

Grandezze caratteristiche della trasmissione del calore

Temperatura

Grandezza fondamentale che caratterizza i fenomeni termici. Indica lo stato energetico nel quale si trova il corpo materiale (gas, liquido, solido). Il **termometro** è lo strumento di misura della temperatura e si basa sulla espansione termica di un corpo per cui *variazioni di temperatura* sono registrate come *innalzamenti o abbassamenti del liquido termometrico*.

Calore

Il calore è una forma di energia, la sua unità di misura nel SI. È il Joule [J]. Un Joule è la quantità di calore che bisogna fornire ad un sistema per aumentarne di un grado °K la sua temperatura [J/°K]. Il calore è una forma di energia, la sua unità di misura nel S.I. è il Joule [J]. Un Joule è la quantità di calore che bisogna fornire ad un sistema per aumentarne di 1 °K la sua temperatura [J/°K]. Nella pratica viene tuttavia ancora spesso usata come unità di misura la caloria [cal].

Ricordiamo:

$$1 \text{ Joule} = 0,2388 \text{ cal} \quad 1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

il passaggio di calore da un sistema ad un altro può avvenire se:

- I due sistemi sono a temperature diverse
- I due sistemi non sono separati da una superficie adiabatica

Il calore si propaga spontaneamente da una zona a temperatura più alta ad una zona a temperatura più

bassa

Grandezze caratteristiche della trasmissione del calore

Calore specifico

E' la quantità di calore necessaria per aumentare di un °K la massa unitaria secondo le condizioni a cui è soggetto il sistema [J/kg°K].

La quantità di calore necessaria dipende anche dalla temperatura, ma se non si richiede un particolare precisione si può trascurare la dipendenza dalla temperatura iniziale.

Quindi, la quantità di calore necessaria per produrre una certa variazione di temperatura è proporzionale alla massa e alla variazione stessa:

$Q = (c_p M (T_1 - T_0))$ dove c_p è il calore specifico [J/kg°K]

$c_p M$ è la capacità termica [J/K].

Flusso di calore “Q”

E' la quantità di calore trasmessa o sviluppata nell'unità di tempo. La sua unità di misura è il Watt [W].

Flusso di calore areico “q”

E' il flusso di calore per unità di superficie trasmittente [W/m²].

Grandezze caratteristiche della trasmissione del calore

Conduttività termica “ λ ”

E' un coefficiente tipico per ogni materiale, ed esprime la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa l'unità di area ($A= 1\text{m}^2$) avente lo spessore unitario ($s= 1\text{m}$) quando tra le due facce del materiale venga mantenuta la differenza di temperatura unitaria **$[\text{W}/\text{m}^\circ\text{K}]$** .

Conduttanza unitaria “C”

Rappresenta il flusso di calore che passa attraverso un materiale di spessore “s” avente superficie unitaria “S” di 1m^2 per una differenza di temperatura di un $^\circ\text{K}$ **$[\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{K}]$** .

Resistenza termica unitaria “r”

E' l'inverso della conduttanza termica $r=1/C= s/ \lambda$ **$[\text{m}^2^\circ\text{K}/\text{W}]$** .

Trasmittanza termica “K”

Rappresenta il coefficiente di trasmissione termica globale attraverso una parete, ed è l'inverso della resistenza termica interna di una parete $R= s/S \lambda$ **$[\text{W}/\text{m}^2^\circ\text{K}]$** .

Trasmissione del calore:

Il calore è definito come la forma di energia che si trasferisce tra due sistemi (o tra un sistema e l'ambiente) in virtù di una **differenza di temperatura**: ne consegue, quindi, che non può esistere alcuna trasmissione di calore tra due sistemi alla stessa temperatura

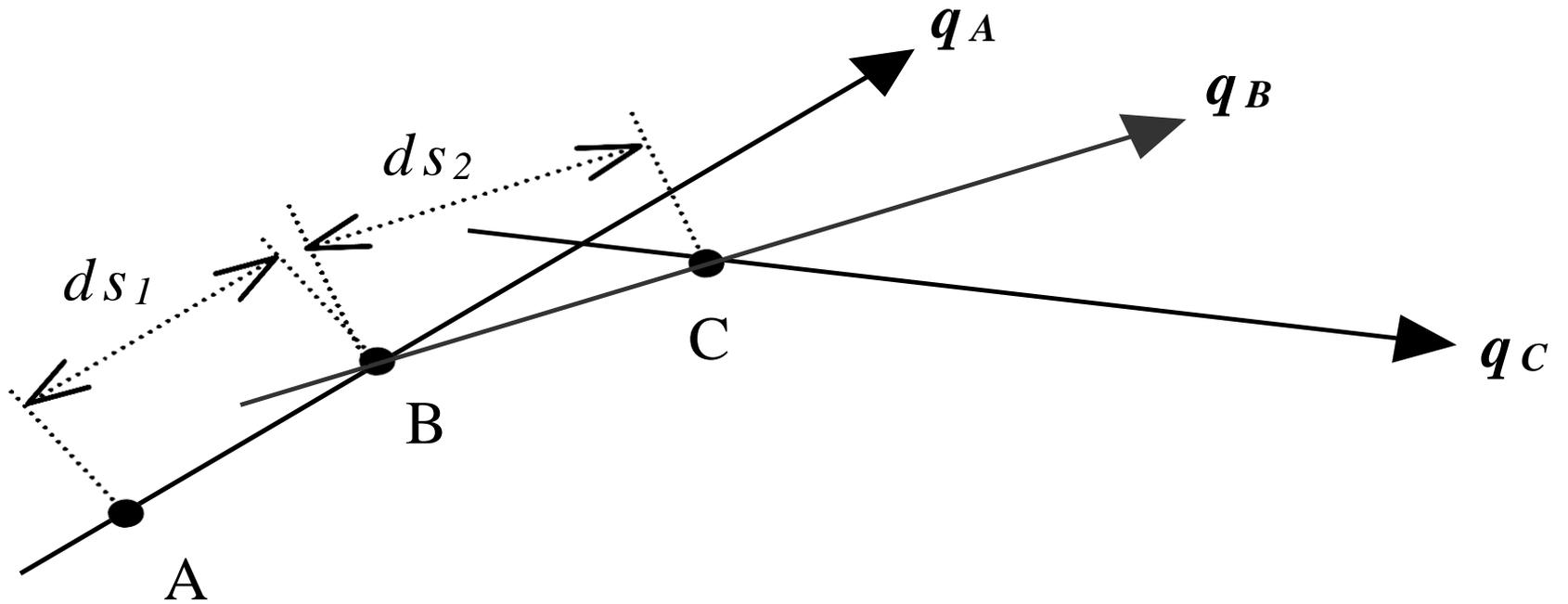
Le modalità con cui avviene lo scambio di calore sono tre:

