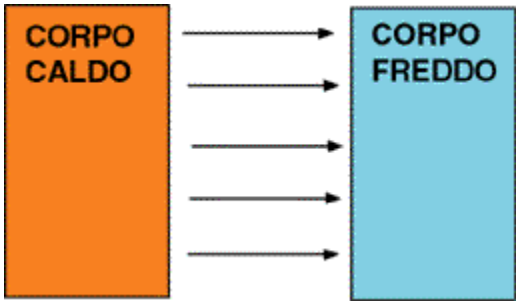
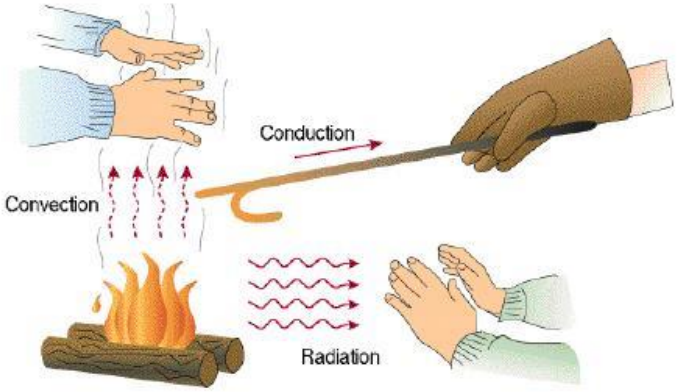
Trasmissione del calore



Modalità di trasmissione del calore

Fondamenti di scambio termico



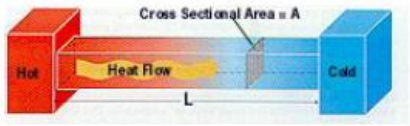
Trasmissione del calore

Trasmissione del "calore"

3

- Il trasferimento dell'energia nello spazio per effetto di differenze di temperatura costituisce l'oggetto fondamentale di studio della "*trasmissione del calore*".

- Il **calore** è quindi il flusso dell'energia termica attraverso lo spazio, sia esso occupato da solidi, fluidi oppure vuoto, causato da differenze di temperatura .

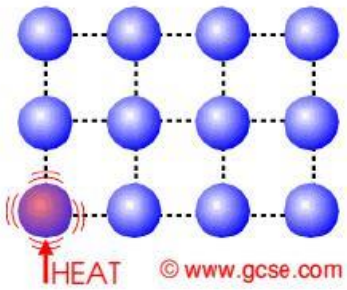


Trasmissione per conduzione

Modalità di trasmissione del calore

- Le modalità d'attuazione del trasferimento d'energia termica sono essenzialmente tre: conduzione, convezione e radiazione termica.

- La conduzione è il modo in cui l'energia termica è trasmessa attraverso i solidi ed i fluidi in quiete, per vibrazioni molecolari.



Le molecole più "energetiche" trasmettono per vibrazione energia alle molecole limitrofe, che a loro volta "propagano" verso altre molecole.

Alcuni leggi sulla trasmissione

Leggi di Fourier, di Newton e di Stefan–Boltzmann

Le leggi fondamentali relative alla *conduzione*, alla *convezione* e alla *radiazione termica* sono:

- legge di Fourier (1822) : $\Phi = \phi \cdot A_n = -\lambda \cdot A \cdot \vec{n} \cdot grad(T)$
- legge di Newton (1701) : $\Phi = \phi \cdot A = h \cdot A \cdot \left(T_s - T_\infty\right)$
- legge di Stefan e Boltzmann (1879) e (1884):

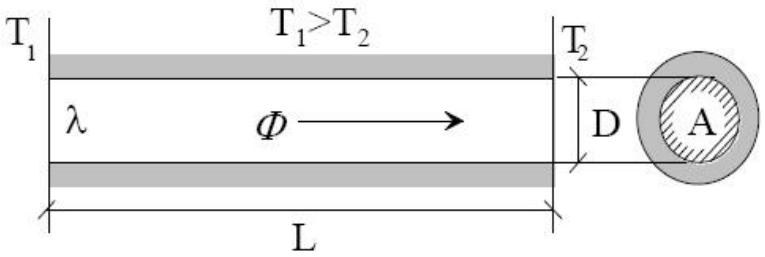
$$\Phi = \phi \cdot A = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

Flusso termico

Il flusso termico *conduttivo*

12

Consideriamo un sistema, costituito da una barra cilindrica di lunghezza (L), diametro (D) e materiale (λ) noti,



manteniamo le basi del cilindro a temperature diverse e costanti per un intervallo di tempo Δt e coibentiamo la superficie laterale (dispersione laterale nulla)

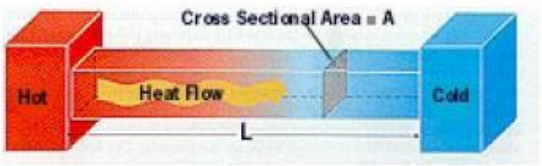
Flusso termico - 2

Il flusso termico *conduttivo (2)*

13

Possiamo osservare che il calore Q [J] trasmesso attraverso la barra è:

- direttamente proporzionale alla:
  - sezione retta A della barra,
  - alla differenza delle temperature ($T_1 - T_2$) applicate agli estremi e all'intervallo di tempo Δt,
- inversamente proporzionale
  - alla lunghezza L della barra



