



Francesco Tariello

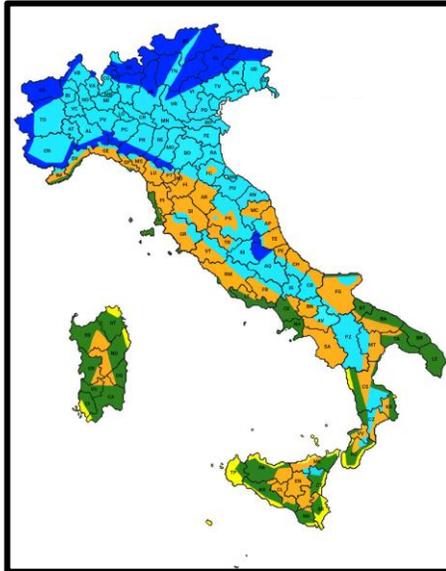
DiAAA – Department of Agricultural, Environmental and Food Sciences
Università degli Studi del Molise

Il Comportamento Inverno Estate delle Strutture Opache Esistenti e la Progettazione di Nuovi Edifici nZEB

NOTE INTRODUTTIVE

- ✘ In base al DPR 412/93, il territorio nazionale è suddiviso in **sei zone climatiche** in funzione dei gradi-giorno, indipendentemente dalla ubicazione geografica, come evidenziato in tabella.
- ✘ Per ciascuna zona climatica, si stabiliscono i giorni di accensione e spegnimento degli **impianti di riscaldamento** ed il massimo numero di ore giornaliere di funzionamento (che deve essere comunque compresa tra le ore 05:00 e le ore 23:00, ad eccezione della zona F) per gli edifici del settore civile e del terziario.

| Zona | Gradi Giorno | Ore giornaliere | Periodo di funzionamento |
|------|--------------------|---------------------|--------------------------|
| A | $GG < 600$ | 6 | dal 1/12 al 15/3 |
| B | $601 < GG < 900$ | 8 | dal 1/12 al 31/3 |
| C | $901 < GG < 1400$ | 10 | dal 15/11 al 31/3 |
| D | $1401 < GG < 2100$ | 12 | dal 1/11 al 15/4 |
| E | $2101 < GG < 3000$ | 14 | dal 15/10 al 15/4 |
| F | $GG > 3001$ | Nessuna Limitazione | |



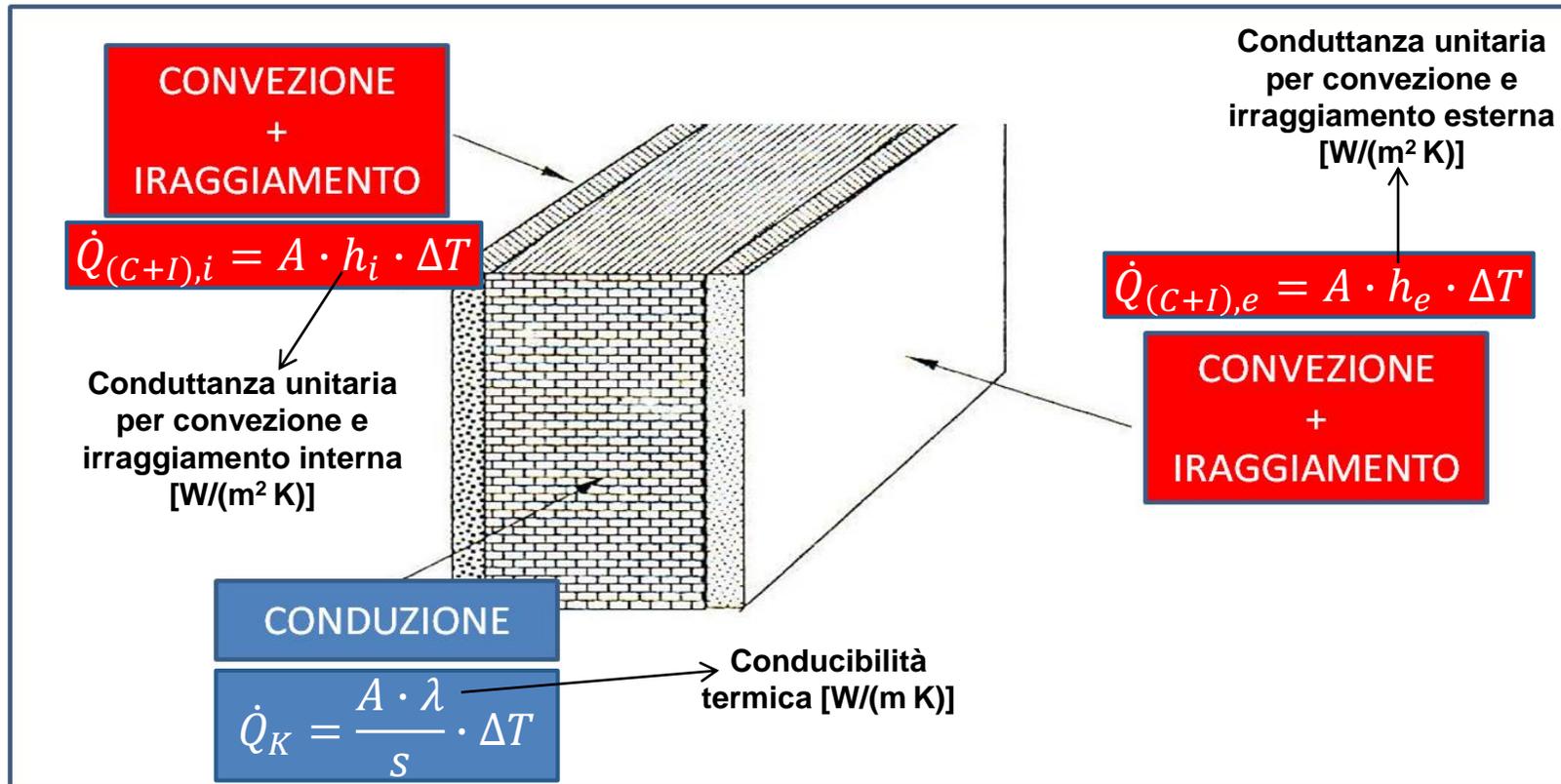
Gradi Giorno (GG): sommatoria, estesa a tutto il periodo convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive fra temperatura ambiente (20 °C) e temperatura media esterna giornaliera ($T_{me,j}$).

$$GG = \sum_{j=1}^n (20 - T_{me,j})^+$$

- ✘ In base ai GG vengono stabiliti molti dei vincoli normativi relativi all'involucro edilizio.

COMPORTAMENTO INVERNALE

L'involucro edilizio costituisce l'elemento che si interpone tra l'ambiente interno climatizzato e quello esterno, che nel periodo invernale si trova ad una temperatura inferiore. Pertanto, le caratteristiche dell'involucro determinano l'entità del flusso termico scambiato tra l'interno e l'esterno.



Per tener conto dei tre meccanismi di scambio termico che agiscono in maniera combinata si introduce la **trasmissione termica (U)**.

Quindi la potenza termica scambiata si può calcolare come:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) \quad [\text{W}]$$

La trasmissione termica U, spesso definita anche "coefficiente globale di scambio termico" della parete, si esprime in W/m²K.

*Il metodo per calcolarla è definito nella **UNI EN ISO 6946:2008**.*

COMPORAMENTO INVERNALE

In condizioni di regime stazionario e monodimensionale si osserva che $\dot{Q}_{(C+I),i} = \dot{Q}_K = \dot{Q}_{(C+I),e} = \dot{Q}$.

$$\dot{Q}_{(C+I),i} = A \cdot h_i \cdot (T_i - T_{S,i}) \longrightarrow \frac{\dot{Q}_{(C+I),i}}{A \cdot h_i} = (T_i - T_{S,i})$$

$$\dot{Q}_{K,a} = \frac{A \cdot \lambda_a}{s_a} \cdot (T_{S,i} - T_1) \longrightarrow \frac{\dot{Q}_{K,a} \cdot s_a}{A \cdot \lambda_a} = (T_{S,i} - T_1)$$

