

Cognome, nome, matr \_\_\_\_\_

Prof. L. Araneo. Prova di Fisica Tecnica del 28 Luglio 2009. Lecco, IPI 7.5 Cr. Tempo 3h

**PROVA COMPLETA (per chi NON ha superato la prima parte) con SOLUZIONE**

| Es    | 1 umid | 2 frig | 3 flux | 4 Otto | 5 Rank | 6 fili | 7 tub | 8 bar | 9 (x,t) | Tot |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---------|-----|
| Punti | 4      | 3      | 4      | 3      | 4      | 5      | 3     | 3     | 4       | 33  |
| Voto  |        |        |        |        |        |        |       |       |         |     |

E' consentito l'uso di: -calcolatrice, -tavole termodinamiche, un -formulario (1 pagina A4 F/R)  
Disponibili: tabelle vapore, aria e varie sostanze

Potete trattenere il testo dell'esame.

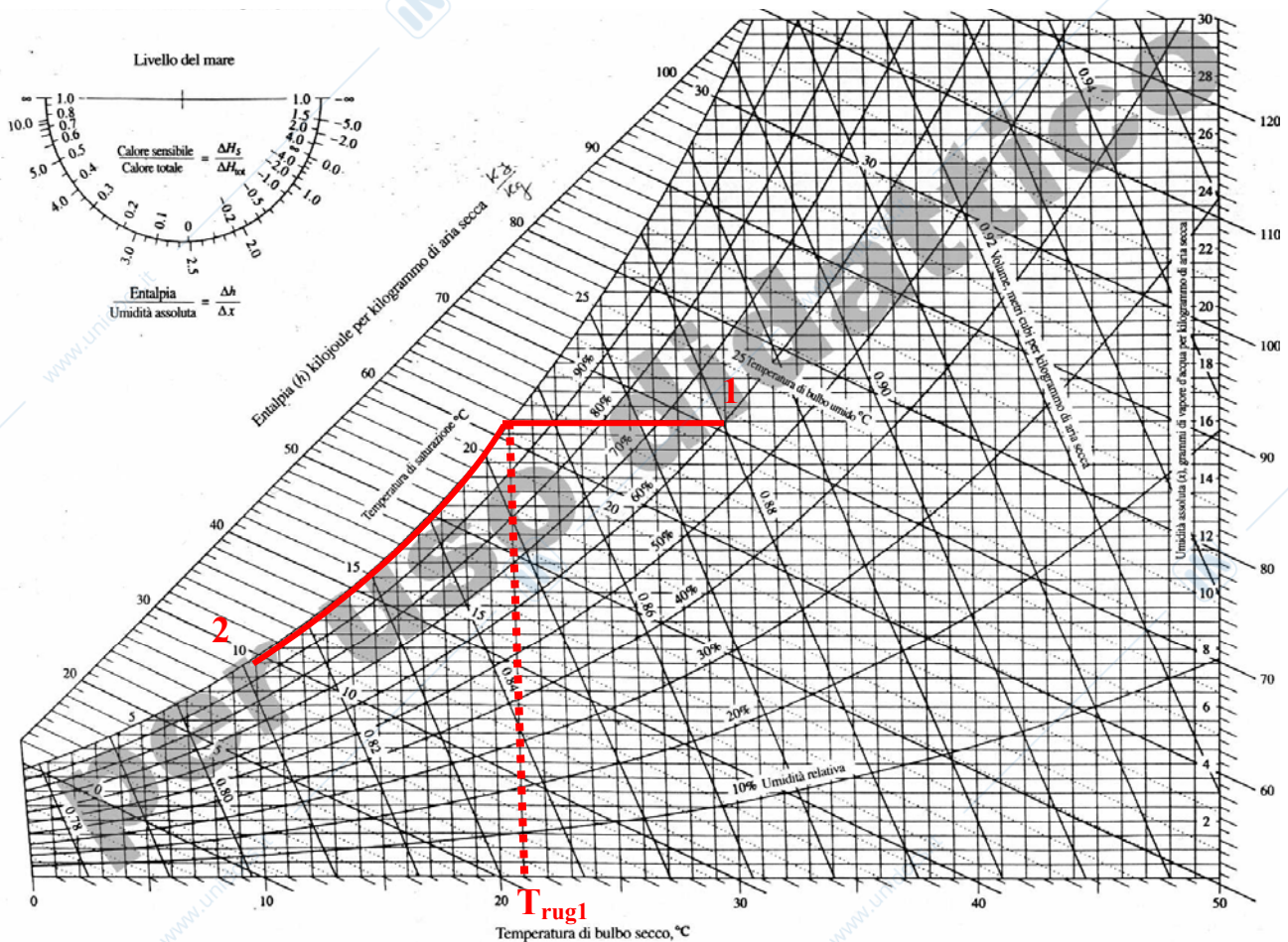
Consegnare:  testo con grafico aria umida,  grafico Rankine,  svolgimento,  formulario.

