

10 dicembre 2015

# **SINTESI PER EX TEMPORE 5**

## **Efficienza energetica degli edifici: valutazione della trasmittanza termica della massa superficiale**



# Trasmittanza - resistenza - conducibilità termica

I concetti di trasmittanza, resistenza e conducibilità termica sono strettamente legati tra loro.

**La conducibilità o conduttività termica** (normalmente indicata con la lettera greca  $\lambda$ ) è il flusso di calore  $Q$  (misurato in J/s ovvero W) che attraversa una superficie unitaria  $A$  di spessore unitario  $d$  sottoposta ad un gradiente termico  $\Delta T$  di un grado Kelvin (o Celsius).

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad [\text{W/m}^\circ\text{K}]$$

La definizione sopraesposta deriva dalla **legge di Fourier che determina il flusso di calore** che si instaura attraverso una superficie unitaria di spessore unitario sottoposta ad un gradiente termico, ovvero:

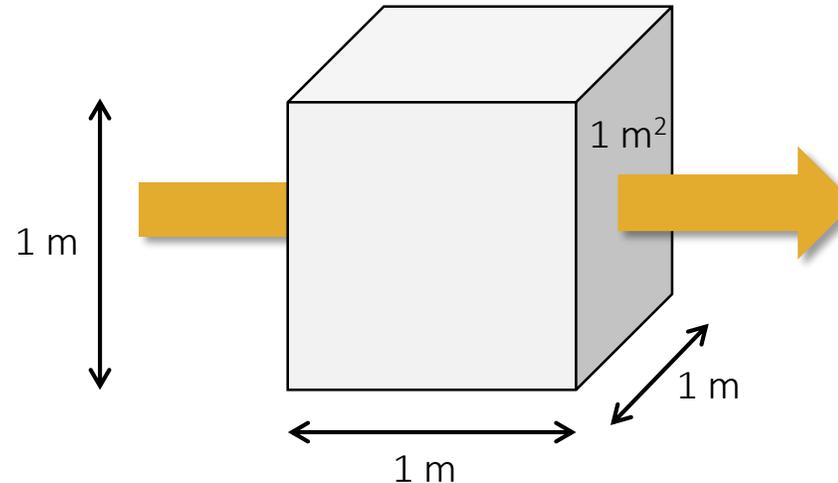
$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \quad [\text{J/s}]$$

## Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]

È la quantità di calore in Watt che passa attraverso uno strato di materiale di spessore pari a 1 m, di superficie pari a 1 m<sup>2</sup>, quando la differenza calcolata nella direzione del flusso termico è di 1°K.

Esprime la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare dal calore.

Più il valore è basso e più è alto il potere isolante del materiale.



$\lambda$  basso ( $0,002 < \lambda < 0,10$ )



Materiale ad alte prestazioni isolanti

$\lambda$  alto ( $0,11 < \lambda < 3,00$ )



Materiale a basse prestazioni isolanti

## Conduttanza $C$ [W/m<sup>2</sup>K]

La conduttanza termica indica la quantità di calore che attraversa, in 1 ora, 1 m<sup>2</sup> di un materiale dello spessore  $s$  quando il salto di temperatura tra le due facce è di 1 K. Un valore basso di  $\lambda$  è indice di un'alta conduttanza, mentre un valore alto indica una conduttanza ridotta.

$$C = \lambda / s$$

## Resistenza termica $R$ [m<sup>2</sup>K/W]

Descrive il valore della proprietà coibente di un materiale.

$$R = s / \lambda = 1/C$$

- Nel caso di sistemi edilizi composti da più strati diversi,  $R$  è calcolata sommando i valori delle resistenze termiche dei singoli materiali.
- I valori della resistenza termica utilizzati nei calcoli intermedi, devono essere calcolati con almeno tre decimali.

# Trasmittanza - resistenza - conducibilità termica

La **trasmittanza termica U** (vedi norma UNI EN ISO 6946) si definisce come il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad un grado Kelvin (o Celsius) ed è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico liminare.

Essa si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati che compongono la superficie considerata, ovvero:

$$U = \frac{1}{\sum R_i} \text{ [W/°K]}$$

Ove R<sub>i</sub> sono le resistenze termiche di ciascun strato che compongono la superficie in esame.

La resistenza termica R è definita come il rapporto tra lo spessore d dello strato considerato e la sua conducibilità termica λ:

$$R = \frac{d}{\lambda} \text{ [°K/W]}$$



# Trasmittanza - resistenza - conducibilità termica

La **resistenza termica** di una parete composta da più strati sarà la somma delle resistenze termiche di ciascun strato. Come si evince da questa definizione, la **trasmittanza termica** è l'inverso della resistenza termica.

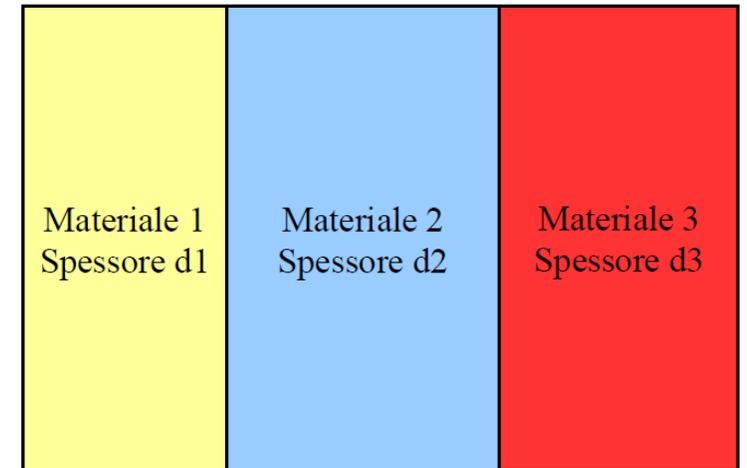
In seguito è riportato un esempio esplicativo di quanto esposto. Si consideri la parete composta da tre diversi materiali, ciascuno con il proprio spessore e conducibilità termica  $\lambda$ :