Resistenza termica superficiale

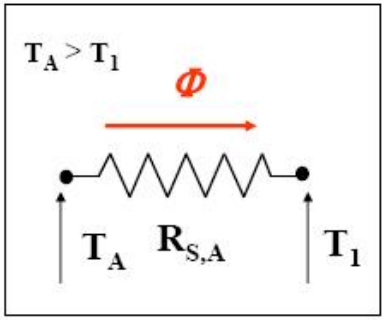
Conduzione termica: analogia elettrica - flusso all'interfaccia

Confrontando la legge di Ohm: ➡ $I = \frac{1}{R}(V_1 - V_2)$

con l'espressione di Newton per il flusso interfacciale (T_A temp. ambiente A) ➡ $\Phi = A \cdot h_A \cdot (T_A - T_1)$

si può definire in analogia la resistenza termica superficiale:

$$R_{S,A} = \frac{1}{h_A \cdot A}$$



con h_A coeff. di scambio termico superficiale

Flusso termico - 3

Il flusso termico *conduttivo (3)*

Quanto osservato si può scrivere in formule come:

$$Q \propto \frac{A}{L}(T_1 - T_2)\Delta t$$

e sostituendo alla proporzionalità l'uguaglianza:

$$Q = \lambda \cdot \frac{A}{L}(T_1 - T_2)\Delta t$$

e anche:

$$\overline{\Phi} = \frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{L}(T_1 - T_2)$$

Flusso termico - 4

$$\overline{\Phi} = \frac{Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{L}(T_1 - T_2)$$

Il flusso termico può essere scritto anche così :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \lambda s \frac{\Delta T}{d}$$

Dove

t = tempo

T = temperatura

d = spessore

S = superficie

Proprietà termofisiche

Leggi di Fourier, di Newton e di Stefan–Boltzmann

9

Le proprietà termofisiche associate sono:

- legge di Fourier:
  la *conduttività termica*
  λ [W/m K]
- legge di Newton:
  il *coefficiente di scambio termico superficiale*
  h [W/m^{2}K]
- legge di Stefan e Boltzmann:
  la *costante di S-B*
  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m^{2}K^4]

Conducibilità di un materiale

Sostanza	Conduttività λ [W/(m*K)]
Diamante	oltre 2600
Argento	420
Rame	380
Alluminio	178
Ferro	59
Ghisa	58
Acciaio 18%Cr 8%Ni	14
Granito	2.5
Terreno argilloso	1.3
Vetro	1.2
Calcestruzzo	0.8 ÷ 1.4
Laterizi asciutti	0.4 ÷ 0.5
Gomma	0.13 ÷ 0.23
Legno quercia in direzione radiale	0.17 ÷ 0.21
Sughero	0.04 ÷ 0.05
Polistirolo spugnoso	0.04
Acqua satura a 20°C	0.598
Olio per macchine a 20°C	0.145
Aria a 27°C	0.0262

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
aerogel di silice	0,013 in pannelli sotto vuoto alla pressione di

Conducibilità di materiali isolanti-1

Tabella 1: *Valori di calcolo per verifiche fisico-costruttive*
Estratto dalla documentazione D 0170

Materiale	Peso specifico nominale ρ_a kg/m³	Conduttività termica Valore nominale λ_D (vedi Capitolo 2) verificato [1] W/(m · K)	non verificato W/(m · K)
Lana di vetro			
Pannelli, stuoie, rotoli	10–120	0.031–0.048	0.055
Sfusa	30–100	[2]	0.060
Lana di roccia			
Pannelli, stuoie, rotoli	15–200	0.034–0.048	0.055
Sfusa	30–100	[2]	0.060
Schiuma di vetro			
Pannelli	100–150	0.040–0.055	0.064
Sfusa	250–450	[2]	0.094
Perlite, Vermiculite sfusa	50–130	v0.084	
Polistirolo, espanso (EPS)	30–15	0.032–0.042	0.048
Polistirolo, estruso (XPS)			
Polistirolo, estruso (XPS)	25–65	0.028–0.036	0.043
Contenuto cellulare Aria	25–65	0.034–0.038	0.046
Poliuretano (PUR) e poliisocianurato (PIR)			
Contenuto cellulare Pentano			
impermeabile alla diffusione	28–55	0.022–0.027	0.032
permeabile alla diffusione	28–55	0.026–0.033	0.037
Contenuto cellulare CO_2	35–60	0.032–0.038	0.045
Sughero: pannelli, stuoie	90–160	0.040–0.047	0.056

Conducibilità di materiali isolanti - 2

Lana di legno			
Pannelli	30–150	0.067–0.089	0.107
Pannelli strutturali leggeri	250–450	[2]	0.095
Rivestimenti di pannelli multistrato [3]			
5 mm	[1]	[2]	0.15
7,5 mm	[1]	[2]	0.125
10 mm	[1]	[2]	0.10
Pannelli isolanti in fibra di legno	120–300	0.044–0.065	0.080
	300–600	[2]	0.110
Cellulosa			
Pannelli	[1]	[2]	0.065
Sfusa	30–80	[2]	0.060
Materiale isol. di orig. vegetale			
Pannelli in fibra di lino	25–35	[2]	0.055
Pannelli in cannette palustri	150–200	[2]	0.072
Stuoie in fibra di cocco	50–100	[2]	0.066
Cotone	> 25	[2]	0.055
Materiale isol. di orig. animale		[2]	
Lana di pecora	20–60		0.055

[1] Questi valori sono punti di riferimento per prodotti esistenti sul mercato (vedi anche scheda tecnica SIA 2001). Sono possibili anche valori più bassi e più alti. Determinante è il valore nominale specifico del prodotto (certificato di verifica necessario).

[2] Valore al momento non ancora definito, rispettivamente troppo pochi dati a disposizione.

