

# Trasmissione del calore: Conduzione

Prepariamo una ciotola con tre cucchiaini:

- uno di legno
- uno di plastica
- uno di metallo

Usiamo un pezzettino di burro per attaccare un mattoncino Lego ad ogni cucchiaino.

Versiamo acqua calda nella ciotola e aspettiamo...



# Trasmissione del calore: **Conduzione**



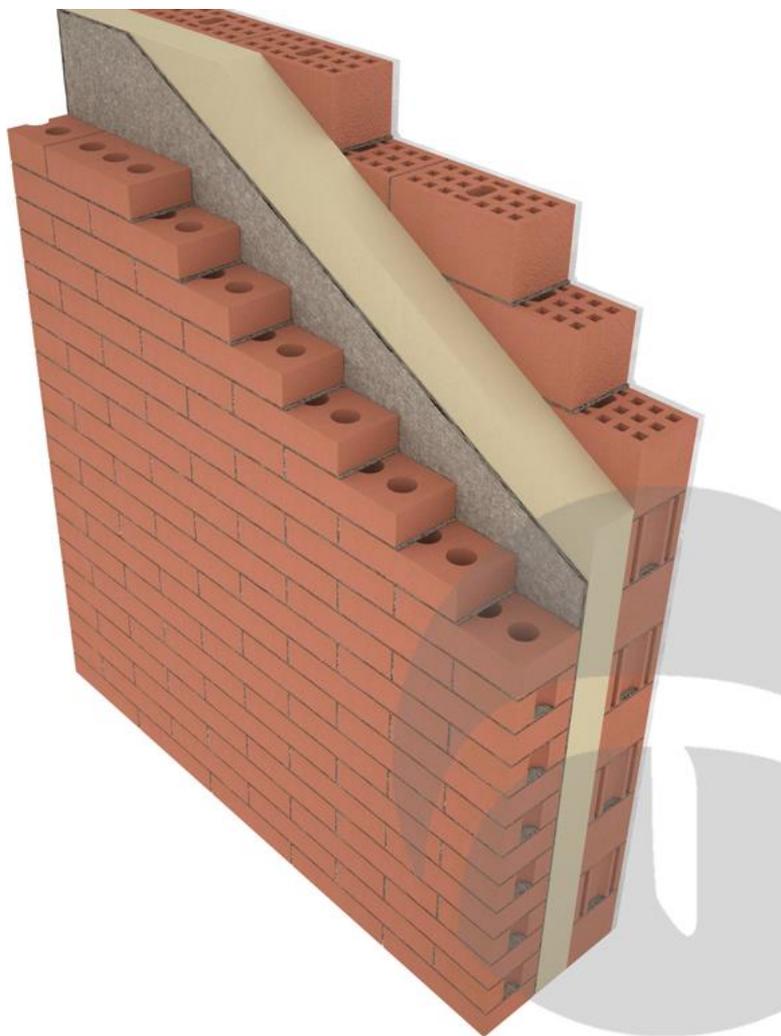
# Trasmissione del calore: **Conduzione**

Il mattoncino Lego attaccato al cucchiaino di metallo cade dopo circa 5 minuti.

Il mattoncino attaccato al cucchiaino di plastica resiste circa 30 minuti.

Dopo 35 minuti cade anche il mattoncino attaccato al cucchiaino di legno.

