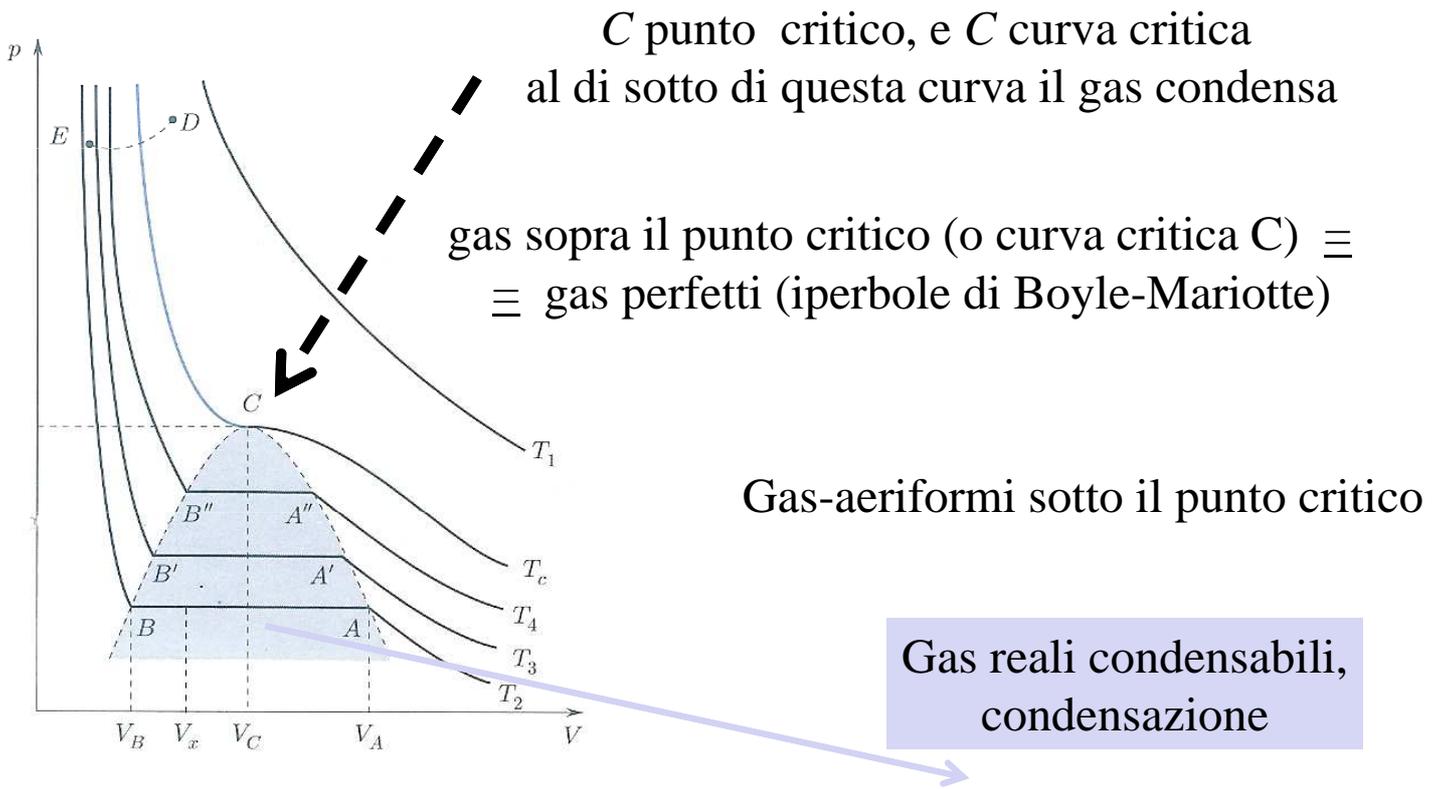


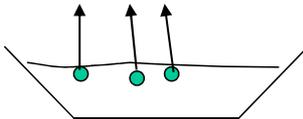
Gas Reali



L'umidità relativa: miscele di gas

1  *Evaporazione: processo di evaporazione dell'acqua dallo stato liquido al gassoso. Processo che avviene sulla superficie.*

2  *Ebollizione: processo di evaporazione, che non avviene solo in superficie, ma anche in tutto il volume di liquido con creazione di bolle di vapore (pressione esterna = pressione di vapore).*

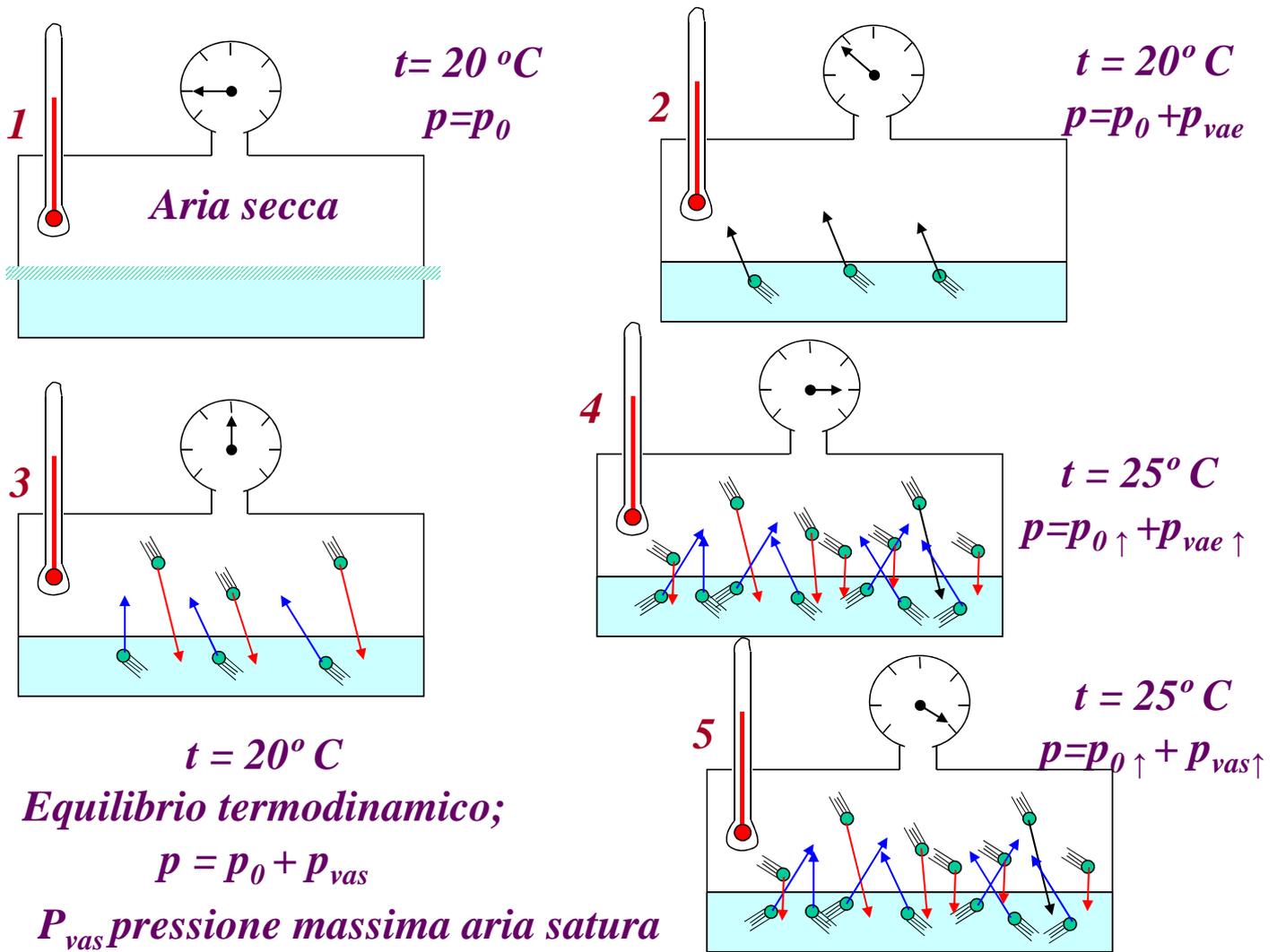
1  *Le molecole più energetiche lasciano la fase liquida, l'energia media diminuisce.*

L'evaporazione è un processo di raffreddamento.