[3] La resistenza al passaggio termico di pannelli isolanti multistrato in lana di legno va calcolata come la somma dei singoli valori della resistenza al passaggio termico. Per i rivestimenti vanno adottati in questo caso i valori della colonna «non verificato».

Conducibilità di materiali da costruzione 1

Gruppo di materiali o applicazione	Peso specifico ρ kg/m³	Conduttività termica λ W/(m·K)
Muratura non intonacata		
Mattoni di cotto modul., semplice	1100	0.44
Mattoni di cotto modul., composti	1100	0.37
Mattoni isolanti	1200	0.47
Mattoni a facciavista	1400	0.52
Mattoni da camino	1800	0.80
Mattoni in silicocalcare	1600	0.80
	1800	1.00
	2000	1.10
Mattoni in cemento pieni	2000	1.10
Mattoni in cemento forati	1200	0.70
Mattoni in beton cellulare	300	0.10
	400	0.13
	500	0.16
	600	0.19
Pietre naturali		
Pietra naturale cristallina	2800	3.5
Pietra naturale sedimentaria	2600	2.3
Basalto	2700 - 3000	3.5
Granito	2500 - 2700	2.8
Marmo	2800	3.5
Ardesia	2000 - 2800	2.2
Arenaria (Quarzite)	2600	2.3
Terreni		
Argilla, limo o fango	1200 - 1800	1.5
Sabbia e ghiaia	1700 - 2200	2.0

Gruppo di materiali o applicazione	Peso specifico ρ kg/m³	Conduttività termica λ W/(m·K)
Gessi		
Gesso	600	0.18
	900	0.30
	1200	0.43
	1500	0.56
Pannelli in cartongesso [2]	900	0.25
Legno [3]		
Legname da costruzione	500	0.13
	700	0.18
Pannelli in fibre di legno	250	0.07
	400	0.10
	600	0.14
	800	0.18
Pannelli in legno truciolare	300	0.10
	600	0.14
	900	0.18
Pannelli in legno truciolare mineral.	1200	0.23
Materiali diversi		
Metalli		
Leghe d'alluminio	2800	160
Acciaio	7800	50
Acciaio inossidabile	7900	17
Vetro (vetro sodico, compreso vetro float)	2500	1.00
Vetro di quarzo	2200	1.40
Acqua a +10°C	1000	0.60

Conducibilità materiali da costruzione - 2

Calcestruzzo [1]		
Con peso specifico medio	1800	1.15
	2000	1.35
	2200	1.65
Con peso specifico alto	2400	2.00
Armato (con l'1% di ferro)	2300	2.3
Armato (con il 2% di ferro)	2400	2.5
Rivestimenti e intonaci		
Intonaco interno, per calcoli normali	1400	0.70
Intonaco esterno, per calcoli normali	1800	0.87
Intonaco isolante esterno	300	0.08
	450	0.14
Malta di calce	1800	0.87
Malta di calce e cemento	1900	1.00
Malta di cemento («betoncino»)	2200	1.40
Intonaco in gesso isolante	600	0.18
Intonaco in gesso	1000	0.40
	1300	0.57
Acqua a +40°C	990	0.63
Ghiaccio a -10°C	920	2.30
Ghiaccio a 0°C	900	2.20
Neve fresca (< 30 mm)	100	0.05
Polivinilcloruro (PVC)	1390	0.17
Pannelli		
Ceramica / Porcellana	2300	1.3
Plastica	1000	0.20
Gomma		
Gomma	910	0.13
Neoprene (Policloroprene)	1240	0.23
Gomma butilica	1200	0.24

1 Il peso specifico del calcestruzzo è indicato come peso specifico a secco.

2 La conduttività termica include l'influsso degli strati di carta di copertura.

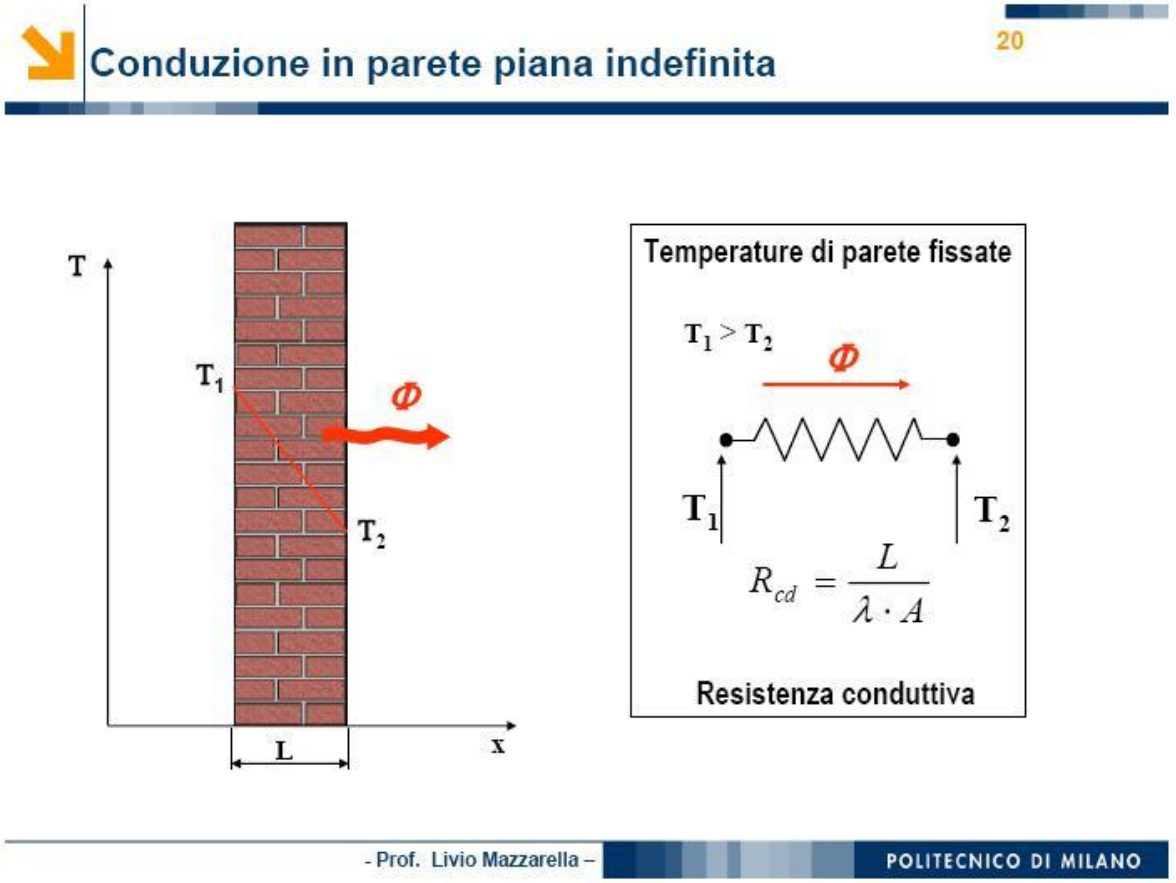
3 Il peso specifico del legname da costruzione e dei prodotti laminati in fibre di legno è il peso specifico in condizioni stabili a 20°C e 65% di umidità relativa.

