

Università degli Studi di Bologna  
Corso di Laurea in Ingegneria Edile  
Sede di Ravenna

**Termofisica ed acustica delle  
costruzioni**

**Esercizi**

**miscele di aria e vapor d'acqua**

**FISICA TECNICA E IMPIANTI T - Ingegneria Edile**  
Prof. Luca Barbaresi - DIN  
[luca.barbaresi@unibo.it](mailto:luca.barbaresi@unibo.it)

## ESERCIZIO n°1

### Miscelazione adiabatica di correnti d'aria

Una portata di 60.5 kg/min di aria secca con 100% di U.R. che si trova alla temperatura di 14°C, viene mescolata adiabaticamente con una seconda portata di 22.5 kg/min a 32°C e 60% di U.R. Supponendo che il processo di miscelazione avvenga alla pressione di 101.325 kPa si determinino il titolo dell'aria, l'umidità relativa, la temperatura di bulbo secco e la portata della miscela.

Dal bilancio di massa dell'aria secca si ottiene:

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = 60.5 + 22.5 = 83 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{min}} \right]$$

## ESERCIZIO n°1

### Miscelazione adiabatica di correnti d'aria

Dal bilancio di massa dell'acqua si ottiene:

$$x_3 = \frac{x_1 \dot{m}_{a1} + x_2 \dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} = 0.0122 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right]$$

Dal bilancio dell'energia si ottiene:

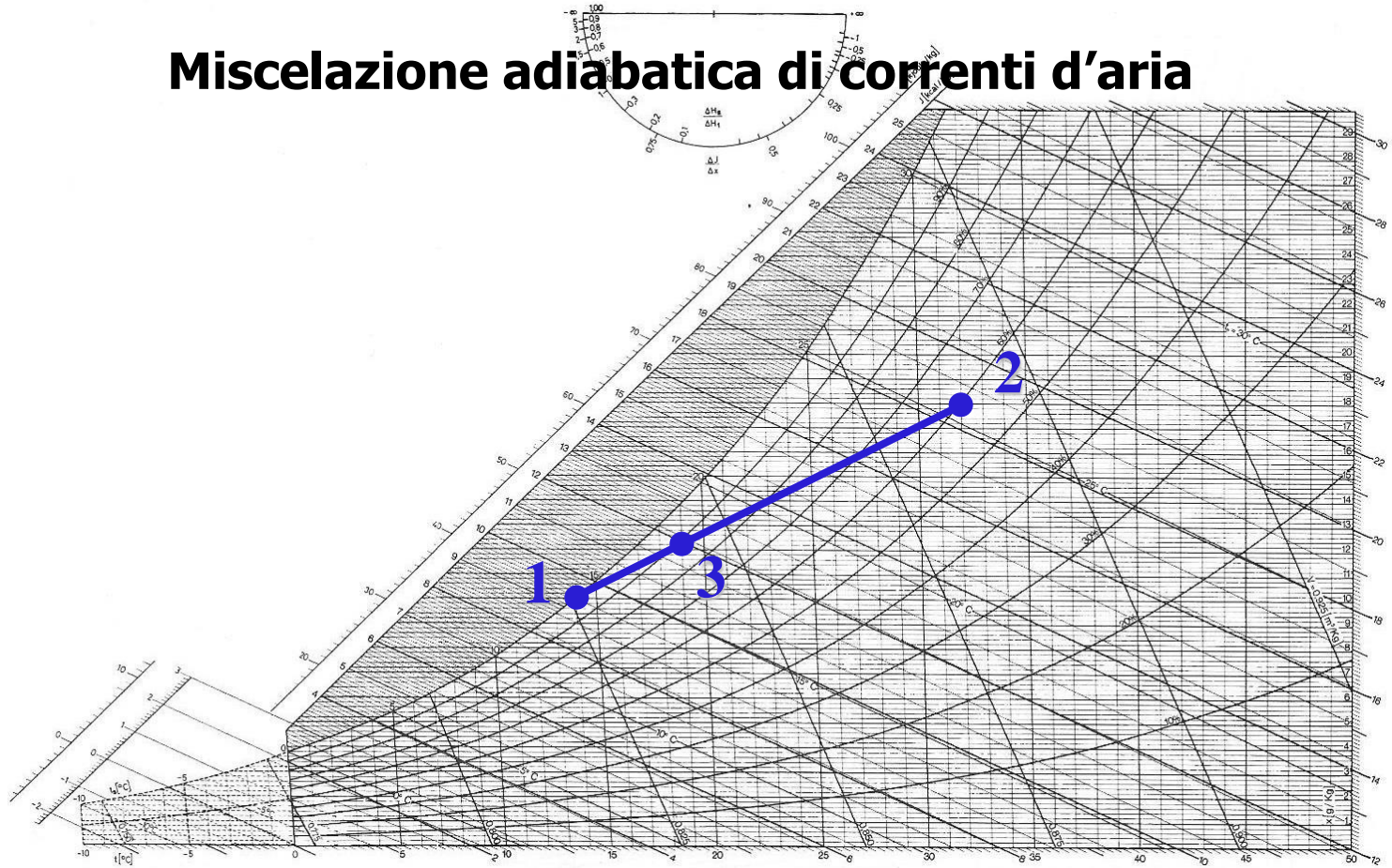
$$h_3 = \frac{h_1 \dot{m}_{a1} + h_2 \dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} = 50.1 \left[ \frac{kJ}{kg_a} \right]$$