## Sistema Costruttivo | Muratura con isolante interposto e mattoni



**Spessore:** 340 (mm)

**Resistenza:** 3.046 ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

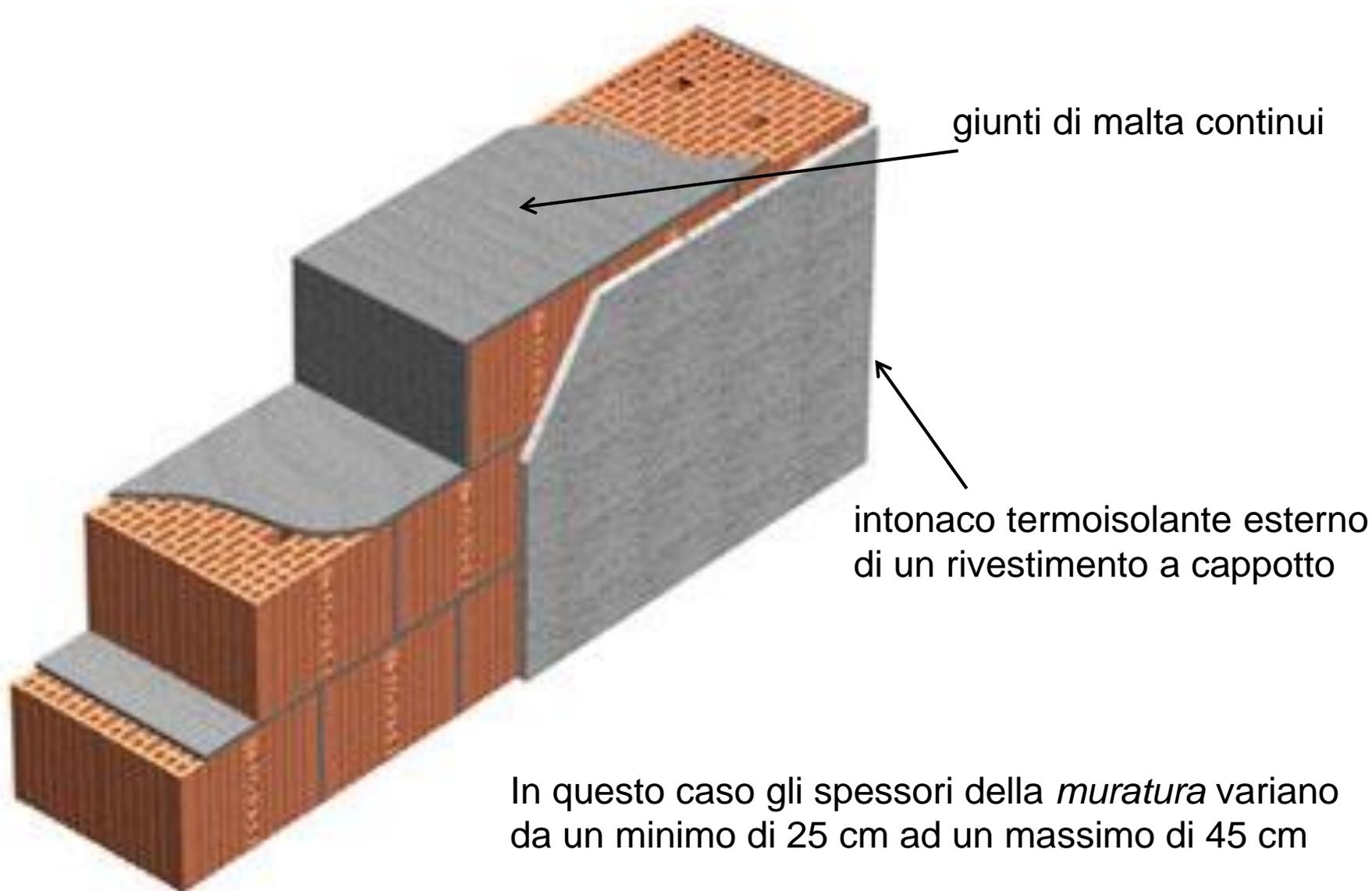
**Capacità termica aerea:** 57.425 ( $\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}$ )

**Trasmittanza:** 0.328 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

**Massa superficiale:** 457 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )

**Fattore di attenuazione:** 0.12

## Sistema Costruttivo | Muratura in laterizio monostrato

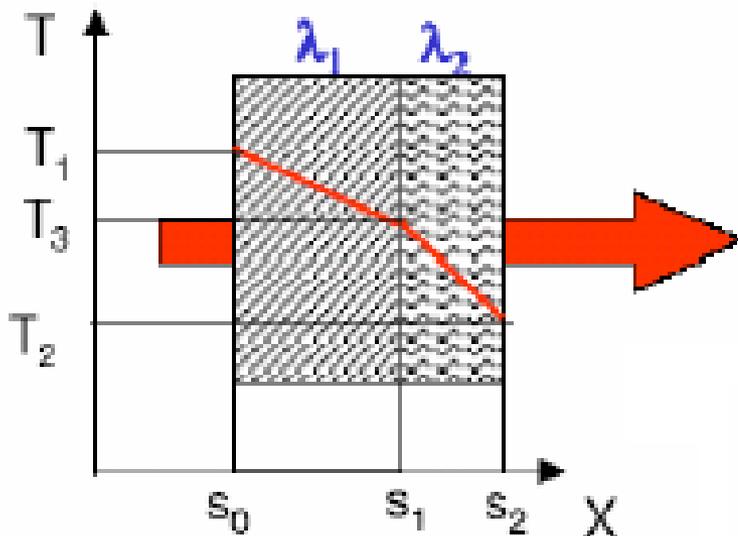


# CASO DI UNA PARETE DOPPIO STRATO

(trasmissione del calore SOLO per conduzione)

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R_{\text{cond,tot}}} S_1 (T_1 - T_2)$$

Dati:



$S_1$ : 20 m<sup>2</sup>  
 $T_1$ : 20 °C  
 $T_2$ : 0°C  
 $\lambda_1$ : 1W/mK  
 $S_1$ : 0,4 m  
 $\lambda_2$ : 0,04W/mK  
 $S_2$ : 0,1 m

$$R_{\text{Totale}} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} = \frac{0,4}{1} + \frac{0,1}{0,04} = 0,4 + 2,5 = 2,9 \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{2,9} * 20 * (20 - 0) = 138 [W]$$

$$Q_{\text{cond}} = [W / (m^2 K)] * [m^2] * [K] = [W]$$

## CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO

Una parete piana è costituita da tre strati omogenei disposti in serie. La temperatura  $T_{pi}$  è di  $20^{\circ}\text{C}$  e quella della parete esterna è di  $3^{\circ}\text{C}$ . Gli strati hanno le seguenti caratteristiche:

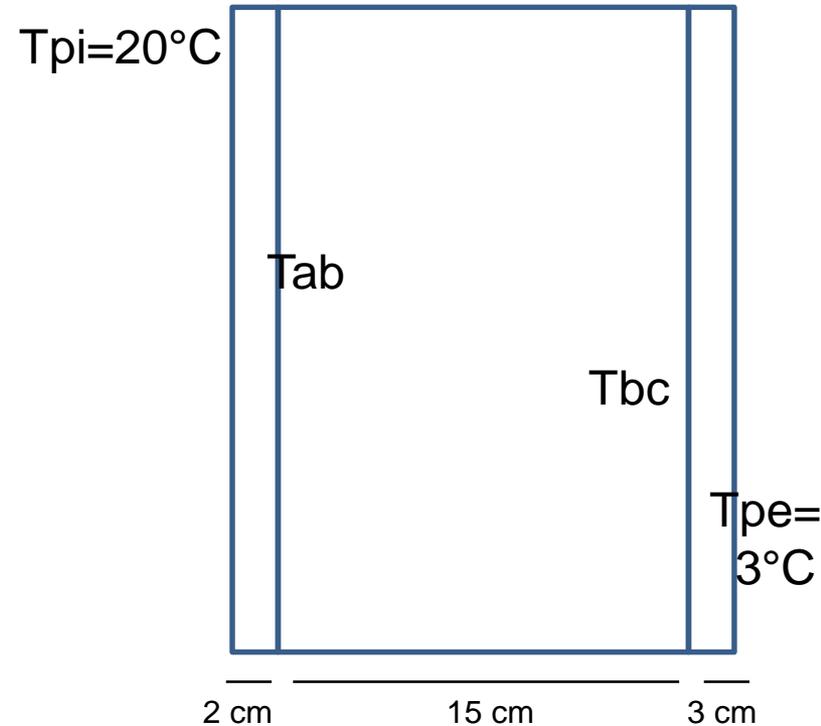
A) Spessore 2 cm, conduttività termica  $0,65 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

B) Spessore 15 cm, conduttività termica  $0,9 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

C) Spessore 3 cm, conduttività termica  $1,2 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Calcolare:

1. Il flusso termico trasmesso attraverso la parete
2. La distribuzione delle temperature all'interno della parete
3. Lo spessore dello strato di isolante (conduttività termica  $0,042 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ) da aggiungere alla parete in modo che, a parità di temperature degli ambienti, il flusso termico si riduce del 50%.



## CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO: 1° quesito

Calcolo del flusso termico  $q$  in condizioni stazionarie  $q = \Delta T/R$

dove  $R$  è la resistenza termica globale allo scambio termico della parete

$$R = R_A + R_B + R_C$$

$$= s_a/\lambda_a + s_B/\lambda_B + s_C/\lambda_C =$$

$$0,02/0,65 + 0,15/0,90 + 0,03/1,2 = 0,215 \text{ [m}^2 \text{ °C/W]}$$

$K$  è la trasmittanza termica pari a:  $K=1/R=4,65 \text{ [W/ m}^2 \text{ °C]}$

**Il flusso termico risulta  $q = (20-3)/0,215 = 79 \text{ [W/ m}^2 \text{ ]}$**

## CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO: 2° quesito

Regime stazionario >>>> (q costante) posso scrivere  $q = (T_{p,i} - T_{ab})/R$ . Avendo precedentemente determinato q resta incognita  $T_{ab} \Rightarrow T_{ab} = T_{p,i} - qR_{ab}$

La temperatura sulla superficie di contatto tra lo strato A) e quello B) è:

$$T_{ab} = T_{pi} - (q \cdot S_a / \lambda_a) = 20 - (79 \cdot 0,02 / 0,65) = \mathbf{17,5 \text{ [}^\circ\text{C]}}$$

$$T_{bc} = T_{pi} - q(S_a / \lambda_a + S_b / \lambda_b) = 20 - 79(0,02 / 0,65 + 0,15 / 0,9) = \mathbf{4,99 \text{ [}^\circ\text{C]}}$$

$$T_{p,e} = T_{pi} - q(S_a / \lambda_a + S_b / \lambda_b + S_c / \lambda_c) = 20 - 79(0,02 / 0,65 + 0,15 / 0,9 + 0,03 / 1,2) = \mathbf{3 \text{ [}^\circ\text{C]}}$$

## CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO: 3° quesito

Per calcolare lo spessore di isolante necessario affinché il flusso termico si riduca del 50%, cioè affinché si abbia un flusso  $q'$  pari al 50% di  $q$ , a parità di temperature interna ed esterna occorre individuare la nuova resistenza  $R'$  corrispondente:  $q' = 0,5q = 0,5 \cdot 79 = 39,5 \text{ [W/ m}^2 \text{]}$   $R' = \Delta T/q' = (20-3) / 39,5 = 0,43 \text{ [m}^2 \text{ °C/W]}$

