

23 novembre 2016

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 λ) 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 ΔT 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:

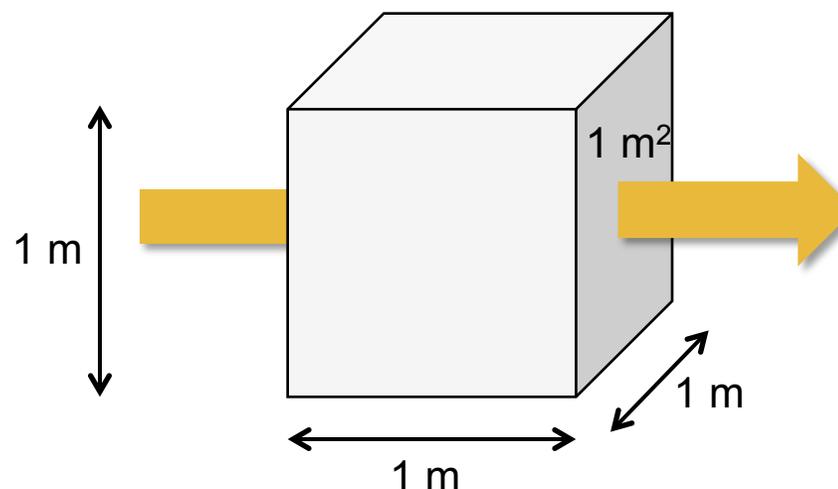
$$Q = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \quad [\text{J/s}]$$

Conducibilità termica λ [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 m², 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.



λ basso ($0,002 < \lambda < 0,10$)



Materiale ad alte prestazioni isolanti

λ alto ($0,11 < \lambda < 3,00$)



Materiale a basse prestazioni isolanti

Conduttanza C [W/m²K]

La conduttanza termica indica la quantità di calore che attraversa, in 1 ora, 1 m² di un materiale dello spessore s quando il salto di temperatura tra le due facce è di 1 K. Un valore basso di λ è indice di un'alta conduttanza, mentre un valore alto indica una conduttanza ridotta.

$$C = \lambda / s$$

Resistenza termica R [m²K/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_i 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.

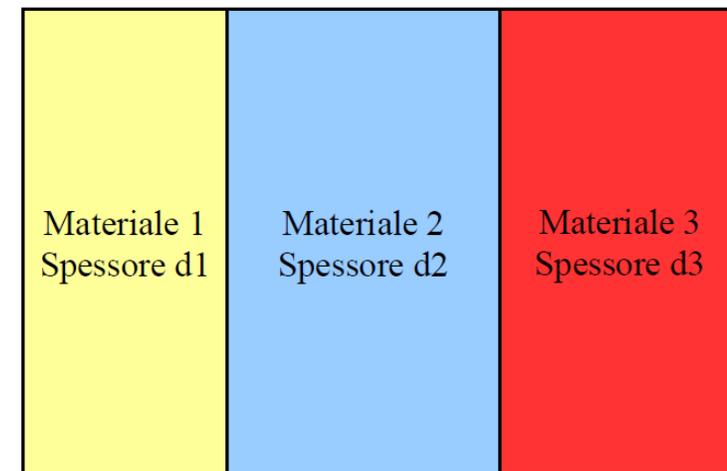
In seguito è riportato un esempio esplicativo di quanto esposto. Si consideri la parete composta da tre diversi materiali, ciascuno con il proprio spessore e conducibilità termica λ .

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.



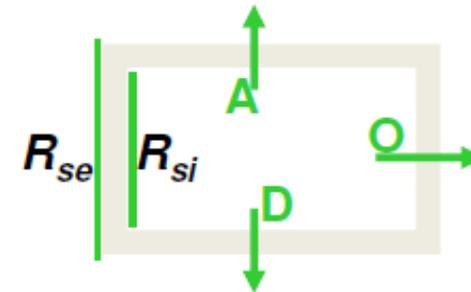
Resistenza termica superficiale ($R_{si} - R_{se}$) [m^2K/W]