Nella ciotola 1 il processo continua, finché l'acqua evapora tutta.

Nella ciotola 2 (sistema chiuso), l'acqua rimane.

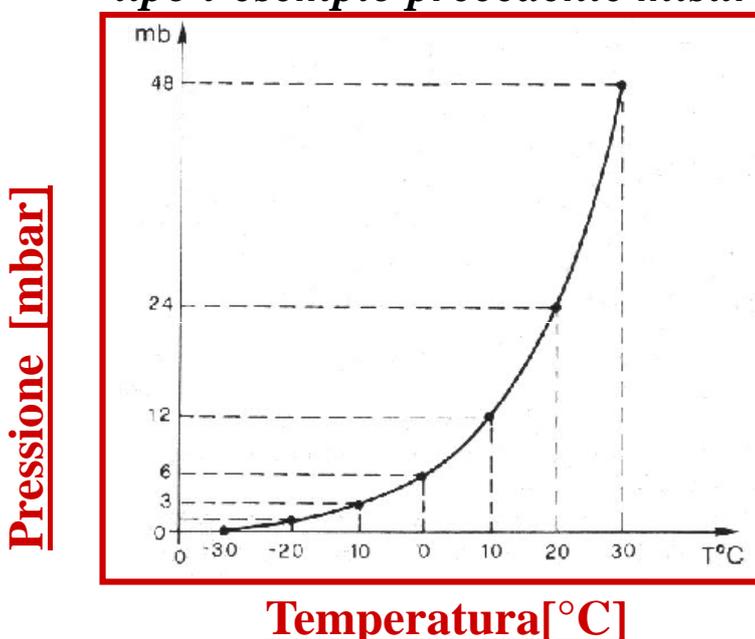
Perché?



Aria e contenuto di vapore acqueo.

Nell'aria aumenterebbe il contenuto di vapore acqueo, all'aumentare della sua temperatura, sulla base della tensione di vapore dell'acqua.

Questa proprietà di equilibrio liquido-vapore è riportata come capacità dell'aria di contenere acqua si misura con un'esperienza tipo l'esempio precedente misurando la P di vapore saturo.



Curva di saturazione dell'acqua

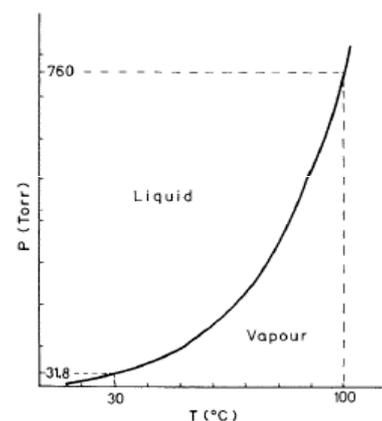


Fig. 2.2 Vapour pressure curve (water).

Modi di esprimere la quantità di H₂O in aria

$$\text{Umidità Relativa (U.R.)} = \left(\frac{p_{vae}}{p_{vas}} \right) \cdot 100\% = \left(\frac{m_{vae}}{m_{vas}} \right) \cdot 100\% \quad \text{o Grado Igrometrico}$$

$$\text{Umidità Specifica (U.S.)} = \left(\frac{m_{vae}}{m_{vae} + m_{aria}} \right) \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right] \quad \text{o Quantità di Vapore di H}_2\text{O per 1 Kg di aria}$$
$$\left(\frac{m_{vae}}{m_{aria}} \right) \cdot 1000 \left[\frac{g}{kg} \right] \quad \text{o anche Titolo } x$$

Non dipende dalla temperatura o dal volume, evidenzia evaporazione, condensazione o rimescolamenti.

$$\text{Umidità Assoluta (U.A.)} = \left(\frac{m_{vae}}{V} \right) \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

*Temperatura di rugiada TR: T alla quale si avrebbe condensazione.
Distanza dal punto di rugiada DTR, ΔT dal punto di rugiada.
Temperatura di bulbo bagnato, temperatura*

La sensibilità del corpo per capire l'umidità

Se non aumenta la quantità di vapore, all'aumentare di T aumenta la capacità dell'aria di contenere acqua, quindi l'umidità relativa diminuisce.

*Viceversa al diminuire di T aumenta l'umidità relativa.
Variazione notte-giorno.*

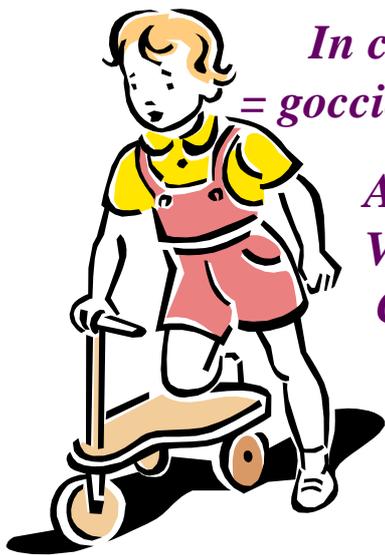
In caso di caldo, sudorazione e traspirazione = goccioline d'acqua = evaporazione raffreddamento.

Alta umidità relativa, non permette evaporazione.

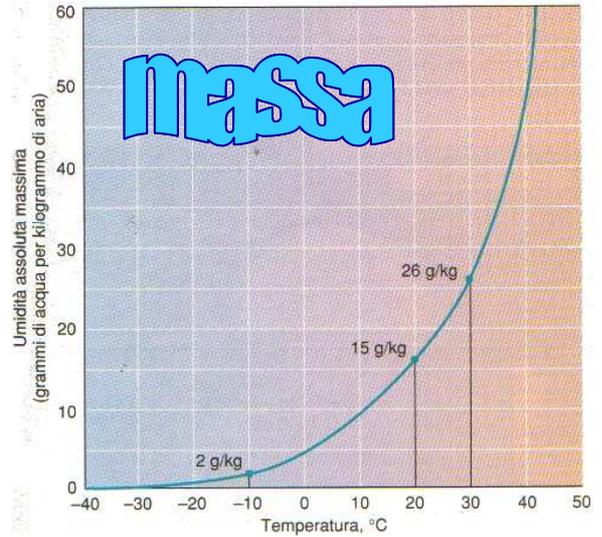
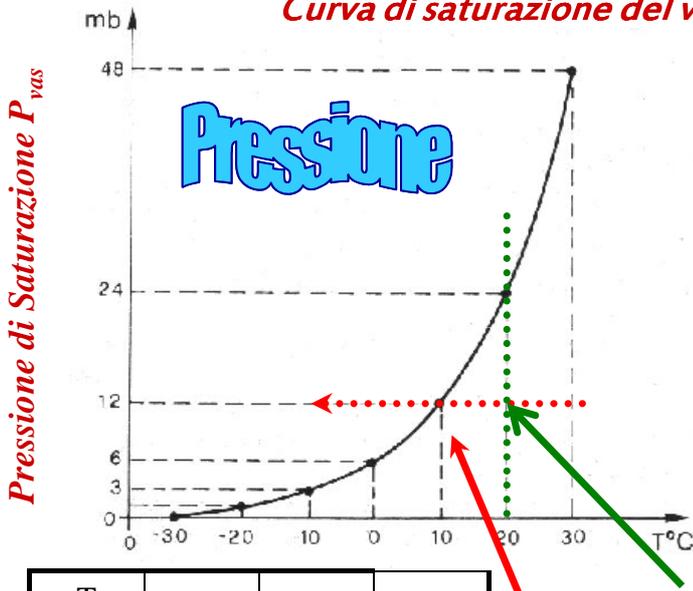
Ventilatore: forza aria meno satura.

Condizionatore elimina Acqua non solo T minore.

In caso di di freddo, se l'umidità è bassa: disagio.



