

# **CORSO DI FISICA 2**

## **TERMOLOGIA**

### **LEZIONE 26**

# TERMOLOGIA

## CALORE – CAPACITÀ TERMICA – CALORE SPECIFICO

Se si fornisce una quantità di calore  $Q$  ad un corpo, la sua temperatura varia in modo direttamente proporzionale. Il coefficiente di proporzionalità si chiama capacità termica  $C$  del corpo

$$Q = C\Delta T$$

**La capacità termica  $C$  di un corpo è l'energia necessaria per aumentare di 1K (o di 1°C) la sua temperatura**

La capacità termica è proporzionale alla massa. E' utile allora definire il **calore specifico** (calore necessario per far aumentare di 1 K una massa unitaria:

$$c_s = \frac{C}{m}$$

Per cui:

$$Q = c_s m (T_f - T_i)$$

$Q \rightarrow$  Unità: [J]

$C_s \rightarrow$  Unità: J/(kg K)

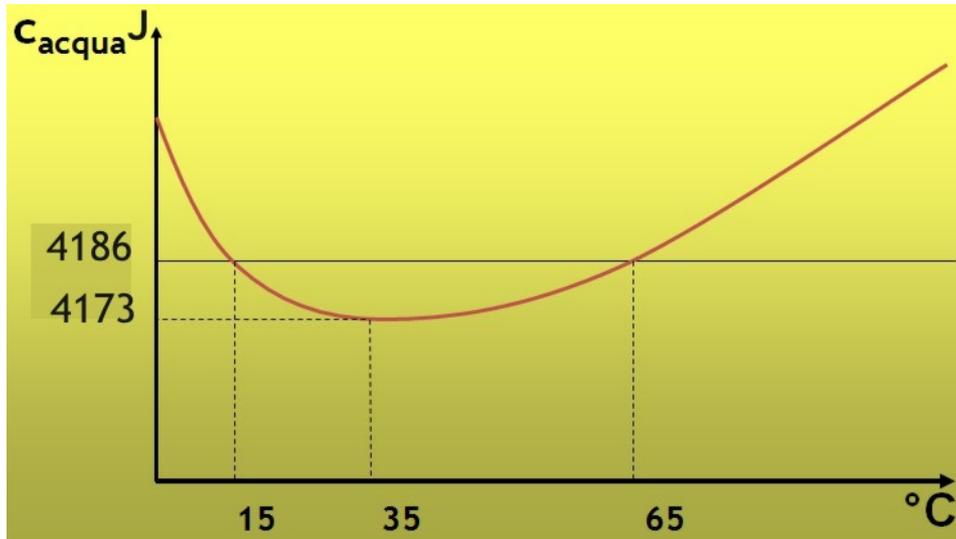
$C \rightarrow$  Unità: J/K

# TERMOLOGIA

## CALORE – CAPACITÀ TERMICA – CALORE SPECIFICO

**Il Calore specifico: dipende dal tipo di materiale e generalmente viene considerato costante con la temperatura**

In figura per esempio si riporta il grafico per l'acqua. In tab. i  $C_s$  di alcune sostanze



SOSTANZA	STATO	CALORE SPECIFICO [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
Alluminio	solido	880
Acciaio inox	solido	502
Acqua	liquido	4186
Acqua (Ghiaccio)	solido ( $0^{\circ}\text{C}$ )	2260
Aria (secca)	gassoso	1005
Aria (100% umidità)	gassoso	~ 1030
Azoto	gassoso	1042
Berillio	solido	1824
Diamante	solido	502
Elio	gassoso	5190
Etanolo	liquido	2460
Ferro	solido	444
Grafite	solido	720
Idrogeno	gassoso	14300
Litio	solido	3582
Mercurio	liquido	139
Olio	liquido	~ 2000
Ossigeno	gassoso	920
Oro	solido	129
Ottone	solido	377
Piombo	solido	130
Rame	solido	385
Silice (fuso)	solido	703
Silice	gassoso	2020
Zinco	solido	388