R_{si} = resistenza termica superficiale interna

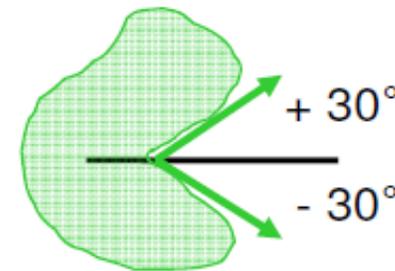
R_{se} = resistenza termica superficiale esterna

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:

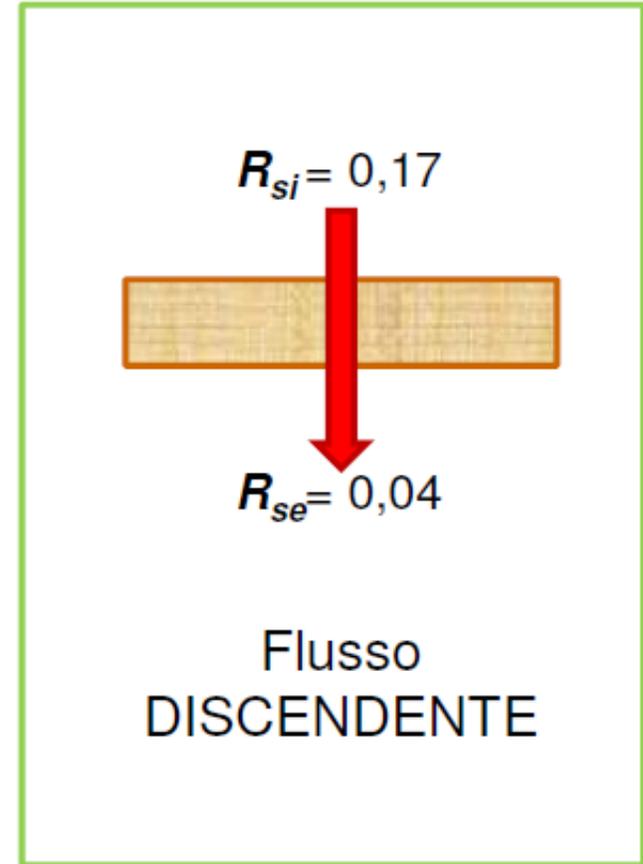