Curva di saturazione del vapore acqueo in aria



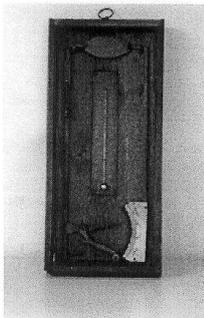
T	p mbar	p mm Hg	x g/kg
-10	2.59	1.943	1.6
0	6.09	4.568	3.78
10	12.25	9.188	7.63
20	23.31	17.48	14.7
30	42.32	31.75	27.2
40	73.58	49.57	43.5

A $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ si ha un U.R. del 50%.

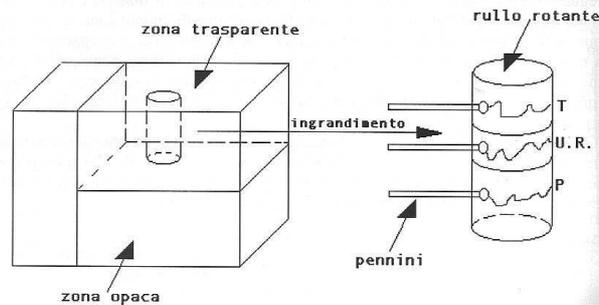
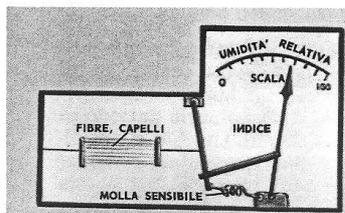
Se non ci sono variazioni del contenuto di vapore acqueo si avrà al diminuire della temperatura che a $10\text{ }^\circ\text{C}$ si raggiungerà la pressione di saturazione

Al di sotto di tale temperatura si avrà il processo di condensazione. Quindi la T di rugiada è $10\text{ }^\circ\text{C}$. E la distanza dalla T di rugiada $DTR = 20 - 10\text{ }^\circ\text{C} = 10\text{ }^\circ\text{C}$

Igrometri e psicrometri

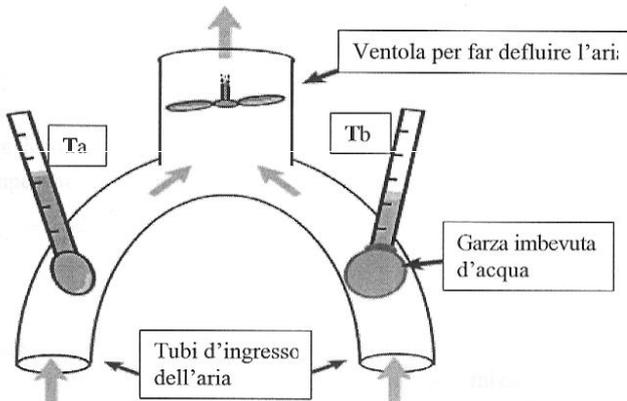
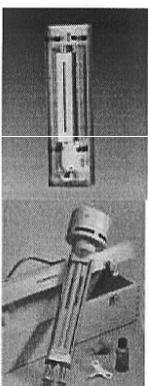


Igrometro a capello
(Bassure '700)



All'aumentare di T i capelli si accorciano.

Attenzione: Variazione non lineare, la taratura a 20 ° è funzionale intorno a tale valore di T .



Igrometro di Assman

Esiste una relazione tra l'U.R. la temperatura di bulbo secco (T_a) e la temperatura di bulbo bagnato (T_b). Tale relazione è riportata graficamente nel diagramma psicrometrico. Data T_a e T_b . Ricaviamo la U.R. come la curva passante per l'intersezione delle due temperature.