La resistenza termica della parete è la somma di ciascuna resistenza termica, ovvero:

$$R = R1 + R2 + R3 = \frac{d1}{\lambda 1} + \frac{d2}{\lambda 2} + \frac{d3}{\lambda 3} \text{ [}^\circ\text{K/W]}$$

La trasmittanza termica della parete è l'inverso della sua resistenza:

$$U = \frac{1}{R} \text{ [W/}^\circ\text{K]}$$



## Resistenza termica superficiale ( $R_{si} - R_{se}$ ) [ $m^2K/W$ ]

È un fattore da **sommare** al calcolo della resistenza totale del componente edilizio. **Indica l'interazione tra la chiusura e gli scambi superficiali in relazione all'irraggiamento e alla convezione causata da movimenti di aria.** La resistenza superficiale è maggiore quando la superficie irradia poco e l'aria è calma.

Le resistenze termiche superficiali  $R_{si}$  (per interni) e  $R_{se}$  (per esterni) indicano i passaggi termici dall'aria ambientale alla superficie interna dell'elemento edile, nonché dalla superficie esterna dell'elemento edile all'aria esterna, in relazione alla direzione del flusso termico (ascendente, orizzontale o discendente).

	Parete a contatto con l'esterno			Parete a contatto con locale chiuso		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente	Ascendente	Orizzontale	Discendente
$R_{si}$	0,10	0,13	0,17	0,10	0,13	0,17
$R_{se}$	0,04	0,04	0,04	0,10	0,13	0,17

I valori riportati sotto "orizzontale" si applicano a flussi termici inclinati fino a  $\pm 30^\circ$  sul piano orizzontale.



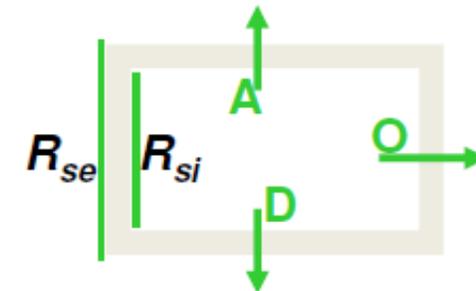
## Resistenza termica superficiale ( $R_{si} - R_{se}$ ) [ $m^2K/W$ ]

$R_{si}$  = resistenza termica superficiale interna

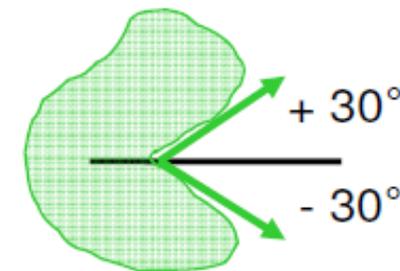
$R_{se}$  = resistenza termica superficiale esterna

In *condizioni normali* si possono usare i valori di **resistenza termica superficiale interna** ( $R_{si}$ ) e di **resistenza termica superficiale esterna** ( $R_{se}$ ) forniti dalla norma:

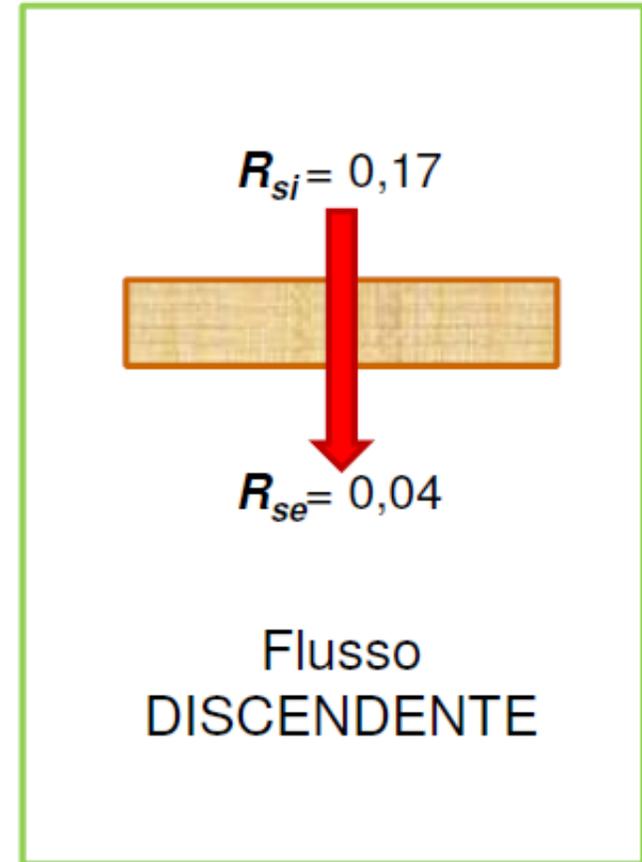
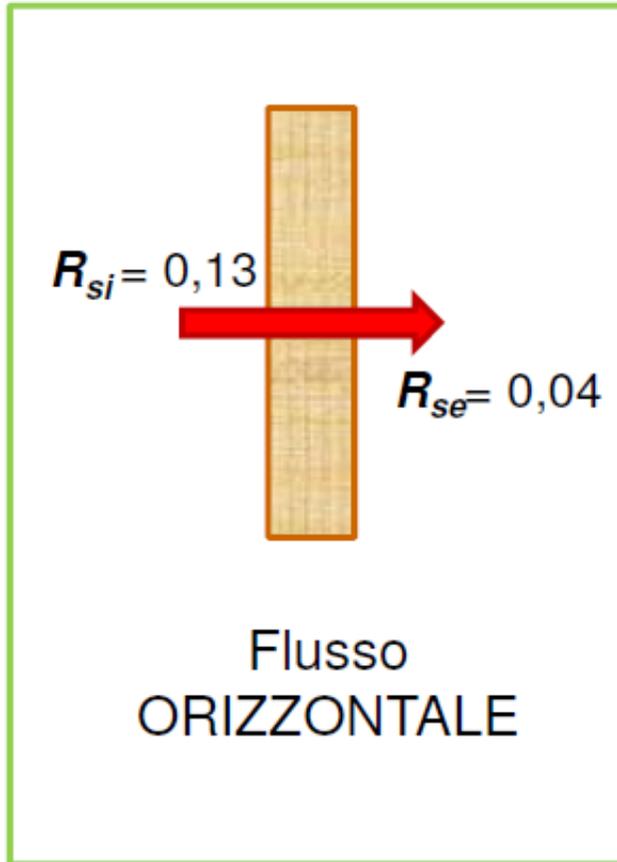
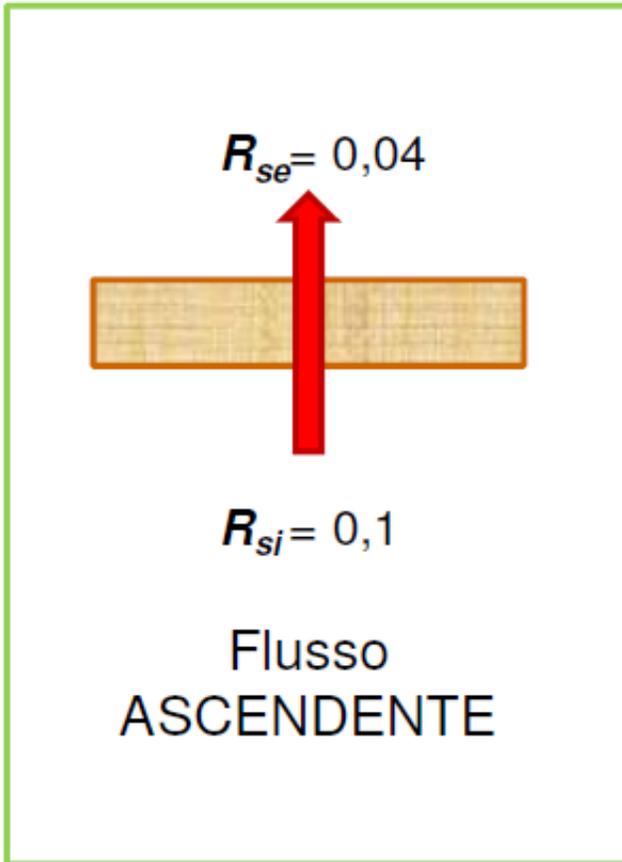
		Direzione del flusso termico		
		Ascendente	Orizzontale	Discendente
Resistenze superficiali	$R_{si}$	0,10	0,13	0,17
	$R_{se}$	0,04	0,04	0,04



- ✓ per quei casi in cui è richiesta la trasmittanza indipendentemente dal senso del flusso termico
- ✓ per flussi termici inclinati fino a  $\pm 30^\circ$  sull'orizzontale



Resistenza termica superficiale ( $R_{si} - R_{se}$ ) [ $m^2K/W$ ]



## Trasmittanza termica $U$ [W/m<sup>2</sup>K]

Rappresenta il flusso di calore che passa attraverso un elemento edilizio per m<sup>2</sup> di superficie della parete e per °K di differenza tra la temperatura interna ad un locale e la temperatura esterna o del locale contiguo.

La trasmittanza termica è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico limite e si assume pari all'inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}}$$

- $R_{si}$  e  $R_{se}$  sono le resistenze termiche superficiali interna ed esterna (m<sup>2</sup>K/W)
- $R_1, R_2, R_n$  sono le resistenze termiche utili relative ai diversi strati della chiusura



# Valori secondo normativa vigente (DM 26/6/15 “ Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici”)

## per strutture opache verticali e orizzontali o inclinate

Il valore limite della trasmittanza termica delle chiusure opache ( $U$ ) espressa in  $W/m^2K$ , riferito alle varie tipologie di strutture ed alla zona climatica, è nel seguito indicato:

**TABELLA 1** (Appendice A)

Trasmittanza termica  $U$  di riferimento delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non riscaldati o contro terra

Zona climatica	$U_{ref}$ [ $W/m^2K$ ]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

**TABELLA 2** (Appendice A)

Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non riscaldati

Zona climatica	$U_{ref}$ [ $W/m^2K$ ]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

Emilia Romagna: zona E

## Capacità termica [kg/m<sup>2</sup>]

È la massa per unità di superficie delle pareti opache, compresa la malta dei giunti esclusi gli intonaci.

Rappresenta il parametro principale che **caratterizza il comportamento dinamico della parete in relazione allo sfasamento dell'onda termica** dovuta agli apporti termici solari e all'irraggiamento termico.

Gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto di **adeguati valori di massa superficiale** delle pareti opache possono essere raggiunti, in alternativa, con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettono di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell'andamento dell'irraggiamento solare.

La **capacità termica** di un materiale descrive la sua attitudine ad accumulare calore che successivamente viene riceduto all'ambiente.