- **Conduzione**

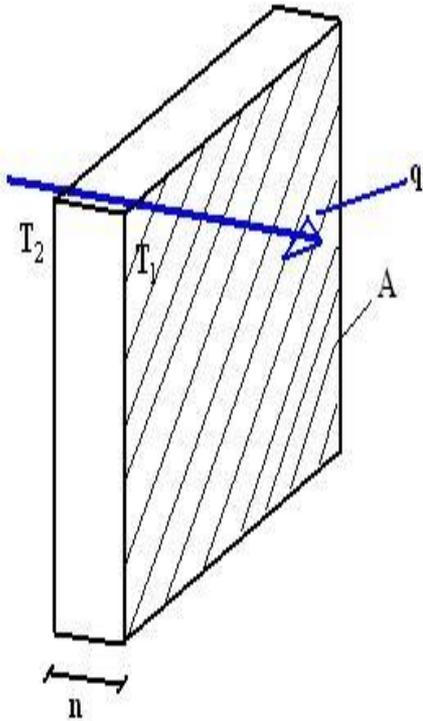
- Convezione

- Irraggiamento

Costruzione di una linea di flusso



Il primo a studiare la **trasmissione di calore per conduzione** fu Fourier che enunciò un suo postulato. Questo si riferisce ad una situazione rappresentata qui in figura:



Si tratta di una piastra piana di materiale omogeneo sulle cui facce si trova una differenza di temperatura; si stabilirà un flusso termico diretto dalla superficie isoterma a temperatura T_2 verso la superficie isoterma a temperatura T_1 , ortogonale ad entrambe. Sperimentalmente, Fourier ha scoperto che tale quantità di calore trasmessa attraverso la piastra è proporzionale a:

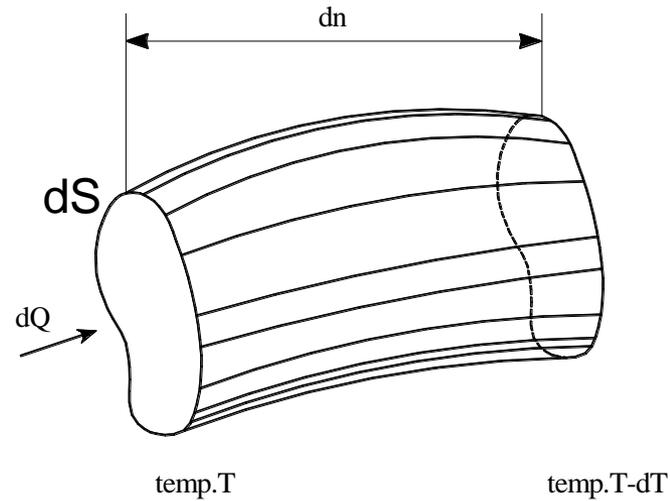
1. una costante λ da definire
 2. tempo di osservazione τ
 3. area interessata dal flusso termico A
 4. differenza di temperatura delle due facce ΔT
- e inversamente proporzionale a:

1. spessore della piastra n

in definitiva il postulato di Fourier per un elementino infinitesimo si esprime come:

$$dQ = \frac{\lambda * dA * dT * d\tau}{dn}$$

Tubo di flusso



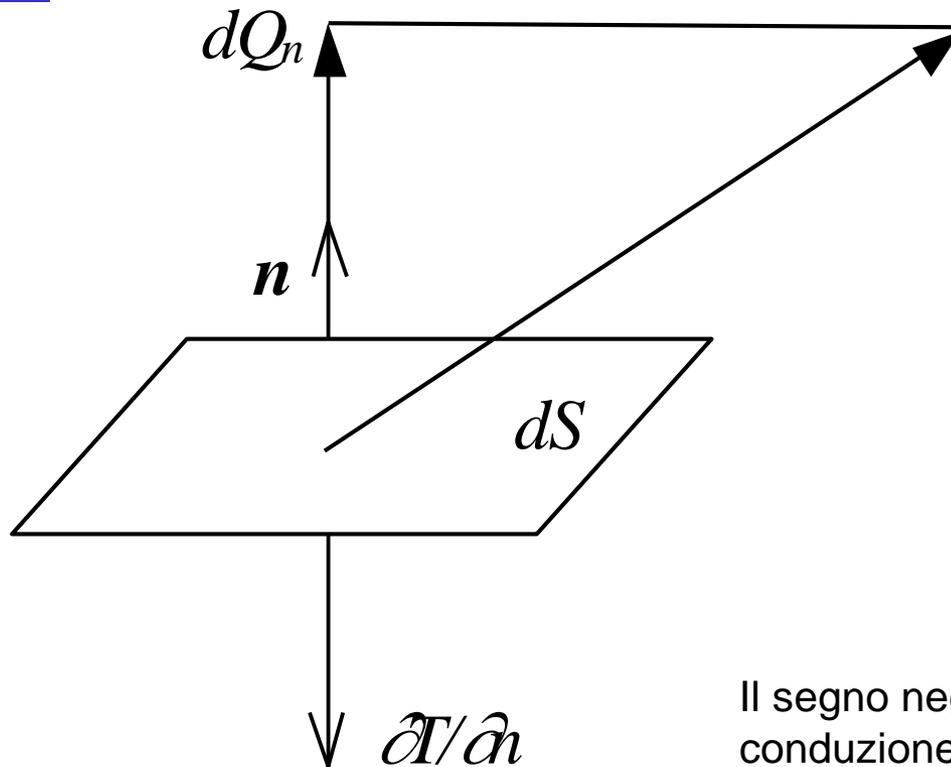
$$\Delta Q = \lambda \frac{\Delta S \Delta \tau \Delta T}{\Delta n}$$

sperimentale

$$dQ = \lambda \frac{dS d\tau dT}{dn}$$

derivazione matematica

Configurazione esplicativa del postulato di Fourier



A questo punto ci interessa conoscere il flusso passante attraverso una superficie:

Nel caso limite di $\partial n \rightarrow 0$

la precedente espressione si riduce a:

$$dQ_n = -\lambda \cdot d\tau \cdot dS \frac{\partial T}{\partial n}$$

Il segno negativo poiché il calore si trasmette per conduzione nel verso delle temperature decrescenti ed il gradiente delle temperature diventa negativo quando la temperatura diminuisce per x crescente

dS = elemento di superficie orientato arbitrariamente

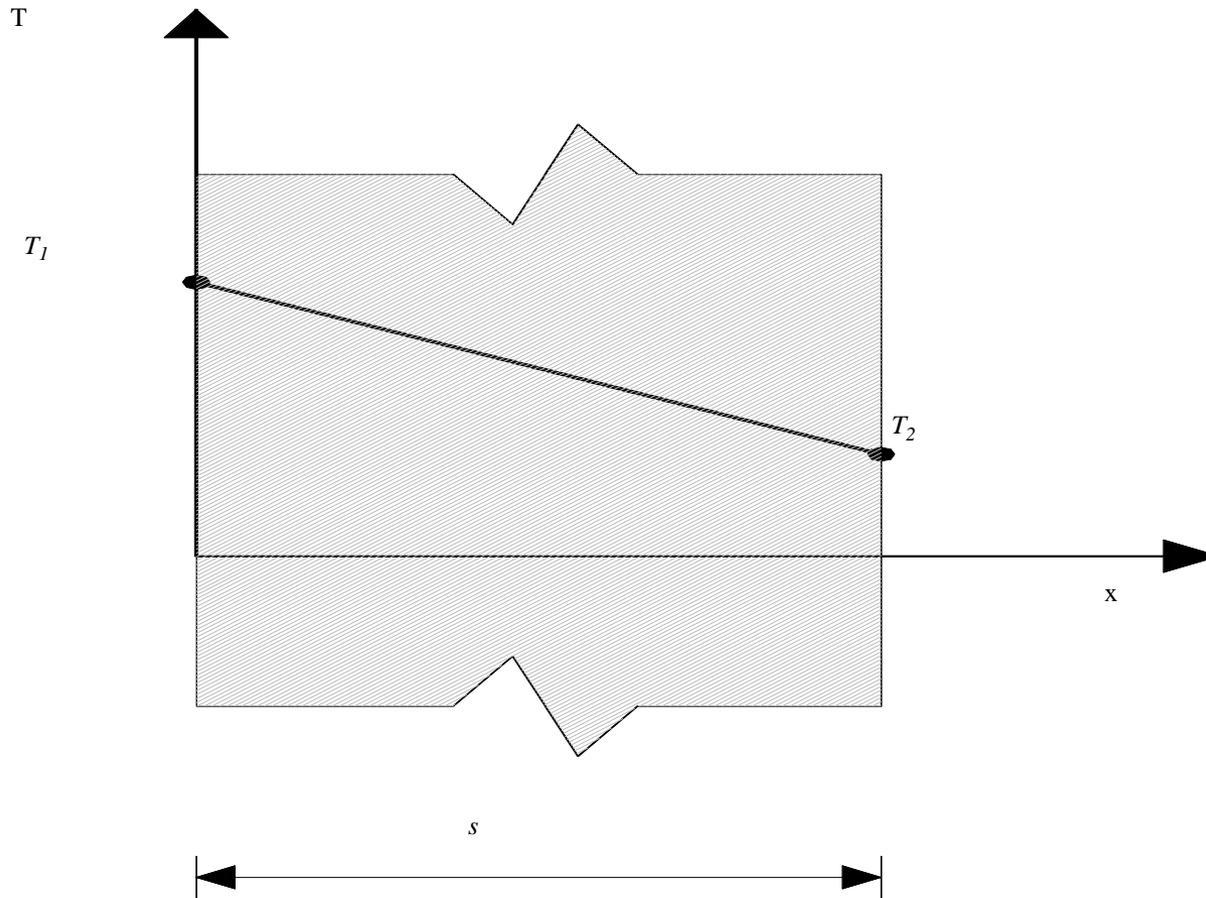
n = normale a dS

$\frac{\partial T}{\partial n}$ = gradiente di temperatura lungo n

dQ = calore che attraversa dS

dQ_n = componente di dQ lungo n

Andamento della temperatura in regime stazionario su una parete piana



$s =$ spessore della parete

$T_1, T_2 =$ temperature delle facce estreme

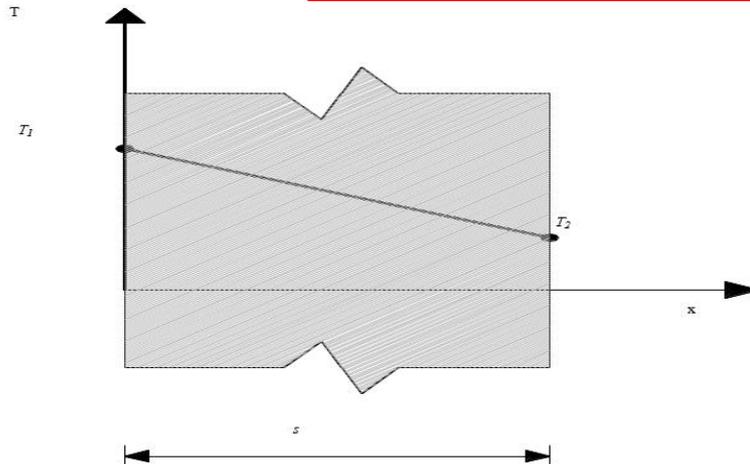
Andamento della temperatura in regime stazionario su una parete piana

A questo punto separando le variabili nella precedente equazione ed integrando da $x=0$ dove $T(0)=T_1$ a $x=s$ dove $T(s)=T_2$, si ottiene:

$$\int_{x=0}^s Q_{\text{cond, parete}} dx = - \int_{T=T_1}^{T=T_2} \lambda S dT$$

Eseguendo l'integrazione e riordinando si ha:

$$dQ = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{s}$$



s = spessore della parete
 T_1, T_2 = temperature delle facce estreme

$$dQ = -\lambda \cdot d\tau \cdot dS \frac{\partial T}{\partial n}$$

$$dQ = -\lambda \cdot d\tau \cdot dS \frac{dT}{dx}$$

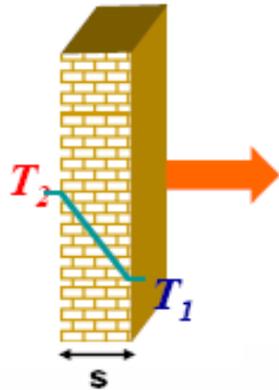
Flusso termico per
unità di superficie

$$\frac{dQ}{dS d\tau} = q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Valida solo in
regime stazionario