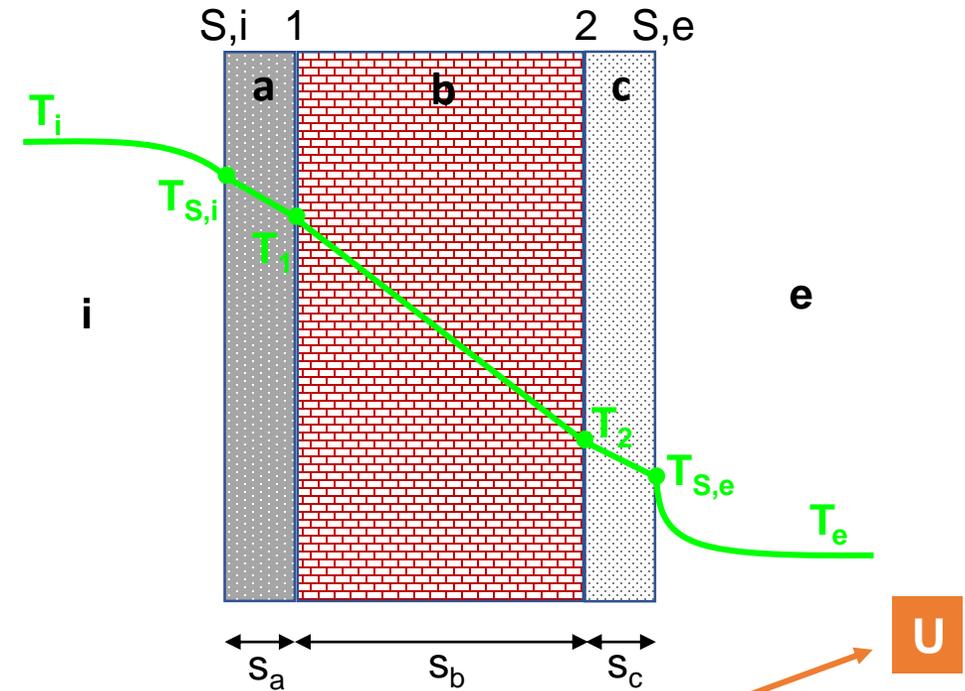
$$\dot{Q}_{Kb} = \frac{A \cdot \lambda_b}{s_b} \cdot (T_1 - T_2) \longrightarrow \frac{\dot{Q}_{K,b} \cdot s_b}{A \cdot \lambda_b} = (T_1 - T_2)$$

$$\dot{Q}_{K,c} = \frac{A \cdot \lambda_c}{s_c} \cdot (T_2 - T_{S,e}) \longrightarrow \frac{\dot{Q}_{K,c} \cdot s_c}{A \cdot \lambda_c} = (T_2 - T_{S,e})$$

$$\dot{Q}_{(C+I),e} = A \cdot h_e \cdot (T_{S,e} - T_e) \longrightarrow \frac{\dot{Q}_{(C+I),e}}{A \cdot h_e} = (T_{S,e} - T_e)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} \left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{s_b}{\lambda_b} + \frac{s_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e} \right) = (T_i - T_e)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{s_b}{\lambda_b} + \frac{s_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_e} \right)} (T_i - T_e)$$



TRASMITTANZA TERMICA

Per un componente edilizio opaco composto da più strati la trasmittanza termica si può esprimere come segue:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{x=1}^y R_x + \frac{1}{h_e}}$$

Spessore dello strato j-esimo

Meccanismi di scambio termico in serie

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + \sum_{x=1}^y R_x + R_{se}}$$

$$U = \frac{1}{\sum_{z=1}^u R_z}$$

dove:

- $R_i = 1/h_i \rightarrow$ Resistenza termica unitaria dello strato liminare dell'aria sulla superficie interna;
- $R_j = s_j/\lambda_j \rightarrow$ Resistenza termica unitaria per conduzione nello strato j-esimo omogeneo;
- $R_x \rightarrow$ Resistenza termica unitaria per conduzione nello strato x-esimo non omogeneo;
- $R_e = 1/h_e \rightarrow$ Resistenza termica unitaria dello strato liminare dell'aria sulla superficie esterna.

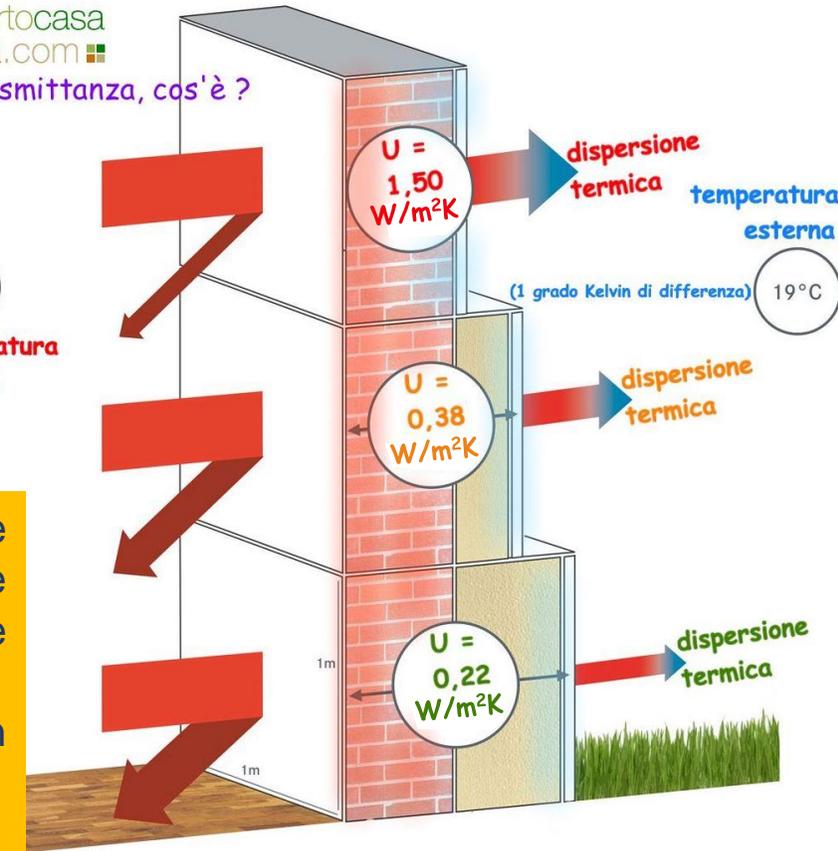
Per ridurre la trasmittanza e quindi il flusso termico serve incrementare una delle resistenze della serie:

- Si aggiunge uno strato con resistenza elevata;
- Si incrementa lo spessore;
- Si scelgono materiali con conducibilità (λ) bassa.

espertocasa
clima.com

la trasmittanza, cos'è?

20°C
temperatura interna

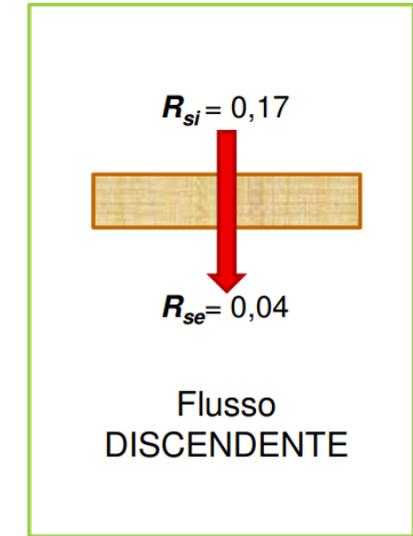
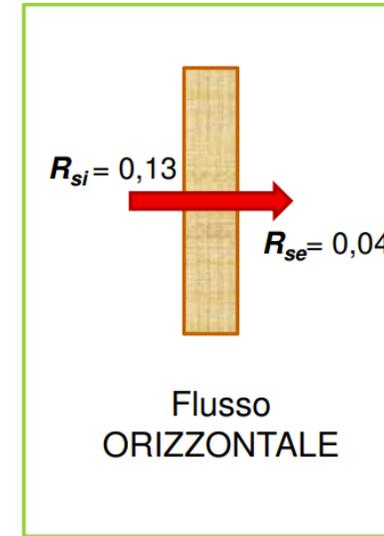
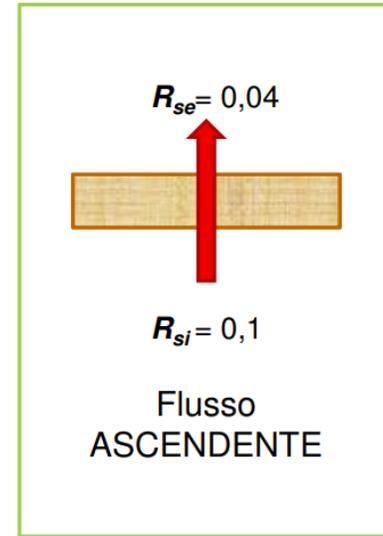


RESISTENZE TERMICHE DEGLI STRATI LIMINARI DELL'ARIA

I valori di queste resistenze nel caso di superfici piane (no sporgenze) in assenza di specifiche informazioni sulle condizioni limite vanno scelti in funzione della **direzione del flusso**, secondo il prospetto a lato.

Per superfici che non sono piane o per casi particolari, utilizzare i procedimenti dell'appendice A della UNI EN ISO 6946.

Si considera la condizione di flusso orizzontale anche nei casi in cui la direzione del flusso è inclinata di $\pm 30^\circ$ rispetto all'orizzontale.