Tabella 2

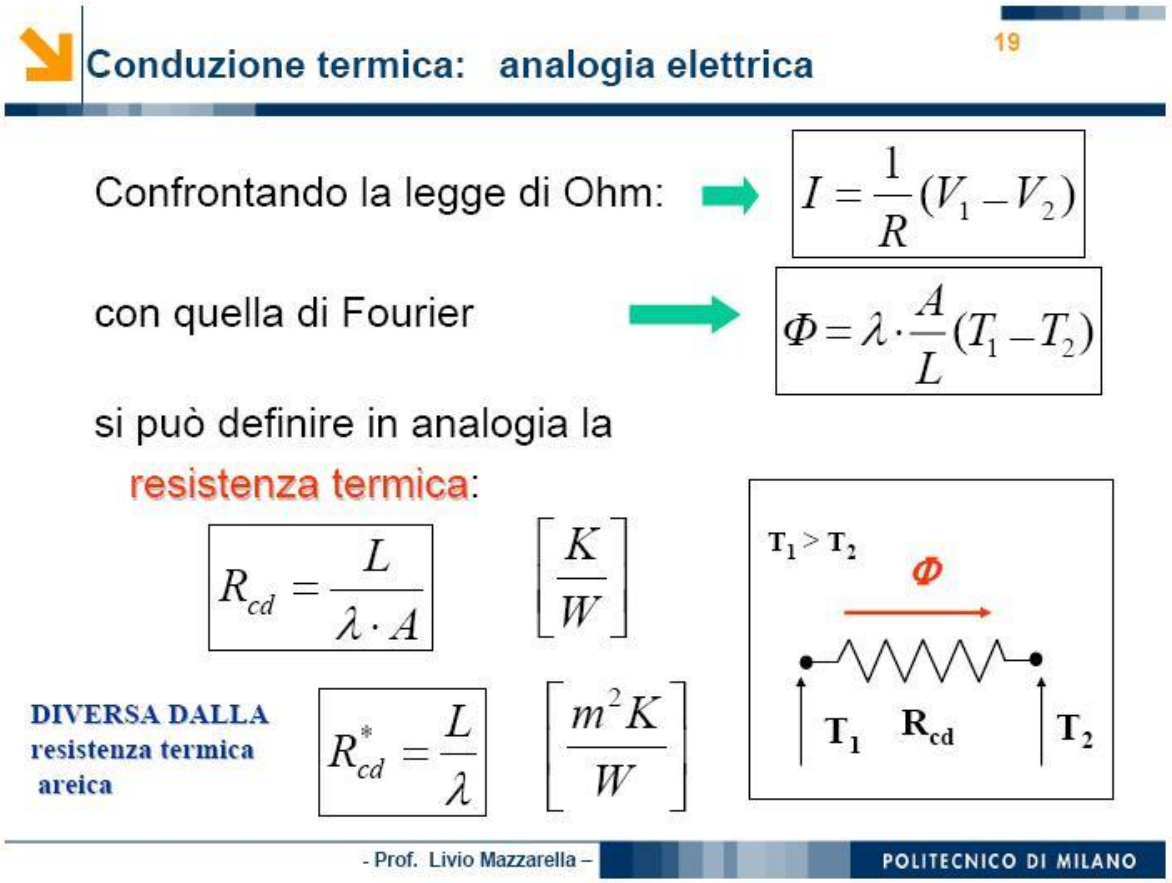
Peso specifico ρ e conduttività termica λ dei materiali da costruzione più usati