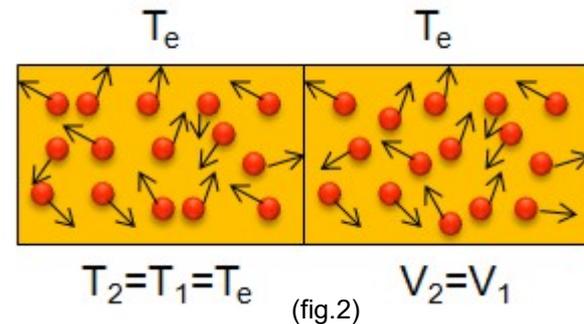
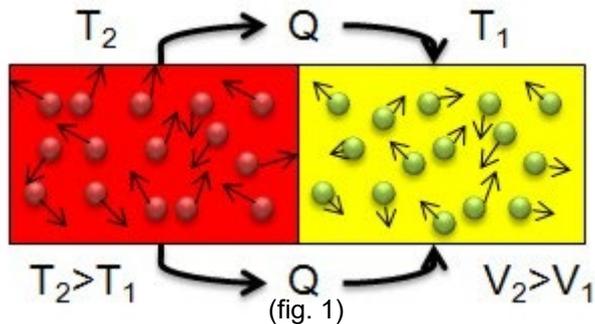
# TERMOLOGIA

## CALORE TEMPERATURA D'EQUILIBRIO

Mettendo a contatto un corpo caldo con uno freddo (fig. 1), dopo un po' di tempo le loro temperature si eguagliano.

All'inizio le molecole del corpo caldo sono veloci, mentre quelle del corpo fredde sono lente.

Poi gli urti distribuiscono l'energia cinetica (di movimento) in modo che essa sia uguale in media, per le molecole dei due corpi (fig. 2).



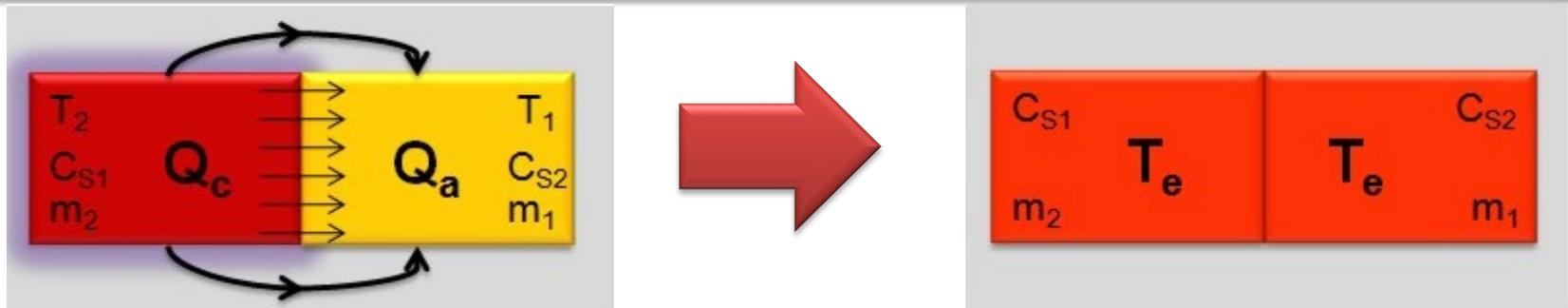
**La temperatura a cui si stabilizzano i due corpi si chiama temperatura d'equilibrio  $T_e$ .**

**Alla temperatura d'equilibrio  $T_e$  i due corpi cessano di scambiare calore.**

# TERMOLOGIA

## CALORE TEMPERATURA D'EQUILIBRIO

Determiniamo adesso, la temperatura di equilibrio di 2 corpi (isolati) di massa  $m_1$  e  $m_2$  con calori specifici  $C_{s1}$  e  $C_{s2}$  e temperature iniziali  $T_1$  e  $T_2$ , ( $T_1 < T_2$ )