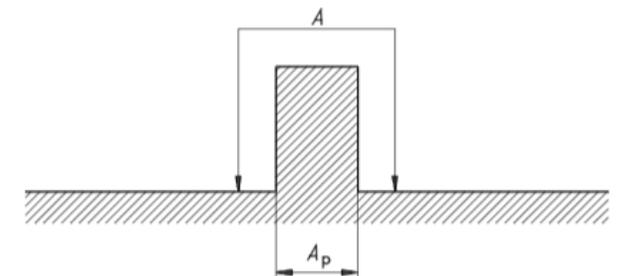
Questi valori sono ricavati per superfici con emittenza (ϵ) pari a **0,9** e valori del coefficiente di irraggiamento del corpo nero valutato a **20°C** per la resistenza superficiale interna e **10°C** per la resistenza superficiale esterna, e con **velocità dell'aria** pari a **4 m/s**.

Appendice A – Superfici con sporgenze

Le parti sporgenti rispetto al piano delle pareti, come per esempio i pilastri, non devono essere considerate nel calcolo della resistenza termica totale, se sono costituite da materiali aventi conduttività termica non maggiore di $2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Se la parte sporgente è costituita da materiale con $\lambda > 2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ e non è coibentata, la resistenza superficiale deve essere modificata come a lato.

$$R_{sp} = R_s \frac{A_p}{A}$$

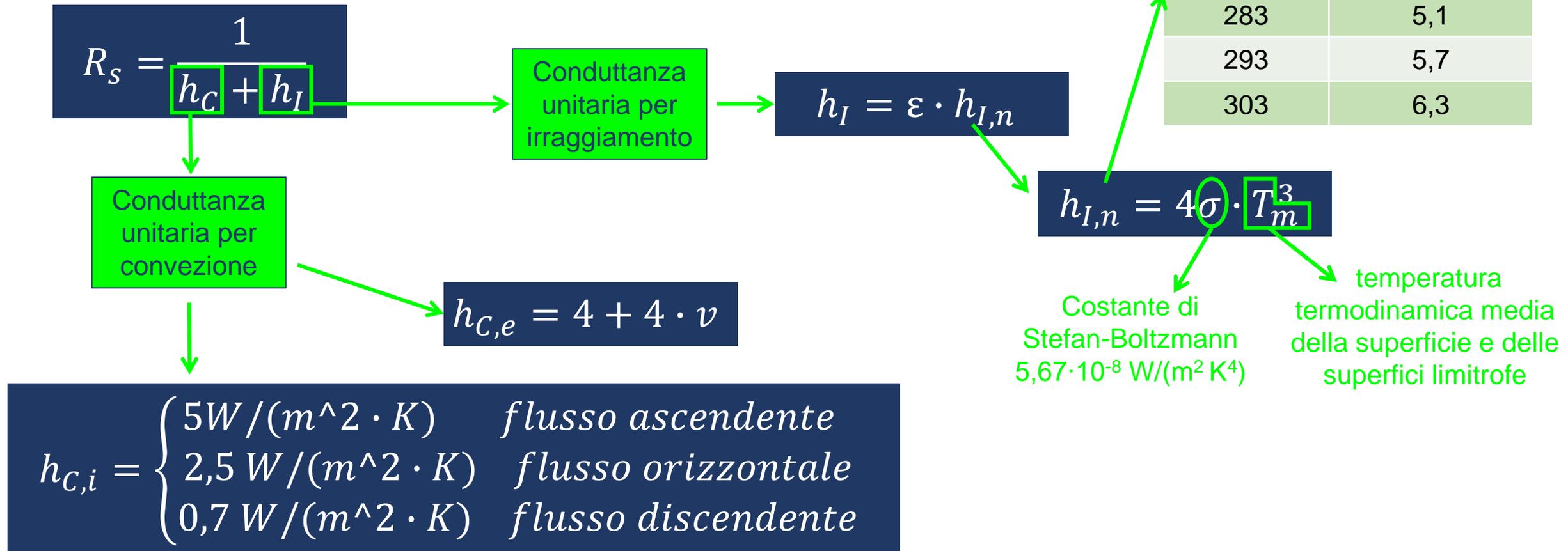
Resistenza riportata di seguito



RESISTENZE TERMICHE DEGLI STRATI LIMINARI DELL'ARIA

Appendice A – Superfici con emittanza e/o velocità del vento diversa

La resistenza degli strati liminari dell'aria si valuta come:



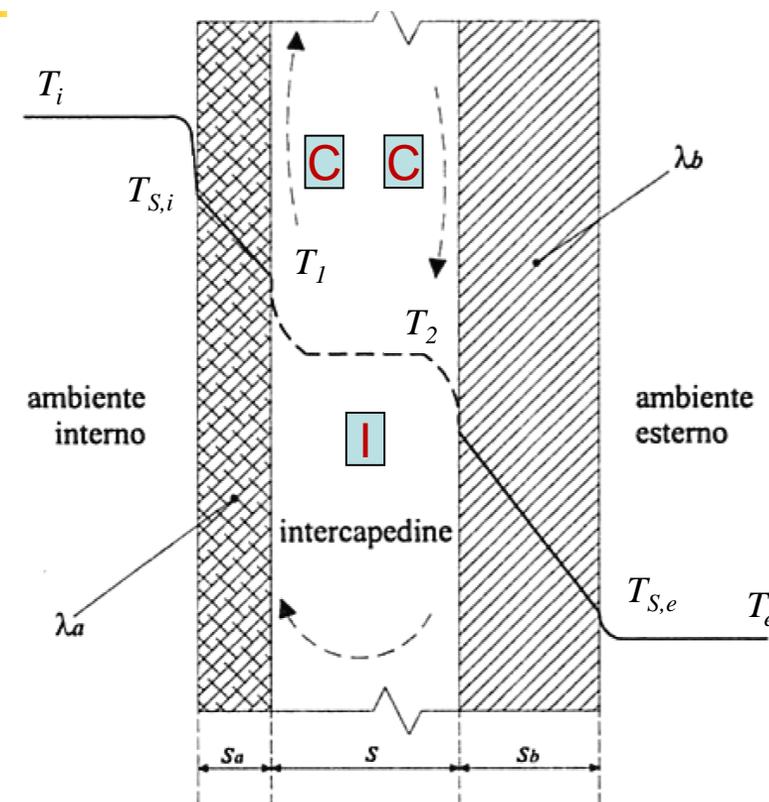
RESISTENZE TERMICHE DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Nelle intercapedini, oltre alla trasmissione per conduzione, si verifica scambio termico per **irraggiamento** **I** e **convezione** **C**.

Le intercapedini **non devono essere calcolate** come strati di materiale solido. Infatti, nelle intercapedini avvengono scambi di tipo convettivo e radiativo. La resistenza termica relativa a strati d'aria risulta essere fortemente influenzata dalla velocità dell'aria nella cavità. L'aria in quiete è un ottimo isolante termico.

Secondo la norma UNI 7357/1974 si possono avere tre situazioni:

1. Intercapedine d'aria non ventilata.
2. Intercapedine d'aria debolmente ventilata,
3. Intercapedine d'aria fortemente ventilata.



Andamento qualitativo della temperatura in una parete verticale con intercapedine

T_i, T_e = temperature del fluido

$T_{S,i}, T_{S,e}$ = temperatura delle facce esterne della parete

T_1, T_2 = temperature facce interne dell'intercapedine

RESISTENZE TERMICHE DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Con riferimento alla UNI EN ISO 6946 i valori forniti e mostrati nelle prossime slide si applicano ad un'intercapedine d'aria quando:

- essa è limitata da due facce effettivamente parallele e perpendicolari alla direzione del flusso termico e con una emittenza non minore di 0,8;
- il suo spessore (nella direzione del flusso termico) sia minore del 10% delle altre due dimensioni e comunque minore di 0,3 m;
- non scambino aria con l'ambiente interno.

Se non sono rispettate le condizioni si utilizzano i procedimenti dell'appendice B.