Estratto dalla documentazione SIA D0170

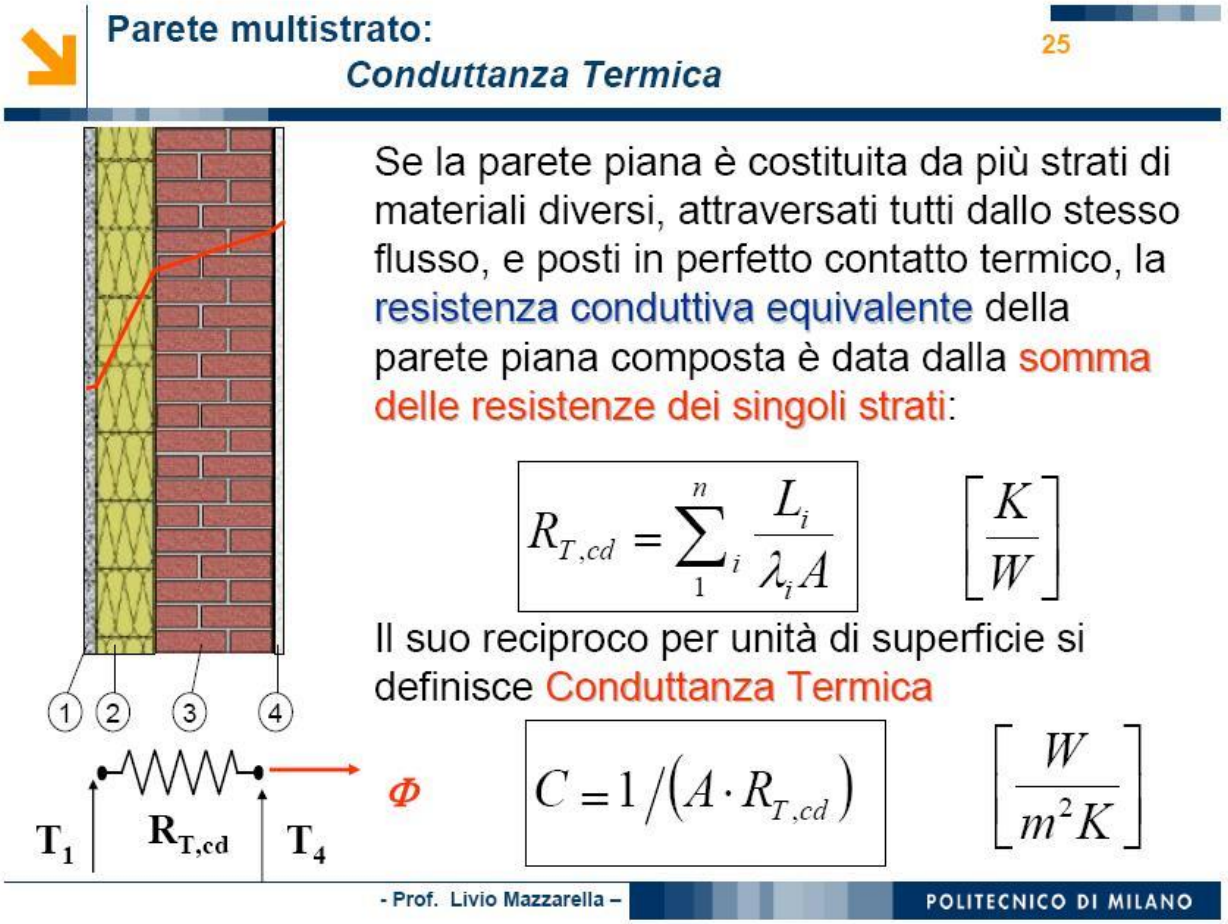
Resistenza conduttiva R



Resistenza Termica

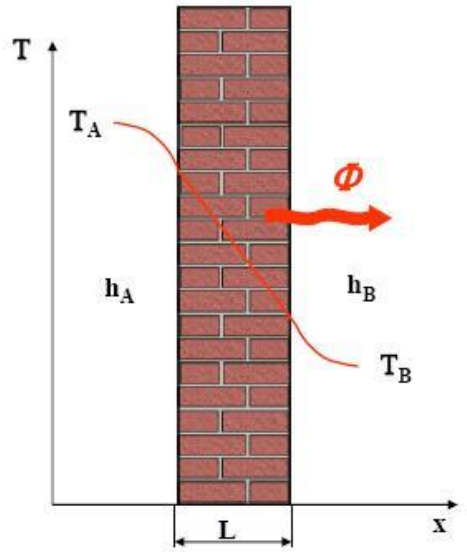


Conduttanza-Resistenza



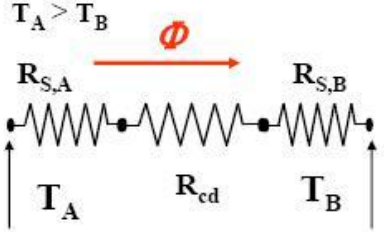
Resistenza totale della parete

Conduzione in parete piana indefinita



Temperature degli ambienti fissate

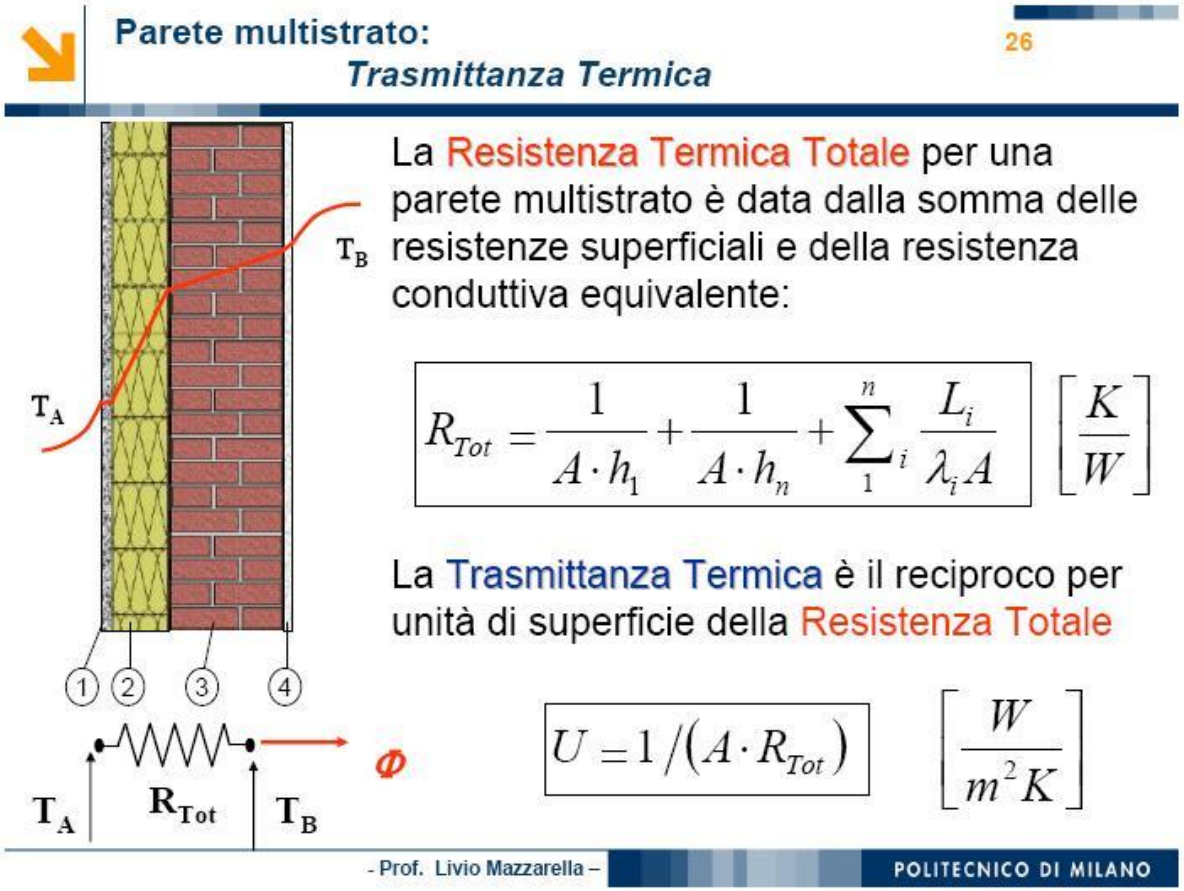
$T_A > T_B$



$$R_{Tot} = \frac{1}{h_A A} + \frac{L}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{h_B A}$$

Resistenza totale:
conduttiva + superficiali

Trasmittanza termica U



Trasmittanza termica definizione-1

- *La **trasmittanza termica** definisce la capacità isolante di un elemento.*

- *Dato un fenomeno di trasmissione di calore in condizioni di regime stazionario (in cui cioè il flusso di calore e le temperature non variano nel tempo), la **trasmittanza** misura la quantità di calore che nell'unità di tempo attraversa un elemento strutturale della superficie di 1 m² in presenza di una differenza di temperatura di 1 grado tra l'interno e l'esterno.*

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

Trasmittanza termica definizione-2

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

- *Dove:*
- Hi e He [W/m² K] sono i coefficienti di adduzione interna ed esterna; cioè il coefficiente di scambio termico superficiale; il suo reciproco 1/h è la resistenza superficiale [mq k /W]
- s [m] lo spessore del materiale;
- λ [W/m K] la conducibilità termica interna del materiale.

Trasmittanza termica definizione-3

