

Prof. Araneo. Esame+Soluzione, Fisica Tecnica Ambientale 5cr del 19 Giugno 2008. Milano

Tempo a disposizione: tutto esercizi 1-8, 3h

Parte2 esercizi 5-10, 2h20m

Materiale: •1 testo dell'esame (potete tenerlo) •1 fogli dati+risultati •1 grafico vapore / aria umida  
E' consentito l'uso di: •calcolatrice, •tavole termodinamiche, •un formulario (un foglio A4 f/r).

Riconsegnare: •1 fogli dati/risultati •1 grafico/i • 1 formulario (segnare il COGNOME su tutti).

1)  $V_1 = 500$  litri di acqua a  $T_1 = 50^\circ\text{C}$  vengono mescolati con  $V_2 = 650$  litri di acqua a  $T_2 = 10^\circ\text{C}$ .  
Calcolare la temperatura finale e la produzione di entropia.

### Soluzione

L'entalpia di una certa massa vale  $H = m \cdot c_p \cdot T$ , assumendo una certa  $T=0$  come riferimento, ed essendo sicuri che  $c_p$  sia costante nell'intervallo usato. Qui è indifferente usare i  $^\circ\text{C}$  o K. 500 litri sono 500kg ( $0.5 \text{ m}^3 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3$ )

$$H_1 = m_1 c_p T_1 = 500 \text{ kg} \cdot 4.184 \text{ kJ/kg} \cdot 50^\circ\text{C} = 104'600 \text{ kJ}$$

$$H_2 = 650 \cdot 4.184 \cdot 10 = 27'196 \text{ kJ}$$

$$H_{\text{tot}} = H_1 + H_2 = 131'796 \text{ kJ} = (500+650) \cdot 4.184 \cdot T_{\text{Fin}}$$

Da cui  $T_{\text{Fin}} = 27.4^\circ\text{C}$ .

$$\text{(si può usare il sistema } \Delta H_1 + \Delta H_2 = 0 \rightarrow m_1 c_p |\Delta T_1| = m_2 c_p |\Delta T_2| \\ |\Delta T_1| + |\Delta T_2| = \Delta T_{\text{tot}} = (50-10)$$

Calcolo dell'entropia, usare i Kelvin

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = \Delta S_{\text{tot}} = m_1 c_p \ln(T_{\text{Fin}} / T_1) + m_2 c_p \ln(T_{\text{Fin}} / T_2) = -151.8 + 162.2 = 10.4 \text{ kJ/K}$$

2) Un compressore aspira  $V' = 1000$  litri al minuto di aria dall'ambiente ( $T_{\text{amb}} = 20^\circ\text{C}$ ) e li immette alla pressione di  $P_2 = 6$  bar relativi in un serbatoio. Ipotizzando la compressione adiabatica non isoentropica con il rendimento del compressore  $\eta_c = 80\%$ , determinare la portata massica, la temperatura dell'aria compressa, la potenza meccanica richiesta, disegnare un grafico della trasformazione nel piano T-s. L'aria poi passa in un ugello dove torna a pressione ambiente tramite una trasformazione reversibile: quali temperatura e velocità raggiunge?

### Soluzione

Portata volumetrica  $V' = 1000$  litri/min =  $1 \text{ m}^3/\text{min} = 1/60 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\text{Densità dell'aria ambiente } \rho_1 = P/(R \cdot T) = 101325 / (8314/29) / 293 = 1.21 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Portata massica } m' = \rho V' = 1.21 \cdot (1/60) = 0.020 \text{ kg/s (usare almeno due cifre significative)}$$

Compressione ideale: da  $T_1 = 293\text{K}$ ,  $P_1 = 1.01$  bar, a  $P_2 = 7.01$  bar

$$T_{2\text{id}} = T_1 \cdot (P_2/P_1)^{R/C_p} = 293 \cdot (7.01/1.01)^{2/7} = 509.6 \text{ K}$$

$$\text{Da cui } \Delta T_{\text{id}} = 509.6 - 293 = 216.6, \Delta T_{\text{Re}} = 216.6 / \eta_{\text{Comp}} = 270.8 \text{ K}$$

$$T_{2\text{Re}} = 293 + 270.8 = 563.8 \text{ K}$$

$$\text{Potenza meccanica} = \Delta H' = m' \Delta h = m' c_p \Delta T = 0.02 \text{ kg/s} \cdot 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot 270.8 \text{ K} = 5.47 \text{ kW}$$

$$\text{Riespansione ideale a } P_3 = P_1, T_3 = T_2 + (P_3/P_2)^{R/C_p} = 563.8 \cdot (1.01 / 7.01)^{2/7} = 324.1 \text{ K} = 51.1^\circ\text{C}$$