**Tanto più la capacità termica è elevata tanto meno cambiano le temperature dell'ambiente interno al variare delle temperature esterne.**

La capacità termica di un corpo di massa  $m$  rappresenta il calore necessario per fare variare di un grado la temperatura dello stesso. A parità di calore specifico, maggiore è la massa di un corpo e maggiore sarà la sua capacità termica.

$c$  = calore specifico unitario [J/kgK]

$m$  = massa unitaria [kg]

$\Delta t$  = variazione di temperatura

$$C = m \times c$$

# Inerzia termica

L'inerzia termica definisce il comportamento di un edificio in regime variabile che ha quando gli scambi di calore sono, appunto, **variabili**. Questa condizione è determinata da fluttuazioni:

- Della temperatura esterna (nel corso della giornata, ad esempio);
- Dalla temperatura interna (apertura o chiusura degli infissi durante la giornata);
- Della temperatura di regime interna;
- Degli apporti interni (cottura, elettrodomestici)
- Dall'irraggiamento (variazione giorno/notte, posizione del sole, nuvolosità passeggera)

L'inerzia termica descrive la reazione alle oscillazioni dello scambio di calore.

- **Se l'inerzia termica è alta, l'ambiente interno rimane prossimo alla condizione di stato stazionario;**
- **Se l'inerzia termica è bassa, l'interno varia con la variazione degli scambi.**

L'inerzia termica dipende:

- **Dai materiali che costituiscono l'involucro e dalla loro successione stratigrafica**
- **Dal peso dei solai e delle partizioni interne a contatto con l'aria interna**



## Inerzia termica

Nelle condizioni naturali, la temperatura dell'ambiente esterno varia durante la giornata e questa variazione è spesso più sensibile nella stagione estiva che in quella invernale. Di conseguenza è errato, o quanto meno insufficiente, basare i ragionamenti in materia di isolamento esclusivamente sulla trasmittanza U.

**Il termine inerzia termica è utilizzato dunque per descrivere la capacità di un materiale o di una struttura edilizia di immagazzinare energia termica e di ritardare la trasmissione del calore.** Essa è dunque funzione del calore specifico (c), della massa superficiale ( $m_s$ ) e della conducibilità termica ( $\lambda$ ) di un materiale.

I **benefici** dell'inerzia termica sono:

- Ridurre il surriscaldamento in estate ed evitare o diminuire il bisogno di raffrescamento attraverso dispositivi meccanici
- Beneficiare degli apporti solari in inverno, soprattutto nel caso di uso continuativo dei locali.



## Inerzia termica

L'inerzia termica di una parete è misurabile attraverso due grandezze che descrivono l'onda termica:

- Lo **sfasamento ( $S$  o  $\Delta t$ )**, che rappresenta il ritardo temporale dell'onda termica nel passaggio attraverso la struttura in esame e legato alla capacità termica della stessa **[ore]**
- L'**attenuazione o fattore di decremento o, più comunemente, smorzamento ( $f_a$ )**, che qualifica la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio attraverso la struttura in esame e legato alla conducibilità della stessa **[numero adimensionale inferiore a 1 dato dal rapporto tra il massimo flusso della parete in esame e il massimo flusso di una parete a massa termica nulla]**; minore è il valore del fattore di attenuazione e maggiore è la riduzione del flusso termico entrante.

I **benefici** derivanti da questi due fenomeni sono evidenti:

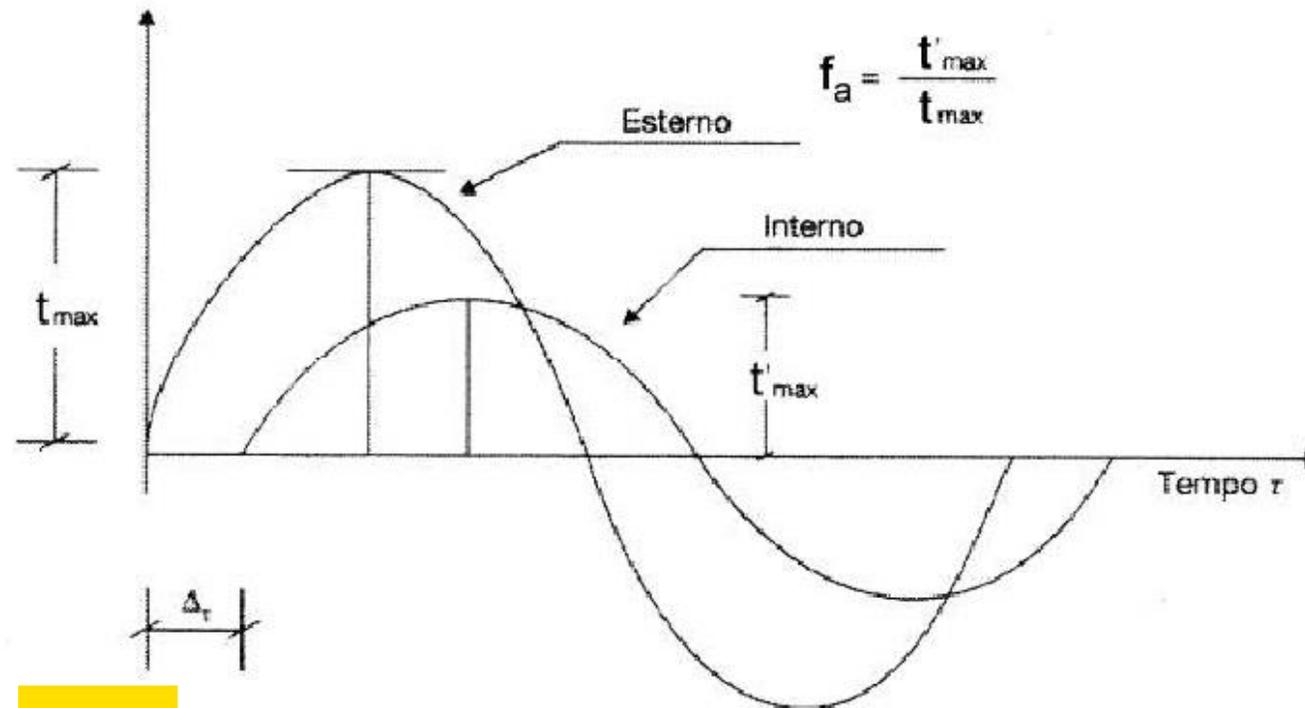
- L'attenuazione suggerisce la possibilità di ridurre il dimensionamento dell'impianto di climatizzazione estiva dell'edificio;
- lo sfasamento indica la collocazione temporale (cioè in quali condizioni termiche ambientali si farà sentire) dell'apparire all'interno dell'abitazione delle condizioni peggiori del clima naturale esterno (minima temperatura notturna d'inverno e massima insolazione d'estate).