- *Più il valore è basso, maggiore è l'isolamento della struttura in esame. L'inverso della trasmittanza è la resistenza termica ovvero la capacità di un materiale di opporsi al passaggio del calore:*

$$R = \frac{1}{U}$$

- *La trasmittanza aumenta al **diminuire** dello spessore ed all'**aumentare** della conducibilità termica. Strutture con bassissima trasmittanza termica si caratterizzano per fornire un elevato isolamento termico.*
- *Per la misura in opera della trasmittanza si deve seguire la norma ISO 9869. Il metodo descritto è quello delle medie progressive, lo strumento usato è il termoflussimetro. La tecnica che studia la misurazione dei flussi di calore è la termoflussimetria.*
-
- *In vecchi documenti potrebbe trovarsi indicata la trasmittanza con la lettera K maiuscola ed espressa in chilocalorie per ora, metro quadro e grado celsius, al posto dei Watt per metro quadro, Kelvin. La conversione è **1 W/m² K = 0,86 kCal/h m² K.***

Trasmittanze delle pareti

UNI TS 11300-1 Appendice A

121

Prospetto A.1 - Trasmittanza termica delle pareti perimetrali verticali[13] [W/m²K].

Spessore [m]	Muratura di pietrame intonacata	Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	Pannello prefabbricato in cls	Parete a cassa vuota[14] con mattoni forati	Struttura isolata[15]
0,15	-	2,31	4,03	-	0,59
0,20	-	1,84	3,64	-	0,57
0,25	3,55	1,54	3,36	1,20	0,54
0,30	3,19	1,33	3,15	1,15	0,52
0,35	2,92	1,18	2,98	1,11	0,50
0,40	2,70	1,06	2,84	1,11	0,48
0,45	2,52	0,97	2,73	1,11	0,46
0,50	2,37	0,89	2,63	1,11	0,44
0,55	2,24	0,82	2,54	1,11	0,42
0,60	2,13	0,77	2,46	1,11	0,40

Prospetto A.3 - Trasmittanza termica delle pareti interne verticali [W/m²K].