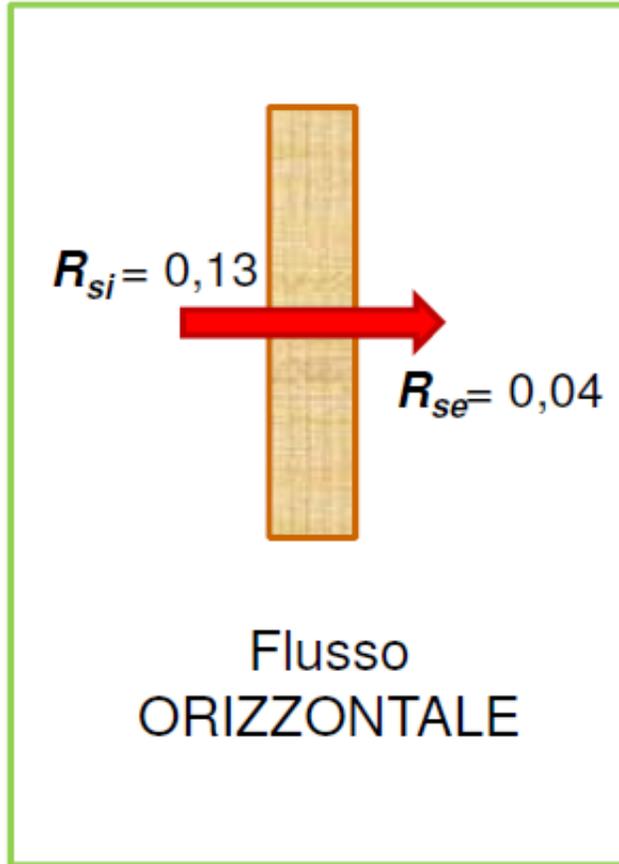
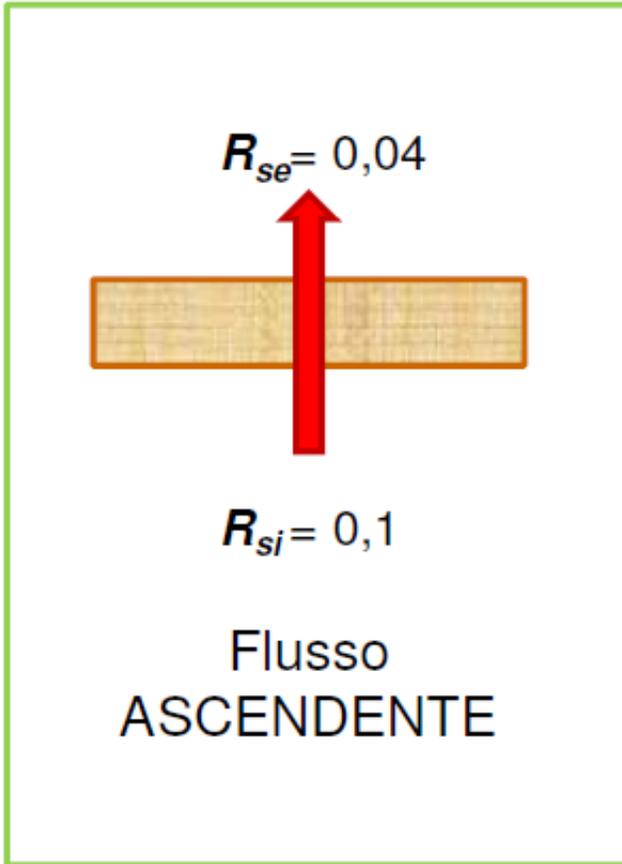
		Direzione del flusso termico		
		Ascendente	Orizzontale	Discendente
Resistenze superficiali	R_{si}	0,10	0,13	0,17
	R_{se}	0,04	0,04	0,04