## Inerzia termica

Quindi, l'incremento dell'inerzia termica ha due effetti:

- riduce il rapporto fra l'ampiezza dell'oscillazione della temperatura interna  $t'_{\max}$  e l'ampiezza dell'oscillazione della temperatura esterna  $t_{\max}$  (aumenta il grado di attenuazione dell'onda termica)
- aumenta l'intervallo di tempo  $\Delta t$  con cui si manifestano all'interno le variazioni della temperatura esterna (aumenta il ritardo o sfasamento dell'onda termica)



# Calcolo della trasmittanza termica di chiusure opache

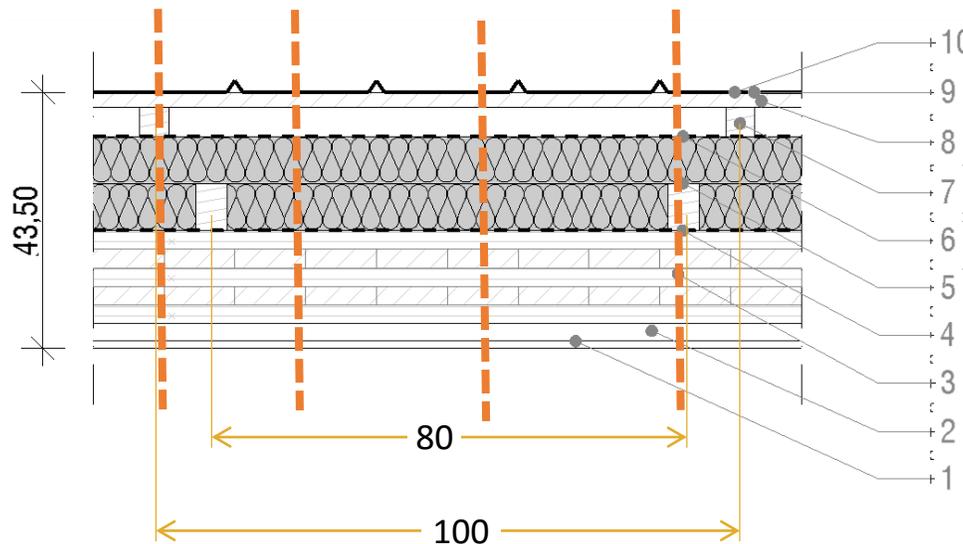
## REGOLE GENERALI

1. Tutti gli **strati sottili** (freni/barriere al vapore, telo antivento, guaine impermeabilizzanti, ecc.) hanno spessori talmente irrisori da non modificare sostanzialmente la trasmittanza termica e, pertanto, non vanno considerati
2. Ogni volta che è presente un'**intercapedine ventilata**, il conteggio degli strati si ferma allo strato precedente all'intercapedine
3. Se nell'intercapedine c'è **aria ferma**, lo strato va conteggiato nel totale, con la relativa conducibilità termica
4. Ogni volta che ci sono delle **listellature** di compartimentazione dell'isolante, la trasmittanza finale della chiusura è pari alla media ponderata delle trasmittanze di tutte le sezioni con differente resistenza
5. Le **coperture a falda** vanno considerate nella sezione perpendicolare alla pendenza e non in proiezione orizzontale



# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 1) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



1. Pannello in cartongesso, 1,5 cm
2. Intercapedine impiantistica su supporto di montanti in alluminio, 3 cm
3. **Pannello in legno lamellare multistrato (tipo x-lam), 14 cm**
4. Barriera al vapore
5. Isolante termico, 8+8 cm con listelli 5x8
6. Membrana traspirante/telo antivento
7. Intercapedine stagna con listellatura per pendenza, 5 x 5 cm variabili
8. Pannello OSB, 2,5 cm
9. Guaina impermeabilizzante
10. Manto di copertura in lamiera metallica