Intercapedine non ventilata

Per intercapedine non ventilata si intende un'intercapedine attraverso cui **non è previsto che ci sia alcun flusso d'aria.**

I valori di progetto della resistenza termica sono riportati nella Tabella a lato, in m^2K/W . I valori sotto la voce "orizzontale" si applicano nel caso di flusso termico con direzione compresa tra $+30^\circ$ e -30° rispetto al piano orizzontale.

| Spessore dell'intercapedine [mm] | Direzione del flusso termico | | |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------|----------------|
| | Verso l'alto | Orizzontale | Verso il basso |
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| 10 | 0.15 | 0.15 | 0.15 |
| 15 | 0.16 | 0.17 | 0.17 |
| 25 | 0.16 | 0.18 | 0.18 |
| 50 | 0.16 | 0.18 | 0.21 |
| 100 | 0.16 | 0.18 | 0.22 |
| 300 | 0.16 | 0.18 | 0.23 |

Nota: valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

RESISTENZE TERMICHE DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Intercapedine leggermente ventilata

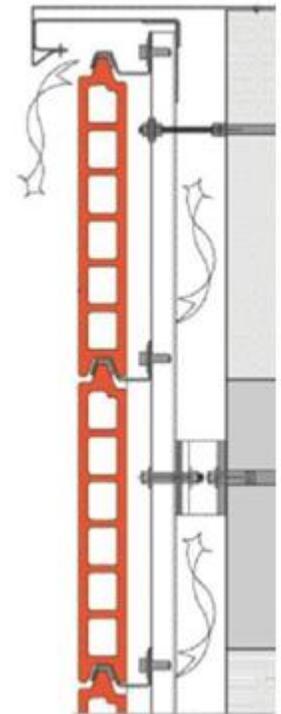
Per intercapedine leggermente ventilata si intende un'intercapedine attraverso cui è previsto che ci sia un limitato flusso d'aria proveniente dall'ambiente esterno tramite aperture con le seguenti dimensioni:

> 500 mm² e ≤ 1500 mm² per m di lunghezza, per intercapedini verticali;

> 500 mm² e ≤ 1500 mm² per m² di area della superficie, per intercapedini orizzontali.

Il valore di progetto della resistenza termica di un'intercapedine leggermente ventilata è pari alla metà del valore visto alla Tabella precedente.

Se, comunque, la somma della resistenza termica dell'intercapedine e delle resistenze tra questa e l'ambiente esterno supera 0,15 m²K/W, il valore da assumere per la resistenza equivalente di questa serie è 0,15 m²K/W.



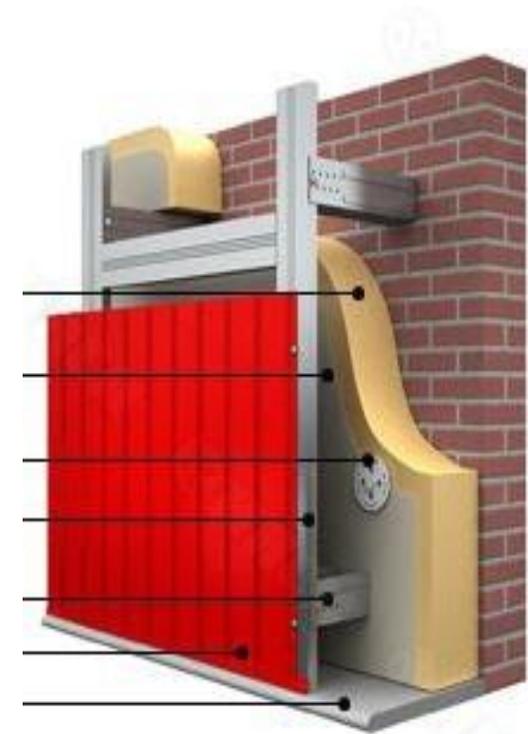
RESISTENZE TERMICHE DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Intercapedine fortemente ventilata

Per intercapedine fortemente ventilata si intende un'intercapedine le cui aperture verso l'ambiente esterno superino le seguenti dimensioni:

- $> 1500 \text{ mm}^2$ per m di lunghezza, per intercapedini verticali;
- $> 1500 \text{ mm}^2$ per m^2 di area della superficie, per intercapedini orizzontali.

La resistenza termica totale di un componente edilizio contenente un'intercapedine ben ventilata si ottiene **trascurando la resistenza termica dell'intercapedine e quella di tutti gli altri strati posizionati tra l'intercapedine e l'ambiente esterno**, ed includendo una **resistenza superficiale esterna** corrispondente ad aria in quiete (quindi **uguale alla resistenza superficiale interna** dello stesso componente edilizio).



RESISTENZE TERMICHE DELLE INTERCAPEDINI D'ARIA

Appendice B – Resistenza Termica Intercapedini d'Aria Non Ventilata

Si applica a:

- intercapedine d'aria con una larghezza e lunghezza entrambe di dimensioni dieci volte maggiori dello spessore, con lo spessore misurato nel senso del flusso termico;
- cavità con lunghezza e larghezza paragonabili allo spessore.

Se lo spessore della lama d'aria varia, dovrebbe essere utilizzato il valore medio dello spessore per il calcolo della resistenza termica.

$$R_g = \frac{1}{h_A + h_I}$$

Conduktanza unitaria per conduzione/convezione

Conduktanza unitaria per irraggiamento

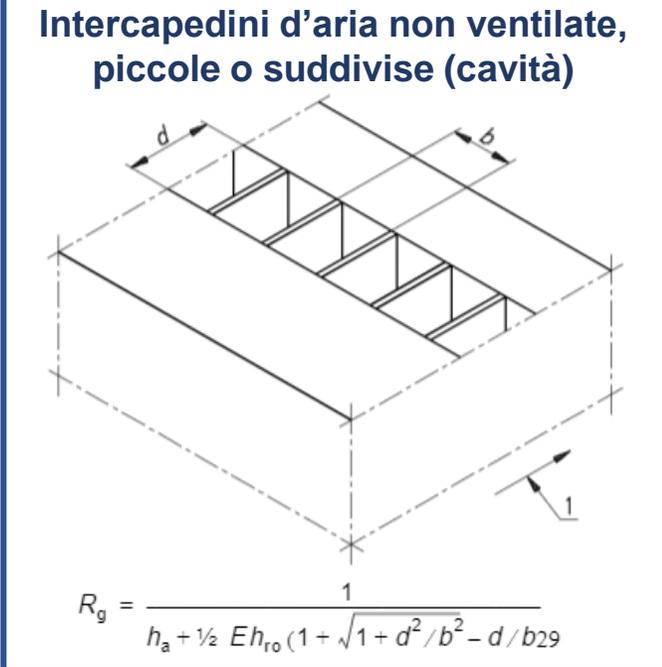
$$h_I = E \cdot h_{I,n}$$

Come prima

$$E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

Spessore Intercapedine

$$h_A = \begin{cases} \max\{1,95; 0,025 \cdot d\} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) & \text{flusso ascendente} \\ \max\{1,25; 0,025 \cdot d\} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) & \text{flusso orizzontale} \\ \max\{0,12 \cdot d^{-0,44}; 0,025 \cdot d\} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) & \text{flusso discendente} \end{cases}$$

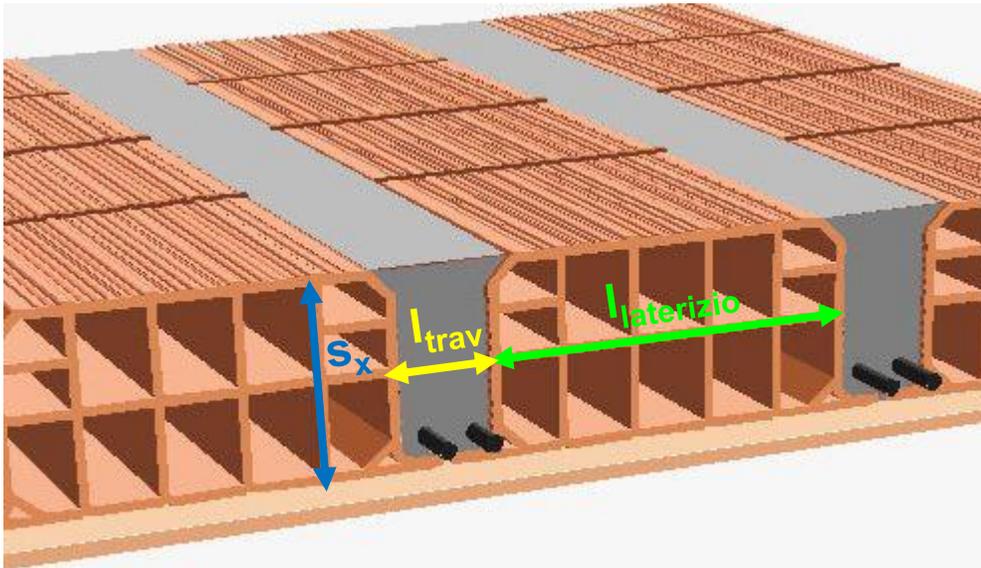


RESISTENZE TERMICHE DEGLI STRATI NON OMOGENEI

Per strati non omogenei, quali ad esempio un solaio in latero-cemento bisogna calcolare una conducibilità equivalente, per uno strato fittizio avente prestazioni medie tra quelle del travetto e della pignatta.

