



POLITECNICO DI MILANO



ANCE LOMBARDIA

DIPARTIMENTO DI ENERGIA ASSOCIAZIONE REGIONALE DEI COSTRUTTORI EDILI LOMBARDI

 POLITECNICO DI MILANO



MADE EXPO - 6 ottobre 2011 – Rho – Centro servizi Fiera Milano – Sala Sagittarius



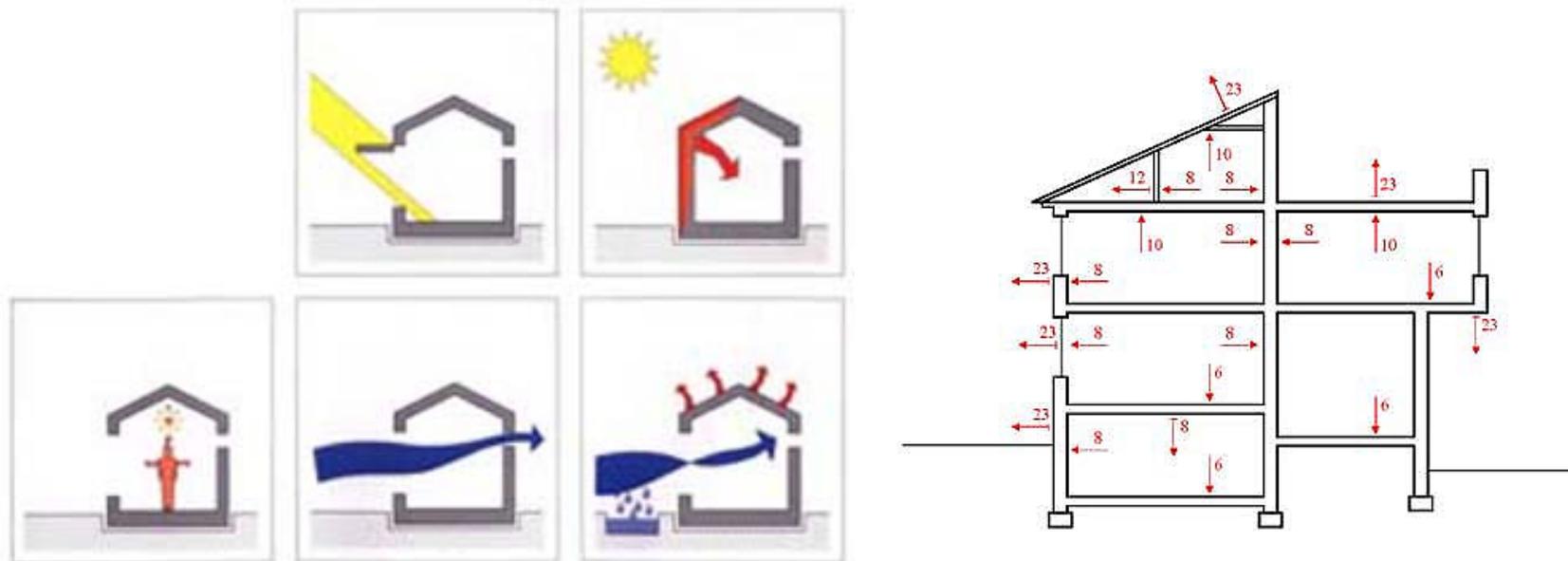
Abaco dei ponti termici

Prof. Livio Mazzarella

PONTI TERMICI ED EFFICIENZA ENERGETICA



L'involucro dell'edificio



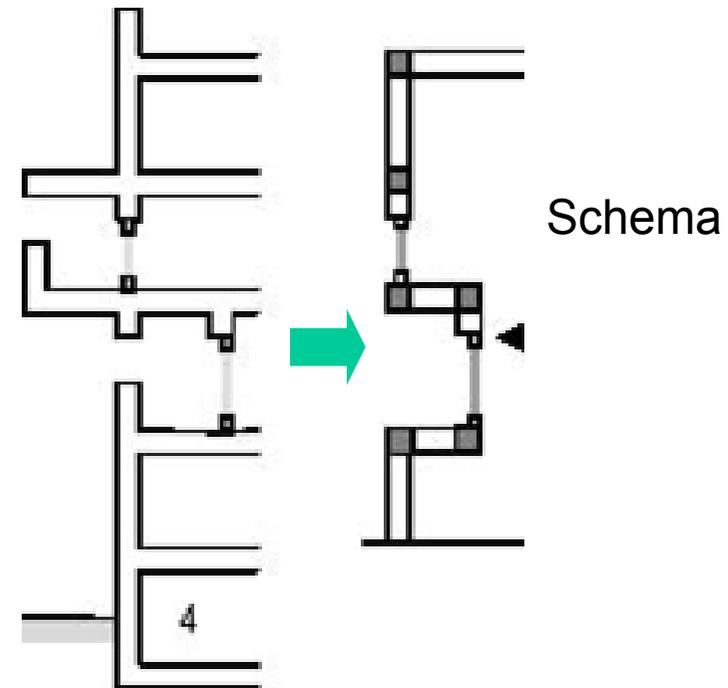
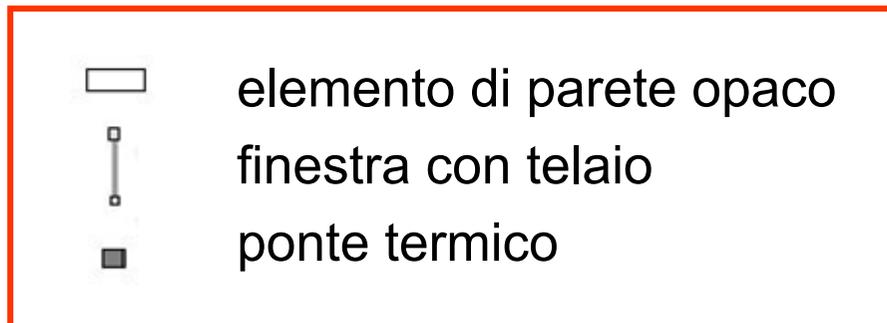


Involucro edilizio: la schematizzazione ³

L'involucro edilizio è un insieme di componenti con funzioni differenti e fortemente tridimensionale.