Segnare il Cognome+Nome su OGNI foglio consegnato.

Specificare le ipotesi, convenzioni, semplificazioni adottate.

I risultati privi di sufficiente svolgimento/spiegazione non sono ritenuti validi.

1) In un impianto di condizionamento di una vettura l'aria convogliata dall'esterno (30 litri/s,  $T_1=30^\circ\text{C}$  e  $UR_F=60\%$ ) viene raffreddata sino a ( $T_2=10^\circ\text{C}$ , satura). Riportare il percorso della trasformazione nel diagramma psicrometrico allegato spiegando come variano i parametri durante il percorso. Calcolare numericamente la temperatura di rugiada dell'aria esterna, la quantità di acqua che condensa e la potenza termica da asportare. Specificare le ipotesi e le approssimazioni adottate.



**Soluzione**

$T_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $UR_1 = 60\%$ ,  $P_{\text{sat}1} = 4246$  (tabelle),  $P_{\text{vap}1} = 4246 * 0.60 = 2548$ ,  $x_1 = 0.0160$ ,  $h_1 = 71.2$  kJ/kg<sub>as</sub>,

$T_{\text{rug}1} =$  la  $T_{\text{sat}}$  corrispondente alla  $P$ , da tabelle interpolate  $21.4^\circ\text{C}$

$T_2 = 30^\circ\text{C}$ ,  $UR_2 = 60\%$ ,  $P_{\text{sat}2} = 1227.6$  (tabelle) =  $P_{\text{vap}2} = 1227.6$ ,  $x_2 = 0.0076$ ,  $h_2 = 29.3$  kJ/kg<sub>as</sub>,

trasformazione 1-2. Tratto orizzontale, scende la  $T$ ,  $x$  resta costante, U.R. cresce fino a 100% a  $T_{\text{rug}}$ . Poi inizia a seguire la curva di saturazione fino a 2: scende la  $T$ , U.R. resta costante al 100%,  $x$  scende e si separa acqua.

Il volume specifico  $v_1$  può essere letto sul grafico (direttamente in  $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{as}}$ ) o calcolato con l'eq. Del gas perfetto, considerando  $P_{\text{as}1} = P_{\text{tot}1} - P_{\text{vap}1} = 101325 - 2548$ , si ottiene  $\rho_1 = 1.137$  kg<sub>as</sub>/m<sup>3</sup>.

$m' = \rho V' = 1.137$  kg<sub>as</sub>/m<sup>3</sup> \*  $0.030$  m<sup>3</sup>/s =  $0.034$  kg/s.

condensazione =  $m' (x_1 - x_2)$  [kg<sub>as</sub>/s \* kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>as</sub> = kg<sub>H2O</sub>/s] =  $0.034 * ((0.0160 - 0.0076)) = 0.000287$  kg/s =  $0.017$  kg/min.

$Q' = m' (h_{\text{fin}} - h_{\text{iniz}}) \cong m' (h_2 - h_1) = 0.034 * (71.2 - 29.3)$  [kg/s \* kJ/kg = kW] =  $1.43$  kW. Si è trascurata l'entalpia dell'acqua liquida, considerando che è molto fredda e prossima allo zero.

Senza trascurarla il risultato è  $Q' = m' (h_{\text{fin}} - h_{\text{iniz}}) \cong m' (h_2 - h_1 - x_{\text{cond}} h_{\text{liq}}) =$

$= 0.034 * (71.2 - 29.3 - (0.0160 - 0.0076) * 4.184 * 10) = 1.41$  kW

2) In un frigorifero il ciclo opera tra le temperature  $-10^\circ\text{C}$  e  $+50^\circ\text{C}$ , con un COP che è metà di quello ideale. Disponendo di un motore da  $150$  W, quanto tempo impiegherà per congelare un litro d'acqua inizialmente a  $20^\circ\text{C}$ ? Dati: entalpia di trasformazione di fase solido-liquido per l'acqua  $80$  kcal/kg.