Si procede:

- o calcolando una conducibilità equivalente mediante una media pesata rispetto alle dimensioni di travetto e pignatta



$$\lambda_{equiv} = \frac{\lambda_{later} \cdot l_{laterizio} + \lambda_{trav} \cdot l_{trav}}{l_{totale}} + P.T.$$



$$R_x = \frac{S_x}{\lambda_{equiv}}$$

- oppure direttamente determinando la resistenza termica direttamente da tabelle (UNI 10351 oppure UNI 6946),

RESISTENZE TERMICHE DEGLI STRATI NON OMOGENEI

Murature e solai UNI 10355

| Rappresentazione dell'elemento | Rappresentazione della struttura | Caratteristiche elemento | | Caratteristiche struttura | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------|----|--|--|---|-------------------------------|----|
| | | Codice | Foratura % tipo | Spessore mm | Tipo di giunto | | Massa volumica** kg/m ³ | Massa superficiale kg/m ² | Resistenza termica m ² K/W | Fattore di correzione % | |
| | | 1.2.10 | 35 | P | 120 | CM | GC | 700 | 68 | 0,43 | 12 |
| | | | 35 | P | 120 | CM | GC | 900 | 82 | 0,38 | 10 |
| | | | 35 | P | 120 | CM | GC | 1100 | 96 | 0,33 | 8 |
| | | | 35 | P | 120 | CM | GC | 1200 | 103 | 0,31 | 7 |
| | | | 35 | P | 120 | CM | GC | 1400 | 118 | 0,28 | 6 |
| | | | | | | | | | | | |

Fig. 38 Blocco semipieno

** Valore riferito al materiale costituente l'elemento.

a) Codice dell'elemento

- La prima cifra individua il tipo di struttura:
 1. struttura verticale
 2. struttura orizzontale o inclinata.
- La seconda cifra individua il tipo di elemento:
 1. elementi artificiali di laterizio
 2. elementi artificiali di calcestruzzo di argilla espansa
 3. elementi artificiali diversi
 4. elementi naturali.

La terza cifra indica il numero d'ordine dell'elemento. Gli elementi impiegati solo all'interno sono contraddistinti dall'indice i.

b) Spessore della struttura

c) Foratura dell'elemento:

- V fori verticali
- O fori orizzontali
- P fori passanti
- PP fori parzialmente passanti
- NP fori non passanti

d) Tipo di giunto:

- CM giunti verticali con malta
- SM giunti verticali senza malta
- GC giunti orizzontali continui
- GI giunti orizzontali interrotti per un terzo
- P₀ elementi collaboranti in opera
- P_i elementi collaboranti interposti
- A₀ elementi di alleggerimento in opera
- A_i elementi di alleggerimento interposti

e) Massa volumica del materiale costituente l'elemento

f) Massa per unità di superficie della parete o del solaio (esclusi gli intonaci ma inclusa la malta dei giunti di spessore 12 mm)

g) Resistenza termica unitaria (riferita alla temperatura media di 20 °C)

h) Fattore di correzione (in per cento) per passare dai valori di resistenza termica indicati, riferiti a strutture con giunti da 12 mm di spessore, a quelli relativi a strutture con giunti da 5 mm di spessore.

RESISTENZE TERMICHE DEGLI STRATI NON OMOGENEI

Murature e solai UNI 10355

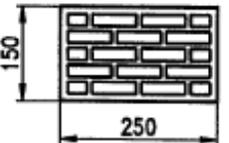
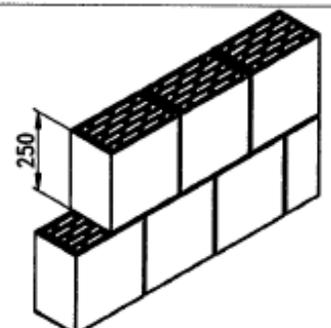
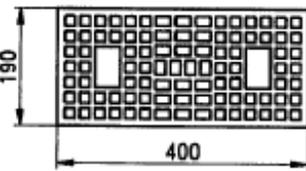
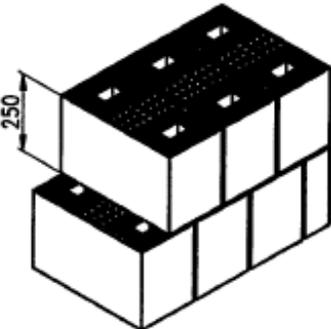
| Rappresentazione dell'elemento | Rappresentazione della struttura | Caratteristiche elemento | | Caratteristiche struttura | | | | | | |
|---|--|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|----|---------------------------------------|---|--|----------------------------|
| | | Codice | Foratura % tipo | Spessore mm | Tipo di giunto | | Massa volumica** kg/m ³ | Massa superficiale kg/m ² | Resistenza termica m ² K/W | Fattore di correzione % |
|  |  | 1.1.11 | 60 V | 150 | CM | GI | 1800 | 114 | 0,45 | 8 |
|  |  | 1.1.12 | 41 V | 400 | CM | GI | 1400 | 322 | 1,19 | 8 |

Fig. 11 Blocco forato

Fig. 12 Blocco semipieno

a) Codice dell'elemento

- La prima cifra individua il tipo di struttura:
 1. struttura verticale
 2. struttura orizzontale o inclinata.
- La seconda cifra individua il tipo di elemento:
 1. elementi artificiali di laterizio
 2. elementi artificiali di calcestruzzo di argilla espansa
 3. elementi artificiali diversi
 4. elementi naturali.

La terza cifra indica il numero d'ordine dell'elemento. Gli elementi impiegati solo all'interno sono contraddistinti dall'indice i.

b) Spessore della struttura

c) Foratura dell'elemento:

- V fori verticali
- O fori orizzontali
- P fori passanti
- PP fori parzialmente passanti
- NP fori non passanti

d) Tipo di giunto:

- CM giunti verticali con malta
- SM giunti verticali senza malta
- GC giunti orizzontali continui
- GI giunti orizzontali interrotti per un terzo
- P₀ elementi collaboranti in opera
- P_i elementi collaboranti interposti
- A₀ elementi di alleggerimento in opera
- A_i elementi di alleggerimento interposti

e) Massa volumica del materiale costituente l'elemento

f) Massa per unità di superficie della parete o del solaio (esclusi gli intonaci ma inclusa la malta dei giunti di spessore 12 mm)

g) Resistenza termica unitaria (riferita alla temperatura media di 20 °C)

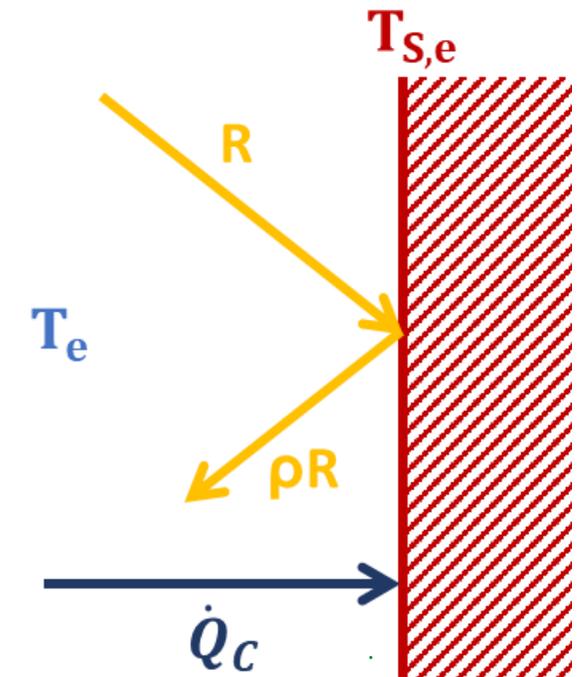
h) Fattore di correzione (in per cento) per passare dai valori di resistenza termica indicati, riferiti a strutture con giunti da 12 mm di spessore, a quelli relativi a strutture con giunti da 5 mm di spessore.

COMPORTAMENTO ESTIVO

A differenza delle analisi relative al periodo invernale, il comportamento **dell'involucro edilizio in regime estivo** non può essere condotto assumendo l'ipotesi di regime stazionario. In estate diventa fondamentale il ruolo della radiazione solare che costituisce una forzante fortemente variabile nel tempo.

$$T_{sol-air} = T_e + \frac{\alpha \cdot R}{h_e}$$

Inoltre è necessario tener conto dell'inerzia termica dell'involucro opaco e cioè dell'effetto combinato delle due caratteristiche di accumulo termico o **capacità termica e resistenza termica**.