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2)$$

In condizioni stazionarie, la distribuzione di temperatura in una parete piana (linea T1 – T2) è una retta



Superficie ortogonale alla propagazione del calore

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{s} S (\Delta T)$$

CONDUTTANZA della parete [W/m²K]

Mentre il suo inverso è la
 $s/\lambda =$ **RESISTENZA TERMICA** [m²K/W]
della parete al passaggio del calore

Solitamente indichiamo con R la resistenza termica specifica, ossia riferita all'unità di area

$$R = \frac{s}{\lambda} \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$q = \frac{\Delta T}{R} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Il flusso termico q è **inversamente proporzionale** alla resistenza termica R

La Resistenza termica per conduzione a sua volta è:

- Direttamente proporzionale allo spessore della parete;
- Inversamente proporzionale alla conducibilità del materiale della parete.

Conducibilità termica di alcuni solidi al variare della temperatura

Sostanza	Temperatura (K)								
	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200
Acciaio al cromo % Cromo = 0			71	65	60	53	40	36	35
" " = 1%		82	60	54	50	45	36	33	33
" " = 5%			40	38	36	35	29	29	29
" " = 20%			22	22	22	22	24	26	29
Acciaio al Carbonio % Carbonio = 0.5%			54	52	48	45	38	32	29
" " = 1%			43	43	42	40	34	30	28
" " = 1.5%			36	36	36	35	32	29	28
Alluminio	300	237	237	240	236	231	218		
Argento	450	430	429	425	419	412	396	379	361
Calcio		220	200	189	182	178	153	116	
Carbonio	0.67	1.18	1.60	1.87	2.06	2.19	2.37	2.5	2.8
Cloruro di Potassio	25	11	7	6	5				
Cobalto	165	120	100	85	75	67	58	52	49
Costantana	19	21	23	27					
Cromo	160	110	94	91	86	81	71	65	62
Duralluminio (95% Al, 5% Cu, tracce Mg)	101	138	174	187	122				
Ferro	134	94	80	70	65	55	43	32	28
Fosforo	31	18	14	12					
Litio	105	90	85	80					
Magnesio	169	159	156	153	151	149	146		
Manganese	5.8	7.2	7.8	7.9	8.0				
Mercurio	32		29						
Nichelio	165	105	91	80	72	66	68	72	76
Ottone	46	74	114	134	143	146	150		
Piombo	39.7	36.7	35.3	34.0	32.8	31.4			
Platino	78	73	72	72	72	73	86	79	83
Plutonio	3.3	4.8	6.7	9.6					
Potassio	107	104	102						
Rame	480	413	400	393	386	379	366	352	339
Sale marino	24	11	7	4	3				
Sodio	136	142	141						
Teflon	0.23	0.25	0.26						
Titanio	31	25	21	20	20	19	19	21	22
Tungsteno	208	185	174	159	146	137	125	118	112
Uranio	22	25	28	30	33	34	39	44	49
Zinco	33	25	23	22	21	21	21	23	26

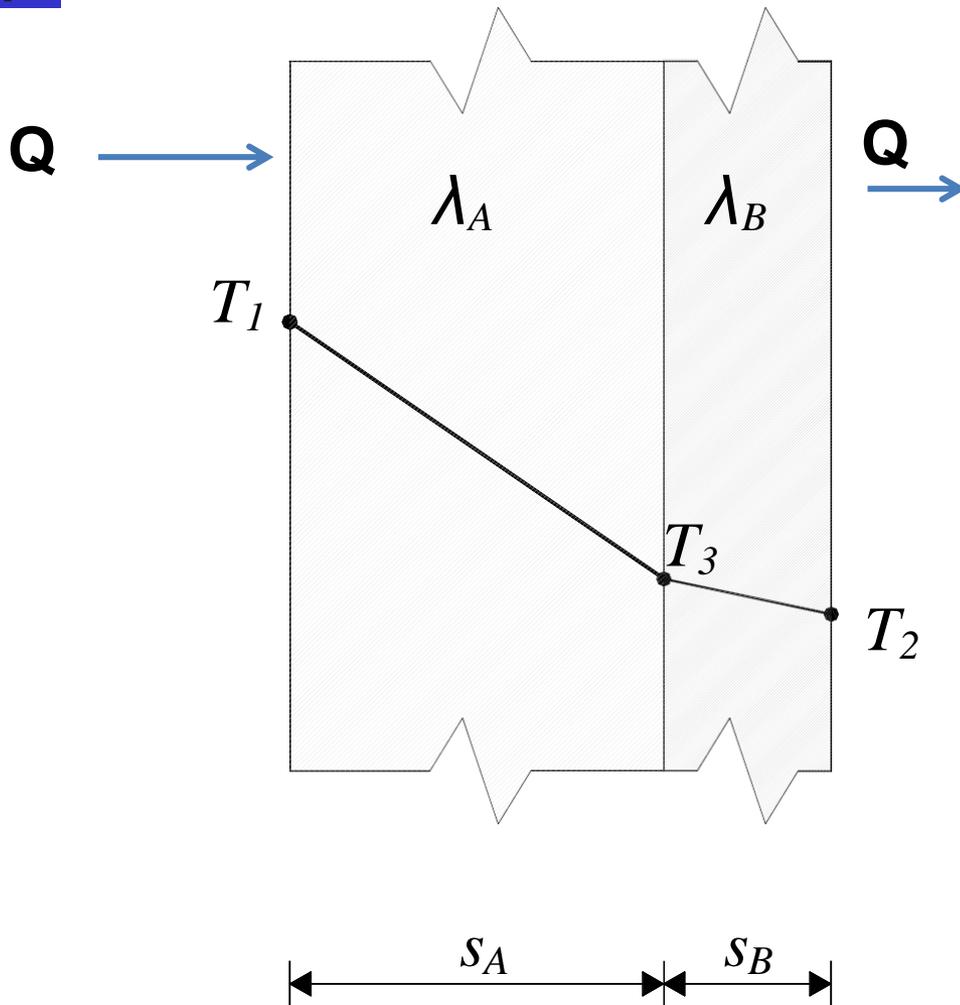
Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conducibilità λ [W/mK]
Laterizi: mattoni pieni, forati, leggeri	600	18-36	0,25
	800		0,30
	1.000		0,36
	1.200		0,43
	1.400		0,50
	1.600		0,59
	1.800		0,72
	2.000		0,90
Legno di abete	450	4,5	0,12
Legno di pino	550	4,5	0,15
Legno di acero	715	4,5	0,18
Legno di quercia	850	4,5	0,22
Mastici per tenute	1.000-1.650	-	0,04
Asfalto	2.100	0	0,70
Asfalto con sabbia	2.300	-	1,15
Bitumi	1.200	0	0,17
Bitumi con sabbia	1.300	0	0,26
Cartone catramato	1.600	-	0,50
Fogli di materiale sintetico	1.100	0,01-0,14	0,23
Argille espanse in granuli da 3 a 25 mm	280	-	0,09
	330	-	0,10
	450	-	0,12
Fibre di cellulosa	32	-	0,058
Perliti espanse in granuli da 0,1 a 2,3 mm	100	-	0,066
Polistiroli espanse in granuli	15	-	0,054
Pomici naturali	400	-	0,08
Scorie espanse	600	-	0,13
Vermiculiti espanse in granuli da 0,1 a 12 mm	80	-	0,077
	120	-	0,082
Ciottoli e pietre frantumate	1.500	-	0,7
	1.700	-	1,20
Sabbia secca	1.700	-	0,6
	30	0,5-1	0,039
Cloruro di polivinile espanso rigido in lastre	40	-	0,041
	30	0,5-1	0,050
Polietilene espanso non reticolato	50	-	0,060
	33	0,5-1	0,048
Polietilene espanso reticolato	50	-	0,058
	10	3,6-9	0,056
Polistirene espanso sinterizzato	15	2,5-6	0,047
	20	1,8-4,5	0,044
	25	1,8-4,5	0,042
	20	-	0,040
Polistirene espanso per termocompressione	25	-	0,039
	30	-	0,039
	30	-	0,036
Polistirene espanso estruso con pelle	30	-	0,036
	35	-	0,035