**Soluzione**

$|Q| = m (|\Delta h_{\text{raff}}| + |\Delta h_{\text{congl}}|) = 1$  kg \* ( $1$  kcal/kg.K \*  $20$  K +  $80$  kcal/kg) =  $100$  kcal =  $418.4$  kJ

$\text{COP}_{\text{id, frigo}} = Q_{\text{inf}} / L = T_{\text{inf}} / \Delta T = 263/60 = 4.38$

$\text{COP}_{\text{re}} = 4.38 * 0.5 = 2.19$

$Q = L * \text{COP} \rightarrow L = Q / \text{COP} = 418.4/2.19 = 191$  kJ

$L = L' * t \rightarrow t = 191'000$  J /  $150$  W =  $1272$  s =  $21$  min.

3) Un flusso di aria ambiente viene aspirato da un compressore dal quale esce alle condizioni  $P_u = 2$  bar relativi,  $T_u = 150^\circ\text{C}$ ,  $w_u = 150$  m/s da un condotto avente diametro  $10$  cm. Specificare le ipotesi adottate, calcolare la potenza meccanica necessaria per azionare il compressore, spiegare se la trasformazione è irreversibile, reversibile o impossibile.

**Soluzione**

Ipotizzo  $T_1 = 30^\circ\text{C} = 303$  K

|                          | IN   | OUT    |
|--------------------------|------|--------|
| T °C                     | 30   | 150    |
| T K                      | 303  | 423    |
| P <sub>rel</sub> bar     | 0    | 2      |
| P <sub>ass</sub> bar     | 1.01 | 3.01   |
| w m/s                    | 0    | 150.00 |
| $\rho$ kg/m <sup>3</sup> | 1.16 | 2.48   |

Nell'ambiente l'aria è in quiete,  $w_{\text{IN}} = 0$ , verrà accelerata in un condotto di aspirazione. Per calcolare la portata serve una sezione nota, quella di uscita.

$D_{\text{OUT}} = 10$  cm  $0.1$  m  $A_{\text{OUT}} = 0.00785$  m<sup>2</sup>

$m' = (\rho w A)_{\text{OUT}} = 2.92$  kg/s

$Q_{\text{IN}}' + L_{\text{IN}}' = \Delta \Theta'$  ma  $Q' = 0$  (ipotesi di componente adiabatico)

$L_{\text{IN}}' = m' (\Delta h + \Delta e_{\text{cin}}) = m' [c_p (T_2 - T_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2] = 2.92 * (120'409 + 11'250) =$

$L_{\text{IN}}' = 385$  kW

$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 21.7$  J/kg.K  $> 0$  trasformazione irreversibile. Il risultato può variare in funzione della  $T$  iniziale scelta, per valori di  $T_1 > 36.5^\circ\text{C}$ , il  $\Delta S$  risulta  $< 0$ , quindi impossibile.

4) In un motore a ciclo Otto ideale l'aria è aspirata a  $T=60^{\circ}\text{C}$ ,  $P=0.5$  bar. Il rapporto di compressione volumetrico è 11, nel riscaldamento vengono forniti al fluido 1500 kJ/kg. Calcolare le condizioni (P,T) nei punti del ciclo e il suo rendimento termodinamico.

### Soluzione

|       | 1   | 2     | 3    | 4    |
|-------|-----|-------|------|------|
| T °C  | 60  | 596   | 2689 | 862  |
| T K   | 333 | 869   | 2962 | 1135 |
| P bar | 0.5 | 14.35 | 48.9 | 1.70 |

$$R = 8314/29 = 286.7 \text{ [J/kg.K]} \quad c_v = 5/2 R = 716.7 \text{ [J/kg.K]} \quad \gamma = 1.4$$

$$T_2 = T_1 \cdot \rho^{\gamma-1} \quad P_2 = P_1 \cdot \rho^{\gamma}$$

$$T_4 = T_3 / \rho^{\gamma-1} \quad P_4 = P_3 / \rho^{\gamma}$$

$$Q_{23} = c_v \Delta T_{23} \quad \text{da cui } T_3 = T_2 + 1500 / 716 = 2962 \text{ K (ipotesi di } c_v \text{ da gas perfetto poco realistica)}$$

Per P e T si può sfruttare la proprietà dei cicli simmetrici ideali  $T_1 / T_2 = T_3 / T_4$

Rendimento  $\eta = 1 - T_1 / T_2 = 62\%$ . Come Carnot tra 1 e 2.

