{vap}}}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

2. Entalpia di miscela:

$$J_2 = c_{p,as} \cdot t_2 + \omega_2 \cdot (c_{p,vap} \cdot t_2 + h_{lv}) = 34.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{as}}}$$

3. Dai bilanci di massa d'acqua ed energia si calcolano  $\dot{m}_{liq}$  e  $|\dot{Q}_{12}^-|$ :

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m}_{as}(\omega_1 - \omega_2) = 2.28 \frac{\text{g}_{liq}}{\text{s}} \text{ (A)}, \quad 3.18 \frac{\text{g}_{liq}}{\text{s}} \text{ (B)}$$

$$|\dot{Q}_{12}^-| = \dot{m}_{as}(J_1 - J_2) - \dot{m}_{liq} \cdot h_{liq} \approx \dot{m}_{as}(J_1 - J_2) = 9.85 \text{ kW (A)}, \quad 13.2 \text{ kW (B)}$$

4.  $\dot{Q}_{23}^+$  dal bilancio di energia, per esempio nella forma con calore specifico aria umida a  $p$  costante,  $c_{p,au}$ :

$$c_{p,au,2=3} = c_{p,as} + \omega_{2=3} \cdot c_{p,vap} = 1.02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\dot{Q}_{23}^+ = \dot{m}_{as} \cdot c_{p,au,2=3} \cdot (t_3 - t_2) = 4.07 \text{ kW (A)}, \quad 5.08 \text{ kW (B)}$$

4. Umidità relativa finale:

$$\phi_3 = \frac{p_{vap,3}}{p_{v,3}} = \frac{p_{vap,2}}{p_{v,1}} = 0.60 \text{ (A)}, \quad 0.53 \text{ (B)}$$