Per semplificarne lo studio delle sue prestazioni termiche si opera una sua **schematizzazione funzionale**.

L'edificio reale viene trasformato in un insieme di elementi semplici:





Nel calcolo delle potenze termiche scambiate attraverso l'involucro si assumono spesso le seguenti ipotesi semplificative :

- il regime sia stazionario (**grandezze costanti nel tempo**),
- l'aria ambiente abbia la stessa temperatura in ogni punto (**omogeneità della temperatura**),
- le proprietà termofisiche dei materiali e i coefficienti di scambio termico superficiale non dipendano dalla temperatura,



... ipotesi semplificative:

- le pareti siano **piane**, indefinitamente estese e composte da strati di materiali diversi fra loro paralleli,
- le resistenze di contatto tra materiali diversi siano nulle,

e in particolare:

- **il flusso termico sia monodimensionale e perpendicolare alle superfici piane che delimitano la parete stessa.**



L'elemento opaco di parete

6

Sotto tali ipotesi, per il generico **elemento opaco** di parete, il flusso termico, trasmesso attraverso un componente l'involucro, può essere sinteticamente espresso, in **assenza** di radiazione solare, come :

$$\Phi = A U \cdot (\mathcal{G}_{op,i} - \mathcal{G}_{op,e})$$

e in **presenza** di radiazione solare

$$\Phi = A \cdot U \cdot (\mathcal{G}_{op,e} - \mathcal{G}_{op,i}) + A \frac{U}{h_{CR,e}} \alpha_s \cdot G_{Tot}$$



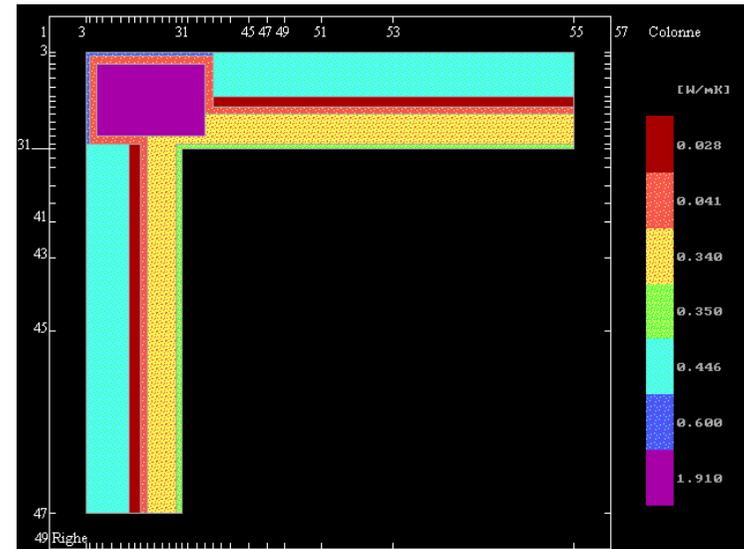
In realtà, tali ipotesi non sono sempre verificate, ma si ha:

- pareti di dimensioni finite;
- **presenza di eterogeneità di forma** (angoli e spigoli): le pareti si articolano fra loro nello spazio tridimensionale per delimitare gli ambienti, definendo angoli;
- **presenza di eterogeneità di struttura** (pilastri in calcestruzzo all'interno di murature in laterizi) **e diffuse** (presenza di materiali anisotropi, camere d'aria o giunti di malta).

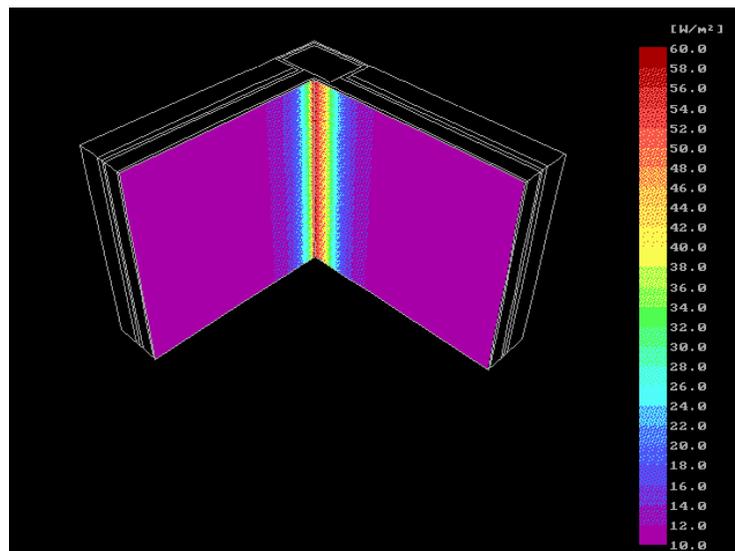


Ponti termici di forma

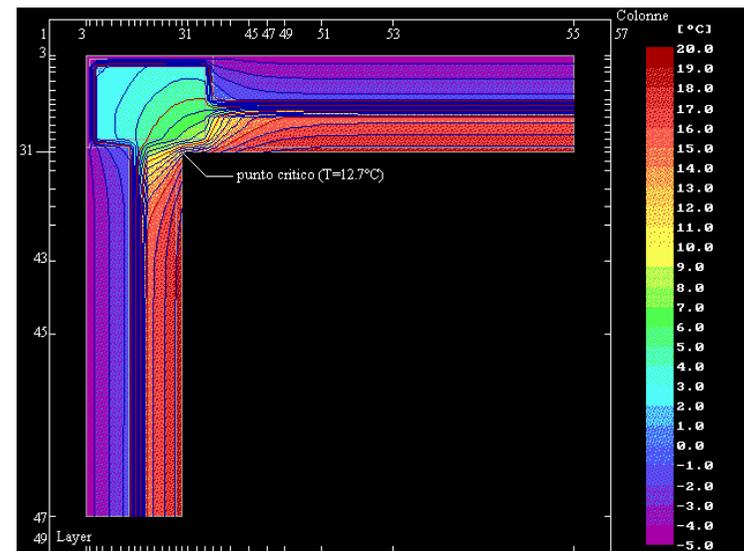
La presenza di pareti concorrenti in uno spigolo causa la formazione di un **campo termico bidimensionale**, con un **incremento del flusso termico** specifico in concomitanza dello spigolo concavo (interno)