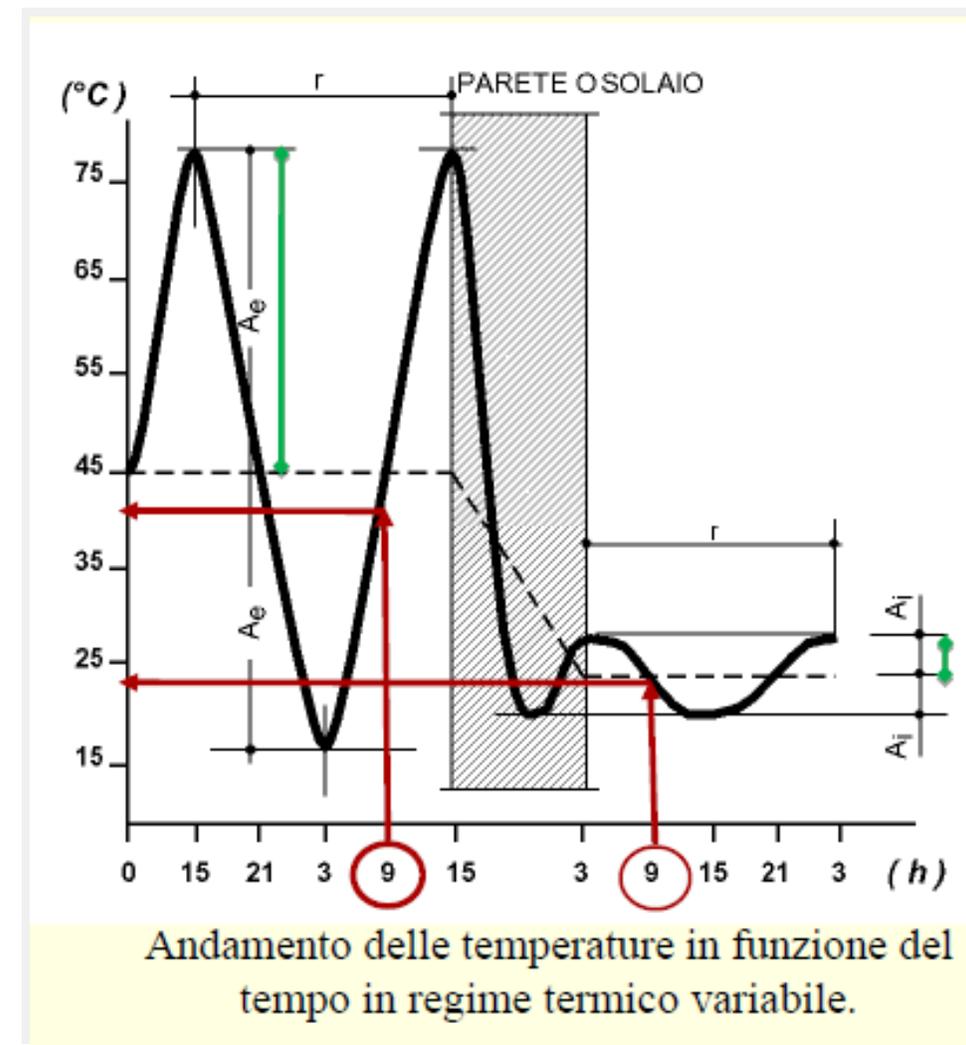
Per il regime estivo bisogna dunque far riferimento ad altri parametri termofisici valutati in regime dinamico.

COMPORTAMENTO ESTIVO

L'INERZIA TERMICA si manifesta con:

- Il **fattore di attenuazione** (f_a) è uguale al rapporto fra il massimo flusso della parete capacitiva ed il massimo flusso della parete a massa termica nulla; esso dunque qualifica la riduzione di ampiezza dell'onda termica nel passaggio dall'esterno all'interno dell'ambiente attraverso la struttura in esame.
- Il **coefficiente di sfasamento** Φ (espresso in ore) dell'onda termica è definito come periodo temporale che intercorre tra il picco massimo della temperatura esterna ed il massimo del flusso termico che si verifica in ambiente. È un parametro che dà misura di quanto sia elevata l'inerzia termica e la costante di tempo della parete.

Il riferimento normativo per il calcolo di questi fattori è la UNI EN ISO 13786:2018.



COMPORTAMENTO ESTIVO

c = calore specifico [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$] di una sostanza, definito come la quantità di energia necessaria per aumentare di 1 Kelvin la temperatura di un'unità di massa del materiale, a pressione costante.

CARATTERISTICHE TERMOFISICHE DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

| Materiale | ρ (kg/m^3) | λ (W/mK) | γ (kJ/kgK) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Calcestruzzo | | | |
| - calcestruzzo di inerti naturali | 2000 | 1.01 | |
| | 2200 | 1.29 | |
| | 2400 | 1.66 | |
| - calcestruzzo di argille espanse | 1000 | 0.25 | |
| | 1100 | 0.29 | 0.880 |
| | 1200 | 0.33 | |
| | 1300 | 0.37 | |
| | 1400 | 0.42 | |
| | 1500 | 0.47 | |
| | 1600 | 0.54 | |
| | 1700 | 0.63 | |

Inerzia termica- \gg

Capacità termica

CAPACITÀ TERMICA totale di un edificio è la somma delle capacità termiche efficaci dei componenti edilizi che si trovano a contatto con l'aria nelle diverse zone termiche. Essa rappresenta l'attitudine dell'involucro ad accumulare energia termica. La **capacità termica areica** di un elemento edilizio composto da più strati si determina mediante le funzioni di trasferimento o con un metodo

più semplice disponibile nell'appendice A della ISO 13786

$$C = \sum_i \rho_i S_i c_{pi}$$

COMPORTAMENTO ESTIVO

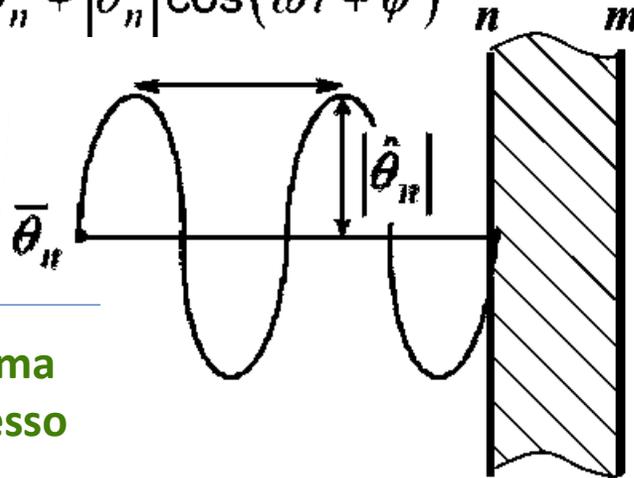
Trasmittanza termica periodica Y_{IE} (W/m²K)

È un parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare e attenuare la componente periodica del flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore, definita e determinata secondo la norma UNI EN ISO 13786:2018

Problema di Fourier

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| \cos(\omega t + \psi)$$



Problema Complesso

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{q}_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_n \\ \hat{q}_n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \hat{q}_1 \\ -\hat{q}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{Z_{12}} \begin{bmatrix} -Z_{11} & 1 \\ 1 & -Z_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = [Z] \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \hat{q}_1 \\ -\hat{q}_2 \end{pmatrix} = [Y] \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_2 \end{pmatrix}$$

Matrice delle Ammettenze

$$\begin{matrix} Y_{11} = -\frac{Z_{11}}{Z_{12}}; & Y_{12} = \frac{1}{Z_{12}}; \\ Y_{21} = \frac{1}{Z_{12}}; & Y_{22} = -\frac{Z_{22}}{Z_{12}} \end{matrix}$$

Massa superficiale M_s (kg/m²)

è la massa per unità di superficie della parete opaca compresa la malta dei giunti esclusi gli intonaci

$$M_s = \sum_i \rho_i \cdot s_i$$

- ρ è la massa volumica dello strato i-esimo
- s è lo spessore dello strato i-esimo

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti di primo livello o edifici a energia quasi zero

- Demolizione e ricostruzione;
- Ampliamento > 15% o comunque > 500 m³.