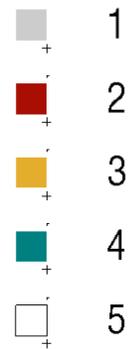
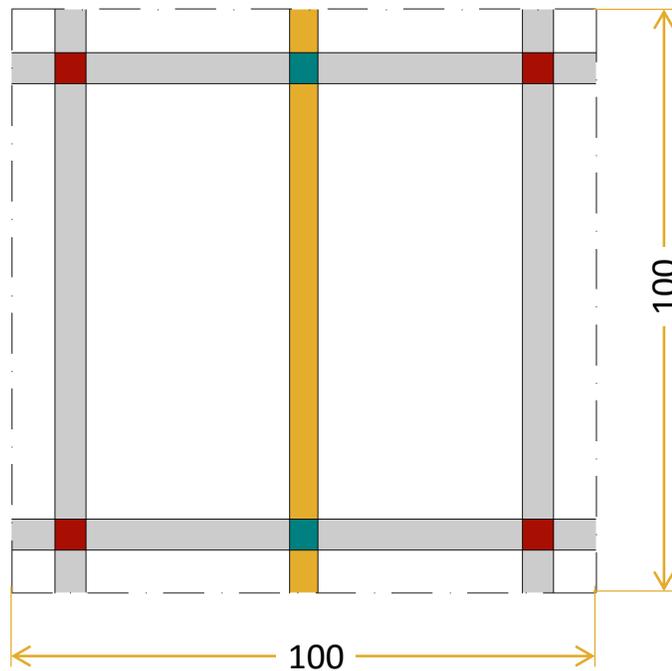
Reperire di ogni materiale/stratigrafia i valori di  $\lambda$  e relativo spessore in metri.

Calcolare quindi la resistenza termica R di ogni strato:  $R = s / \lambda$



# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 2) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



### DEFINIZIONE DELLE PERCENTUALI DI INCIDENZA DI CIASCUNA SEZIONE DELLA CHIUSURA

- 1 SEZIONE 1: listello semplice fra coibente
- 2 SEZIONE 2: listelli fra coibente incrociati
- 3 SEZIONE 3: listello per pendenza sotto manto
- 4 SEZIONE 4: intersezione listello pendenza e listello coib.
- 5 SEZIONE 5: solo coibente

SEZIONE 1:  $(0,05 \times 1 \times 4) - (0,05 \times 0,05 \times 4 \times 2 \text{strati}) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,175$

SEZIONE 2:  $0,05 \times 0,05 \times 4 = 0,01$

SEZIONE 3:  $(0,05 \times 1) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,045$

SEZIONE 4:  $0,05 \times 0,05 \times 2 = 0,005$

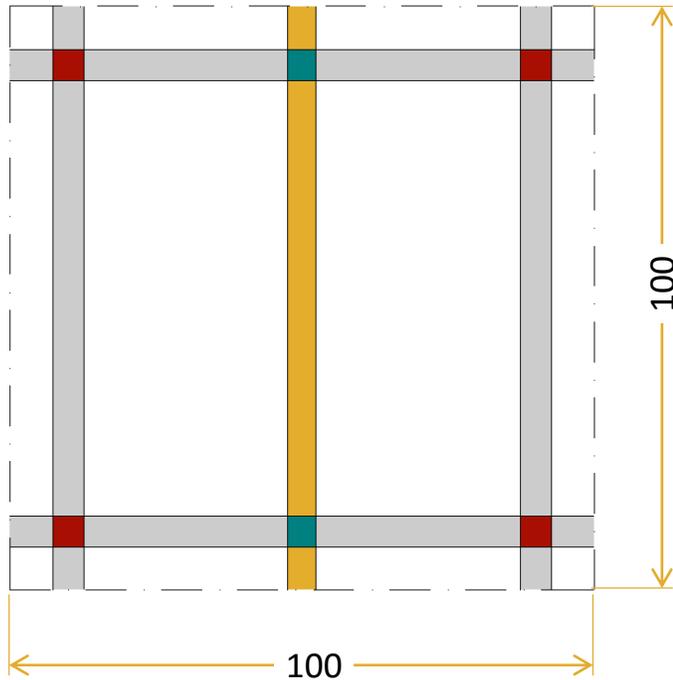
SEZIONE 5:  $1 - 0,235 = 0,765$

} = 1

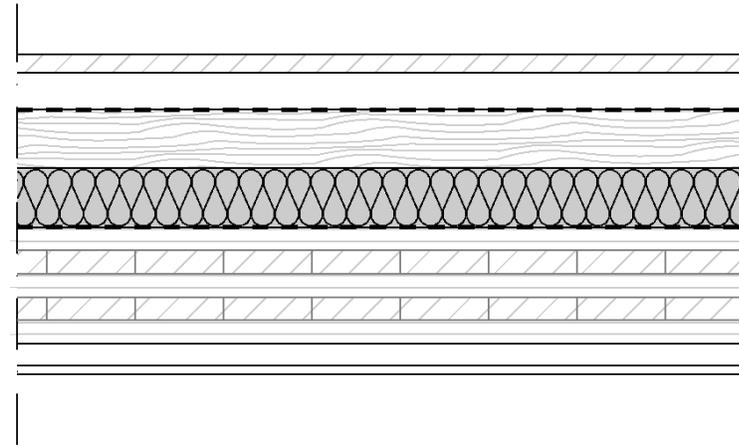


# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 3) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