Condizioni climatiche e Psicrometria

Condizioni ottimali per uomo: **Condizioni tipiche musei:**

	Estate	Inverno
T	24 ÷ 26 °C	18 ÷ 22 °C
UR	40 ÷ 60 %	40 ÷ 60 %

T	21 °C
UR	60 %

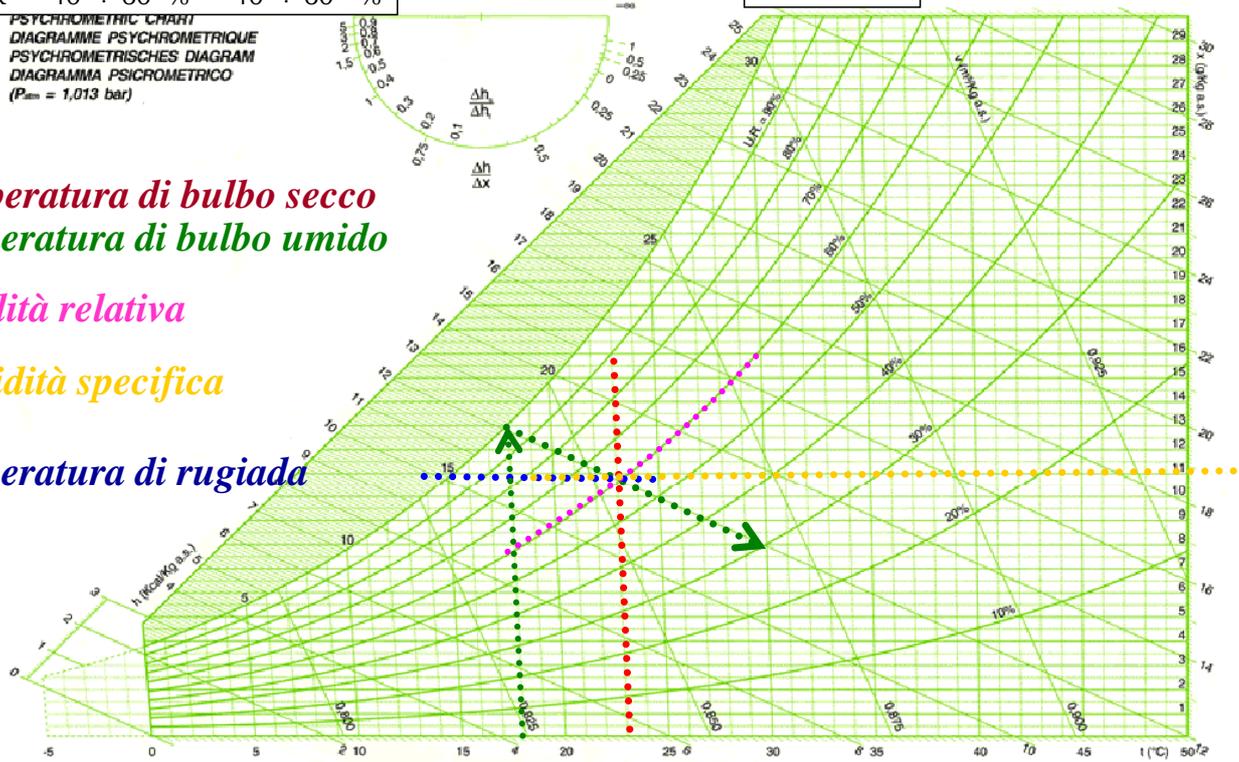
..... Temperatura di bulbo secco

..... Temperatura di bulbo umido

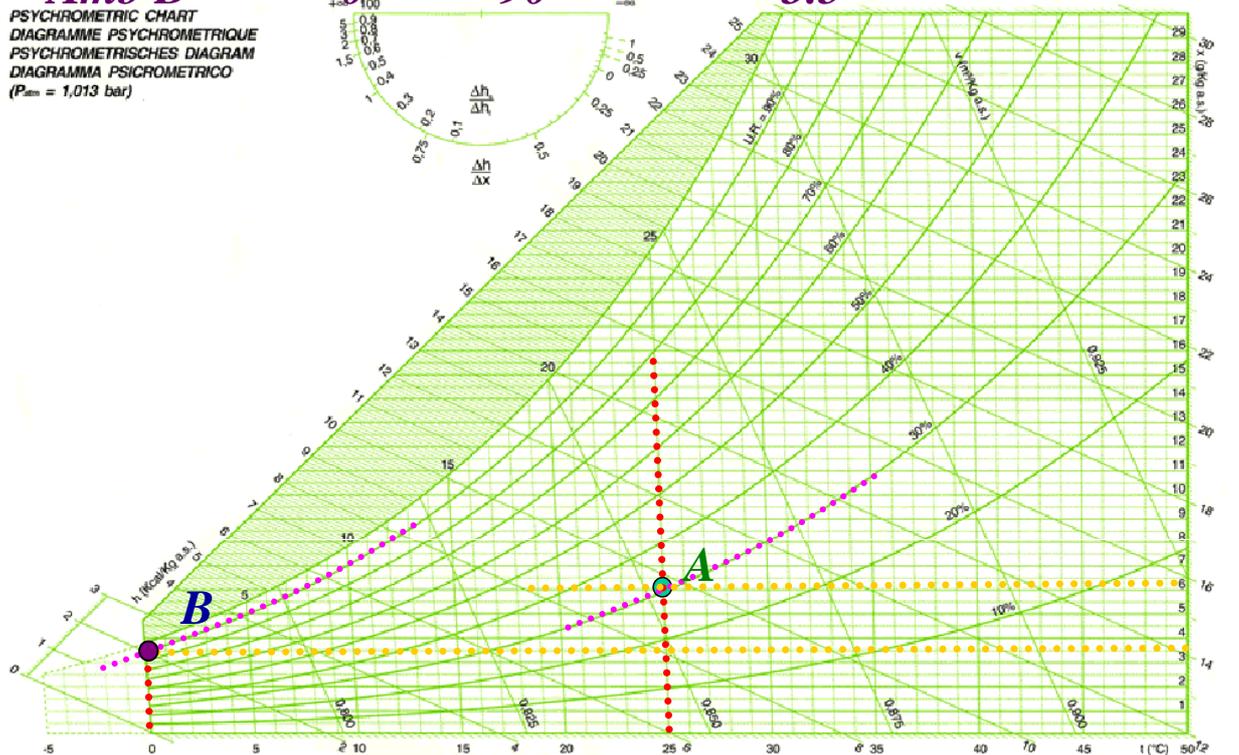
..... Umidità relativa

..... Umidità specifica

..... Temperatura di rugiada



	T	U.R. (%)	U.A. [g/m^3]
Amb. A	25	30	6
Amb. B	0	90	3.5



H_2O maggiore nell'ambiente in A. Ma si soffre maggiore disagio in B a causa dell'elevata umidità. B non "sano" per un'opera d'arte.

Determinazione dell'umidità relativa con l'igrometro alla Assman

PSYCHROMETRIC CHART
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 (P_{sat} = 1,013 bar)

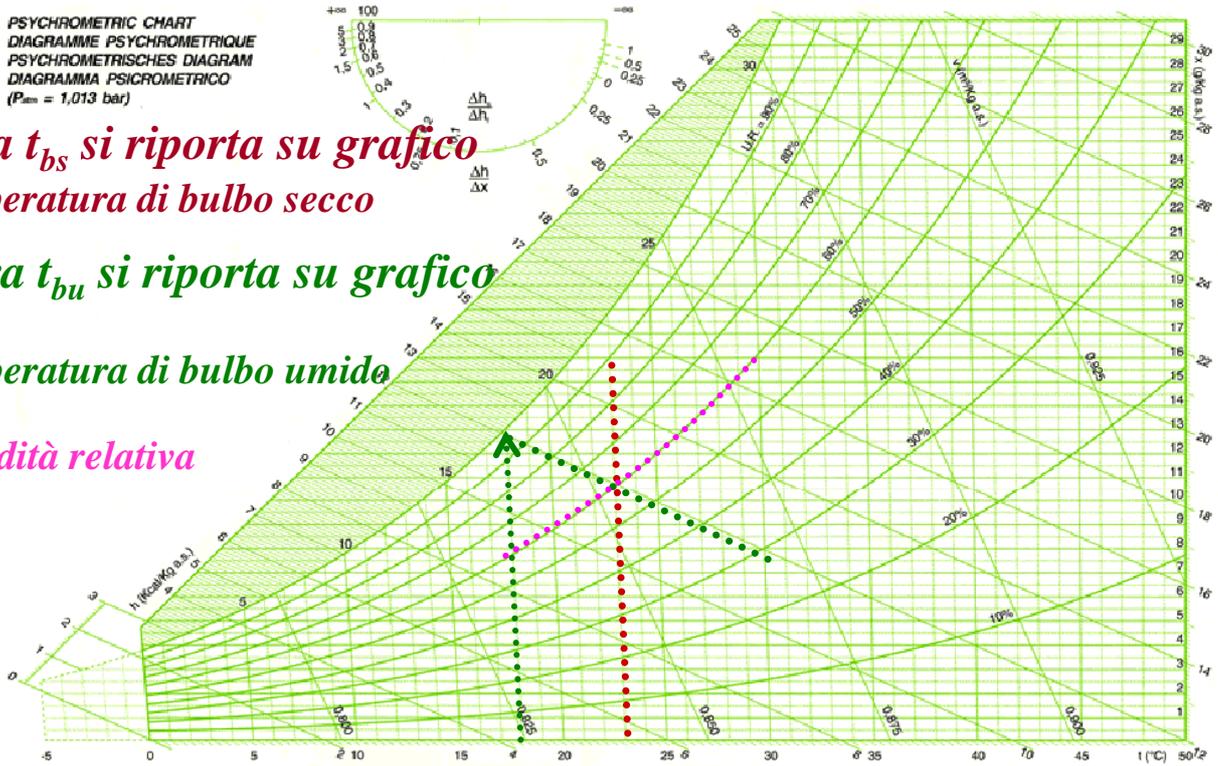
Si misura t_{bs} si riporta su grafico

..... Temperatura di bulbo secco

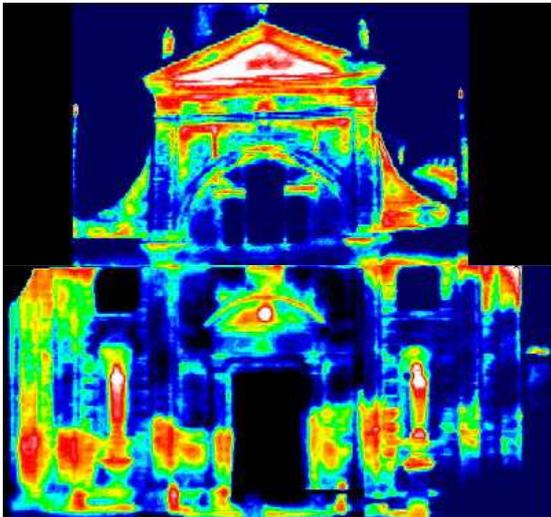
Si misura t_{bu} si riporta su grafico

..... Temperatura di bulbo umido

..... Umidità relativa



Trasmissione del Calore



In caso di riscaldamento viene assorbita energia secondo la relazione

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

↖ *Calore o energia [J]*
 ↖ *Massa [kg]*
 ↖ *Calore Specifico [J/kg °C]*
 ↖ *Variazione di T [°C]*

Una mappa termografica evidenzia le proprietà termofisiche:

- diverse modalità di raffreddamento e riscaldamento.

- studio della propagazione del calore all'interno dei materiali.

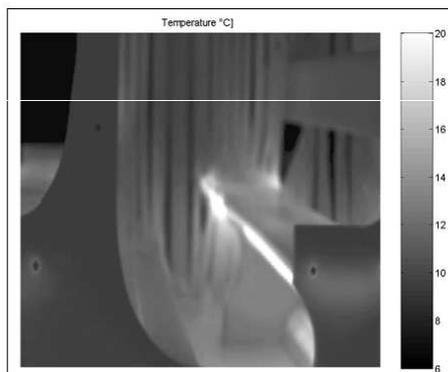


Figure 4. IR thermograph of the bench with the heating system under the seat turned on.