Spessore [m]	Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	Muratura di mattoni forati intonacati sulle due facce	Parete in cls intonacata	Parete a cassa vuota con mattoni forati	Struttura isolata
0,15	1,91	1,38	2,96	1,16	0,56
0,20	1,67	1,11	2,79	1,12	0,54
0,25	1,43	0,93	2,62	1,08	0,52
0,30	1,19	0,80	2,46	1,04	0,50

Trasmittanze delle coperture

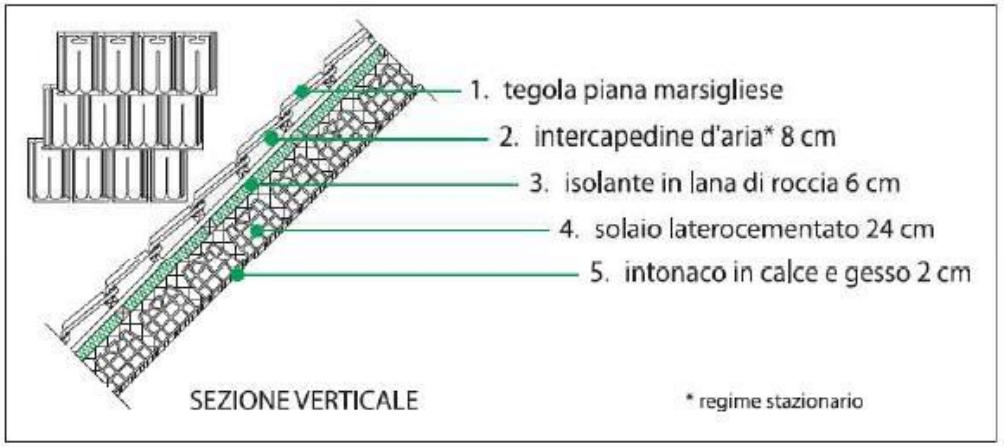
COPERTURA 115

Prospetto A.4 - Trasmittanza termica delle coperture piane e a falde [W/m^{2}K].

Spessore [m]	Soletta piana non coibentata in laterocemento	Soletta piana coibentata	Tetto a falda in laterizio non coibentato	Tetto a falda in laterizio coibentato	Tetto in legno poco isolato	Tetto in legno mediamente isolato
0,15	2,00	0,77	2,77	0,87	1,31	0,72
0,20	1,76	0,72	2,39	0,81		
0,25	1,53	0,67	2,02	0,75		
0,30	1,30	0,61	1,65	0,68		
0,35	1,06	0,56	1,28	0,62		

UNI/TS 11300-1: 2008 – Appendice A

Calcolo trasmittanza copertura



Calcolo della trasmittanza termica

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + \frac{1}{h_e}\right)}$$

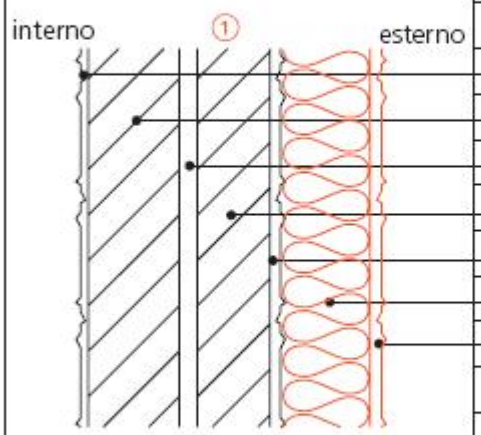
COPERTURA	strati		s [m]	λ [W/mK]	C [W/m^{2}K]	R [m^{2}K/W]
	he		-	-	-	0.100
tegola		1	0.02	0.43	-	0.000
aria		2	0.08	-	-	0.000
isolante		3	0.06	0.038	-	1.579
solaio laterocemento		4	0.26	-	-	0.390
intonaco in calce		5	0.02	0.7	-	0.029
	hi		-	-	-	0.100

resistenza termica totale	R	2.20	[m^{2}K/W]
trasmittanza termica	U	0.46	[W/m^{2}K]

Calcolo Trasmittanza parete

Esempio 1

Struttura dell'elemento costruttivo (schizzo, sezione)



Denominazione dell'elemento costruttivo: *Parete esterna*

Strato nr. (2)	Materiale da costruzione (3)	d m (4)	h W/(m²·K) (5) / λ W/(m·K) (5)	R $\frac{1}{h}$ bzw. $\frac{d}{\lambda}$ m²·K/W (6)
–	Convezione termica interna (h_i)	—	8	0.13
1	Intonaco interno	0.015	0.7	0.02
2	Mattone	0.15	0.44	0.34
3	Cavità	0.04	—	0.18
4	Mattone	0.12	0.44	0.27
5	Intonaco esterno vecchio	0.02	0.87	0.02
6	Sagex EPS 15	0.14	0.040	3.50
7	Intonaco esterno nuovo	0.02	0.87	0.02
–	Convezione termica esterna (h_e)	—	25	0.04

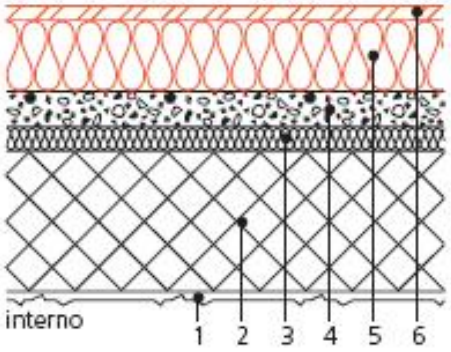
Tab. A

Coeff. $U = \frac{1}{R_{totale}} = 0.22$ W/(m²·K) (8)