1



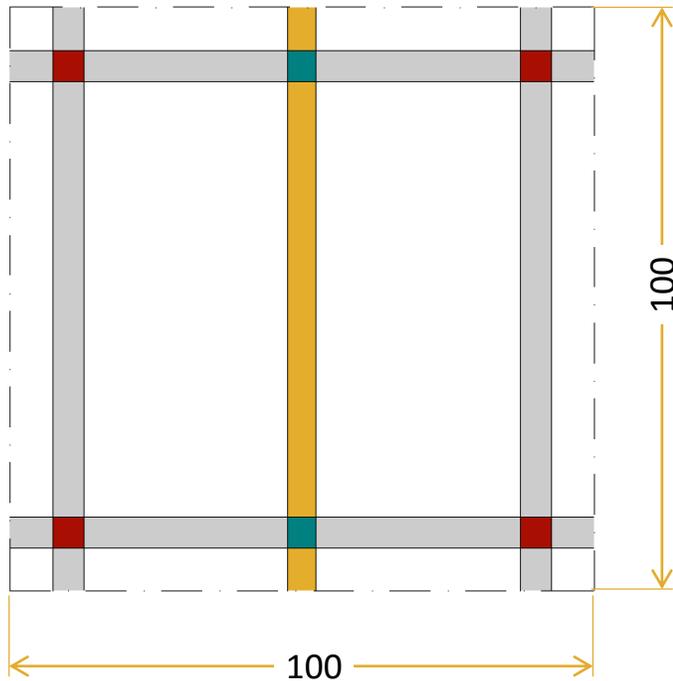
$$U_1 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,182 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SEZIONE 1:  $(0,05 \times 1 \times 4) - (0,05 \times 0,05 \times 4 \times 2 \text{strati}) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,175$

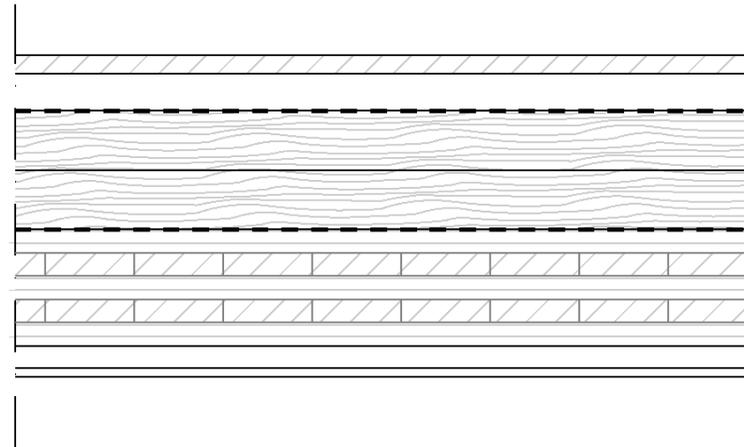


# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 4) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



■ 2



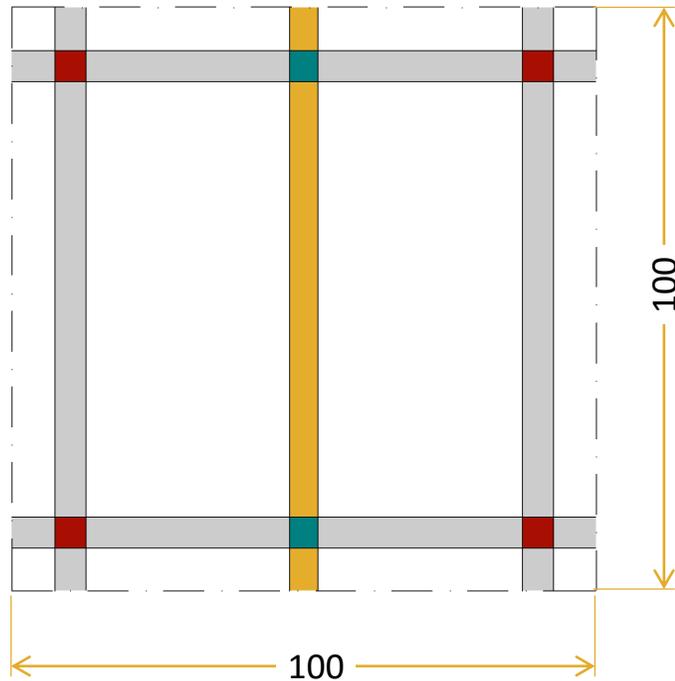
$$U_2 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,244 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SEZIONE 2:  $0,05 \times 0,05 \times 4 = 0,01$

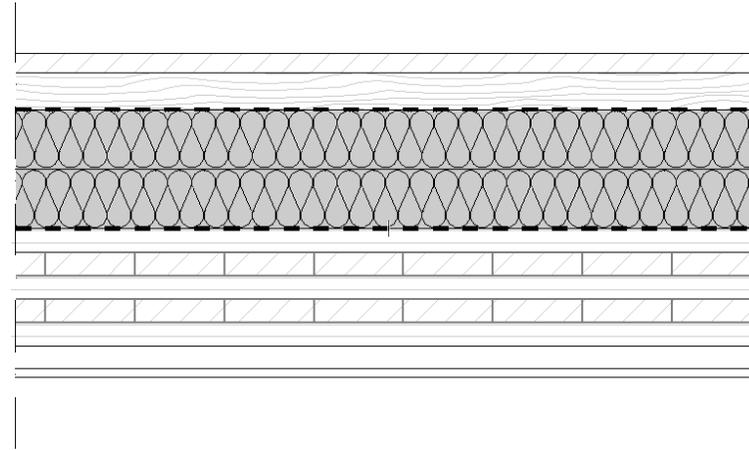


# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 5) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