- ✓ 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/m²K]

Rappresenta il flusso di calore che passa attraverso un elemento edilizio per m² 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 liminare 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 (m²K/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/m²]

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]

Δt = 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 (λ)** 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 Δt)**, 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:

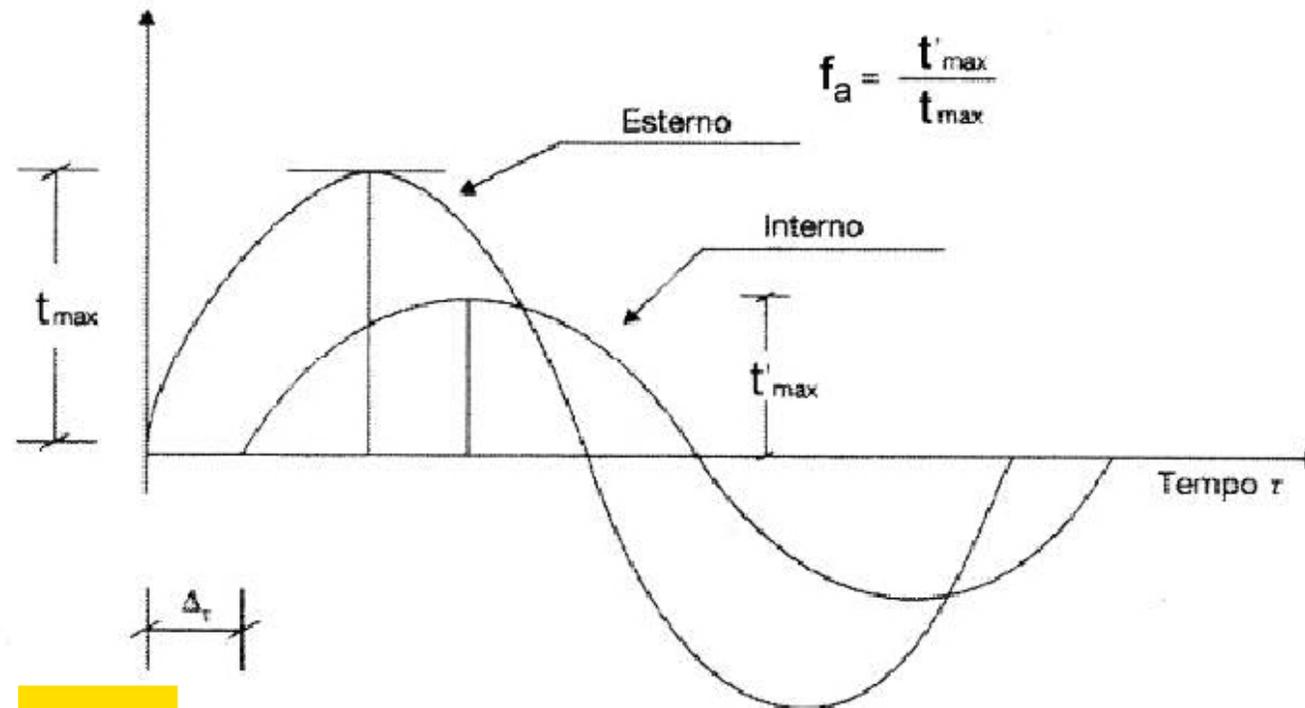
- L'attenuazione suggerisce la possibilità di ridurre il dimensionamento dell'impianto di climatizzazione estiva dell'edificio;
- lo sfasamento indica la collocazione temporale (cioè in quali condizioni termiche ambientali si farà sentire) dell'apparire all'interno dell'abitazione delle condizioni peggiori 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 Δt 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