(l'irreversibilità durante la compressione è divenuta energia termica, per cui alla fine non si hanno le condizioni iniziali 1, ma il fluido è più caldo)

Calcolo velocità: conservazione entalpia totale da 2 a 3 (trascurabile  $w_2$  e variazione quota Z):

$$h_2 = h_3 + w_3^2/2 \quad \text{da cui } w_3 = [2 c_p (T_2 - T_3)]^{0.5} = [2 \cdot 1005 \cdot (563.8 - 324.1)]^{0.5} = 694 \text{ m/s}$$

3) Una pompa di calore, azionata da un motore elettrico che assorbe 500 W di energia elettrica, è usata per scaldare un locale avente  $T_{\text{loc}} = 18^\circ\text{C}$  mentre all'esterno si ha  $T_{\text{est}} = 8^\circ\text{C}$ , l'evaporatore necessita di una differenza di temperatura di  $\Delta T_{\text{ev}} = 6^\circ\text{C}$  per scambiare calore, il condensatore di  $\Delta T_{\text{cond}} = 17^\circ\text{C}$ . L'efficienza è il 50% di quella di una macchina ideale che lavora tra le stesse temperature estreme del ciclo. Calcolare il COP della macchina i flussi di calore. Disegnare uno o più schemi della macchina per spiegarne il funzionamento.

### Soluzione

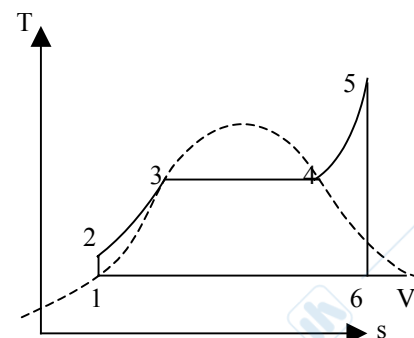
Nella pompa di calore, l'evaporatore si trova all'esterno, con il fluido a T inferiore per poter essere scaldato:  $T_{inf\_ciclo} = 8-6 = 2^{\circ}C = 275K$ . Il condensatore si trova nel locale ed è più caldo di esso per poter cedere calore:  $T_{condensatore} = 18+17 = 35^{\circ}C = 308K$ . Un amacchina ideale tra queste due temperatura lavorerebbe con  $COP_{pompa\_calore\_ideale} = Q_{sup}/L_{in} = Q_{sup}/(Q_{sup} - Q_{inf}) = T_{sup}/(T_{sup} - T_{inf}) = 308 / (308-275) = 9.33$ . La macchina reale ha COP dimezzato  $COP_{reale} = 9.33/2 = 4.67$ , da cui  $Q_{sup} = L * COP_{reale} = 500W * 4.67 = 2333 W$ . Il  $Q_{inf}$  è  $2333-500=1833W$ .

4) Sono date le temperature minima ( $35^{\circ}$ ) e massima ( $600^{\circ}C$ ) e la pressione massima (175 bar) 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 nei punti necessari ed il rendimento del ciclo.

**Soluzione**

Sono riportati intabella i dati essenziali, il grafico a destra. I punti 1 e 2 sul grafico dovrebbero essere quasi coincidenti ( $T_1 \cong T_2$ ); segmento 1-6 = 77.5% di 1-V . Riportare con cura sul diagramma fotocopiato seguendo i valori corretti.