- Intervento su più del 50% della superficie disperdente lorda;
- +
- Ristrutturazione dell'impianto termico

| Numero Riga | RAPPORTO DI FORMA (S/V) | Zona climatica | | | | |
|-------------|--|----------------|------|------|------|------|
| | | A e B | C | D | E | F |
| 1 | $S/V \geq 0,7$ | 0,58 | 0,55 | 0,53 | 0,50 | 0,48 |
| 2 | $0,7 > S/V \geq 0,4$ | 0,63 | 0,60 | 0,58 | 0,55 | 0,53 |
| 3 | $0,4 > S/V$ | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,75 | 0,70 |
| Numero Riga | TIPOLOGIA DI INTERVENTO | Zona climatica | | | | |
| | | A e B | C | D | E | F |
| 4 | Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie | 0,73 | 0,70 | 0,68 | 0,65 | 0,62 |

Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente, valutato con riferimento all'intero edificio (H'_T) minore dei valori riportati in tabella a lato (APPENDICE A all'ALLEGATO 1)

1

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ **Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente**

$$H'_T = \frac{H_{tr,adj}}{\sum_k A_k}$$

f(trasmittanze termiche dei componenti opachi e trasparenti opportunamente valutate (UNI/TS 11300-1) comprensive dei ponti termici)
Superfici dei componenti opachi e trasparenti dell'involucro

Per l'edificio di riferimento viene valutato con le trasmittanze riportate nelle seguenti tabelle (APPENDICE A all'ALLEGATO 1)

Chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2019/2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 3,20 | 3,00 |
| C | 2,40 | 2,20 |
| D | 2,00 | 1,80 |
| E | 1,80 | 1,40 |
| F | 1,50 | 1,10 |

Strutture opache orizzontali di pavimento

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2019/2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,46 | 0,44 |
| C | 0,40 | 0,38 |
| D | 0,32 | 0,29 |
| E | 0,30 | 0,26 |
| F | 0,28 | 0,24 |

Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2019/2021 ⁽²⁾ |
| A e 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 |

Strutture opache verticali

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2019/2021 ⁽²⁾ |
| A e 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 |

Strutture opache verticali e orizzontali di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|--------------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2019/2021 ⁽²⁾ |
| Tutte le zone | 0,8 | 0,8 |

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO *REQUISITI MINIMI* (DM 26/06/2015)

➤ Edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti di primo livello o edifici a energia quasi zero

- Demolizione e ricostruzione;
- Ampliamento $> 15\%$ o comunque $> 500 \text{ m}^3$.

- Intervento su più del **50%** della superficie disperdente lorda;
- +
- Ristrutturazione dell'impianto termico.

Verifica che a eccezione degli edifici adibiti ad attività sportive, artigianali ed industriali, in tutte le zone climatiche a esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, $I_{m,s} \geq 290 \text{ W/m}^2$:

- $M_s > 230 \text{ kg/m}^2$, relativamente a tutte le pareti verticali opache con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est oppure che $Y_{IE} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- $Y_{IE} < 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ per tutte le pareti opache orizzontali e inclinate.

La trasmittanza delle strutture edilizie di separazione tra edifici o unità immobiliari confinanti $U \leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ad eccezione degli edifici adibiti ad attività artigianali o industriali, nel caso di nuova costruzione e ristrutturazione importante di primo livello di edifici esistenti, questo ultimo limitatamente alle demolizioni e ricostruzioni, da realizzarsi in zona climatica C, D, E ed F.

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO *REQUISITI MINIMI* (DM 26/06/2015)

➤ Edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti di primo livello o edifici a energia quasi zero

- Demolizione e ricostruzione;
- Ampliamento > 15% o comunque > 500 m³.

- Intervento su più del 50% della superficie disperdente lorda;
- +
- Ristrutturazione dell'impianto termico.



Le verifiche previste per i parametri estivi (riportate nel precedente punto 2) possono essere ottenute anche con soluzioni tecniche e materiali innovativi (ad esempio mediante l'uso del verde) nel tal caso il progettista deve certificare l'equivalenza dei benefici producendo opportuna documentazione.



REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici soggetti a ristrutturazioni importanti di secondo livello

- Intervento su più del 25% della superficie disperdente lorda;
- Ristrutturazione dell'impianto termico **opzionale**.

| Numero Riga | RAPPORTO DI FORMA (S/V) | Zona climatica | | | | |
|----------------|--|----------------|------|------|------|------|
| | | A e B | C | D | E | F |
| 1 | $S/V \geq 0,7$ | 0,58 | 0,55 | 0,53 | 0,50 | 0,48 |
| 2 | $0,7 > S/V \geq 0,4$ | 0,63 | 0,60 | 0,58 | 0,55 | 0,53 |
| 3 | $0,4 > S/V$ | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,75 | 0,70 |
| Zona climatica | | | | | | |
| Numero Riga | TIPOLOGIA DI INTERVENTO | Zona climatica | | | | |
| | | A e B | C | D | E | F |
| 4 | Ampliamenti e Ristrutturazioni importanti di secondo livello per tutte le tipologie edilizie | 0,73 | 0,70 | 0,68 | 0,65 | 0,62 |

1

Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente, valutato con riferimento all'intera porzione d'involucro (H'_T) minore dei valori riportati in Tabella a lato (APPENDICE A all'ALLEGATO 1)

$$H'_T = \frac{H_{tr,adj}}{\sum_k A_k}$$

Viene valutato come indicato in precedenza ma solo con le trasmittanze del caso reale

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici soggetti a ristrutturazioni importanti di secondo livello

- Intervento su più del 25% della superficie disperdente lorda;
- Ristrutturazione dell'impianto termico **opzionale**.

Strutture opache verticali

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,45 | 0,40 |
| C | 0,40 | 0,36 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,30 | 0,28 |
| F | 0,28 | 0,26 |

2

Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache verticali delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno e verso locali non climatizzati, deve essere inferiore o uguale a quello riportato nella Tabella a lato (APPENDICE B all'ALLEGATO 1)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{x=1}^y R_x + \frac{1}{h_e}}$$

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici soggetti a ristrutturazioni importanti di secondo livello

- Intervento su più del 25% della superficie disperdente lorda;
- Ristrutturazione dell'impianto termico **opzionale**.

3

Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache orizzontali o inclinate, delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, deve essere inferiore o uguale a quello riportato, in funzione della fascia climatica di riferimento, nelle tabelle lato (APPENDICE B all'ALLEGATO 1)

Strutture opache orizzontali di pavimento

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,48 | 0,42 |
| C | 0,42 | 0,38 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,31 | 0,29 |
| F | 0,30 | 0,28 |

Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,34 | 0,32 |
| C | 0,34 | 0,32 |
| D | 0,28 | 0,26 |
| E | 0,26 | 0,24 |
| F | 0,24 | 0,22 |

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici soggetti a riqualificazione energetica

- Intervento su **meno del 25%** della superficie disperdente lorda;
e/o
 - Ristrutturazione dell'impianto termico.

Strutture opache verticali

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,45 | 0,40 |
| C | 0,40 | 0,36 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,30 | 0,28 |
| F | 0,28 | 0,26 |

Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache verticali delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno e verso locali non climatizzati, deve essere inferiore o uguale a quello riportato nella Tabella a lato (APPENDICE B all'ALLEGATO 1)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{x=1}^y R_x + \frac{1}{h_e}}$$

REQUISITI PER L'INVOLUCRO OPACO IN BASE AL DECRETO REQUISITI MINIMI (DM 26/06/2015)

➤ Edifici soggetti a riqualificazione energetica

- Intervento su **meno del 25%** della superficie disperdente lorda; **e/o**
- Nuova installazione, ristrutturazione dell'impianto termico.

2

Il valore della trasmittanza termica (U) per le strutture opache orizzontali o inclinate, delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, deve essere inferiore o uguale a quello riportato, in funzione della fascia climatica di riferimento, nelle tabelle lato (APPENDICE B all'ALLEGATO 1)

Strutture opache orizzontali di pavimento

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,48 | 0,42 |
| C | 0,42 | 0,38 |
| D | 0,36 | 0,32 |
| E | 0,31 | 0,29 |
| F | 0,30 | 0,28 |

Strutture opache orizzontali o inclinate di copertura

| Zona climatica | U (W/m ² K) | |
|----------------|------------------------|---------------------|
| | 2015 ⁽¹⁾ | 2021 ⁽²⁾ |
| A e B | 0,34 | 0,32 |
| C | 0,34 | 0,32 |
| D | 0,28 | 0,26 |
| E | 0,26 | 0,24 |
| F | 0,24 | 0,22 |

N.B.