In modo naturale, il calore (energia) fluisce dal corpo più caldo al corpo più freddo, il fenomeno si esaurisce quando la temperatura dei due corpi è la stessa

Il calore ceduto  $Q_c$  dal corpo 2 a temperatura  $T_2$  sarà lo stesso acquistato dal corpo 1  $Q_a$  a temperatura  $T_1$  con  $T_1 < T_2$

# TERMOLOGIA

## CALORE TEMPERATURA D'EQUILIBRIO

La temperatura finale di equilibrio  $T_e$  è sempre compresa tra  $T_1$  e  $T_2$

$$T_1 < T_e < T_2$$

Il calore ceduto è:



$$Q_C = C_{S2} m_2 (T_2 - T_e)$$

Il calore acquistato è:



$$Q_a = C_{S1} m_1 (T_e - T_1)$$

Il calore ceduto è uguale a quello acquistato (sistema isolato-conservazione dell'energia).

$$Q_a = Q_C$$

né deriva che:



# TERMOLOGIA

## CALORE TEMPERATURA D'EQUILIBRIO

$$C_{S2}m_2(T_2 - T_e) = C_{S1}m_1(T_e - T_1)$$



moltiplicando

$$C_{S2}m_2T_2 - C_{S2}m_2T_e = C_{S1}m_1T_e - C_{S1}m_1T_1$$



Separiamo  $T_e$

$$C_{S1}m_1\underline{T_e} + C_{S2}m_2\underline{T_e} = C_{S1}m_1T_1 + C_{S2}m_2T_2$$



Mettendo in evidenza  $T_e$

$$T_e(C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2) = C_{S1}m_1T_1 + C_{S2}m_2T_2$$



Dividendo ambo i membri per  
( $C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2$ )

$$T_e \frac{\cancel{(C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2)}}{\cancel{(C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2)}} = \frac{C_{S1}m_1T_1 + C_{S2}m_2T_2}{(C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2)}$$



Da cui

$$T_e = \frac{C_{S1}m_1T_1 + C_{S2}m_2T_2}{(C_{S1}m_1 + C_{S2}m_2)}$$

# TERMOLOGIA

## CALORE TEMPERATURA D'EQUILIBRIO

Nel caso di due masse uguali della stessa sostanza  $C_{s1}=C_{s2}=C_s$   
 $m_1=m_2=m$  la formula precedente diventa:

$$T_e = \frac{C_s m T_1 + C_s m T_2}{(C_s m + C_s m)}$$

Mettendo in evidenza i termini comuni

$$T_e = \frac{\cancel{C_s m} (T_1 + T_2)}{2 \cancel{C_s m}}$$

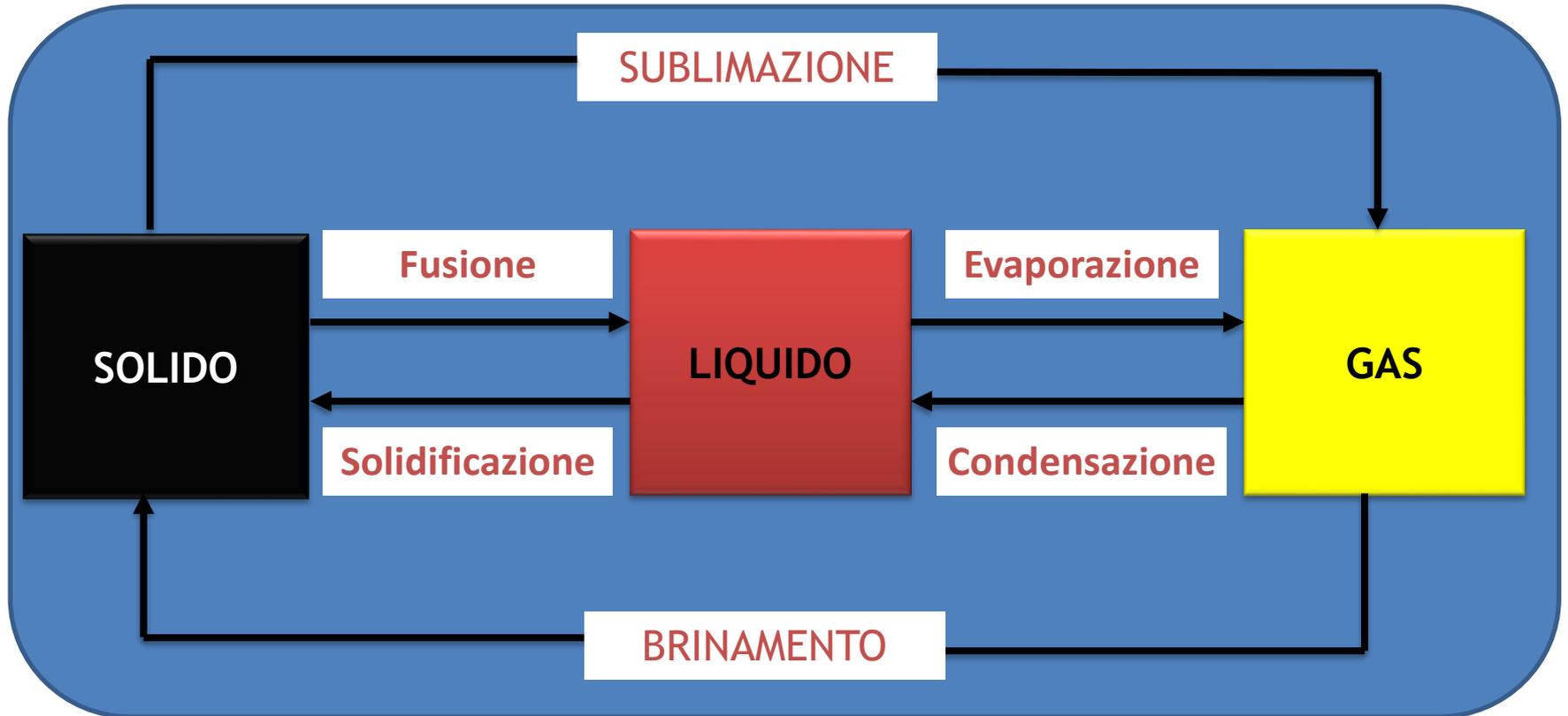


$$T_e = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$$

Nel caso di due masse uguali della stessa sostanza la temperatura di equilibrio è la media delle due temperature

# TERMOLOGIA

## Passaggi di stato



I passaggi di stato avvengono a temperatura costante.  
Il calore ceduto o acquistato serve per modificare i legami molecolari

# TERMOLOGIA

## PASSAGGI DI STATO: CALORI LATENTI

DEFINIZIONE: Il calore latente è la quantità di energia necessaria (calore) a far avvenire il passaggio di stato.

I calori latenti sono quanti i passaggi di stato ossia:

1. di fusione (solidificazione)



$C_{lf}$        $C_{ls}$

2. di vaporizzazione (condensazione)



$C_{le}$        $C_{lc}$

3. di sublimazione (condensazione)



$C_{lsu}$        $C_{lc}$

Formalizzando la definizione di calore specifico (indipendente dal particolare passaggio di stato, i valori invece cambiano) si ha:

$$C_{Lx} = \frac{Q}{m}$$

Che può essere espressa in questo modo

$$Q_{Lx} = C_{Lx} \bullet m$$

# TERMOLOGIA

CALORI LATENTI: FUSIONE (SOLIDIFICAZIONE) VAPORIZZAZIONE(CONDENSAZIONE)