	P [kPa]	Titolo	h [kJ/kg]	s [kJ(kg.K)]
1	5.628	0	146.68	0.5053
2	17'500	nd	164.21	"
3	(17'500)	(0)		
4	(17'500)	(1)		
5	17'500	nd	3560.1	6.5866
6	5.628	0.775	2020.9	6.5866
V=saturo	5.628	1	2565.3	8.3531



**Procedimento**

Da tabella si trovano  $P_1, h_1, s_1, v_1$

$\Delta h_{12} = v \Delta P = 0.001002 * (17500-5.628) = 17.53 \text{ kJ/kg}$  nota: acqua liquida  $\cong$  fluido incompressibile con  $v_1 \cong v_2 = 0.001002 \text{ m}^3/\text{kg}$ , usando  $P=[\text{kPa}] \rightarrow h=[\text{kJ}]$

Da tabella si trovano  $h_5, s_5$

$s_6 = s_5$  permette di trovare  $x_6 = (s_6-s_1)/(s_V-s_1)$

$x_6$  permette di trovare  $h_6 = (1-x)h_1 + x h_V$

$q_{in} = h_5-h_2 = 3395.89 \text{ kJ/kg}$   $l_{nu} = |h_6-h_5| - (h_2-h_1) = 1521.69 \text{ kJ/kg}$

$\eta_1 = l_{nu} / q_{in} = 44.8\%$  (quanto calore viene trasformato in lavoro)

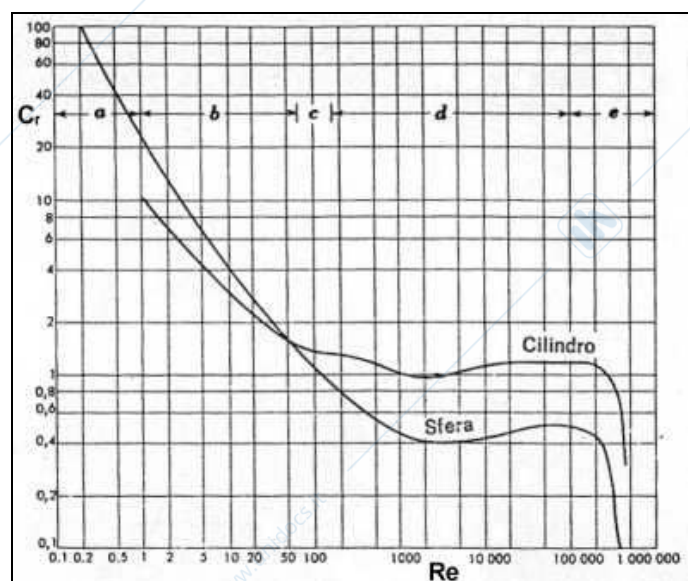
diagramma T-s sufficientemente preciso per allenarsi scaricabile alla pagina

<http://www.dinma.univ.trieste.it/nirftc/misc/didattica/Pagine%20Didattica/Diagrammi/T-s-H2O-A4.pdf>

5) Una barra di acciaio lunga 5 m ( $D = 2 \text{ cm}$ ,  $\rho_{acc} = 7850 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda_{acc} = 60 \text{ W/m.K}$ ,  $c_p = 434 \text{ J/kg.K}$ ) a temperatura  $T_1 = 250^{\circ}C$  viene esposta all'aria alla velocità di  $w_{aria} = 12 \text{ m/s}$  e  $T_{aria}=30^{\circ}C$ . Determinare e calcolare i numeri adimensionali necessari, il tempo necessario perche la barra raggiunga  $50^{\circ}C$  e possa essere maneggiata, la forza impressa dall'aria sulla barra.

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	$0.0266 Re^{0.805} Pr^{1/3}$

**Soluzione**



Si determina la temperatura di film dell'aria che circonda la barra, inizialmente è  $(250+30)/2=140^{\circ}\text{C}=413\text{ K}$ , si trovano sulle tabelle i valori corrispondenti a questa  $T_{\text{film}}$ , o più bassa considerando che col tempo la barra si raffredderà.

Si trovano per esempio:

$$T_{\text{film}}=413\text{K}, \rho=0.86, \mu=0.0000234, \lambda=0.0339, \text{Pr}=0.703,$$

$$\text{Re}=\rho w L/\mu=8779 \text{ (qui } L=\text{diametro)}, \text{Nu}=46.9, \text{ da cui } h=79.6 \text{ W/m}^2\text{K}.$$

La verifica di  $\text{Bi}=0.0066$  (qui  $L=V/A=D/4$  trascurando le piccole basi del cilindro) permette di applicare il metodo a parametri concentrati

$$\tau=\rho V c_p / (h A)=\rho L_c c_p / h=\rho D/4 c_p / h=214\text{s} \text{ è il tempo caratteristico del sistema}$$