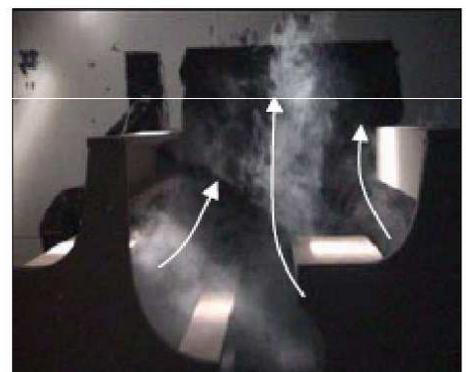
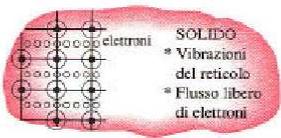
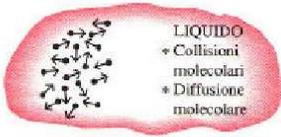
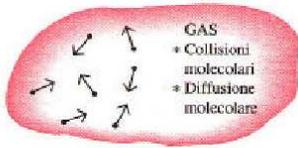
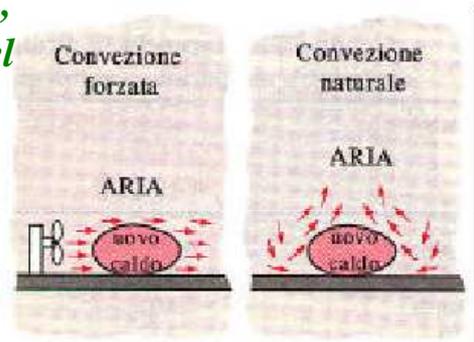


Figure 5. Air flow between the benches with the heating system under the seat turned on.

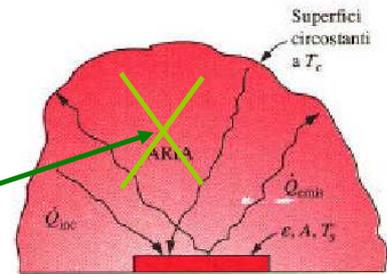
Modi di propagazione del calore

Convezione: Trasmissione attraverso i fluidi, mediante il moto delle molecole all'interno del fluido stesso. Importante nei liquidi e gas.



Conduzione Termica: Propagazione per azione molecolare, associata alle vibrazioni delle molecole. Si ha nei liquidi, nei gas ed è di maggiore importanza nei solidi

Irraggiamento: Trasmissione dell'energia mediante le onde elettromagnetiche, che incontrando un corpo assorbente si trasforma in parte in calore.

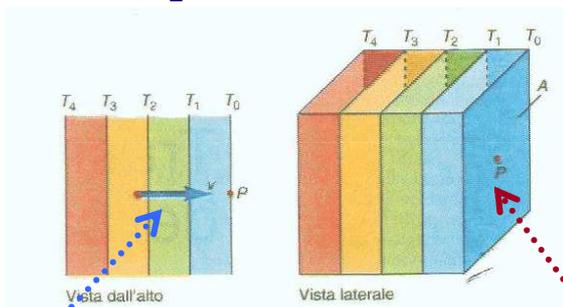


Non richiede un mezzo, anche nel vuoto.

Trasmissione del calore: convezione

Attenzione: t tempo
 T Temperatura.

Isoterma: linea (superficie) lungo la quale T è costante



$$T_4 > T_3 > T_2 > T_1 > T_0$$

Non immettiamo energia in alcun modo: solo aria si muove verso P.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Quantità di energia trasmessa per unità di tempo

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta x} = \frac{\Delta Q}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (a)$$

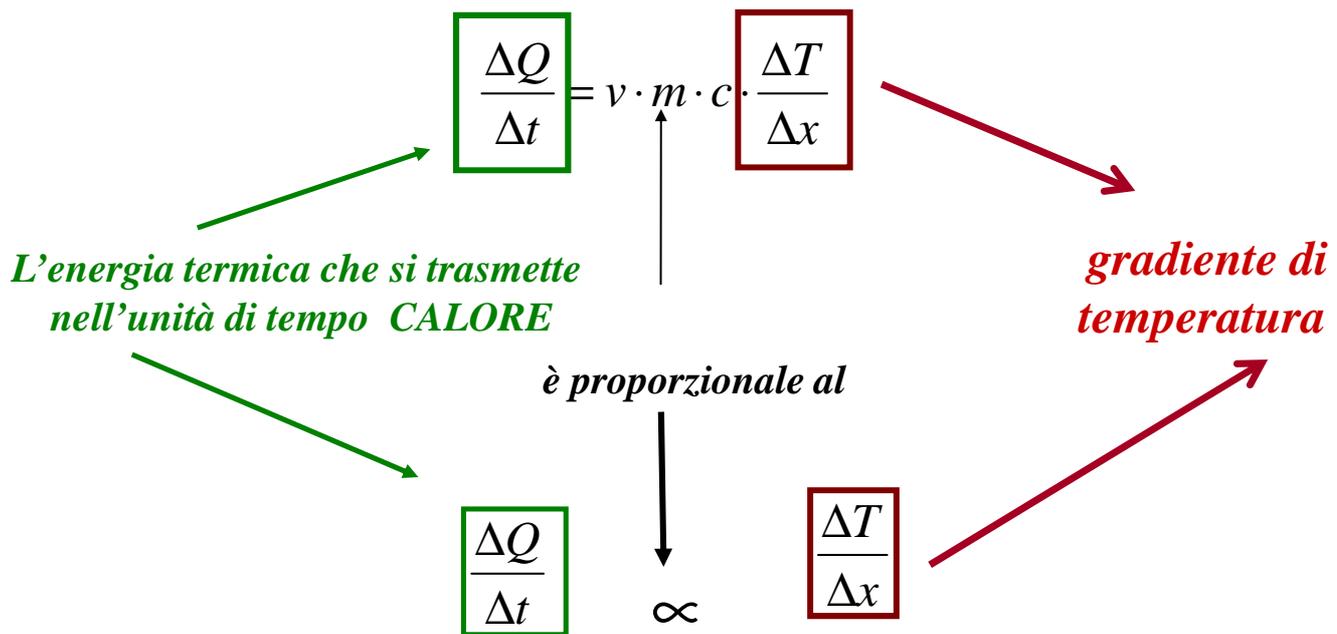
$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v \quad \text{Velocità dell'aria}$$

$$(a) \text{ diventa } \frac{\Delta Q}{\Delta t} = v \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta x}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \left\{ \begin{array}{l} \Delta Q \text{ energia termica} \\ \Delta t \text{ unità di tempo} \end{array} \right\}$$

Energia termica che si trasmette nell'unità di tempo **CALORE**

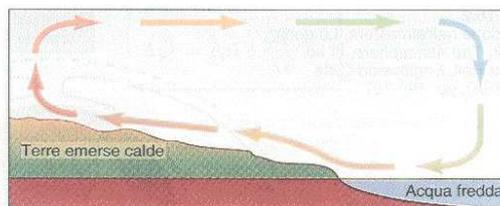
Dato che si ha : $\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ (a) diventa: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = v \cdot \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\Delta x}$



Osservare e ricordare la proporzionalità tra calore, propagazione dell'energia nell'unità di tempo e gradiente di T
 Il calore va dalla T maggiore alla T minore (vedremo dopo il segno)

Giorno:

Brezza di mare



$$Q = mc\Delta T$$

$$Q = C \Delta T$$

C = capacità termica del mare elevata, di giorno per **scaldarsi** impiega maggiore tempo degli strati superficiali della terra

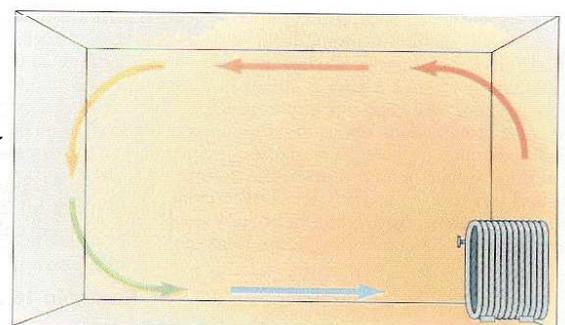
Notte: Il mare di notte per **raffreddarsi** impiega maggiore tempo degli strati superficiali della terra.

Brezza di terra

Le correnti d'aria rispetto alla figura precedente si invertono.