5) Sono date le pressioni minima (0.1 bar) e massima (150 bar) e la temperatura massima ( $500^{\circ}\text{C}$ ) di un ciclo Rankine a vapore d'acqua, con pompa e turbina isoentropiche. Disegnare il ciclo nel diagramma T-s allegato. Calcolare i valori delle grandezze termodinamiche (P, T, h, s, titolo) nei punti necessari ed il rendimento del ciclo.

### Soluzione

|                  | T °C       | P kPa     | x     | h      | s      |
|------------------|------------|-----------|-------|--------|--------|
| 1=liquido saturo | 45.8       | 10        | 0     | 191.8  | 0.6492 |
| 2                | 45.8 circa | 15'000    | nd    | 206.85 | "      |
| 3                |            |           | 0     |        |        |
| 4                |            |           | 1     |        |        |
| 5                | 500        | 15'000    | nd    | 3308.6 | 6.3443 |
| 6                | 45.8       | 10.039472 | 0.775 | 2008.5 | 6.3443 |
| Vapore saturo    | 45.8       | VAP       | 1     | 2584.6 | 8.150  |

per il punto 1 si usano le tabelle dell'acqua satura con base Pressione, dove si trovano i valori per  $P=10$  kPa, e si interpola la sola  $T_1$ .

$$\Delta h_{12} = l_{IN} = v \Delta P = 0.001002 * (12'500-10) = 15.07 \text{ kJ/kg (è un liquido, se perfetto la T non varia)}$$

$$q_{IN} = \Delta h_{25} = 3137 \text{ kJ/kg}$$

$$|l_{OUT}| = |\Delta h_{56}|$$

$$\eta = (|l_{OUT}| - l_{IN}) / q_{IN} = 41.4\%$$

6) Le resistenze elettriche di una stufetta elettrica (fili di acciaio con diametro = 0.5 mm) durante il funzionamento stazionario si trovano a  $300^{\circ}\text{C}$  e sono investite dal flusso d'aria a 10 m/s. Viene tolta l'alimentazione elettrica alle resistenze: dopo quanto tempo si trovano a meno di  $50^{\circ}\text{C}$ ?

Correlazioni suggerite  $Re(Pr-Nu)$  per cilindro esposto a flusso

| Campo Re       | Nu=                         |
|----------------|-----------------------------|
| 0.4÷4          | $0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ |
| 4÷40           | $0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ |
| 40÷4'000       | $0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ |
| 4'000÷40'000   | $0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ |
| 40'000÷400'000 | $0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$ |

### Soluzione

Le resistenze sono investite dal flusso di aria trasversale ad esse. Si ipotizza la temperatura dell'aria ambiente p.e.  $30^{\circ}\text{C}$ , da cui quella di film (media tra ambiente e resistenze), e pensando che nel

corso del raffreddamento diminuirà, da tabelle si scelgono valori di densità etc appropriati. La raffinatezza sarebbe scegliere per il corpo la media tra  $T$  iniziale e finale, e poi quella di film.

$$\rho=0.81, \mu=2.3 \cdot 10^{-5}, \lambda=0.033, Re = 176, Nu=6.75, h=445 \text{ W/m}^2\text{K},$$

Durante il raffreddamento  $Bi=0.0009$ : posso usare l'ipotesi di  $T$  omogenea per il corpo.

$$\tau = \rho_{Fe} \cdot D/4 \cdot c_{p-Fe} / h = 0.98 \text{ s}, \text{ tempo} = 2.56 \text{ s}.$$

Facendo riferimento al Cengel,  $b=1/\tau$ .

Grave errore sarebbe usare le proprietà  $\rho c_p$  del fluido.

7) In un tubo di rame ( $D_{int}$  14mm, spessore 1 mm) scorre acqua calda ( $70^\circ\text{C}$ ). Si vuole ricoprire il tubo con un materiale avente conducibilità termica  $\lambda=0.02$ . Determinare lo spessore di materiale che massimizza le perdite in un ambiente dove  $h=1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , in tale caso il profilo di temperatura radiale, il calore dissipato per metro di tubo. Specificare le ipotesi e le approssimazioni adottate.