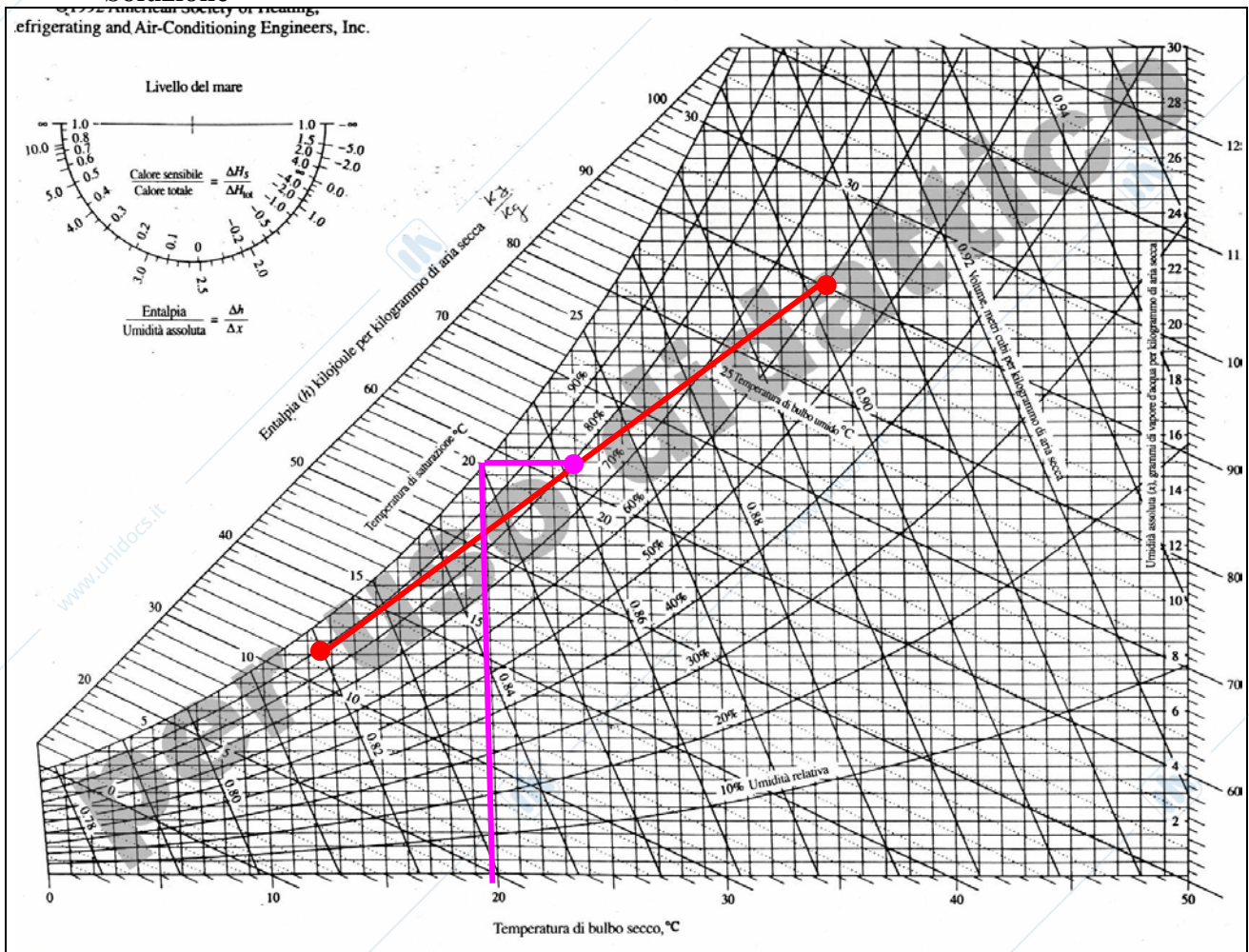
$$\text{risolvendo } t(50^{\circ}\text{C})=-\tau \ln(\Delta T/\Delta T_0)=-214 * \ln [(50-30)/(250-30)]=513\text{s}=8.6 \text{ min}$$

$$\text{Attrito: } \frac{1}{2} \rho w^2 A_f C_f = \frac{1}{2} * 1.2 * 12^2 * D * L * 1.1 = 9.5 \text{ N (6.7 N con } \rho_{\text{film}})$$

Dove  $C_f$  viene letto dal grafico, la sezione è l'area trasversale, e la densità dell'aria è più correttamente quella ambiente che arriva a  $w=12\text{ m/s}$ , che non quella del solo film (raffinatezza).