3



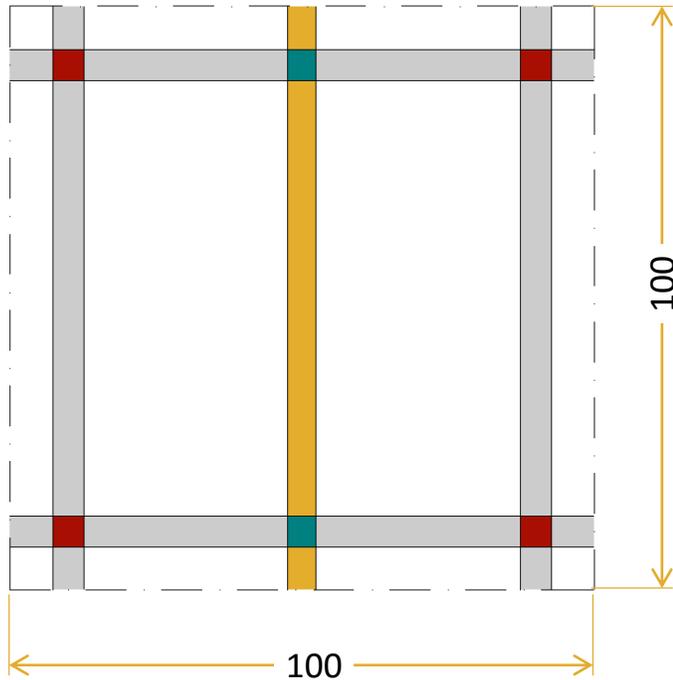
$$U_3 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SEZIONE 3:  $(0,05 \times 1) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,045$

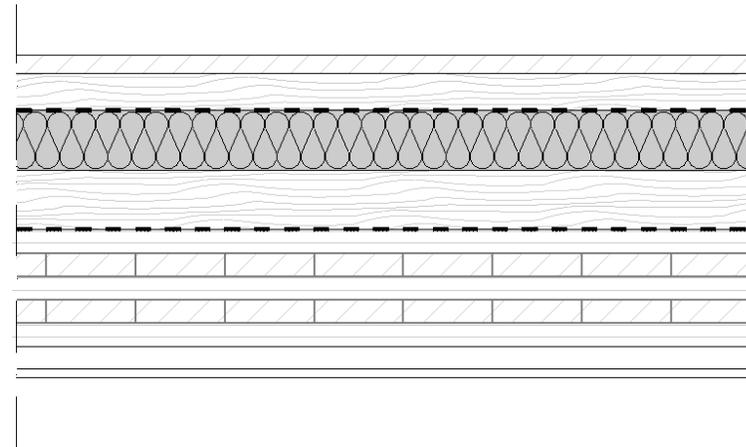


# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 6) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



4



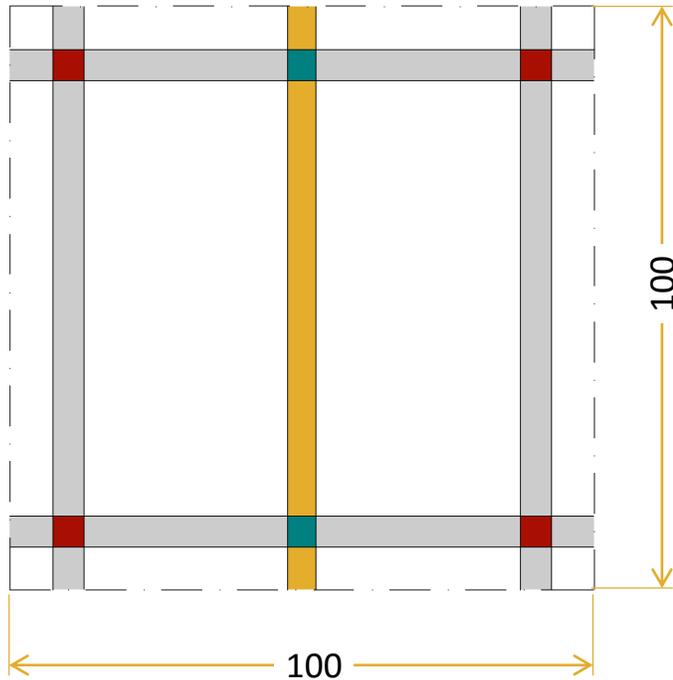
$$U_4 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SEZIONE 4: 0,05x0,05x2=0,005

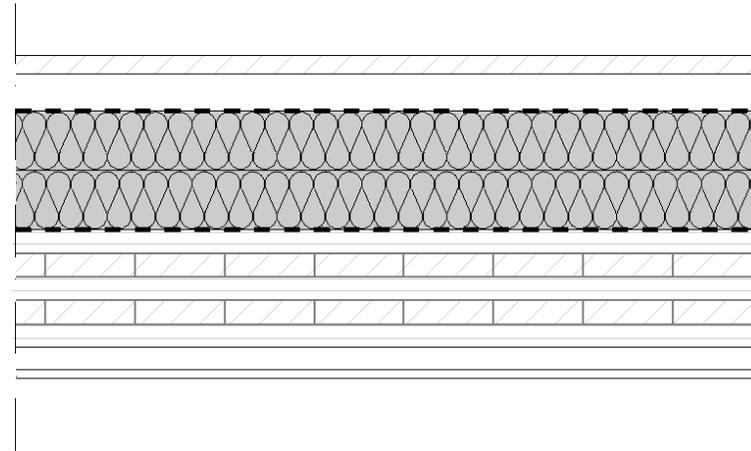


# Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

## 7) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale



□ 5



$$U_5 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,146 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SEZIONE 5: 1-0,235=0,765



## Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

### 8) Chiusura inclinata superiore con isolamento sopra l'orditura principale

$$\begin{aligned}U_{\text{tot}} &= (0,175 \times 0,182 \text{ W/m}^2\text{K}) + (0,01 \times 0,244 \text{ W/m}^2\text{K}) + \\ &+ (0,045 \times 0,188 \text{ W/m}^2\text{K}) + (0,005 \times 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}) + \\ &+ (0,765 \times 0,146 \text{ W/m}^2\text{K}) = \\ &= \mathbf{0,155 \text{ W/m}^2\text{K}}\end{aligned}$$

**ottengo la media ponderata.**