## DEFINIZIONI

### Il calore latente di fusione

(o di solidificazione) è la quantità di energia necessaria a fondere (solidificare) completamente una massa unitaria di sostanza quando essa si trova alla temperatura di fusione (solidificazione)

$$\Rightarrow C_{Lf} = \frac{Q}{m}$$

### Il calore latente di vaporizzazione

(condensazione) è la quantità di energia necessaria a vaporizzare (condensare) completamente una massa unitaria di sostanza senza variazione di temperatura

$$\Rightarrow C_{Le} = \frac{Q}{m}$$

PER IL PRINCIPIO DELLA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA SI HA:

$$C_{lf} = C_{ls}$$

$$C_{le} = C_{lc}$$

# TERMOLOGIA

## PASSAGGI DI STATO: CALORI LATENTI COEFFICIENTI

TEMPERATURE E CALORI LATENTI DI FUSIONE DI ALCUNE SOSTANZE CALCOLATI A 1 Atm

SOSTANZE	TEMPERATURA DI FUSIONE ( °C )	CALORE LATENTE DI FUSIONE ( Kcal / kg )
Alluminio	660	64.6
Argento	961	21.1
Ghiaccio	0	79.7
Azoto	-210	6.2
Elio	-269.7	1.25
Idrogeno	-259	1.6
Etere etilico	-116	23.2
Ferro	1536	56
Iridio	2447	65.8
Mercurio	-39	2.8
Naftalene	80 (subl.)	35.7
Nichel	1455	71.8
Oro	1063	16.1
Paraffina	54	36
Platino	1774	27
Piombo	327	5.78
Rame	1083	50.6
Stagno	230	14
Tungsteno	3380	46
Zinco	419	24.1
Zolfo	183	9.35

# TERMOLOGIA

## PRODUZIONE DEL CALORE: COMBUSTIONE

L'energia termica (calore) può essere ottenuta sia da altre forme di energia (generalmente degradata) che come prodotto di una reazione chimica chiamata combustione (reazione tra un combustibile e un comburente).

**Si definisce potere calorifico  $P_c$**  o calore di combustione, la quantità di massima di calore che si può ricavare dalla combustione completa di una massa unitaria (o  $V$  unitario) di combustibile a pressione cost. **U.M. [J/kg - J/m<sup>3</sup>]**

Quando si parla di potere calorifico in realtà si deve parlare di potere calorifico superiore ( $P_{CS}$ ) e inferiore ( $P_{CS}$ ) così definiti:

Il **potere calorifico superiore** ( $P_{CS}$ ) definito come sopra tiene conto del calore di condensazione del vapore d'acqua durante la combustione .

Il **potere calorifico inferiore** ( $P_{Ci}$ ) invece non del calore di condensazione del vapore d'acqua durante la combustione.

# TERMOLOGIA

## PRODUZIONE DEL CALORE: POTERE C. SUPERIORE E INFERIORE

COMBUSTIBILE	POTERE C. SUPERIORE [MJ/kg]	POTERE C. INFERIORE [MJ/kg]
Carbonio (grafite)	32,65	-
Legna secca (umidità <15%)	-	15,9
Carbone	-	31,4
Gasolio	44,00	41,0
Benzina	46,00	42,0
Alcool etilico	30,00	27,1
Propano	49,40	49,4
Butano	46,15	46,1
Trementina	45,40	45,4

Facendo riferimento a una massa  $m$  di combustibile e al potere calorifico inferiore  $P_{Ci}$ , Il calore sviluppato dalla sua combustione completa è:

$$Q = P_{ci} \cdot m \quad [J]$$

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE

Il calore si può trasmettere per:

**1. CONDUZIONE**

**2. CONVEZIONE**

**3. IRRAGGIAMENTO**

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE

### 1.CONDUZIONE

La trasmissione del calore avviene senza spostamento di materia, ma solo di energia. È tipica dei solidi.

### 2.CONVEZIONE

La trasmissione del calore avviene mediante lo spostamento di materia che si ha nei fluidi con le correnti convettivi.