Flusso termico areico



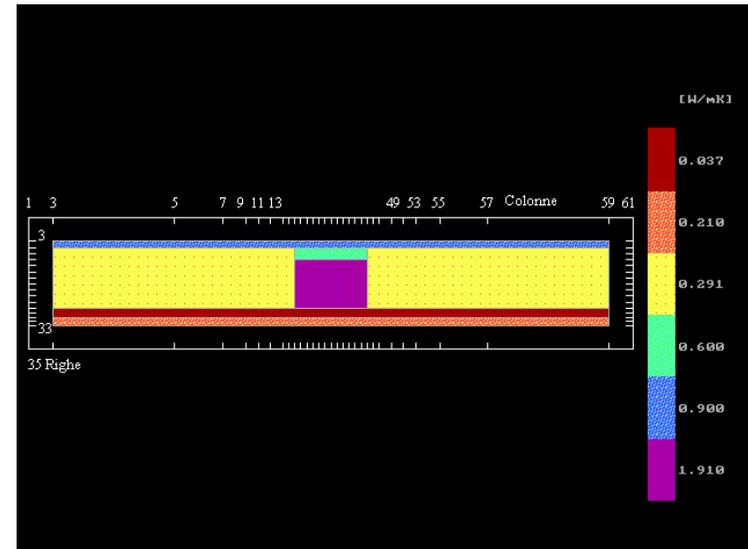
Campo termico



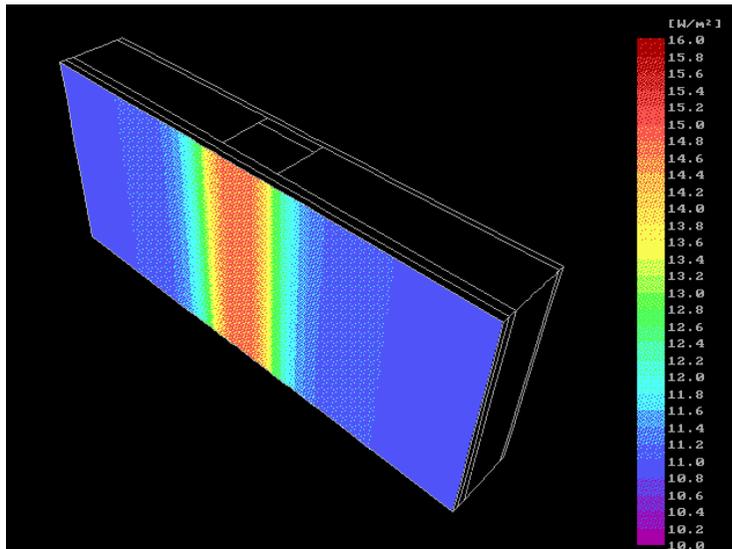


Ponti termici da eterogeneità strutturali⁹

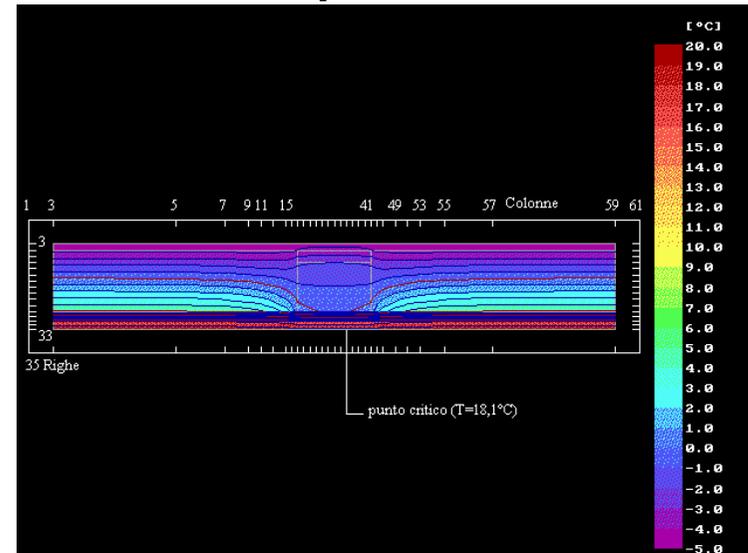
La presenza di materiali differenti provoca una *perturbazione del flusso termico*, il quale assume **componenti dirette lungo tutte e tre le direzioni ortogonali** nello spazio; la distorsione del flusso termico provoca **disomogeneità di temperatura sulle superfici interne** delle pareti.



Flusso termico areico



Campo termico





Per il calcolo del flusso termico trasmesso dalla parete in presenza di un ponte termico esistono due possibilità:

- utilizzare un **metodo di calcolo numerico 2D o 3D** per calcolare il **flusso termico complessivamente scambiato** e la distribuzione dei valori effettivi delle temperature sia superficiali che interne alla parete;
- utilizzare un **metodo semplificato** che, utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, consente di calcolare **l'incremento di flusso termico** dovuto alla presenza del ponte termico.