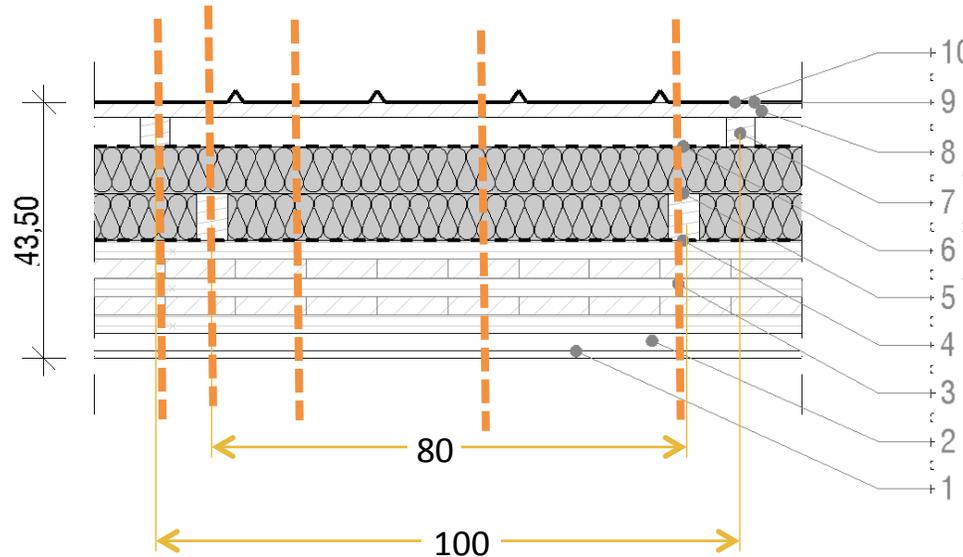
REGOLE GENERALI

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



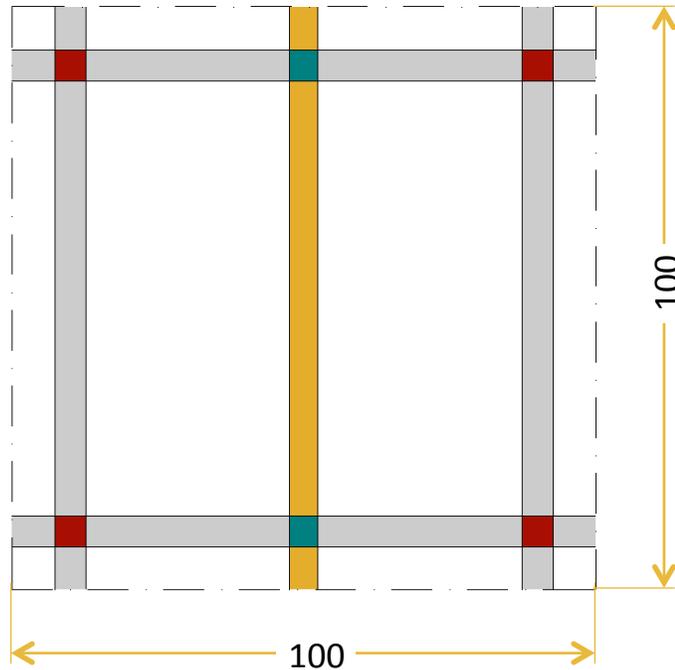
1. Pannello in cartongesso, 1,5 cm
2. Intercapedine impiantistica su supporto di montanti in alluminio, 3 cm
3. **Pannello in legno lamellare multistrato (tipo x-lam), 14 cm**
4. Barriera al vapore
5. Isolante termico, 8+8 cm con listelli 5x8
6. Membrana traspirante/telo antivento
7. Intercapedine stagna 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 λ 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



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

DEFINIZIONE DELLE PERCENTUALI DI INCIDENZA DI CIASCUNA SEZIONE DELLA CHIUSURA

- SEZIONE 1:** listello semplice fra coibente
- SEZIONE 2:** listelli fra coibente incrociati
- SEZIONE 3:** listello per pendenza sotto manto
- SEZIONE 4:** intersezione listello pendenza e listello coib.
- 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: $0,05 \times 0,05 \times 2 = 0,005$