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conducibilità λ [W/mK]
Calcestruzzi a struttura aperta di argilla espansa	500	18-36	0,16
	600		0,18
	700		0,21
	800		0,24
	900		0,27
	1.000		0,31
Calcestruzzi cellulare da autoclave	400	18-36	0,15
	500		0,17
	600		0,19
	700		0,22
Calcestruzzi di inerti espansi di origine vulcanica	800	18-36	0,25
	1.000		0,38
	1.200		0,47
Calcestruzzi di perlite o vermiculite	1.400	18-36	0,58
	250		0,13
	400		0,15
Carta e cartone	1.000	1-2	0,16
Cartone bitumato	1.100	0,06-0,09	0,23
Cartongesso in lastre	900	23	0,21
Cartone ondulato	100	-	0,065
Fibre di vetro, pannelli rigidi	100	150	0,038
Fibre minerali, feltri resinati	30	150	0,045
	35	150	0,044
	40	-	0,042
Fibre minerali, pannelli semi rigidi	55	-	0,040
	80	150	0,039
	100	-	0,038
Fibre minerali, pannelli rigidi	125	-	0,038
	80	150	0,048
	100	150	0,044
Fibre minerali, pannelli a fibre orientate	80	-	0,044
	100	-	0,045
	40	150	0,054
	40	150	0,054
Fibre minerali, pannelli da loppe di altoforno	60	-	0,048
	80	-	0,046
	100	-	0,046
	150	-	0,048
	600	18	0,29
Malte di gesso per intonaci	750	-	0,35
	900	-	0,41
	1.000	-	0,47
	1.200	-	0,58
Intonaci di gesso puro	1.200	18	0,35
Intonaci di calce e gesso	1.400	18	0,70
Malte di calce o di calce e cemento	1.800	5-12	0,90
Malte di cemento	2.000	5-12	1,40

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Polistirene espanso estruso senza pelle	30	0,6-2,2	0,041
	50		0,034
Poliuretani in lastre da blocchi	25	1-2	0,034
	32		0,032
	40		0,032
	50		0,032
Polisocianurati in lastre da blocchi	32	1-2	0,032
	40		0,032
Poliuretani espansi in situ	37	1,8-6	0,035
Resine fenoliche in lastre	35	3,6-6	0,041
	60		0,044
	80		0,046
Resine ureiche espanse in situ	8	30-140	0,057
	12		0,054
	15		0,051
	30		0,048
Piastrelle di porcellana	2.300	-	1,0
Vetro cellulare espanso	130	0	0,055
	150		0,060
	180		0,066
Vetro da finestre	2.500	0	1,0
Celluloide	1.350	-	0,35
Policarbonato PC	1.150	-	0,23
Politetrafluoroetilene PTFE	2.200	-	0,24
Polietilene PE	950	-	0,35
Policloruro di vinile PVC	1.400	-	0,16
Polistirene PS	1.100	-	0,17
Resine epossidiche	1.200	-	0,20
Resine poliestere	2.000	-	0,50
Acciaio	7.800	-	52
Acciaio inox	8.000	-	17
Argento	10.500	-	420
Alluminio	2.700	-	220
Leghe di alluminio	2.800	-	160
Bronzo	8.700	-	65
Ferro	7.870	-	80
Ghisa	7.200	-	50
Nichel	8.800	-	65
Ottone	8.400	-	110
Piombo	11.300	-	35
Rame	8.900	-	380
Zinco	7.100	-	110
Pannelli a base di perlite espansa	190	26	0,071
Pannelli di fibre di legno	800	2,6	0,14
	900		0,16
	1.000		0,18

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]	
Pannelli di lana di legno	300	36-90	0,085	
	400		0,097	
	500		0,11	
Pannelli di spaccato di legno	400	-	0,12	
	500		0,14	
	600		0,16	
Pannelli di trucioli di legno pressati	500	1,8-3,6	0,10	
	700		0,15	
Pannelli di trucioli di legno estrusi	700	9	0,17	
Pannelli di sughero espanso puro	130	6,7-10	0,045	
Pannelli di sughero espanso con leganti	90	6,7-10	0,043	
	130		4-21	0,045
	200		4-21	0,052
Ardesia	2.700	-	2,0	
Basalto	2.800	-	3,5	
Calcere	2.100	-	1,6	
	2.700		2,9	
	2.800	-	3,5	
Dolomite	2.700	-	1,8	
Granito	2.500	-	3,2	
	3.000	-	4,1	
Lava	2.200	-	2,9	
Marmo	2.700	-	3,0	
Porfido	2.200	-	2,9	
Tufo	1.500	-	0,63	
	2.300		1,7	