Il metodo semplificato consiste nella determinazione di coefficienti di *trasmissione lineari* (lineici), esprimenti il flusso termico disperso, che compete alle zone singolari per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria fra interno ed esterno:

- *l'incremento di flusso termico, rispetto a quello calcolato nell'ipotesi monodimensionale, viene concentrato nella singolarità definita da una dimensione lineare (da qui il nome dei coefficienti).*



Per un generico problema caratterizzato da (L_1, L_2, s_1, s_2) si determina o **sperimentalmente** o **numericamente** il flusso bidimensionale attraverso l'elemento, $\Phi^{(2D)}$, e si impone

l'uguaglianza:

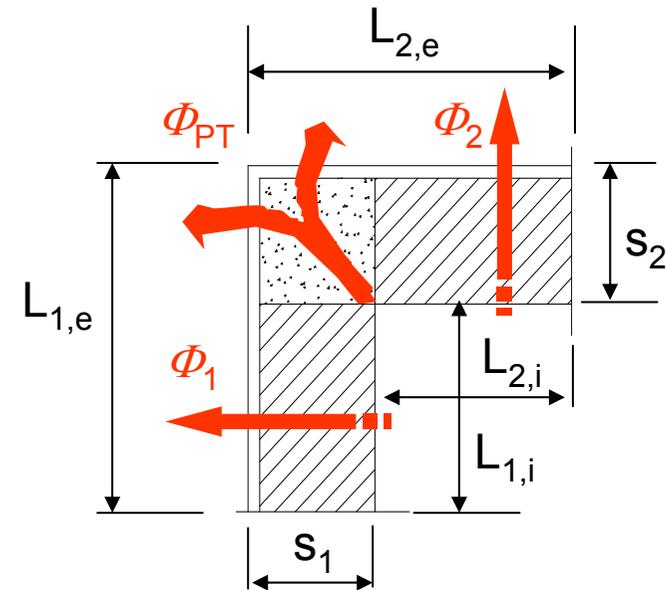
$$\Phi^{(2D)} \equiv \Phi_1^{(1D)} + \Phi^{(1D)} + \Phi_{PT}$$

da cui

$$\begin{aligned} \Phi_{PT} &= \Phi^{(2D)} - \Phi_1^{(1D)} - \Phi^{(1D)} = \\ &= \Phi^{(2D)} - L_1^{(i)} z U_1 \Delta \mathcal{G} - L_2^{(i)} z U_2 \Delta \mathcal{G} \end{aligned}$$

e quindi

$$\Psi_i = \frac{\Phi^{(2D)}}{z \Delta \mathcal{G}} - L_1^{(i)} U_1 - L_2^{(i)} U_2$$





Il flusso termico attraverso una parete contenete uno o più ponti termici può essere espresso da:

$$\Phi = \left[\sum_i U_i \cdot A_i + \sum_j \Psi_j \cdot l \right] \cdot (\vartheta_{op,i} - \vartheta_{op,e})$$

dove:

$(\vartheta_{op,i} - \vartheta_{op,e})$ differenza tra temperatura interna ed esterna rispetto alla parete ($^{\circ}\text{C}$).

U_i trasmittanza termica dell'elemento i-esimo di parete ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

A_i superficie interna dell'elemento i-esimo di parete (m^2)

Ψ_j trasmittanza lineare del ponte termico j-esimo (W/mK)

l lunghezza del ponte termico j-esimo (m).



Fino a ieri i valori dei coefficienti di trasmissione termica lineari erano ricavabili per identificazione tipologica:

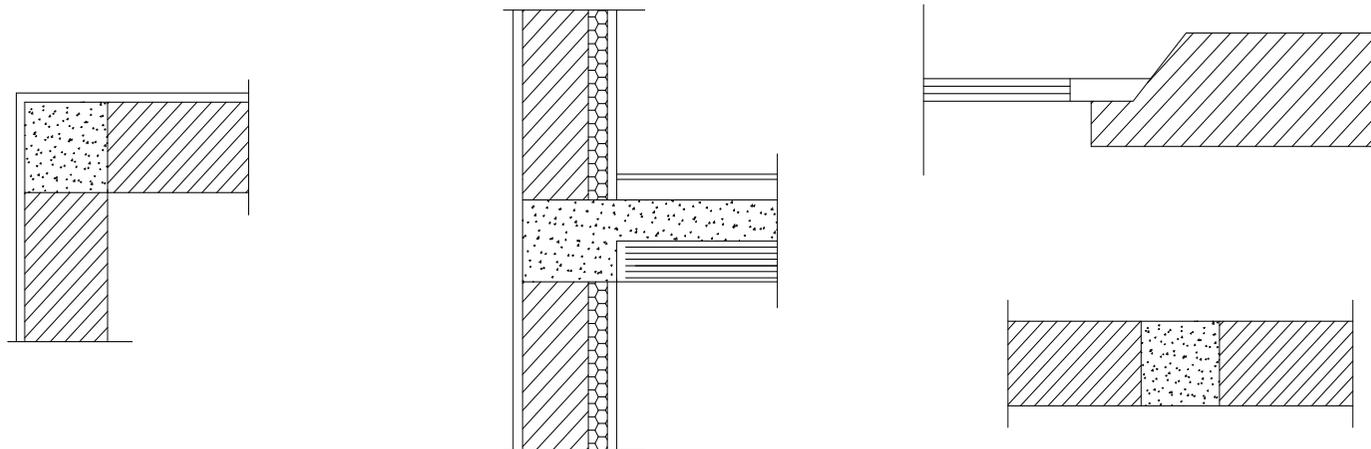
- o dal foglio aggiuntivo FA-3 alla norma [UNI 7357](#) ,
abrogata ma riportata in appendice alla DGR
- o dalla norma [UNI EN ISO 14683:2008](#);

oppure andavano calcolati utilizzando un codice di calcolo numerico bi-tridimensionale secondo la [UNI EN ISO 10211:2008](#) ..