Riscaldamento per convezione naturale

Su piccola scala si ha che l'aria a contatto con il radiatore si riscalda e quindi sale (diminuisce la sua densità), aria più fredda affluisce e si avvia un ciclo di convezione





Friendly Heating

Sistema di riscaldamento confortevole per le persone ideato in modo compatibile con la conservazione delle opere d'arte conservate nelle chiese

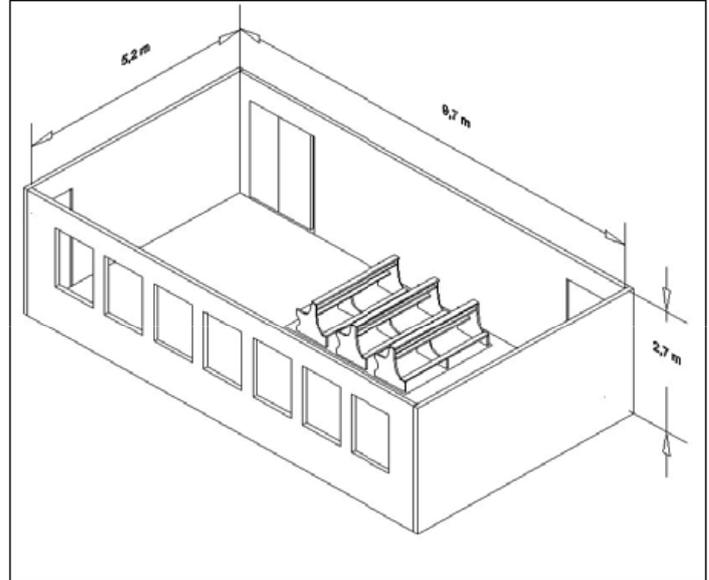
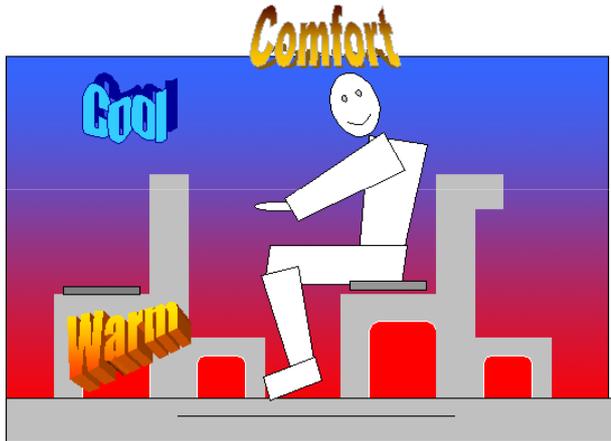
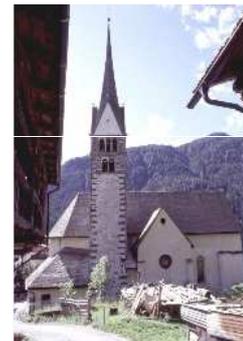
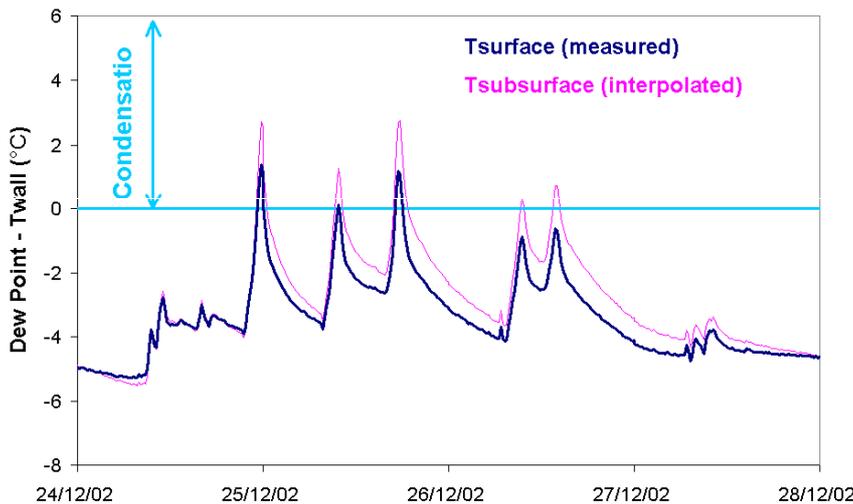
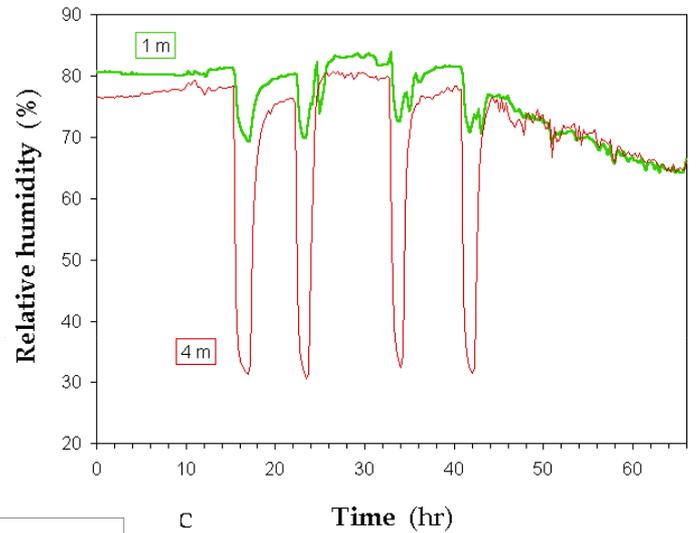
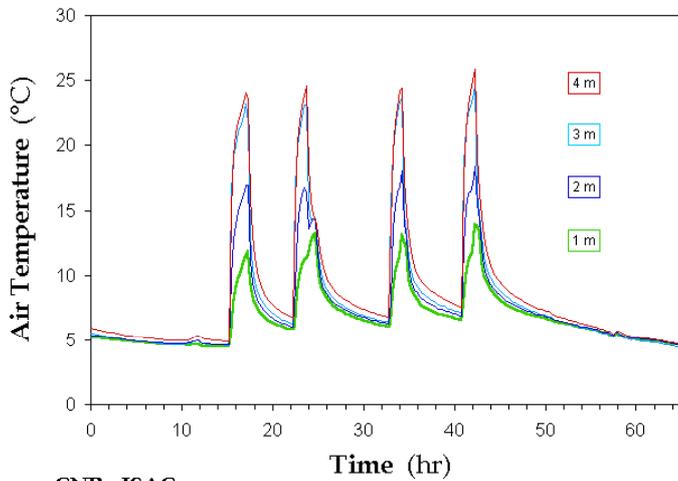


Figure 2. Overview of climate room with the benches



**Monitoraggio
di S. Maria
Maggiore di
Rocca Piétore**

<http://www.isac.cnr.it/~friendly-heating/indice.htm>

Effetti del riscaldamento su UR, T e TR

Collegamento a

[confronto tra due modi di riscaldamento.ppt](#)

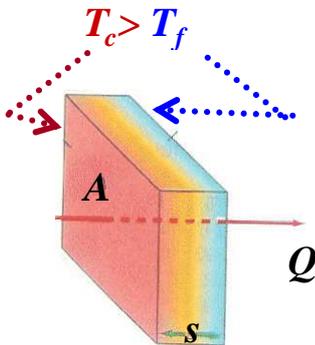
[grafici su riscaldamento UR e TR](#)

Trasmissione del calore: conduzione.

trasmissione di energia per azione delle vibrazioni molecolari

$$Q \propto A \cdot (T_c - T_f) \cdot t \quad \left\{ \begin{array}{l} A = \text{area} \\ T_c > T_f \\ t = \text{tempo} \end{array} \right.$$

$$Q \propto \frac{1}{s} \quad \{s = \text{spessore}\}$$



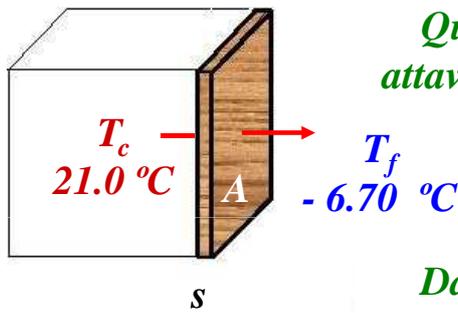
$$Q = k \cdot \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s}$$