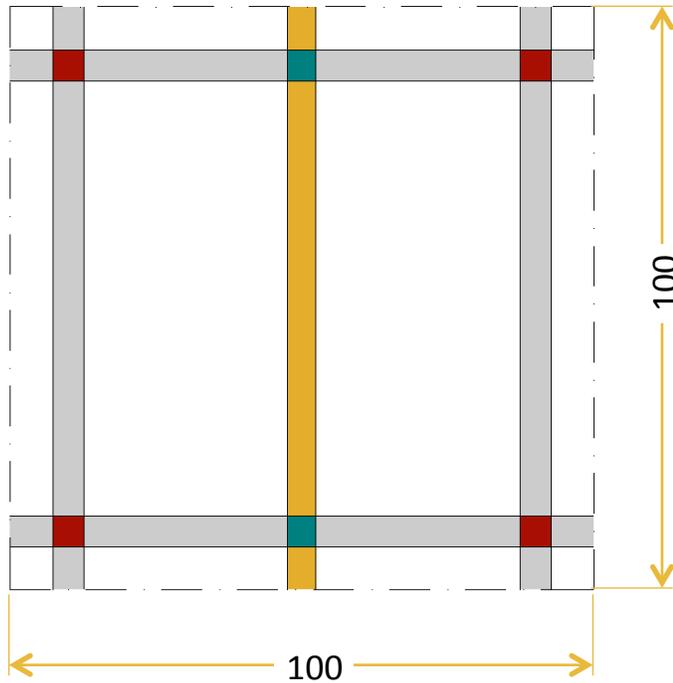
SEZIONE 5: $1 - 0,235 = 0,765$

} = 1

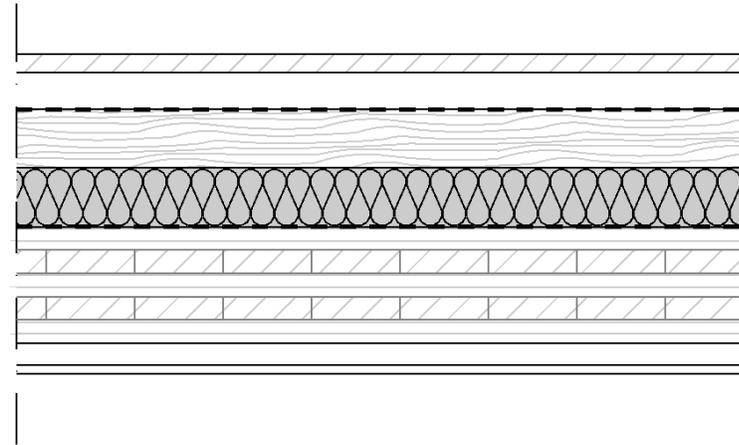


Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

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



1

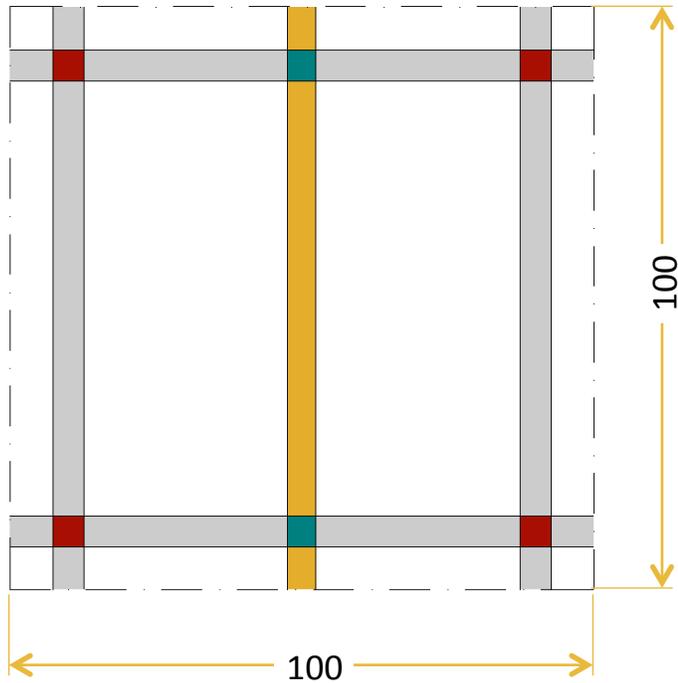


$$U_1 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,182 \text{ W/m}^2\text{K}$$

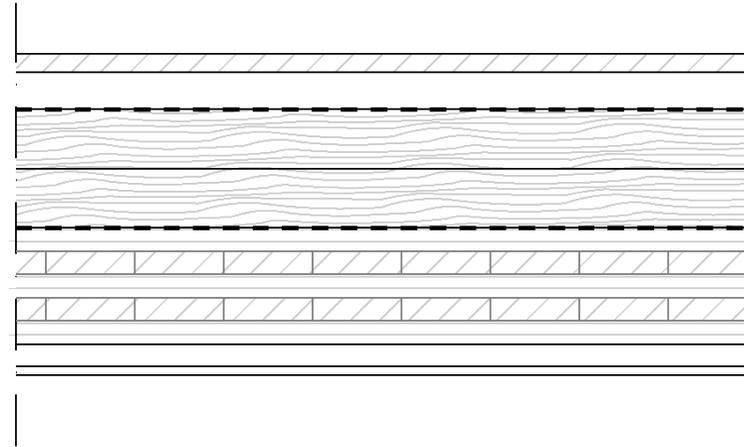
SEZIONE 1: $(0,05 \times 1 \times 4) - (0,05 \times 0,05 \times 4 \times 2 \text{strati}) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,175$

Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

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



■ 2

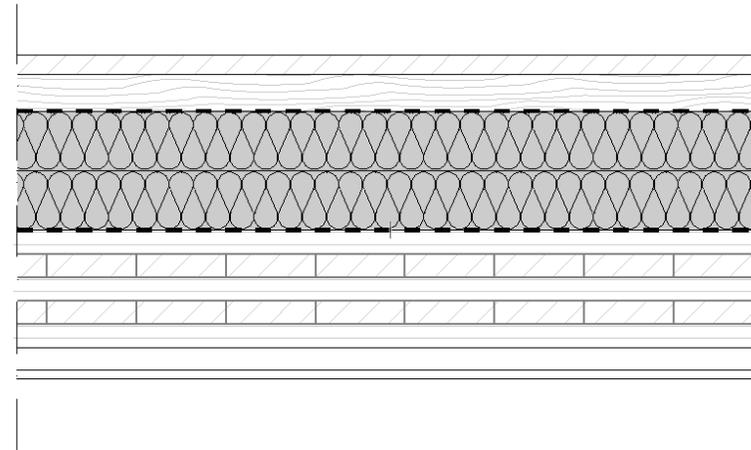
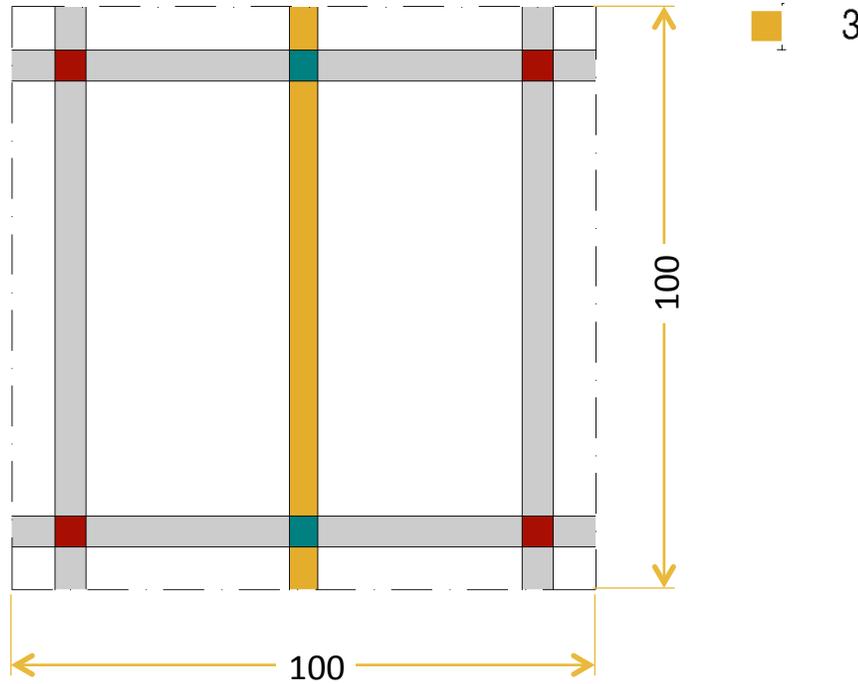


$$U_2 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,244 \text{ W/m}^2\text{K}$$