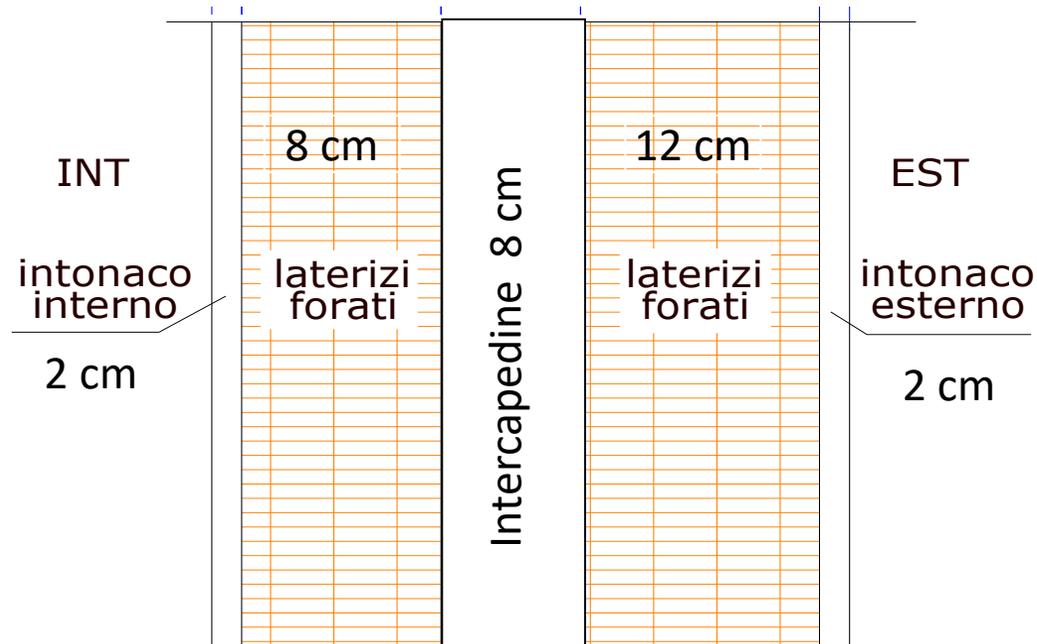
Tutti i valori delle trasmittanze limite riportate in queste slide vanno incrementati del 30% in caso di isolamento termico dall'interno o in intercapedine, indipendentemente dall'entità della superficie coinvolta

ESEMPIO DI STRUTTURA OPACA VERTICALE

Il metodo di calcolo dei parametri termici dinamici non è particolarmente complesso.

E' comunque necessario uno strumento di calcolo informatico, trattandosi di iterazione multipla di algoritmi basati su calcoli di matrici di trasmissione del calore a coefficienti complessi.

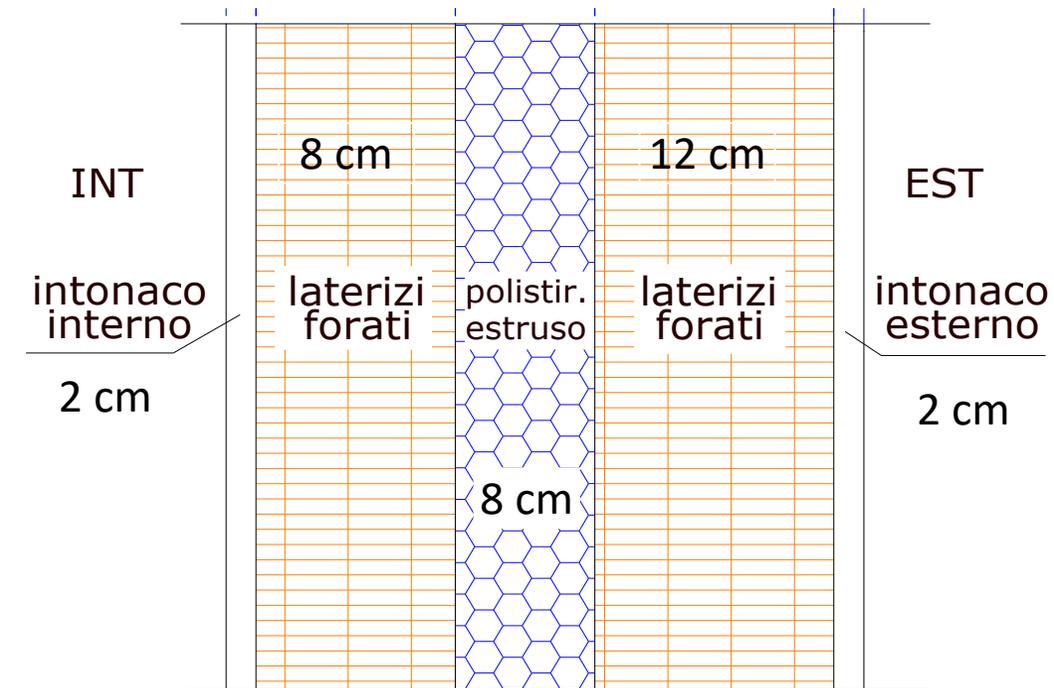
Per esercizio sono confrontati ATTENUAZIONE e SFASAMENTO per la parete perimetrale esterna di edificio con le caratteristiche indicate nello schema.



| PARAMETRO | VALORE |
|--------------------------------------|--------|
| Trasmittanza U ($W/m^2 K$) | 1,13 |
| Spessore (m) | 0,32 |
| Massa (kg/m^2) | 160 |
| Trasmittanza periodica ($W/m^2 K$) | 0,72 |
| Sfasamento (h) | 6,17 |
| Fattore di attenuazione (---) | 0,63 |

ESEMPIO DI STRUTTURA OPACA VERTICALE

Ipotizzando di avere un isolamento in polistirene al posto dell'intercapedine.....



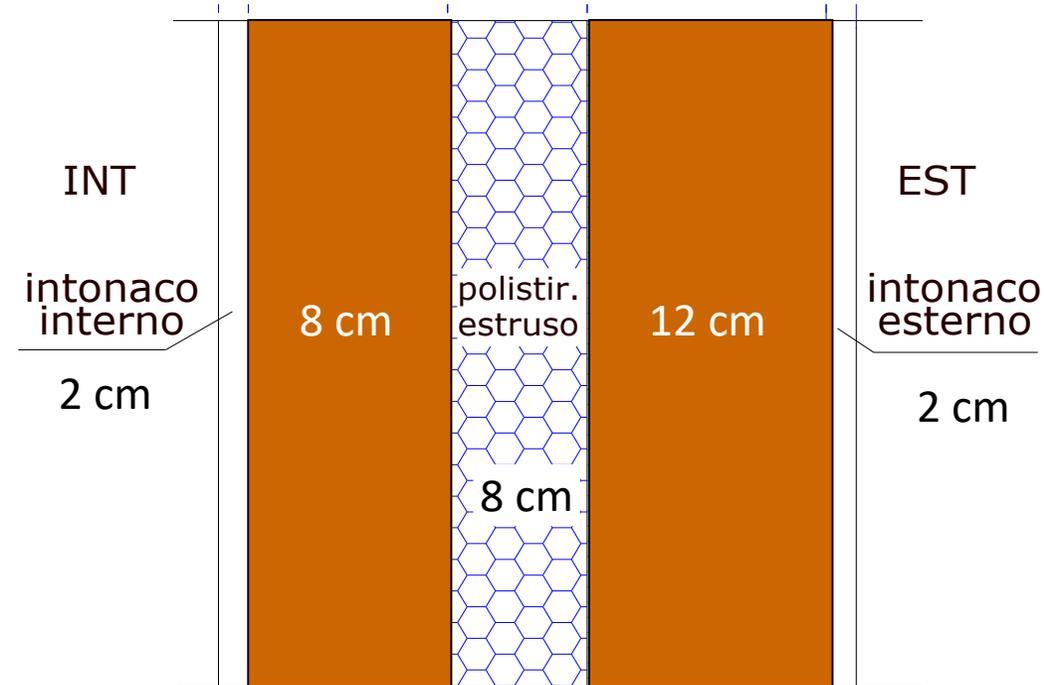
| PARAMETRO | VALORE |
|---|--------|
| Trasmittanza U (W/m ² K) | 0,34 |
| Spessore (m) | 0,32 |
| Massa (kg/m ²) | 162,4 |
| Trasmittanza periodica (W/m ² K) | 0,172 |
| Sfasamento (h) | 8,04 |
| Fattore di attenuazione (---) | 0,50 |

....le cose non cambiano molto !!!!!

Attenuazione, sfasamento e trasmittanza periodica sono infatti fortemente dipendenti dalla capacità termica degli strati e quindi da CALORE SPECIFICO e DENSITA' !!!!

ESEMPIO DI STRUTTURA OPACA VERTICALE

Sostituendo ai mattoni forati degli strati in **MATTONI PIENI**.....



| PARAMETRO | VALORE |
|---|--------------|
| Trasmittanza U (W/m ² K) | 0,378 |
| Spessore (m) | 0,32 |
| Massa (kg/m ²) | 402,4 |
| Trasmittanza periodica (W/m ² K) | 0,096 |
| Sfasamento (h) | 10,06 |
| Fattore di attenuazione (---) | 0,25 |

....i parametri termici dinamici assumono valori molto migliori. Ovviamente in questo caso la massa della parete risulterebbe essere molto maggiore e la trasmittanza termica stazionaria sensibilmente più alta (avendo i mattoni pieni maggiore conduttività dei forati).

Il Comportamento Inverno e Estate delle Strutture Opache Esistenti e la Progettazione di Nuovi Edifici nZEB

*Grazie per
l'attenzione!*



Prof. Francesco Tariello

DiAAA – Dipartimento di Agricoltura Ambiente e Alimenti

Università degli Studi del Molise

francesco.tariello@unimol.it