Ma oggi grazie a ANCE Lombardia e CESTEC



L'abaco dei ponti termici





- Identificazione delle tipologie di ponte termico più ricorrenti tramite:
 - indagine statistica su una prima scelta di 125 tipologie di diversi nodi strutturali e tecnologici;
 - riduzione del campione alle tipologie più frequenti tramite inchiesta tra associati ANCE → 47 tipologie di ponte termico

| Classe di frequenza della tipologia di ponte termico | Numero di tipologie nella classe | Frazione sul totale delle tipologie identificate |
|--|----------------------------------|--|
| 0 | 8 | 6.4% |
| 1 | 37 | 29.6% |
| 2 | 33 | 26.4% |
| 3 | 22 | 17.6% |
| 4 | 13 | 10.4% |
| 5 | 12 | 9.6% |

Classe = n° di imprese che indicano «frequente» , 5= tutte



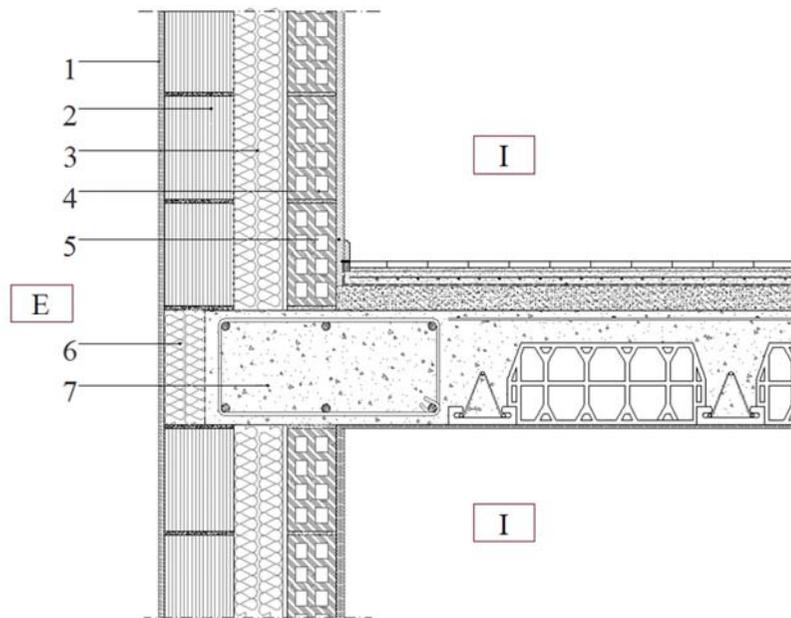
Dall'analisi del campione di 47 elementi, sono state scelte le famiglie tipologiche di ponte termico (**archetipo**) :

- Parete con pilastro
- Angolo sporgente
- Angolo rientrante
- Angolo sporgente con pilastro
- Angolo rientrante con pilastro
- Parete solaio
- Parete esterna con parete interna
- Balcone
- Parete con copertura piana
- Parete con serramento
- Compluvi / displuvi

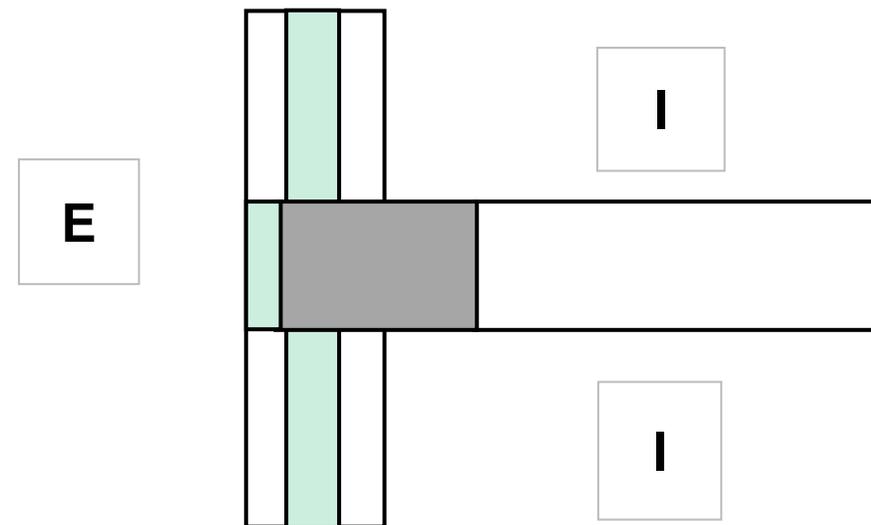


Ogni archetipo è stato schematizzato in 1 o 2 strati di materiale omogeneo equivalente con o senza uno strato di materiale isolante, secondo l'approccio della UNI EN ISO 10211:2008 .

Nodo reale

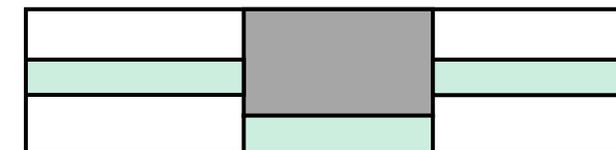


Archetipo





Per ogni archetipo sono state definite delle varianti in funzione della assenza o posizione dello strato di materiale isolante.





Per ogni variante di archetipo sono state considerate le seguenti variazioni delle proprietà geometriche e termofisiche:

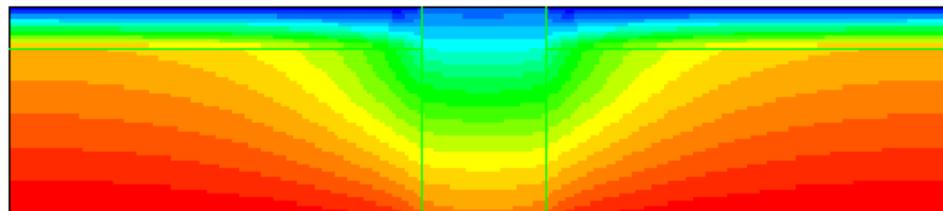
- spessore pareti: 0.3 – 0.6 m
- spessore dello strato di isolante: 0.05 - 0.15 m
($\lambda = 0.04 \text{ Wm/K}$)
- conduttività termica equivalente strato omogeneo:
0.23 - 0.81 W/mK

in modo da fare variare la trasmittanza della parete corrente tra un valore minimo e uno massimo e determinare una trasmittanza termica lineare per ogni combinazione possibile.