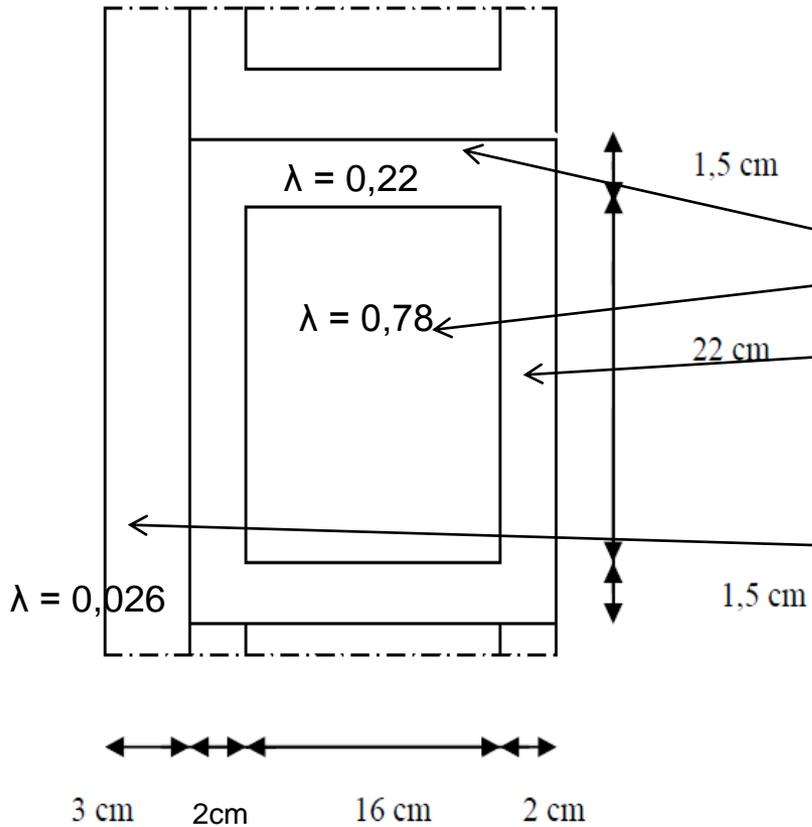
Ma  $R'$  è data dalla resistenza precedente incrementata di quella dello strato di isolante  $R' = R + s_{is} / \lambda_{is}$

$$s_{is} / \lambda_{is} = R' - R$$

$$s_{is} = \lambda_{is} (R' - R) = 0,042 \cdot (0,43 - 0,215) = \mathbf{0,009 \text{ [m]}}$$

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

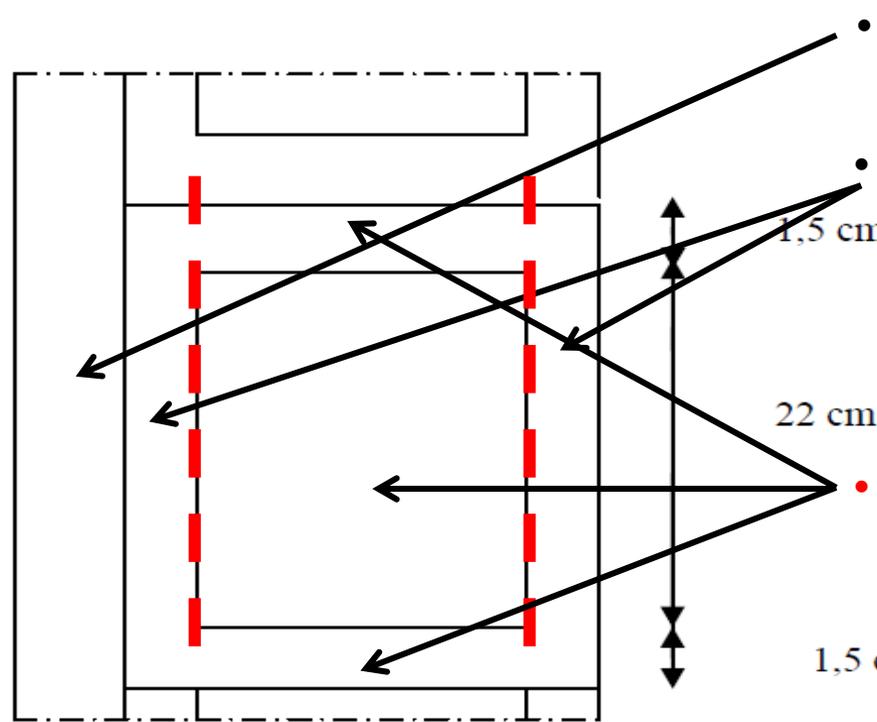
(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



Una parete è costituita da lunghi mattoni orizzontali [ $\lambda = 0,78 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ] da 16 cm x 22 cm in sezione trasversale, separati da strati di malta [ $\lambda = 0,22 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ] da 3 cm di spessore. Vi sono anche strati di malta da 2 cm di spessore su ciascuna faccia del mattone e una schiuma rigida [ $\lambda = 0,026 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ ] da 3 cm di spessore sul lato interno della parete. Calcolare la resistenza totale della parete al calore passante ipotizzando che ci sia una differenza di T fra una parte e l'altra.