(7) $R_{totale} = 4.52$

Calcolo Trasmittanza solaio

Struttura dell'elemento costruttivo (schizzo, sezione)



Denominazione dell'elemento costruttivo: *Pavimento solaio*

Strato nr.	Materiale da costruzione	d m	h W/(m²·K) / λ W/(m·K)	R $\frac{1}{h}$ bzw. $\frac{d}{\lambda}$ m²·K/W
–	Convezione termica interna (h_i)	—	8	0.13
1	Intonaco a plafone	0.015	0.70	0.02
2	Calcestruzzo	0.20	2.3	0.09
3	Isolam. termico esistente [1]	0.03	0.040	0.75
4	Riv. in cemento	0.05	1.4	0.04
5	Pavatherm [2]	0.15	0.043	3.49
6	Pannello in legno truciolare	0.02	0.14	0.14
–	Convezione termica esterna (h_e) [3]	—	8	0.13

Tab. A

Coeff. $U = \frac{1}{R_{totale}} =$ 0.21 W/(m²·K)

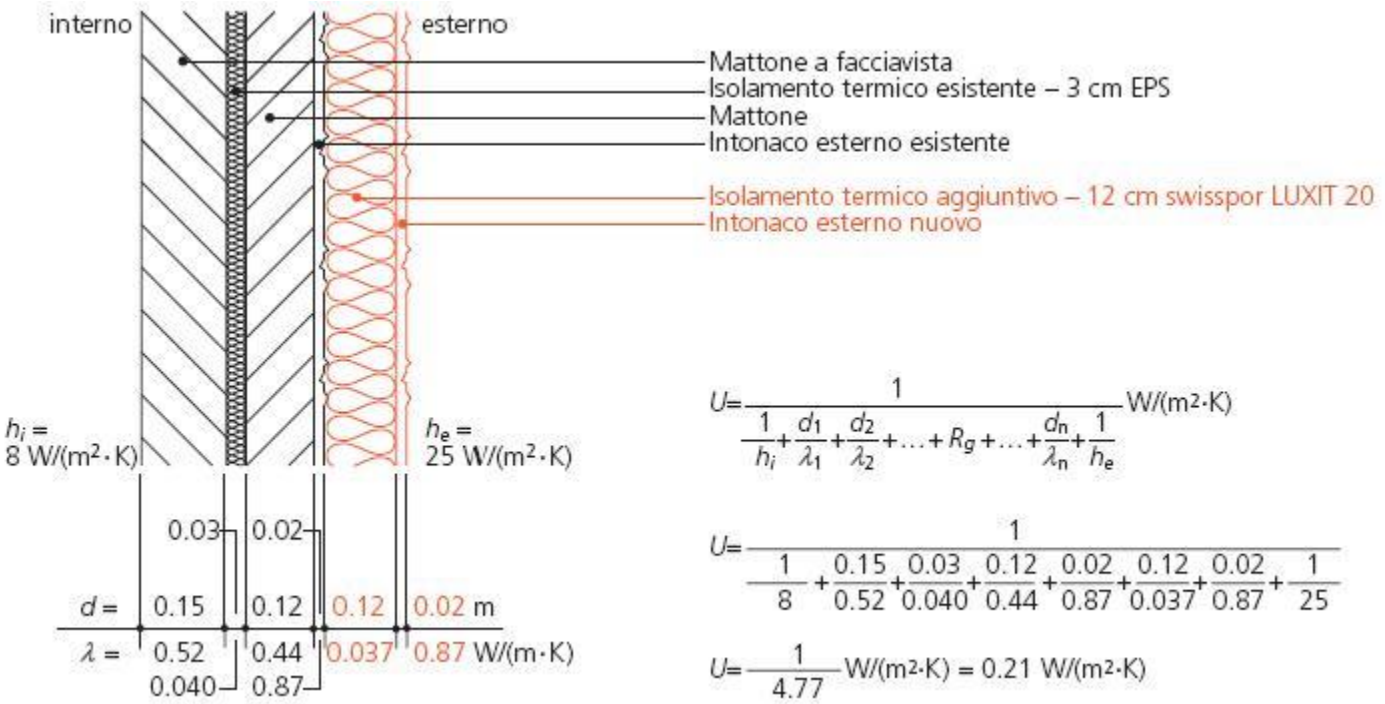
$R_{totale} =$ 4.79

1 Poiché è difficile determinare con precisione il materiale termoisolante, viene introdotto un coefficiente λ di 0.040 W/(m · K).

2 Il coefficiente λ è stato preso dalla scheda tecnica SIA 2001 «Wärmedämmstoffe» («Isolanti termici») (edizione 2001). Può essere preso anche dalle indicazioni del fabbricante verificate.

3 Verso il non riscaldato vale $R_{se} = \frac{1}{} = 0.13$ m² · K/W (Cap. 2.3.1).

Calcolo Trasmittanza parete - 2



$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \ldots + R_g + \ldots + \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}} \text{ W/(m²·K)}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0.15}{0.52} + \frac{0.03}{0.040} + \frac{0.12}{0.44} + \frac{0.02}{0.87} + \frac{0.12}{0.037} + \frac{0.02}{0.87} + \frac{1}{25}}$$

$$U = \frac{1}{4.77} \text{ W/(m²·K)} = 0.21 \text{ W/(m²·K)}$$