Andamento della temperatura in una parete piana a doppio strato in regime stazionario

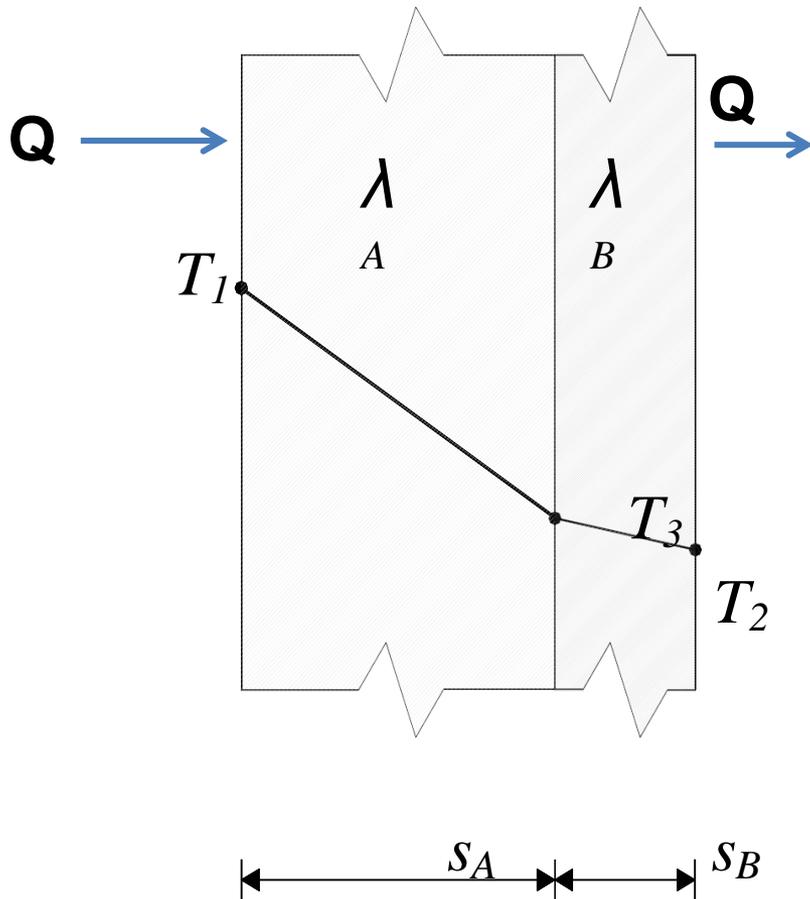


$$q = \frac{\lambda_A}{s_A} (T_1 - T_3)$$
$$q = \frac{\lambda_B}{s_B} (T_3 - T_2)$$

s_A, s_B = spessore strati

λ_A, λ_B = conducibilità materiali ($\lambda_A < \lambda_B$)

Andamento della temperatura in una parete piana a doppio strato in regime stazionario



$$q = \frac{\lambda_A}{s_A} (T_1 - T_3)$$

$$q = \frac{\lambda_B}{s_B} (T_3 - T_2)$$

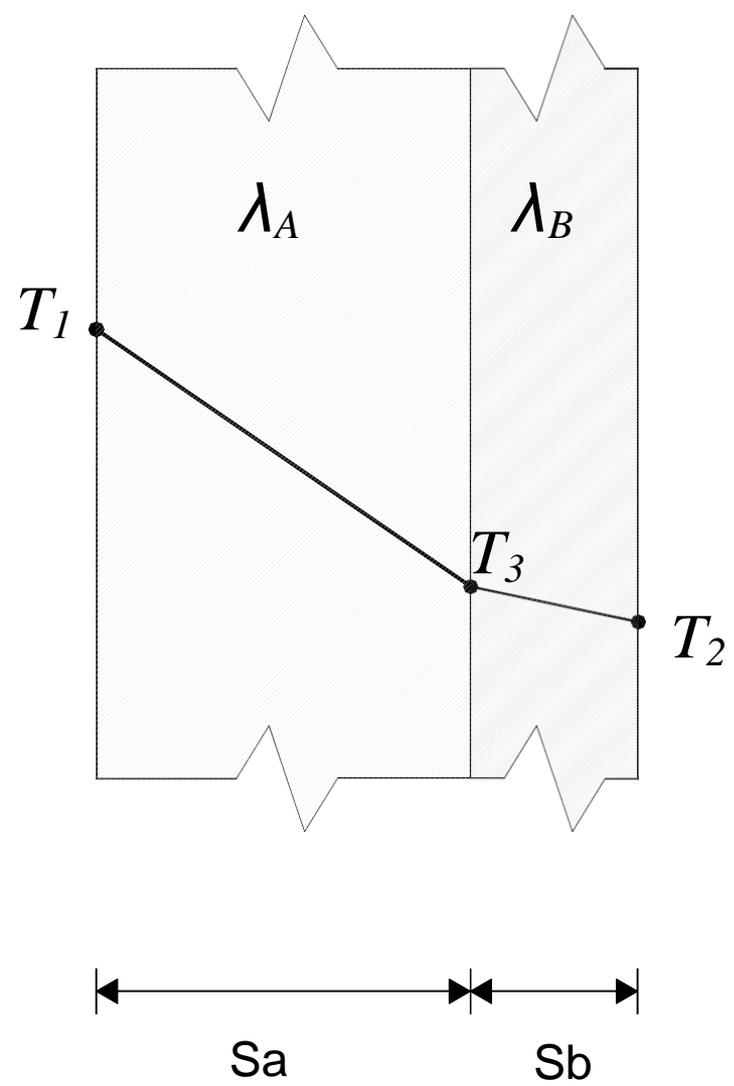
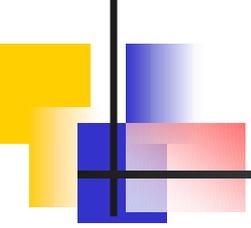
$$q \left(\frac{1}{\lambda_A/s_A} + \frac{1}{\lambda_B/s_B} \right) = T_1 - T_3 + T_3 - T_2$$

$$q = \frac{1}{\left(\frac{s_A}{\lambda_A} + \frac{s_B}{\lambda_B} \right)} (T_1 - T_2)$$

s_A, s_B = spessore strati

λ_A, λ_B = conducibilità materiali

($\lambda_A < \lambda_B$)