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



- Strato 1 è omogeneo lungo tutta la h della parete

- Strato 2 e quello finale sono omogenei lungo tutta la h della parete

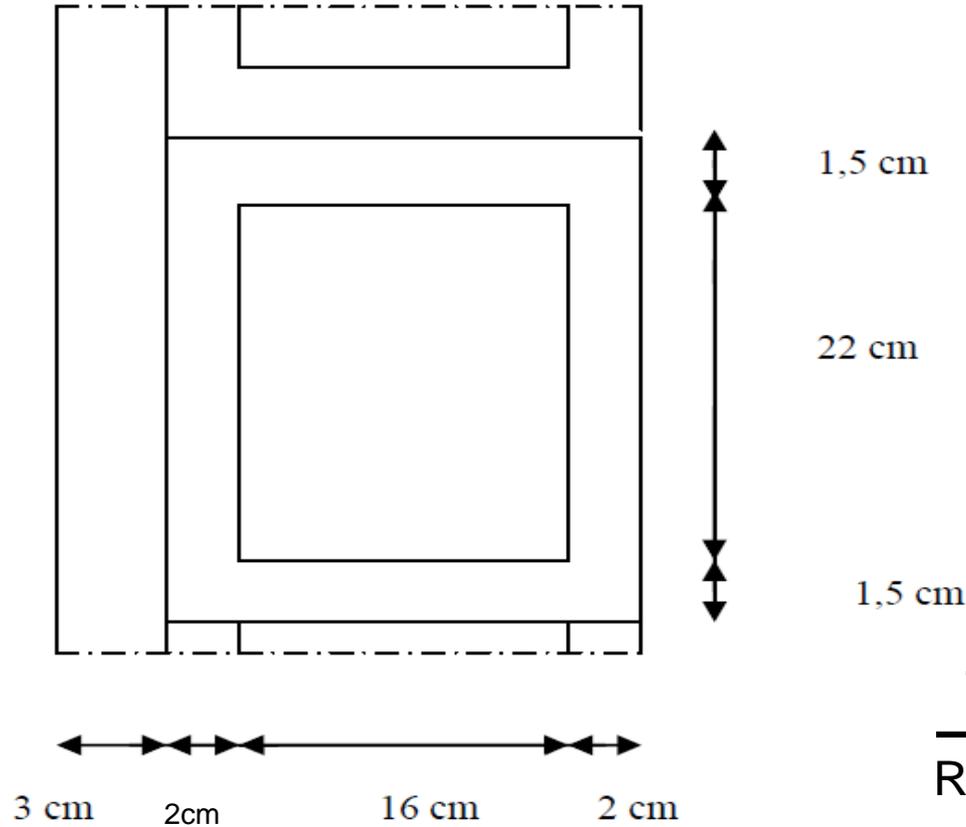
- **Strato centrale del mattone non è omogeneo lungo tutta la h della parete**

1,5 cm

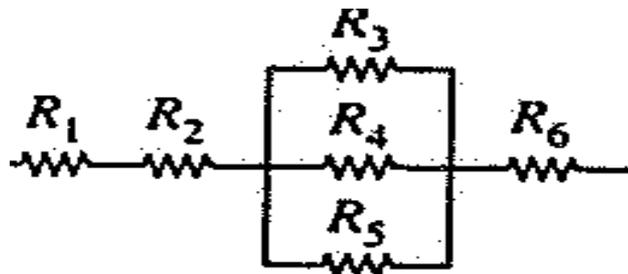
3 cm    2cm    16 cm    2 cm

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



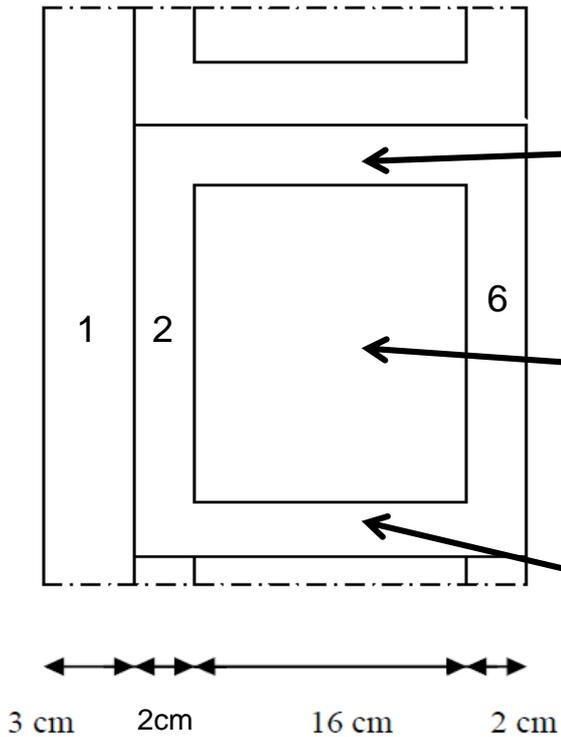
$$\frac{1}{R_{\text{PARALLELO}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$$