### 3.IRRAGGIAMENTO

La trasmissione del calore avviene per mezzo delle radiazioni elettromagnetiche.

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE

### CONDUZIONE

La potenza termica che fluisce attraverso una parete di area A e spessore d è:

$$P_t = \frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta T$$

**Dove:**  $\lambda$  è il coefficiente di conducibilità termica, A è l'area della parete, d è lo spessore della parete, Q è quantità di calore trasmesso, T gradiente termico, t intervallo di tempo.

### CONVEZIONE

La potenza termica trasmessa in questo caso è:

$$P_t = \frac{Q}{\Delta t} = h \cdot \Delta T$$

**Dove:** h è una costante detta coefficiente di convezione

### IRRAGGIAMENTO

La potenza termica trasmessa in questo caso è:

$$P_t = \frac{Q}{\Delta t} = \sigma \cdot T^4$$

$\sigma = 5,8 \times 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>•K<sup>4</sup>)] costante di Stefan-Boltzmann

**Dove per tutte:**  $\Delta T$  è la variazione di temperatura (gradiente termico) -  $\Delta t$  è l'intervallo di tempo

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE PER CONDUZIONE

### CONDUZIONE: STRATI DI PIÙ MATERIALI

Nel caso di una parete formata da un solo strato:

$$P_t = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta t$$

Dove: -  $\lambda$  è il coeff. Conduc. Termica  
-  $A$  è l'area della parete  
-  $d$  è lo spessore della parete

Quando il calore per trasferirsi deve attraversare più strati di materiali diversi di spessori  $d_1, d_2$  ..ecc (esempio di una parete formata da più materiali), è necessario definire una grandezza che si chiama resistività dello strato data:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Per cui:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Dove:

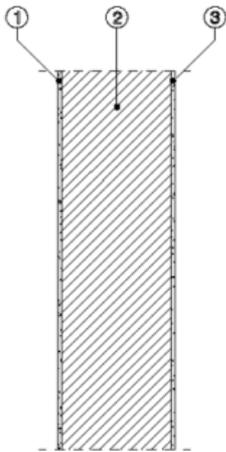
$R_t$   
 $R_1; R_2; \dots R_n$   
 $d$

**resistenza superficiale interna;**  
resistenze termiche utili di ciascuno strato;  
**spessore dello strato di materiale nel componente;**

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE PER CONDUZIONE

### ESEMPIO DI CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA TOTALE PER PARETE A PIÙ STRATI DI MATERIALI DIVERSI



	Descrizione	spessore (m)	conducibilità $\lambda$ W/mK	conduttanza C W/m <sup>2</sup> K	resistenza termica R m <sup>2</sup> K/W	Riferimento normativo
$R_{si}$	Resistenza termica superf. interna				0,13	UNI 6946
1	Malta di gesso con inerti	0,02	0,29		0,0690	UNI 10351
2	Muratura in laterizio alveolato	0,25			0,8600	UNI 10355
3	Malta di calce o di calce e cemento	0,02	0,90		0,0222	UNI 10351
$R_{se}$	Resistenza termica superf. esterna				0,04	UNI 6946
	Resistenza totale della struttura	$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$			1,1212	m <sup>2</sup> K/W
	Trasmittanza termica della struttura secondo UNI 6946		$U = 1/R_T$		0,8919	W/m <sup>2</sup> K

# TERMOLOGIA

## LA PROPAGAZIONE DEL CALORE

Conducibilità termica di alcune sostanze comuni

SOSTANZA	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
diamante	1000 - 2600
argento	430
rame	390
oro	320
alluminio	236
ottone	111
platino	70
quarzo	8
vetro	1
acqua distillata	0,6
laterizi	0,8
lana	0,05
vermiculite	0,046
polistirolo espanso	0,03
aria secca (a 300 K, 100 kPa)	0,026