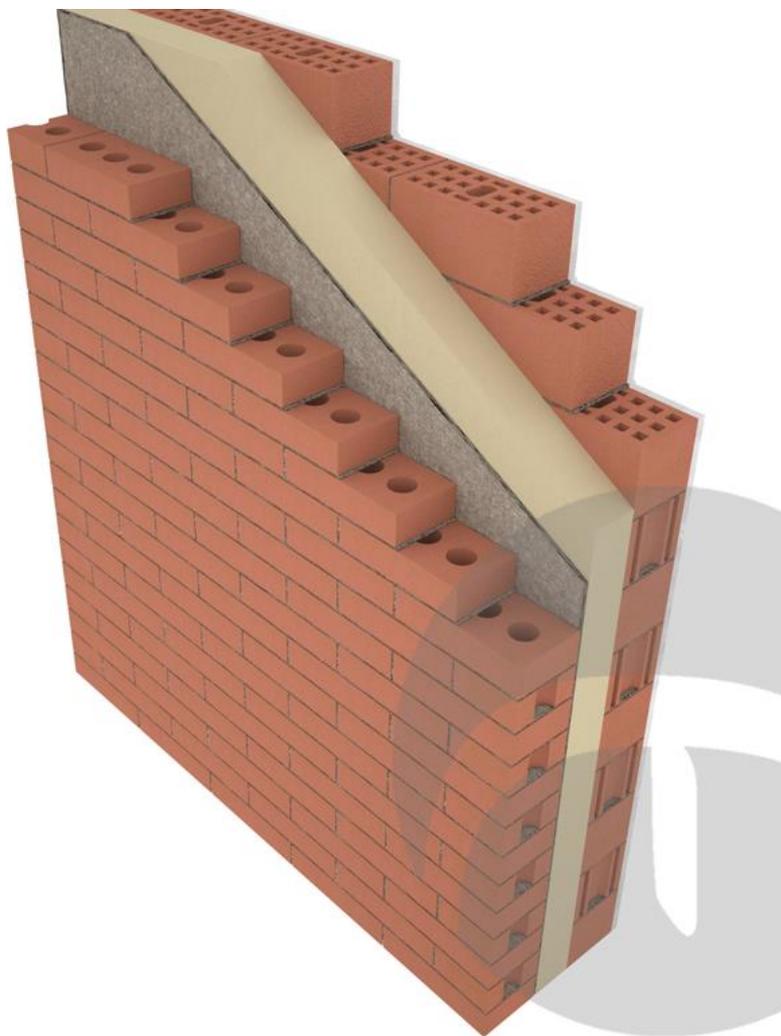
~~$$q = \frac{\lambda_A}{S_A} + \frac{\lambda_B}{S_B} (T_1 - T_2)$$~~

$$\frac{S_A}{\lambda_A} + \frac{S_B}{\lambda_B} = R_A + R_B = R_{\text{tot}}$$



$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{tot}}}$$

Sistema Costruttivo | Muratura con isolante interposto e mattoni



Spessore: 340 (mm)

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

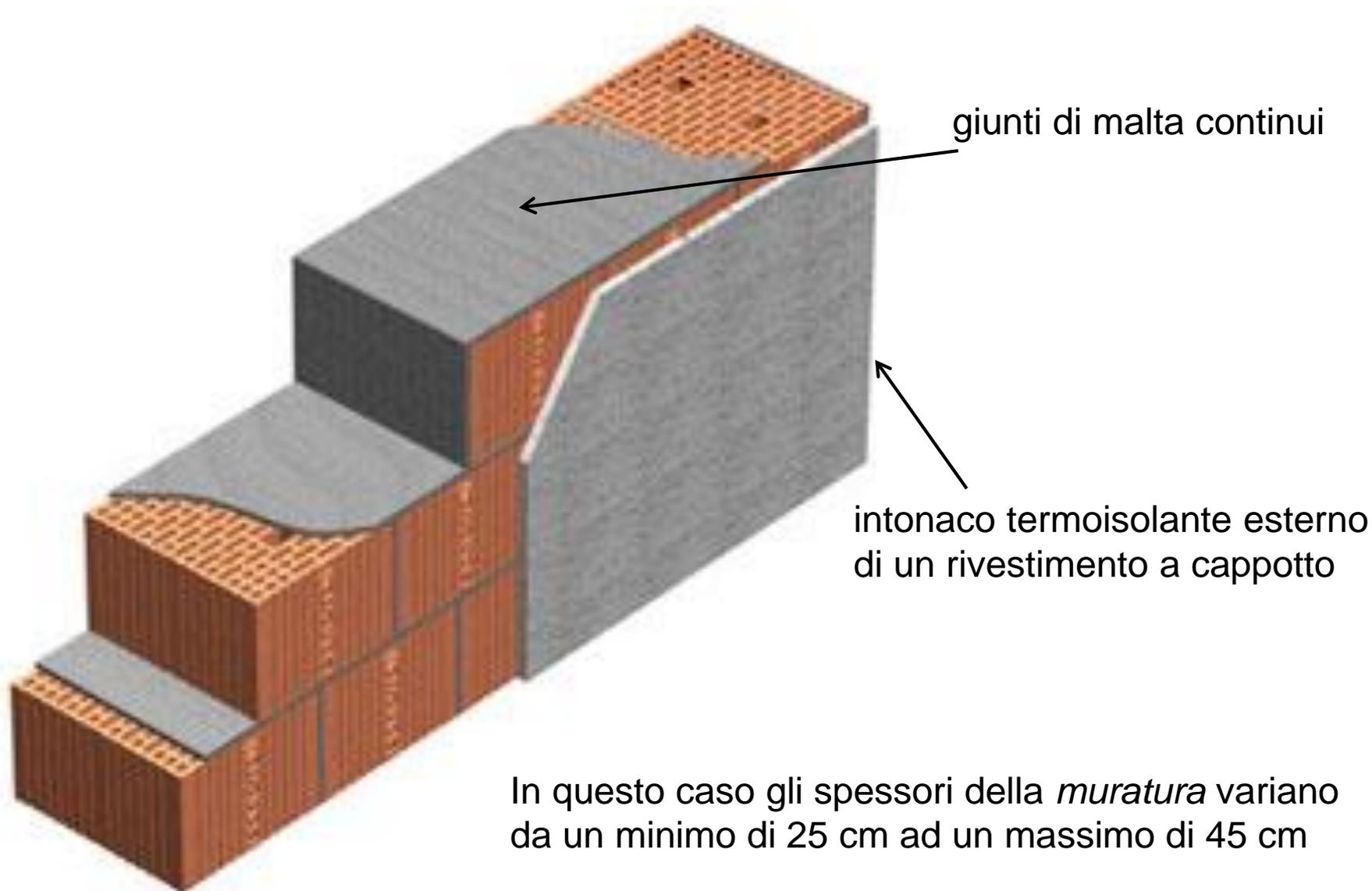
Capacità termica aerea: 57.425 ($\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}$)