6) L'aria che esce dalla bocchetta di un condizionatore (temperatura  $T_1=12.5^{\circ}\text{C}$  e umidità relativa  $\text{UR}_1=90\%$ ) si mescola con l'aria presente nell'ambiente ( $T_2=35^{\circ}\text{C}$  e  $\text{UR}_2=60\%$ ) in parti che si ipotizzano uguali. Calcolare le condizioni della miscela ( $T_m, \text{UR}_m, \text{Trugiada}_m$ ) Riportare i punti che descrivono le varie condizioni (1, 2, miscela,  $T_m$ ) sul diagramma psicrometrico allegato.

### Soluzione



I dati salienti sono:

	T	UR	Psat (Pa)	Pvap	Titolo	entalpia
1	12.5	90%	1447.9	1303.12	0.00810	33.02
2	35	60%	5605.8	3363.48	0.02136	89.95
mix	23.9	79%	2956.4	2344.02	0.0147	61.49

$$\text{Trugi}_{\text{mix}}=19.96^{\circ}\text{C}$$

Sequenza logica per effettuare i conti:

$T_1 \rightarrow P_{Sat_1}, P_{Sat_1} + UR_1 \rightarrow P_{Vap_1}, P_{Vap_1} \rightarrow Titolo_1, Titolo_1 + T_1 \rightarrow h_1$  (idem per 2)

$h_1$  e  $h_2 \rightarrow h_{Mix}, Titolo_1$  e  $Titolo_2 \rightarrow Titolo_{Mix}, h_{Mix}$  e  $Titolo_{Mix} \rightarrow T_{Mix}$

$Titolo_{Mix} \rightarrow P_{Vap_{mix}}, T_{Mix} \rightarrow P_{Sat_{mix}}, P_{Vap_{mix}}$  e  $P_{Sat_{mix}} \rightarrow UR_{mix}, P_{Vap_{mix}} \rightarrow T_{Rug_{mix}}$

I punti vanno riportati sul grafico. La miscela si trova in questo caso sul punto medio del segmento rosso. Muovendosi orizzontalmente verso sinistra si incrocia la curva di saturazione alla temperatura di rugiada. Verificare che conti e grafico coincidano.

Grafico 2008\*1438pixels scaricato da [http://www.fisicatecnica.altervista.org/risorse/ashrae\\_h.jpg](http://www.fisicatecnica.altervista.org/risorse/ashrae_h.jpg)

7) Una parete in calcestruzzo ( $\lambda_{calc}=1.3$  W/m.K) di  $A=10$  m<sup>2</sup> si affaccia in un ambiente a 20°C (coefficiente convezione  $h=5$  W/m<sup>2</sup>K), è spessa  $S_{calc}$  35 cm. Sul retro è rivestita da  $S_{imp}$  2 cm di impermeabilizzante ( $\lambda_{imp}=0.1$  W/m.K), che sull'altro lato poggia al terrapieno a 8°C. Determinare il flusso di calore disperso e le temperature intermedie.

### Soluzione

Dalle formule  $Q'=DT_i/R_i$  si ottiene

Strato	Resistenza specifica	Flusso termico W/m <sup>2</sup>	$\Delta T = \Phi * R_i$	$T_i$
$h=5$	$=1/h = 0.2$		$=17.93*0.2=3.59$	20°C
$sp_1=0.35 \lambda=1$	$=sp/\lambda = 0.2692$		$= 4.83$	16.41
$sp_2=0.02 \lambda=2$	$=sp/\lambda = 0.2$		$= 3.59$	11.58
totale	$= 0.6692$	$\Phi = \Delta T/R =$ $= 12/0.6692=17.93$	$20-8=12$	8

$$Q'=\Phi*A=179.3 \text{ W}$$

8) Un caminetto a forma di cavità ad apertura quadrata di lato  $L_{Cam}=140$  cm e profonda 80 cm, ha le pareti a  $T_{Cam}=150$  °C, e si affaccia in una stanza cubica di lato  $L_{St}=4$  m avente pareti a  $T_{St}=18$ °C. Ipotizzando i coefficienti di emissività tutti pari a 0.8, calcolare il fattore di vista e il calore scambiato per irraggiamento tra caminetto e stanza. Specificare le ipotesi adottate.