$$R_{\text{totale}} = R_1 + R_2 + R_{\text{PARALLELO}} + R_6$$

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



$$A' = A_1' + A_2' + A_3' = 25 \text{ cm}$$

$$R_3 = \frac{S_3}{\lambda_3 \cdot A_1'}$$

$$R_4 = \frac{S_4}{\lambda_4 \cdot A_2'}$$

$$R_5 = \frac{S_5}{\lambda_5 \cdot A_3'}$$

$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1 \cdot A'}$$

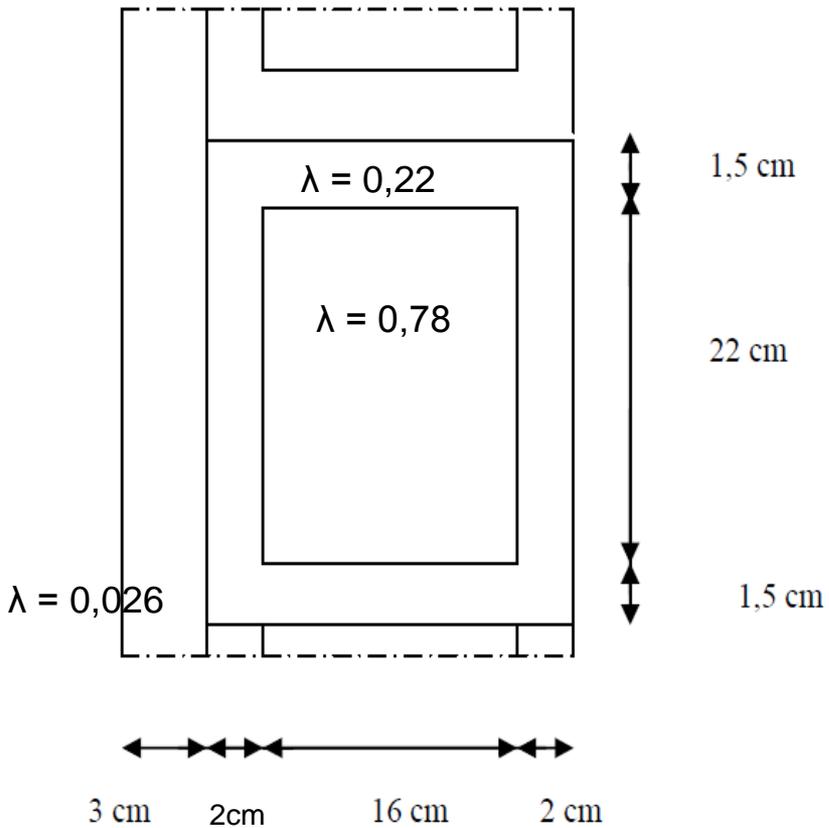
$$R_2 = \frac{S_1}{\lambda_2 \cdot A'}$$

$$R_6 = \frac{S_1}{\lambda_6 \cdot A'}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_{\text{PARALLELO}} + R_6$$

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

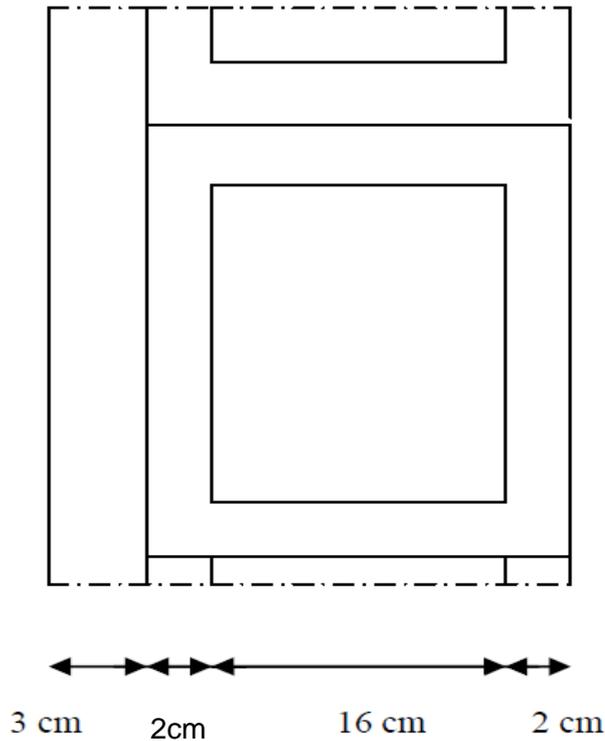
(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



Una parete alta 3 m e larga 5 m è costituita da lunghi mattoni orizzontali [ $\lambda = 0,78$  W/(m°C)] da 16 cm x 22 cm in sezione trasversale, separati da strati di malta [ $\lambda = 0,22$  W/(m°C)] da 3 cm di spessore. Vi sono anche strati di malta da 2 cm di spessore su ciascuna faccia del mattone e una schiuma rigida [ $\lambda = 0,026$  W/(m°C)] da 3 cm di spessore sul lato interno della parete. Calcolare la resistenza totale della parete al calore passante ipotizzando che ci sia una differenza di T fra una parte e l'altra.