Dal diagramma psicrometrico, conoscendo lo stato della miscela possiamo dedurre le altre proprietà:

$$T_3 = 19^\circ C \quad U.R. = 89\% \quad v_3 = 0.844 \left[ \frac{m^3}{kg_a} \right]$$

## ESERCIZIO n°1

### Miscelazione adiabatica di correnti d'aria



## ESERCIZIO n°2

### Riscaldamento semplice

Una portata d'aria di  $0.286 \text{ kg}_a/\text{s}$  alla pressione di  $95 \text{ kPa}$  ( $p_{tot}$ ) riceve calore. Se l'aria in ingresso ha una temperatura di  $15^\circ\text{C}$  ( $t_1$ ) e grado igrometrico pari a  $0.3$  ( $\varphi_1$ ) e se all'uscita la temperatura dell'aria è pari a  $25^\circ\text{C}$  ( $t_2$ ) si calcoli:

- la potenza termica  $Q$  ricevuta dalla miscela;
- il grado igrometrico della miscela all'uscita.

---

Calcoliamo il titolo dell'aria in ingresso, conoscendo la  $p_{sat}(t_1)$ :

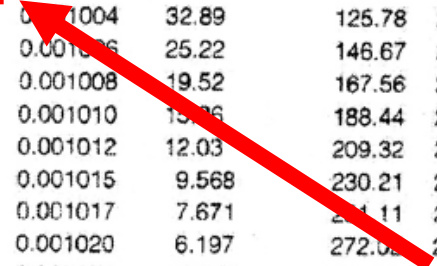
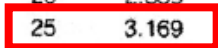
$$x_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_{sat}(t_1)}{p_{tot} - \varphi_1 p_{sat}(t_1)} = 0.00337 \left[ \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a} \right]$$

## ESERCIZIO n°2

### Riscaldamento semplice

Acqua saturo: tabella in temperatura

Temp. $T$ °C	Press. sat. $p_{sat}$ kPa	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. $u_l$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $u_l$	Evap. $u_{lv}$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $h_l$	Evap. $h_{lv}$	Vapore sat. $h_v$	Liquido sat. $s_l$	Evap. $s_{lv}$	Vapore sat. $s_v$
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
<b>25</b>	<b>3.169</b>	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.25	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.8	2488.4	355.89	2296.0	2651.9	1.1338	6.4100	7.5457



## ESERCIZIO n°2

### Riscaldamento semplice

Scrivendo l'equazione del bilancio della massa d'aria, vapore ed energia tra la sezione di ingresso e di uscita si ha:

$$\begin{cases} m_{a1} = m_{a2} \\ x_1 = x_2 \\ m_{a1}h_1 + Q = m_{a2}h_2 \end{cases}$$