Coefficiente di conducibilità termica (k)

Materiale	kcal/(m s °C)	J/(m s °C)
Aria	$5.50 \cdot 10^{-6}$	$2.30 \cdot 10^{-2}$
Calcestruzzo	$3.10 \cdot 10^{-4}$	1.30
Ferro	$2.10 \cdot 10^{-2}$	$8.79 \cdot 10^1$
Lana di vetro	$9.90 \cdot 10^{-6}$	$4.14 \cdot 10^{-2}$
Malta	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$4.69 \cdot 10^{-1}$
Mattoncino	$1.55 \cdot 10^{-4}$	$6.49 \cdot 10^{-1}$
Quercia	$3.51 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$
Pann. Sughero	$8.60 \cdot 10^{-6}$	$3.60 \cdot 10^{-2}$
Vetro	$1.89 \cdot 10^{-4}$	$7.91 \cdot 10^{-1}$

Coefficiente di conducibilità termica Tabella da P.J. Nolan

Esempio su conduzione



Qual è la quantità di energia che fluisce in un giorno attraverso una parete di quercia di spessore 10.0 cm, lunga 3.00 m ed alta 2.40 m?

Da $Q = k \cdot \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s}$ si ha

$$Q = \left(1.47 \cdot 10^{-1} \frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{°C}} \right) \cdot (3.00 \cdot 2.40 \text{ m}^2) \cdot \frac{[21.0 - (-6.70) \text{ °C}] \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}}{10 \text{ cm}}$$

$$Q = 2.53 \cdot 10^7 \text{ J}$$

$$Q = 2.53 \cdot 10^7 \text{ J} \frac{\text{kWatt h}}{1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ W} \cdot \text{s}} = 25.3 \text{ kWatt h}$$

potenza = energia/tempo

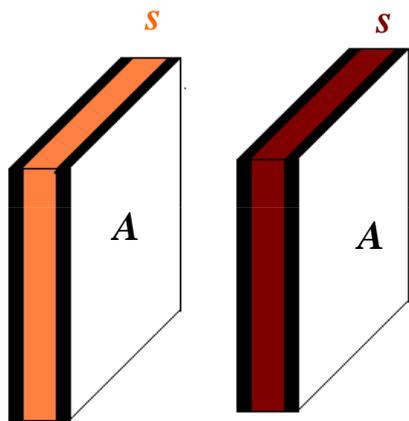
[W] = [J / sec],

[energia] = W · sec o kW · h

Watt

Tale energia deve essere fornita dal sistema di riscaldamento per mantenere la temperatura di 21 °C nell'ambiente interno.

Spessore equivalente di varie pareti



Lana
di
vetro

1. Calcestruzzo

$$Q_{lv} = k_{lv} \cdot \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s_{lv}}$$

1. $Q_{ca} = k_{ca} \cdot \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s_{ca}}$

Qual è lo spessore equivalente per avere lo stesso isolamento?

$$Q_{lv} = Q_{cs}$$

$$1 = \frac{k_{lv} / s_{lv}}{k_{ca} / s_{ca}} = \frac{k_{lv}}{k_{ca}} \cdot \frac{s_{ca}}{s_{lv}}$$

$$s_{lv} \frac{k_{ca}}{k_{lv}} \cdot 1 = \frac{k_{lv} / s_{lv}}{k_{ca} / s_{ca}} = \frac{k_{lv}}{k_{ca}} \cdot \frac{s_{ca}}{s_{lv}} \cdot s_{lv} \cdot \frac{k_{ca}}{k_{lv}}$$

$$s_{ca} = s_{lv} \frac{k_{ca}}{k_{lv}}$$

Spessore di calcestruzzo (s_{ca}) in sostituzione di 10 cm di lana vetro (s_{lv}):

$$s_{ca} = s_{lv} \frac{k_{ca}}{k_{lv}} = (10.0 \text{ cm}) \cdot \left(\frac{1.30 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})}{4.14 \cdot 10^{-2} \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})} \right) = 3.14 \text{ m}$$

Calcestruzzo

$$s_m = s_{lv} \frac{k_m}{k_{lv}} = \text{sostituendo gli opportuni valori} = 1.57 \text{ m}$$

Mattoni

$$s_v = s_{lv} \frac{k_v}{k_{lv}} = \text{sostituendo gli opportuni valori} = 1.91 \text{ m}$$

Vetro

$$s_q = s_{lv} \frac{k_q}{k_{lv}} = \text{sostituendo gli opportuni valori} = 0.36 \text{ m}$$

Legno di quercia

$$s_{Al} = s_{lv} \frac{k_{Al}}{k_{lv}} = \text{sostituendo gli opportuni valori} = 565 \text{ m}$$

Alluminio

La lana di vetro è la soluzione migliore.

Resistenza e conduttanza termica

- Di definisce conduttanza C di un determinato spessore (s) di materiale la seguente relazione
 - $C = k/s$
 - Quanto maggiore è C tanto più si trasmette il calore.
- Si usa il reciproco detto Resistenza (R) termica:
 - $R = 1/C = s/k$
 - Quanto maggiore è R tanto meno si trasmette il calore.

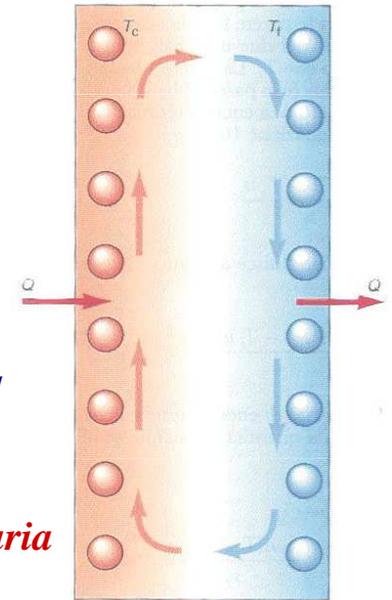
Nel calcolo dei sistemi complessi si possono utilizzare degli equivalenti elettrici, per semplificare i calcoli.

Ciclo di convezione sulle pareti con intecapedine

Dalla tabella delle conducibilità termica si ha per l'aria il minore k , pertanto il migliore isolamento o la peggiore conducibilità termica.

Putroppo si generano correnti convettive, che quindi trasmettono il calore dalla parete calda a quella fredda.

Impedendo il movimento dell'aria quindi si potrebbe ottenere un sistema isolato in modo ottimale.

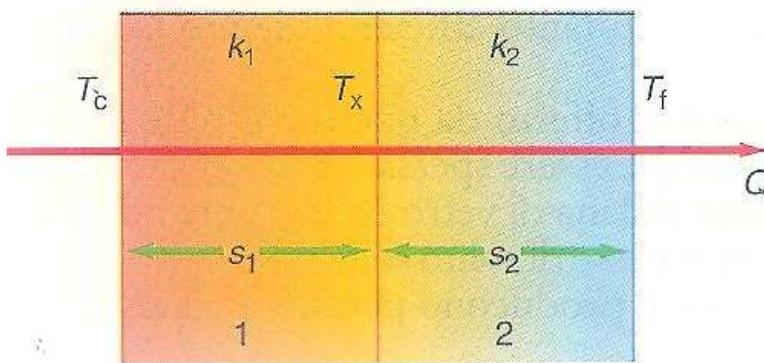


L'utilizzo della lana vetro oppone resistenza al movimento dell'aria.

Il buon isolamento della lana vetro è dovuto alle sacche d'aria che si formano nelle fibre di vetro..

Isolamento della finestre a vetrocamera non ottimale per l'aria o gas pesanti, presenti all'interno con possibili correnti convettive..