### Soluzione

La superficie del caminetto che irradia ha fattore di vista verso la stanza pari a quello che avrebbe verso una parete fittizia (scelta piatta per comodità) che ne chiuda l'apertura.

$$A_{cam} = 1.4^2 + 1.4*0.8*4 = 6.44 \quad A_{Fitt} = 1.4^2 = 1.96 \quad F_{Fitt-Cam}=1 \quad F_{Cam-Fitt}=1.96*1/6.44=0.304$$

$$Q' = \frac{\sigma(T_{Cam}^4 - T_{Sta}^4)}{\frac{1-\epsilon_{cam}}{A_{Cam}\epsilon_{Cam}} + \frac{1}{A_{Cam}F_{Cam-Sta}} + \frac{1-\epsilon_{Sta}}{A_{Sta}\epsilon_{Sta}}} = \frac{5.67*10^{-8}(423^4 - 291^4)}{\frac{1-0.8}{6.44*0.8} + \frac{1}{6.44*0.304} + \frac{1-0.8}{94.04*0.8}} = 2553W$$

Si ipotizzano tutte le pareti alle stesse temperature

9) La barra dell'esercizio 5 è restata con un'estremità nel forno mantenuta alla temperatura  $T_1=250$ °C, (i dati riportati sono gli stessi  $D=0.02$  m), e sporge in un ambiente con  $h=8$  W/m<sup>2</sup>K. Di quanto deve perlomeno sporgere affinché l'altra estremità poter essere considerata a temperatura ambiente? A regime, a quale distanza la si potrà afferrare senza scottarsi? ( $T<50$ °C).

### Soluzione

Il profilo di temperatura segue un andamento del tipo  $\Delta T = \Delta T_0 e^{-mx}$  dove  $1/m$  assume il significato di una lunghezza caratteristica,  $m = (hP/\lambda A)^{0.5} = (8 * \pi D / 60 / (\pi D^2/4))^{0.5} = (8/15/0.02)^{0.5} = 5.16$ , la lunghezza caratteristica è  $1/5.16 = 0.194$  m. Dopo 5 lunghezze = 0.97m il  $\Delta T$  barra sarà ridotto allo 0.7% di quello originario. Altre scelte sono possibili se giustificate.

Per avere  $T=50$ °C, vuol dire trovarsi alla distanza  $x$  tale che  $(50-30)=(250-30)e^{-mx}$  da cui si trova  $x=0.46$  m.

10.1) numero di **matricola** finisce per cifra **pari**: ricavare l'equazione di Fourier per la trasmissione del calore  $T=T(x,y,z,t)$ . Specificare e discutere brevemente le ipotesi e/o semplificazioni utilizzate

10.2) numero di **matricola** finisce per cifra **dispari**: Ricavare il profilo di temperatura di un'aletta di lunghezza infinita immersa in un fluido, specificare e discutere brevemente le ipotesi e/o semplificazioni utilizzate.

#### VOTI

Matr	proposta	Parte1	19-giu parte2 o tutto
648386	19	8.8	19
652356	insuff		9
657286	Insuff	12.1	11
669042	Insuff	12.1	15
676910	rifare P2	18.7	15
682332	30	28.1	30L
700036	30	14.9	30
700063	28	23.1	30L
700101	26	29.2	22.8
700281	30	rifiuta17.6	30
700530	rifare P2	17.6	12
700534	27	25.3	29
700602	27	29.2	24.5
700636	Insuff		12
700694	30L	30.3	30L
700835	Insuff	13.8	14
701197	19	18.2	20
701239	22	12.7	22
701266	30	30.8	30
701273	24 contatt. Docente	24.8	23.4
702114	28	22.0	30L
702431	26	28.6	22.8
703005	25	11.6	25
703359	Insuff	11.0	16
703469	24	20.1	28.8
703605	25	11.6	25
703783	30	28.1	30L
706132	24	26.4	21.6
706197	Insuff	12.7	13
711442	25	25.3	25