#### Soluzione

Si possono ipotizzare trascurabili le resistenze dello strato convettivo nel fluido (come dire coefficiente di convezione infinito) e la resistenza termica del rame (data l'elevata conducibilità e il modesto spessore,  $r_{Int\_Cu}=7, r_{Est\_Cu}=8 \text{ mm}$ ).

Lo spessore di isolante che annulla le perdite è infinito. Lo spessore che le massimizza è quello che fornisce il raggio esterno pari al raggio critico  $r_{CR} = \lambda / h = 0.02/1 = 0.02 \text{ m} = 20 \text{ mm}$

In tal caso  $R_{Termica\_Totale} = \ln(20/8)/(2\pi \cdot 1 \cdot 0.02) + 1/(1 \cdot 2\pi \cdot 0.02) = 7.29 + 7.96 = 15.3 \text{ K/W}$  ( $L=1$ ).

Ipotizzo una temperatura dell'aria, p.e.  $20^\circ\text{C}$ , ed ottengo  $Q'=3.28 \text{ W}$ .  $T_{esterno} = 46.1^\circ\text{C}$ .

8) Una barra (Acciaio,  $D=2 \text{ cm}$ ) con temperatura ad una estremità pari a  $100^\circ\text{C}$  si trova in un ambiente con coefficiente di convezione pari a  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Determinare quale lunghezza debba avere per poter essere considerata infinita, e in tal caso la distanza a cui la temperatura è  $50^\circ\text{C}$ .

#### Soluzione

La barra si comporta come un'aletta, posso considerarla di lunghezza infinita se  $L > 5 \cdot (1/m)$  dove  $m = (hP/\lambda A)^{1/2} = 5.77, 1/m = 0.17 \text{ metri} = \text{lunghezza caratteristica dell'esponenziale smorzata}$ , quindi  $x_\infty = 0.87 \text{ metri}$ . Altri criteri  $(\theta/\theta_0)=1\%$  etc sono equivalenti. E' indipendente dalla  $T_{amb}$ .

Ipotizzo una temperatura dell'aria, p.e.  $30^\circ\text{C}$ ,  $\theta/\theta_0 = e^{-m \cdot x}$  ed ottengo la distanza di  $x_{50^\circ\text{C}} = 0.217 \text{ metri}$ .

9) Un oggetto di grosse dimensioni, di materiale solido avente le proprietà dell'acqua ( $\rho, c_p, \lambda$ ;  $T_{iniziale} = 20^\circ\text{C}$ ) viene messo in un freezer ( $T=-10^\circ\text{C}$ , convezione =  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) Determinare dopo quanto tempo la superficie è a  $0^\circ\text{C}$ , e in tale momento la temperatura alla profondità di 2 cm. Specificare e discutere le ipotesi adottate.

#### Soluzione

Corpo ( $\rho=1000, c_p=4184, \lambda=0.58, T_{iniziale} = 20^\circ\text{C}$ ).

Si usa il grafico, parametro  $\xi_{0cm} = 0$  alla superficie per ogni tempo,  $1-\theta=0.667$ , si ottiene la curva con parametro 1.5, a cui corrisponde un tempo di  $54600\text{s} = 15 \text{ ore}$ . Si usa la stessa curva e il tempo ottenuto per calcolare  $\xi$  alla profondità di 2 cm  $\xi_{2cm\_t54600} = 0.115$ , ottenendo sul grafico  $1-\theta=0.55$ , da cui  $T_{2cm\_t54600} = 3.5^\circ\text{C}$ .