Parete composita



Con un po' di calcoli algebrici si ricava che la quantità di energia termica che fluisce è

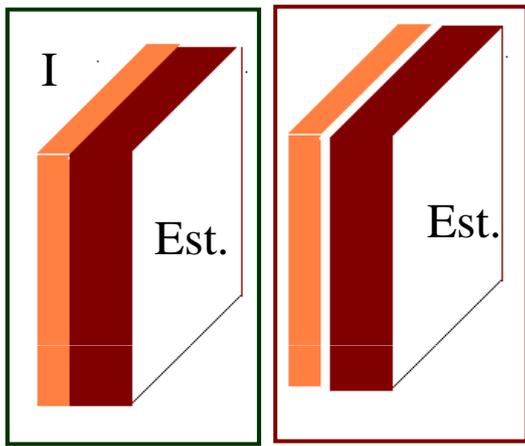
$$Q = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s_1/k_1 + s_2/k_2}$$

Possiamo definire la resistenza termica $R = s/k$

$$R_T = \sum_{i=1}^n s_i/k_i = \sum_{i=1}^n R_i$$

$$Q = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

$$Q = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{\sum_{i=1}^n s_i/k_i}$$



Materiale	kcal/(m s °C)	J/(m s °C)
Aria	$5.50 \cdot 10^{-6}$	$2.30 \cdot 10^{-2}$
Calcestruzzo	$3.10 \cdot 10^{-4}$	1.30
Malta	$1.12 \cdot 10^{-4}$	$4.69 \cdot 10^{-1}$
Mattoni	$1.55 \cdot 10^{-4}$	$6.49 \cdot 10^{-1}$

1 m² di affresco (substrato malta/calcestruzzo) si distacca dalla parete di mattoni. Supponiamo di scaldare la parete con 25 kWh per una parete da 2.50 m x 1.0 m.

$$Q = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{R_{malta} + R_{matt}}$$

$$Q = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{R_{malta} + R_{matt} + R_{aria}}$$

In questo caso Q è la sorgente che utilizziamo (e sarà omogenea sulla superficie, per cui la superficie distaccata e quella non distaccata riceveranno la stessa quantità di calore per unità di superficie. Le incognite sarebbero T_c (interne), la temperatura esterna (T_f è costante).



e semplifico le variabili uguali, potremmo anche Considerare Q/At , Watt/m².

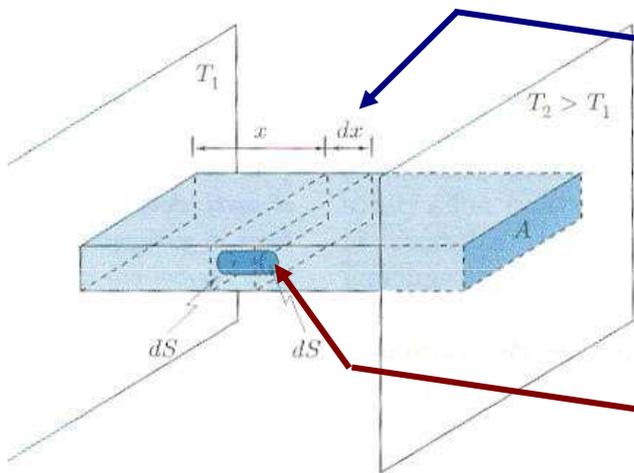
$$\frac{(T_c - T_f)}{R_{malta} + R_{matt}} = \frac{(T_{c_{distacco}} - T_f)}{R_{malta} + R_{matt} + R_{aria}}$$

$$(T_{c_{distacco}} - T_f) = (T_c - T_f) \frac{R_{malta} + R_{matt} + R_{aria}}{R_{malta} + R_{matt}} > (T_c - T_f)$$

Si osserva che la superficie all'interno che si è distaccata avrà una temperatura superiore alla pareti limitrofe dove non si è avuto il distacco.

Allo stesso modo si può osservare, che se sotto il calcestruzzo si trova un materiale che conduce meglio il calore ovvero R minore, si avrebbe una temperatura minore.

Dettaglio sul gradiente di temperatura



Prendiamo una porzione infinitesima lungo l'estensione della barra come dx

Prendiamo una areola della sezione che indichiamo con dS

Riscrivo

$$Q = k \cdot \frac{A \cdot (T_c - T_f) \cdot t}{s}$$

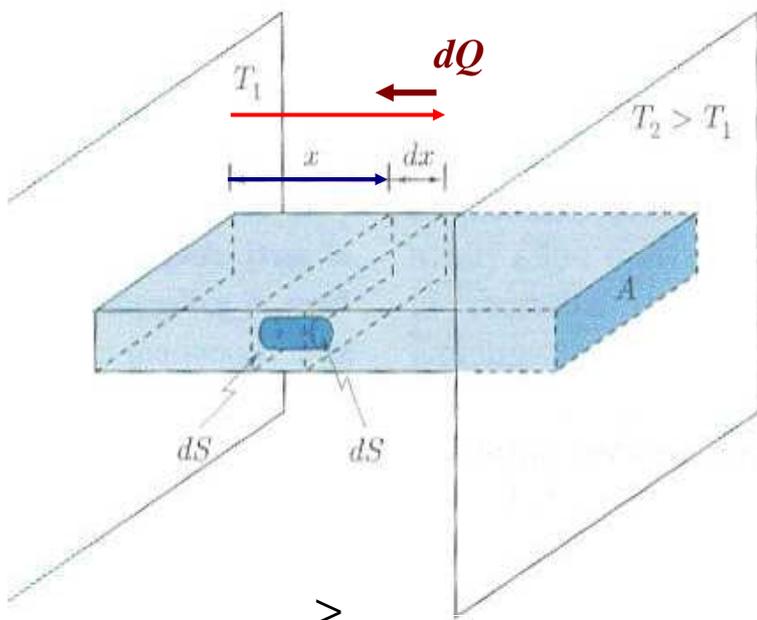
Per dimensioni infinitesimali

dim.
≡
piccole

quindi diventa

$$dQ = k \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dS \cdot dt$$

Ci sarà quindi una piccola quantità di calore (dQ) che passa attraverso quest'areola. Per le proporzioni infinitesimali si ha:



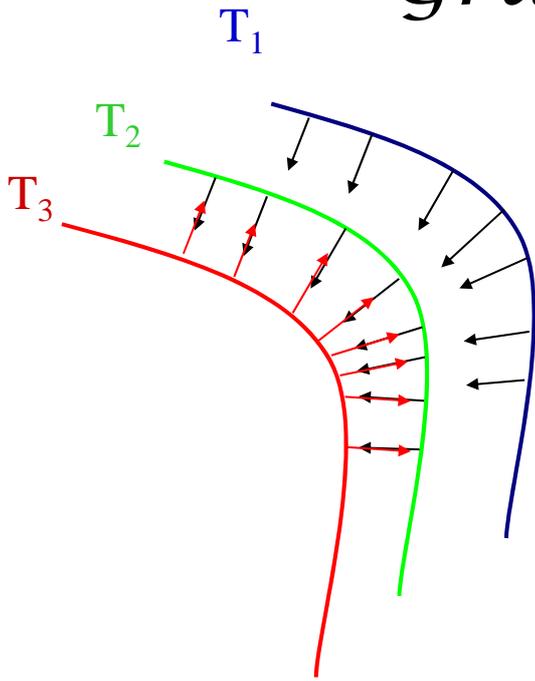
Il Calore va dalla zona a temperatura più alta nella direzione della zona a temperatura più bassa.

$$dQ = \square k \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dS \cdot dt$$

$$\frac{T(x+dx) - T(x)}{(x+dx) - (x)} \stackrel{\text{definizione}}{\equiv} \frac{dT}{dx} > 0$$

Quindi c'è un segno -

Gradiente di T



Il gradiente di T , è un vettore che ha direzione, verso e modulo.

Si può facilmente dedurre dalle isoterme (nel grafico $T_1 < T_2 < T_3$).

Il gradiente di T è normale alla curva isoterma ed è diretto nella direzione delle isoterme a temperatura maggiore. ↗

Dalle relazione precedenti si osserva che Q ha il verso opposto del gradiente di T , ovvero dalle isoterme a T maggiore verso quelle a T minore. ↖