# CASO DI UNA PARETE MULTISTRATO CON RESISTENZA IN PARALLELO

(trasmissione del calore SOLO per conduzione)



$$R_1 = 0,03 / (0,026 * 0,25) = 4,6$$

$$R_2 = 0,02 / (0,22 * 0,25) = 0,36$$

$$R_6 = 0,02 / (0,22 * 0,25) = 0,36$$

$$R_3 = \frac{0,16}{0,22 * 0,015} = 48,48$$

$$R_4 = \frac{0,16}{0,78 * 0,22} = 0,94$$

$$R_5 = R_3 = 48,48$$

$$\frac{1}{R_{\text{PARALLELO}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = 1,10$$

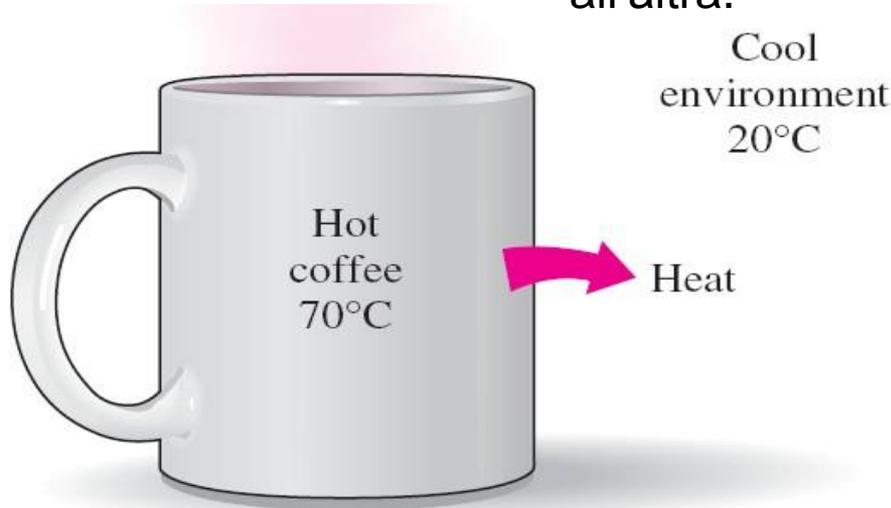
$$R = R_1 + R_2 + R_{\text{PARALLELO}} + R_6 = \mathbf{6,22}$$

# Trasmissione del calore:

- Conduzione
- **Convezione**
- Irraggiamento

# Cos'è la Convezione:

È lo scambio di calore che avviene tra una superficie e un fluido che si trovano a diversa temperatura e in movimento l'uno rispetto all'altra.

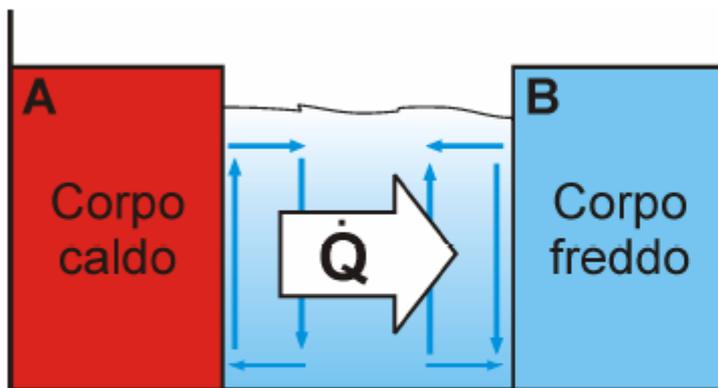


Il calore si disperde nel verso delle temperature decrescenti (dall' ambiente più caldo verso quello più freddo):

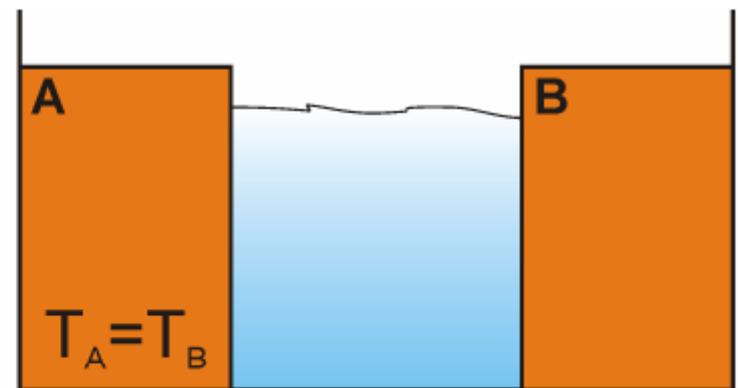
- attraverso il materiale solido (struttura molecolare fissa con particelle che vibrano attorno alla posizione di equilibrio) si propaga per conduzione termica
- dall'ambiente caldo verso la superficie solida per **convezione** e irraggiamento
- dalla superficie solida più fredda verso l'ambiente più freddo per **convezione** e irraggiamento

# Convezione

- Scambio termico tra un solido ed un fluido in movimento che ne lambisce la superficie
- È quindi vincolato al trasporto di materia per effetto delle forze che agiscono sul fluido e che si generano a causa delle variazioni di temperatura.