Prof. L. Araneo. Prova di Fisica Tecnica del 28 Luglio 2009. Lecco, IPI 7.5 Cr. Tempo 2h

**SOLO SECONDA PARTE (per chi ha già superato la prima parte)**

**(Gli esercizi sono simili ai precedenti, cambiano solo i valori numerici. E' aggiunta la soluzione all'esercizio di teoria n°15)**

| Es                 | 10 umid | 11 fili | 12 tub | 13 bar | 14 T(x,t) | 15 teor | Tot |
|--------------------|---------|---------|--------|--------|-----------|---------|-----|
| Punti come sopra   | 4       | 5       | 3      | 3      | 4         | 3       | 22  |
| Punti normalizzati | 6       | 7.5     | 4.5    | 4.5    | 6         | 4.5     | 33  |
| Voto               |         |         |        |        |           |         |     |

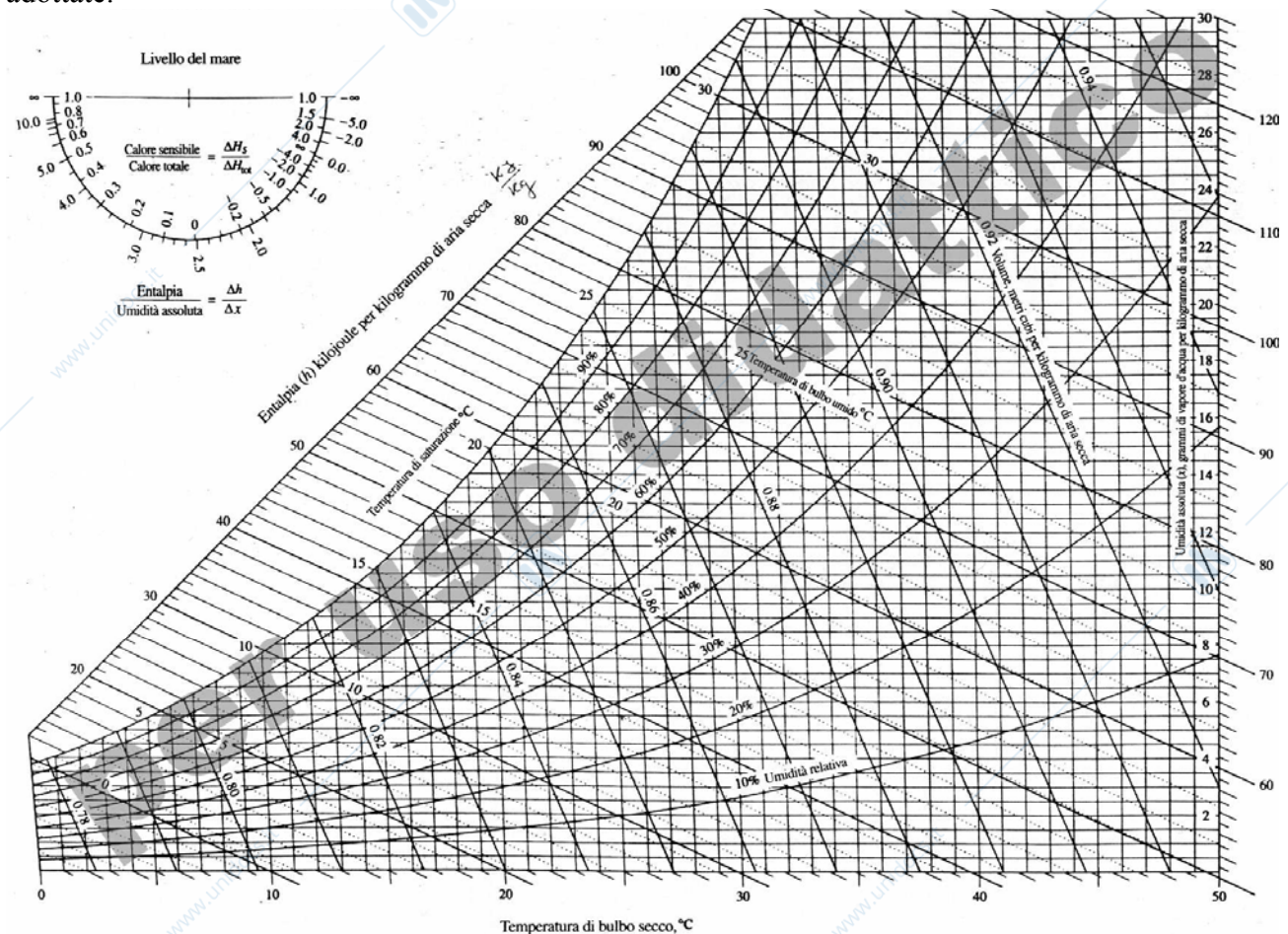
E' consentito l'uso di: -calcolatrice, -tavole termodinamiche, un -formulario (1 pagina A4 F/R)  
Disponibili: tabelle vapore, aria e varie sostanze

Consegnare:  testo con grafico aria umida,  svolgimento,  formulario.  
Segnare il Cognome+Nome su OGNI foglio consegnato.