Calcoliamo ora l'entalpia della miscela:

$$h_1 = t_1 + x_1(1.9t_1 + 2500) = 23.51$$

$$h_2 = t_2 + x_2(1.9t_2 + 2500) = 33.57$$

$$\left[ \frac{kJ}{kg_a} \right]$$

## ESERCIZIO n°2

### Riscaldamento semplice

La potenza scambiata vale quindi:

$$Q = m_{a1}(h_2 - h_1) = 2.875 \quad [kW]$$

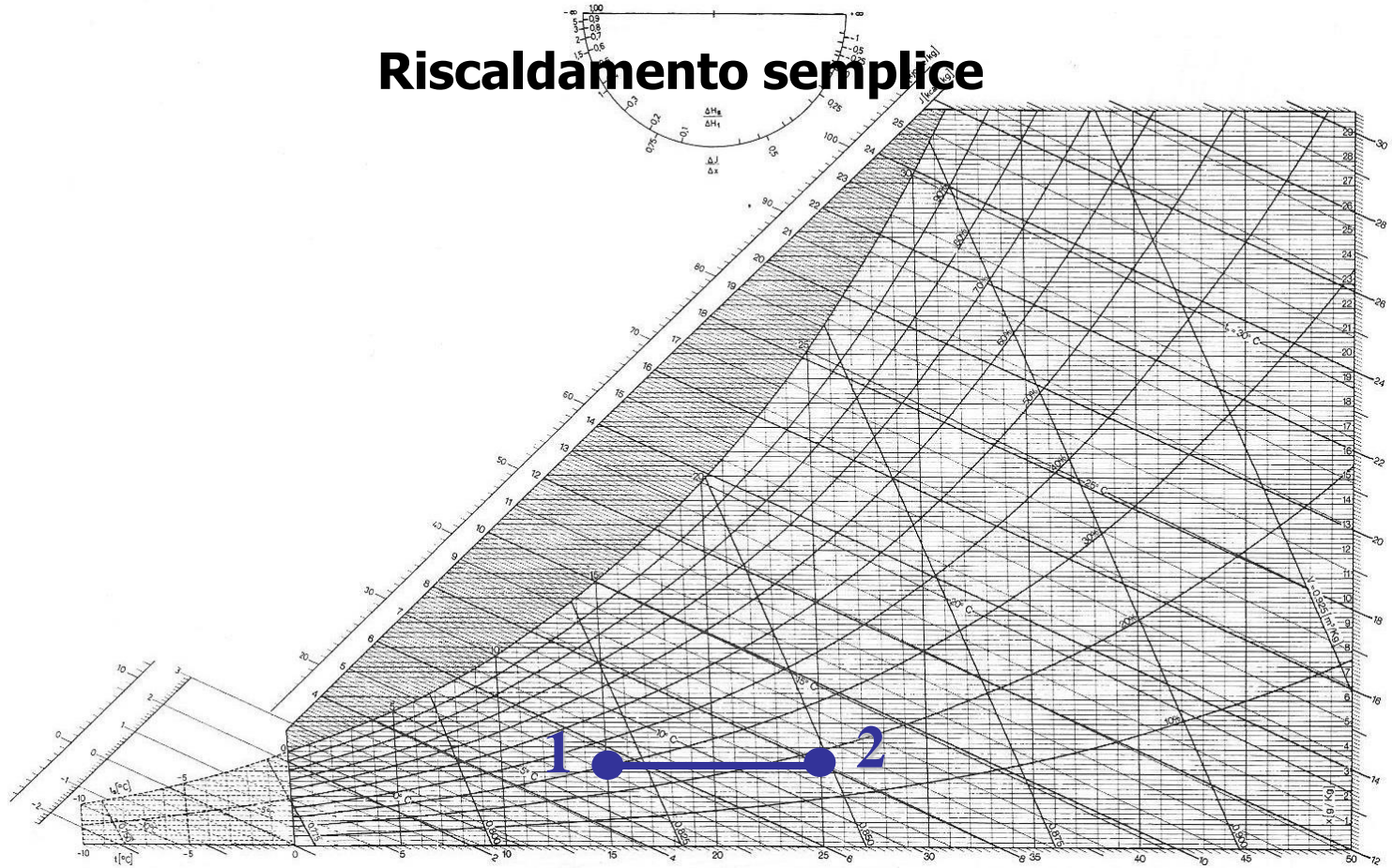
Calcoliamo ora il grado igrometrico della miscela in uscita:

$$\varphi_2 = \frac{x_2 P_{tot}}{P_{sat}(t_2)(x_2 + 0.622)} = 0.16$$



# ESERCIZIO n°2

## Riscaldamento semplice



## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

Si raffredda dell'aria che si trova alla temperatura di  $40^{\circ}\text{C}$  ( $t_1$ ) e grado igrometrico pari a  $0.5$  ( $\varphi_1$ ) fino alla temperatura di  $15^{\circ}\text{C}$  ( $t_2$ ).  
Si calcoli:

- quanto vale la temperatura di rugiada ( $t_r$ ), quanti grammi di acqua condensano per kg di aria secca raffreddata ( $M_c$ ), quanto calore deve essere sottratto durante il processo per kg di aria secca ( $p_{\text{tot}}=1\text{atm}$ ).

---

Calcoliamo il titolo dell'aria in ingresso, conoscendo la  $p_{\text{sat}}(t_1)$ :

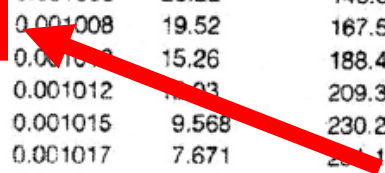
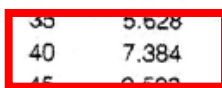
$$x_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_{\text{sat}}(t_1)}{p_{\text{tot}} - \varphi_1 p_{\text{sat}}(t_1)} \approx 0.024 \left[ \frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a} \right]$$

## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

Acqua satura: tabella in temperatura

Temp. $T$ °C	Press. sat. $p_{sat}$ kPa	Volume specifico m <sup>3</sup> /kg		Energia interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. $u_l$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $u_l$	Evap. $u_{lv}$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $h_l$	Evap. $h_{lv}$	Vapore sat. $h_v$	Liquido sat. $s_l$	Evap. $s_{lv}$	Vapore sat. $s_v$
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	11.93	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122



## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

Calcoliamo dapprima la pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di rugiada:

$$p_{\text{sat}}(t_r) = \frac{x_1 p_{\text{tot}}}{x_1 + 0.622} = 3.7 \quad [\text{kPa}]$$

Calcoliamo la temperatura di rugiada:

$$t_r = t_{\text{sat}} = \frac{4030.183}{16.6536 - \ln(p_{\text{sat}})} - 235 \approx 26.9 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Essendo la temperatura dell'aria in uscita inferiore alla temperatura di rugiada, si avrà un raffreddamento con deumidificazione dell'aria.

## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

Alla fine della trasformazione la miscela si troverà in condizioni di saturazione e alla  $t_2$  ; il titolo dell'aria in uscita sarà:

$$x_2 = 0.622 \frac{p_{sat}(t_2)}{p_{tot} - p_{sat}(t_2)} = 0.0106 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right]$$

La massa d'acqua condensata si ottiene da:

$$m_c = x_1 - x_2 = 0.0134 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right]$$

L'energia sottratta si ottiene da:

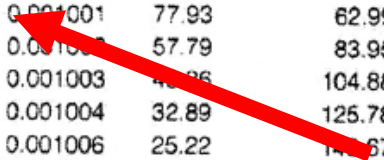
$$q = h_2 - h_1 = 42 - 100 = -58 \left[ \frac{kJ}{kg_a} \right]$$

## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

Acqua saturo: tabella in temperatura

Temp. $T$ °C	Press. sat. $p_{sat}$ kPa	Volume specifico $m^3/kg$		Energia interna $kJ/kg$			Entalpia $kJ/kg$			Entropia $kJ/(kg \cdot K)$		
		Liquido sat. $u_l$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $u_l$	Evap. $u_{lv}$	Vapore sat. $u_v$	Liquido sat. $h_l$	Evap. $h_{lv}$	Vapore sat. $h_v$	Liquido sat. $s_l$	Evap. $s_{lv}$	Vapore sat. $s_v$
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.96	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001032	2.885	355.83	2132.8	2488.6	355.87	2296.2	2652.1	1.1334	6.4101	7.5462



## ESERCIZIO n°3

### Raffreddamento con deumidificazione