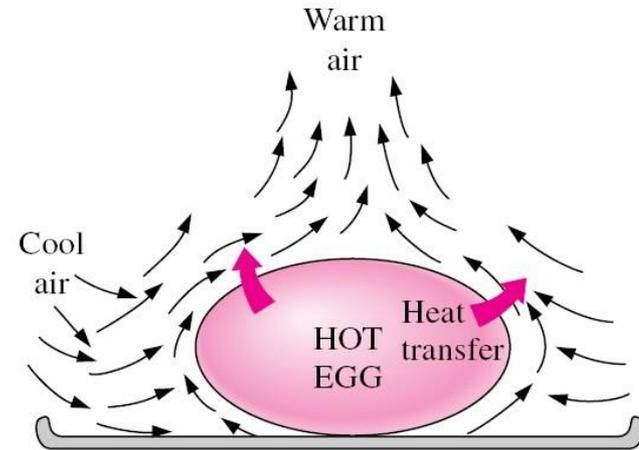
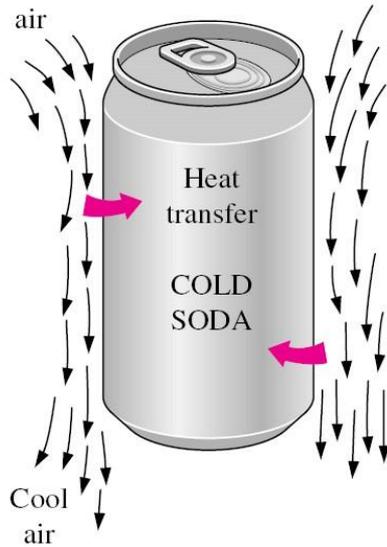


FASE 1



FASE 2

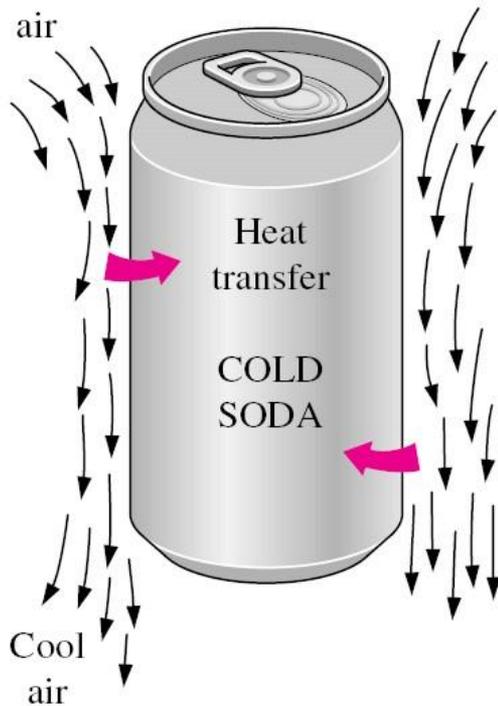
# Convezione



- **Forze ascensionali** che sono responsabili del moto naturale dell'aria per effetto di una differenza di temperatura e pressione
- **Forze di viscosità** che oppongono al moto dell'aria.

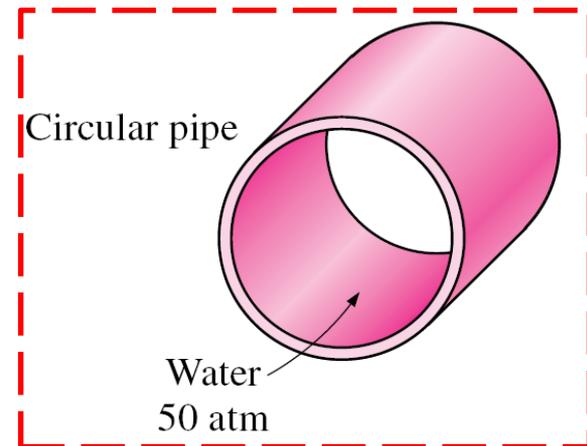
## CONVEZIONE NATURALE

Moto dato dalle forze di galleggiamento (si tratta di forze ascensionali che derivano dalle differenze di densità tra le porzioni di fluido, causate dalle variazioni di temperatura nel fluido stesso.



## CONVEZIONE FORZATA

Flusso causato da mezzi esterni (es: pompe, ventilatori, pale, ecc.)



# Flusso di calore per convezione

Equazione del flusso termico specifico trasmesso per convezione trasmesso tra una superficie a temperatura  $T_s$  e un fluido a temperatura  $T_a$ :

$$\mathbf{q} = \mathbf{h}_c(\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_a) \quad (\mathbf{W}/\mathbf{m}^2)$$

$\mathbf{h}_c$  è detto coefficiente di scambio termico per convezione ( $\mathbf{W}/\mathbf{m}^2\mathbf{K}$ )

Esso dipende dalle condizioni nello strato limite:

- Geometria della parete
- Natura del moto del fluido
- Velocità, pressione e tante altre variabili che rendono la determinazione matematica di  $h$  estremamente difficile.

$$h_c = h_c[\rho, c_p, \mu, \lambda, l, u_f, \alpha \cdot g, (T_p - T_f)]$$

Il coefficiente di scambio termico convettivo ( $h_c$ ) dipende:

- 1) dalle caratteristiche del fluido
  - densità  $\rho$
  - viscosità dinamica  $\eta$
  - calore specifico  $C_p$
  - conduttività termica  $\lambda$
  
- 2) dalle condizioni di moto del fluido
  - velocità  $u$
  - accelerazione gravitazionale  $\alpha \cdot g$
  
- 3) dalla geometria del sistema
  - dimensione  $l$
  
- 4) dalla differenza di temperatura fra fluido e sistema  $\Delta t$

# Alcuni valori di $h$

<b>Processo</b>	<b><math>h_c</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>
<b>Convezione naturale</b>	
Gas	2-25
Liquidi	50-1000
<b>Convezione forzata</b>	
Gas	25-250
Liquidi	100-20000