Specificare le ipotesi, convenzioni, semplificazioni adottate.

I risultati privi di sufficiente svolgimento/spiegazione non sono ritenuti validi.

10) In un impianto di condizionamento di una vettura l'aria convogliata dall'esterno (25 litri/s,  $T_1=35^\circ\text{C}$  e  $UR_F=70\%$ ) viene raffreddata sino a ( $T_2=12.5^\circ\text{C}$  e  $UR_2=100\%$ ). Riportare il percorso della trasformazione nel diagramma psicrometrico allegato spiegando come variano i parametri durante il percorso. Calcolare numericamente la temperatura di rugiada dell'aria esterna, la quantità di acqua che condensa e la potenza termica da asportare. Specificare le ipotesi e le approssimazioni adottate.



11) Le resistenze elettriche di una stufetta elettrica (diametro = 1 mm, materiale acciaio) durante il funzionamento stazionario si trovano a 400°C e sono investite dal flusso d'aria a 15 m/s. Viene tolta l'alimentazione elettrica alle resistenze: dopo quanto tempo si trovano a meno di 50°C?

Correlazioni suggerite  $Re(Pr-Nu)$  per cilindro esposto a flusso

| Campo Re       | Nu=                         |
|----------------|-----------------------------|
| 0.4÷4          | $0.989 Re^{0.330} Pr^{1/3}$ |
| 4÷40           | $0.911 Re^{0.385} Pr^{1/3}$ |
| 40÷4'000       | $0.683 Re^{0.466} Pr^{1/3}$ |
| 4'000÷40'000   | $0.193 Re^{0.618} Pr^{1/3}$ |
| 40'000÷400'000 | $0.027 Re^{0.805} Pr^{1/3}$ |

12) In un tubo di rame ( $D_{int}$  14mm, spessore 1 mm) scorre acqua calda (60°C). Si vuole isolare il tubo con un materiale avente conducibilità termica  $\lambda = 0.02$ . Determinare lo spessore di isolante da mettere per minimizzare le perdite in un ambiente dove  $h = 0.5$  W/m<sup>2</sup>K, il profilo di temperatura radiale, il calore dissipato per metro di tubo. Specificare le ipotesi e le approssimazioni adottate.

13) Una barra (Acciaio,  $D = 3$  cm) con temperatura ad una estremità pari a 120°C si trova in un ambiente con coefficiente di convezione pari a 8 W/m<sup>2</sup>K. Determinare quale lunghezza debba avere per poter essere considerata infinita, e in tal caso la distanza a cui la temperatura è 50°C.

14) Un oggetto di grosse dimensioni, di materiale solido avente le proprietà dell'acqua ( $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ ;  $T_{iniziale} = 20^\circ\text{C}$ ) viene messo in un freezer ( $T = -10^\circ\text{C}$ , convezione = 5 W/m<sup>2</sup>K) Determinare dopo quanto tempo la superficie è a 0°C, e in tale momento la temperatura alla profondità di 3 cm. Specificare e discutere le ipotesi adottate.

15) Dimostrare che i coefficienti di emissione e assorbimento per un corpo grigio hanno uguale valore.

#### Soluzione

Si prendano due superfici, una nera e l'altra grigia, di superficie  $A$  infinita ed affacciate. Esse raggiungeranno l'equilibrio termico per cui  $T_N = T_G = T$ . In tale situazione la superficie nera assorbe tutto ciò che le arriva, ed emette  $Q_N' = A \sigma T^4$ .

La superficie grigia emette  $Q_{G\_OUT}' = \epsilon_G A \sigma T^4$  (tutto assorbito dalla nera, per cui nulla torna indietro) ed assorbe la frazione  $\alpha_G$  di ciò che riceve:

$Q_{G\_IN}' = \alpha_G Q_N' = \alpha_G A \sigma T^4$ ; (la parte riflessa torna alla nera, e viene totalmente assorbita).

L'equilibrio  $Q_{G\_OUT}' = Q_{G\_IN}'$  risulta  $\epsilon_G A \sigma T^4 = \alpha_G A \sigma T^4$  da cui  $\epsilon_G = \alpha_G$ .

c.v.d.