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

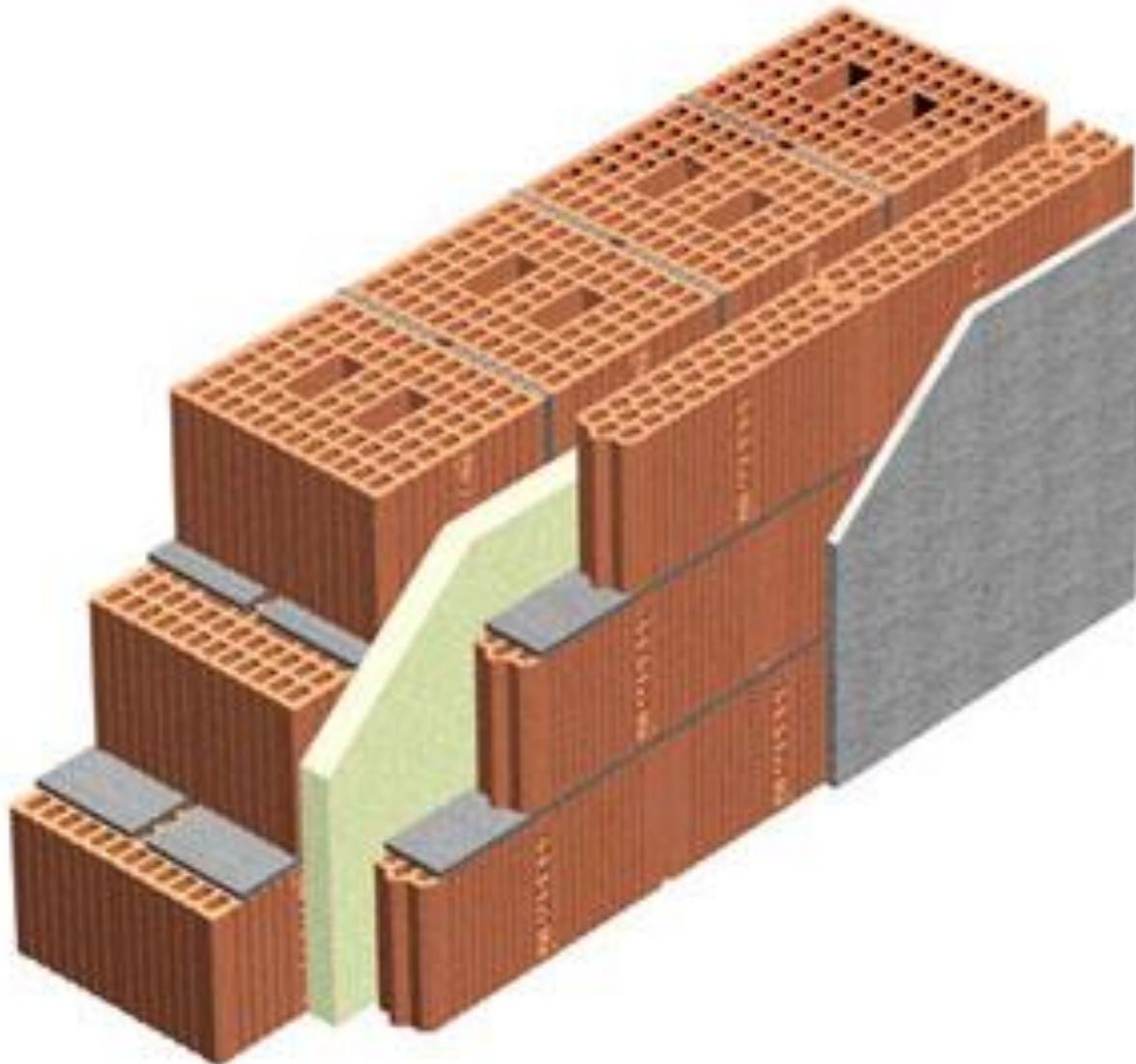
Massa superficiale: 457 (kg/m^2)

Fattore di attenuazione: 0.12

Sistema Costruttivo | Muratura in laterizio monostrato



Sistema Costruttivo | Muratura in laterizio pluristrato con intercapedine

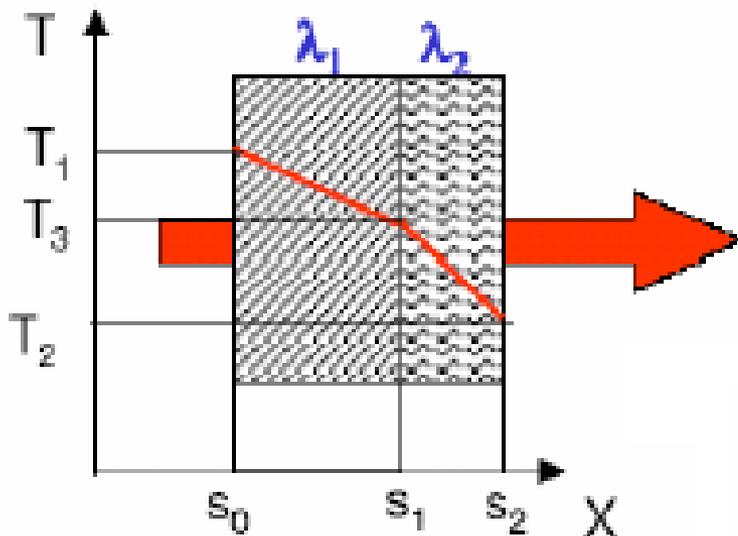


CASO DI UNA PARETE DOPPIO STRATO

(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 m²
 T_1 : 20 °C
 T_2 : 0°C
 λ_1 : 1W/mK
 S_1 : 0,4 m
 λ_2 : 0,04W/mK
 S_2 : 0,1 m

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

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

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