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

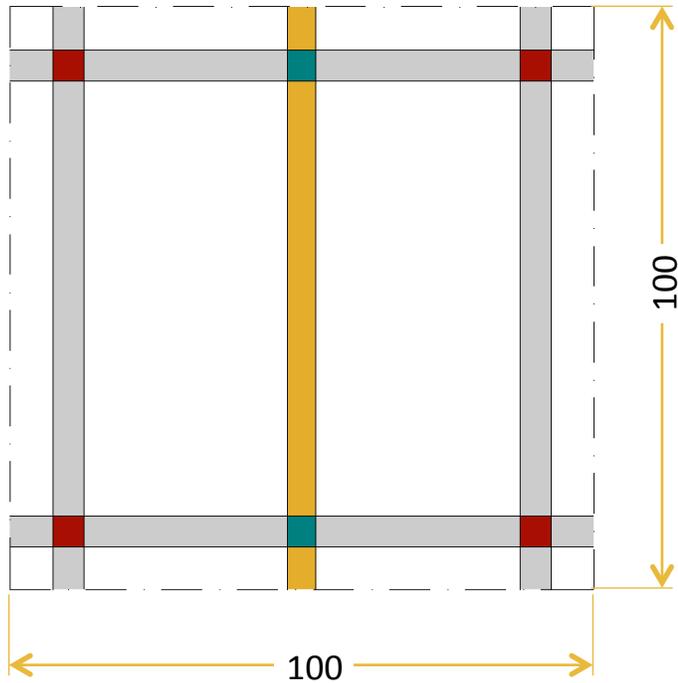


$$U_3 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$$

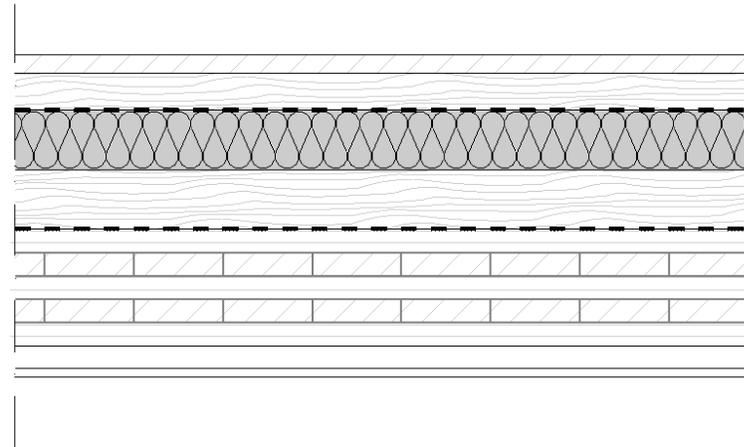
SEZIONE 3: $(0,05 \times 1) - (0,05 \times 0,05 \times 2) = 0,045$

Calcolo della trasmittanza termica di alcune chiusure

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



4

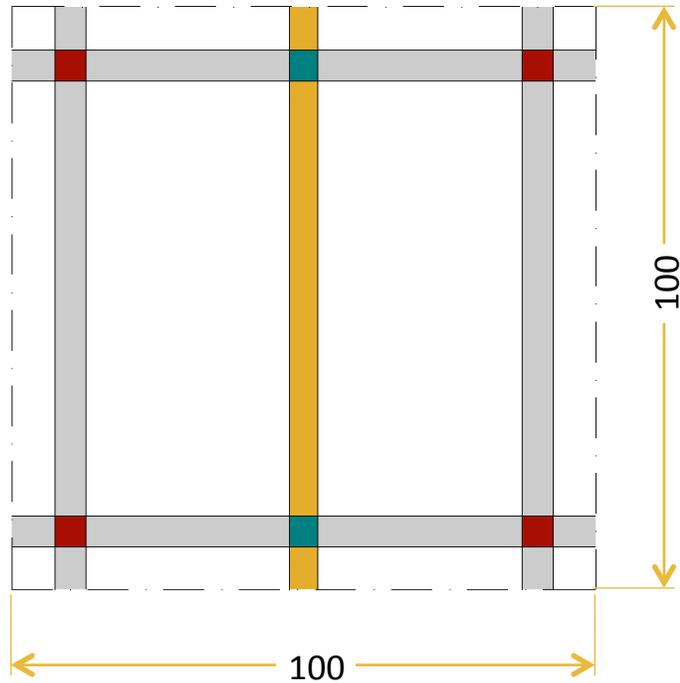


$$U_4 = 1/R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se} = 0,170 \text{ W/m}^2\text{K}$$

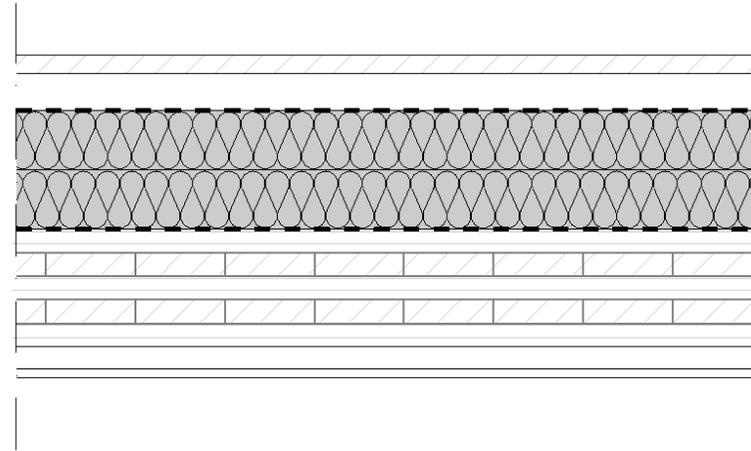
SEZIONE 4: 0,05x0,05x2=0,005

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.