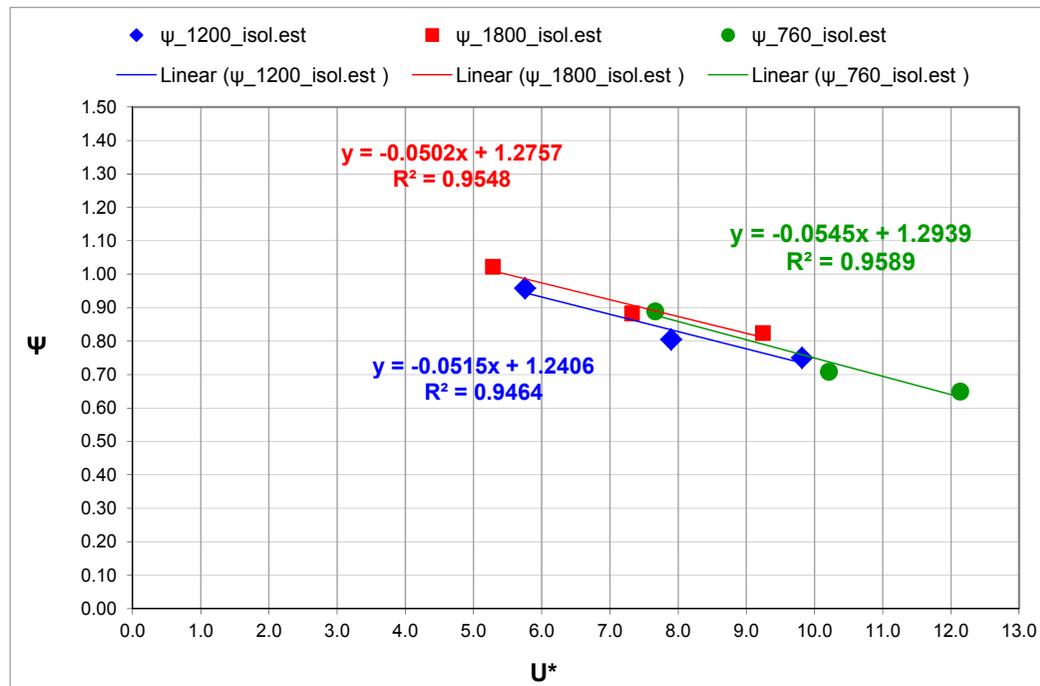
- Per ogni archetipo
 - variante tipologica
 - variazioni dimensionali
 - variazioni di proprietà termofisiche

sono stati eseguiti i calcoli numerici con codice validato a norma UNI EN ISO 10211:2008, ottenendo il relativo valore di Ψ .





Per ogni variante di archetipo e sulla base dei dati calcolati per ogni variante dimensionale e di proprietà termofisica, sono state ricavate delle correlazioni per la determinazione della trasmittanza termica lineare in funzione di parametri caratteristici della geometria di ciascuna tipologia.



Ogni correlazione ha il suo intervallo di confidenza

$$IC^{95\%} = 2 \cdot s_{x,y}$$

$$s_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Psi_i - \Psi_{stim,i})^2}{N-2}}$$



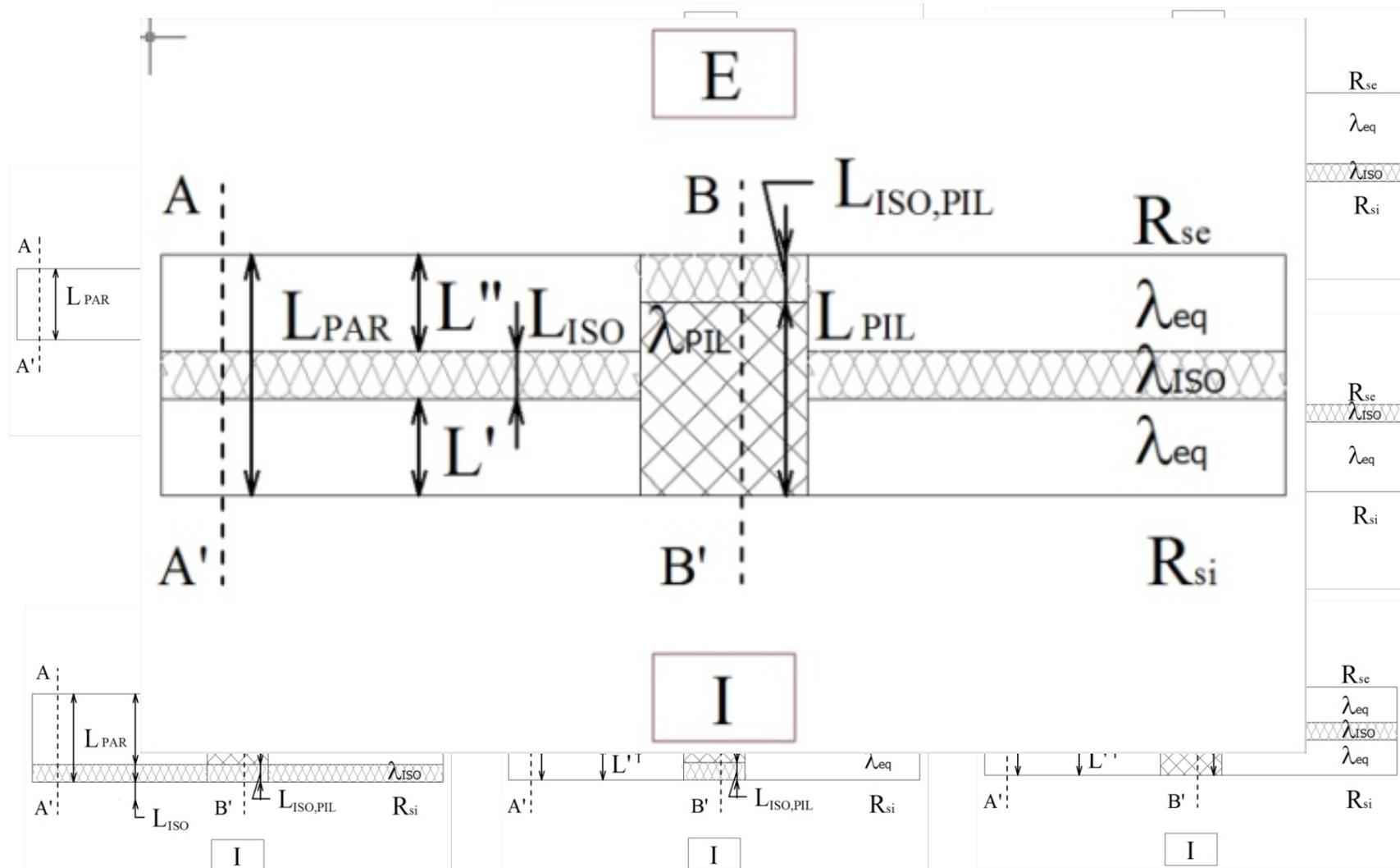
I risultati sono stati raccolti in un abaco in forma di schede, all'interno delle quali, oltre ad una rappresentazione schematica della tipologia di ponte termico sono riportate le correlazioni per il calcolo della trasmittanza termica lineare e le indicazioni per il loro impiego.

| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PIASTRO NON ISOLATO |
|---|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di piastrino isolato nella giunzione. | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U' + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U' + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U' = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza del piastrino | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{ii} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{ie}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{ii} + \frac{L'}{\lambda_{EQ}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{ie}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U' \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

| SOL.006 | PARETE ISOLATA IN MEZZERIA CON SOLAIO E TRAVE ISOLATA |
|---|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di una parete esterna isolata in mezzera con un solaio, la cui trave è isolata all'esterno. | |
| SEZIONE VERTICALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 0.112 + 0.428 \cdot U' - \frac{0.127}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = -0.290 + 1.015 \cdot U' - \frac{0.219}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U' = \frac{U_{TR}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza della trave (per lo spessore pari alla parete) | $U_{TR} = \frac{1}{R_{ii} + \frac{L_{ISO,TR}}{\lambda_{ISO,TR}} + \frac{L'_{TR}}{\lambda_{TR}} + R_{ie}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{ii} + \frac{L''}{\lambda_{EQ}} + \frac{L'_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + \frac{L'}{\lambda_{EQ}} + R_{ie}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $1.08 \leq U' \leq 1.62 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.12 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

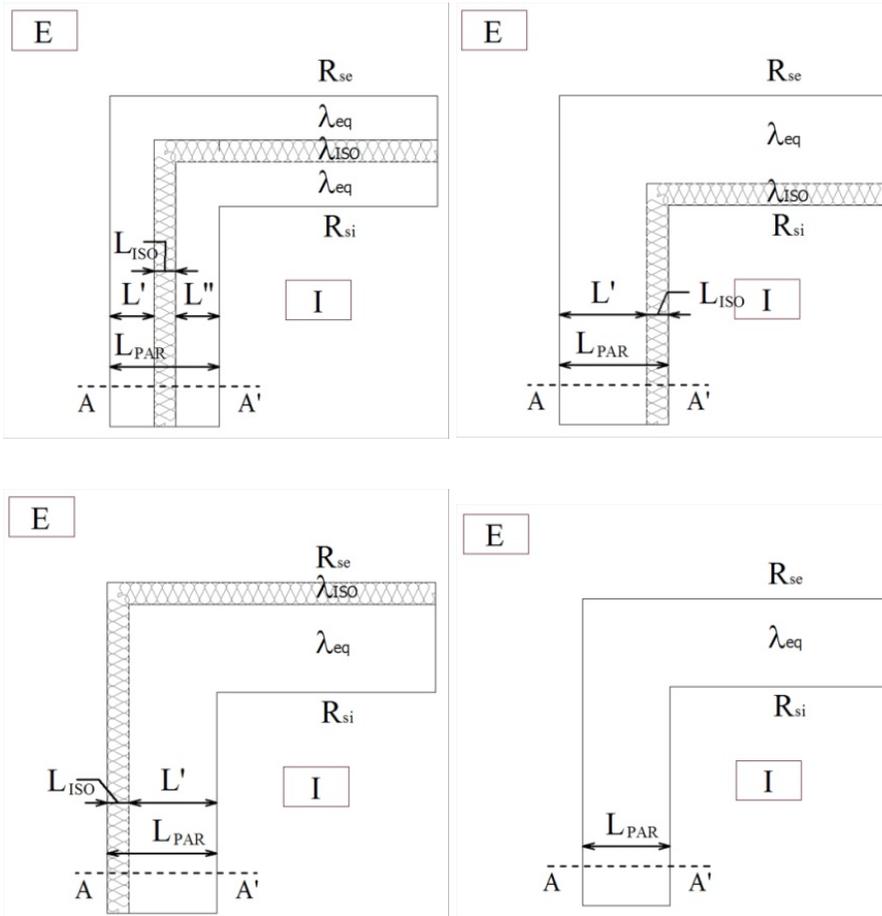


- Parete con pilastro

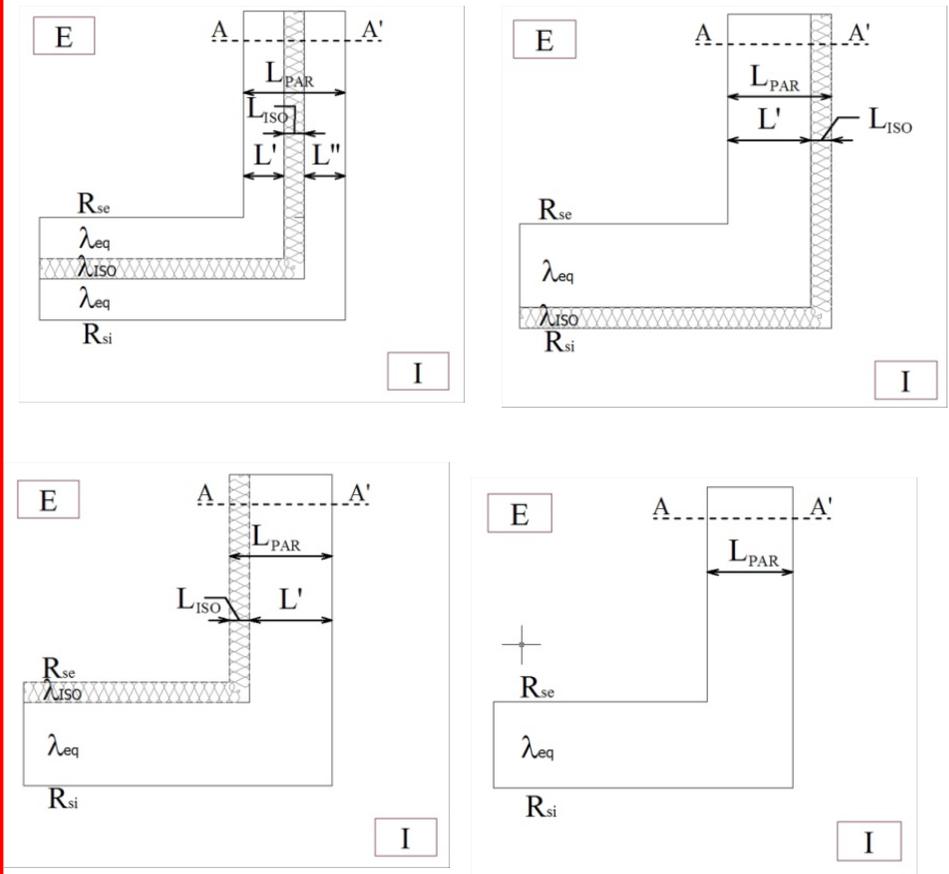




- Angolo sporgente rientrante

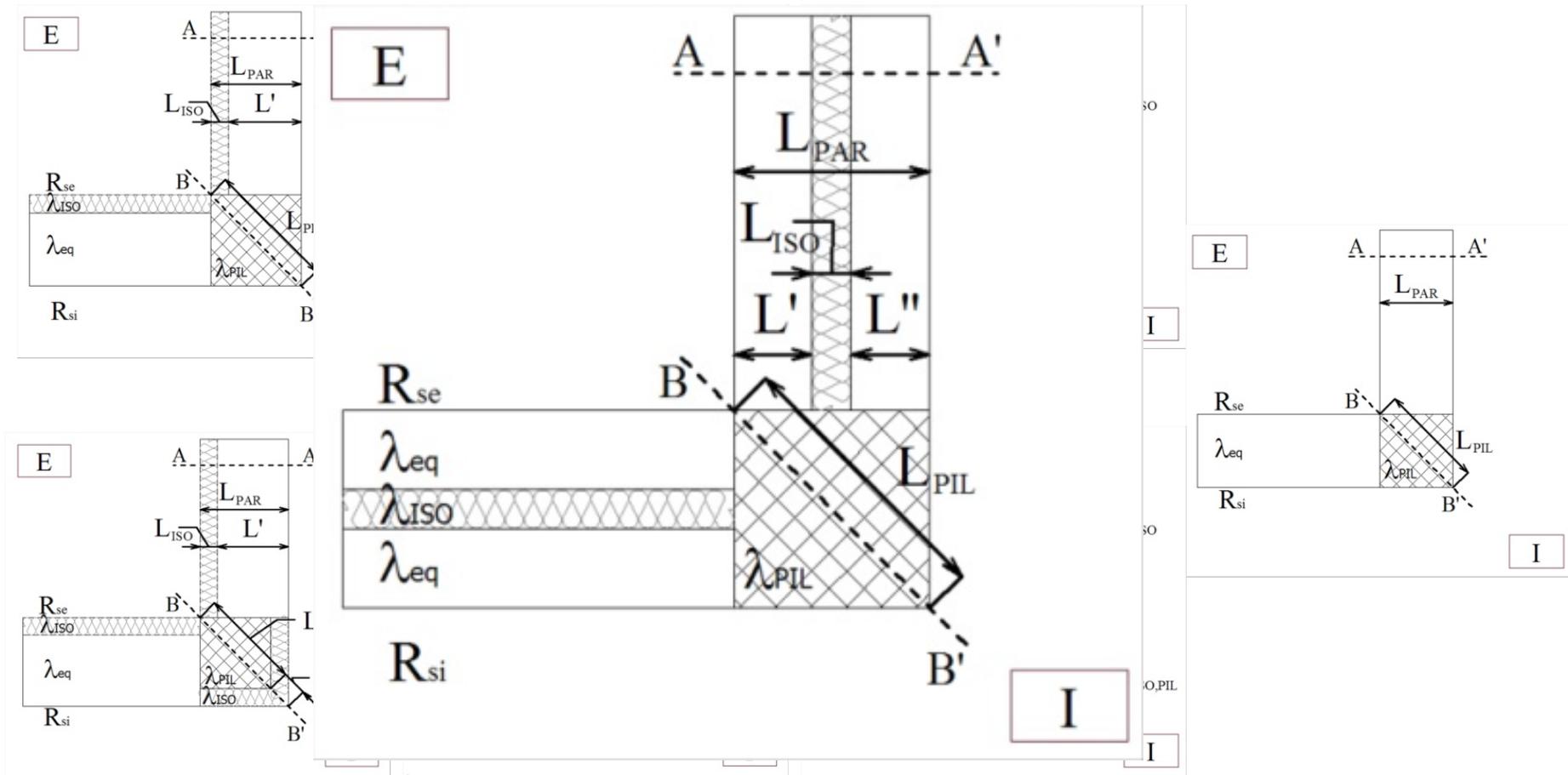


Angolo



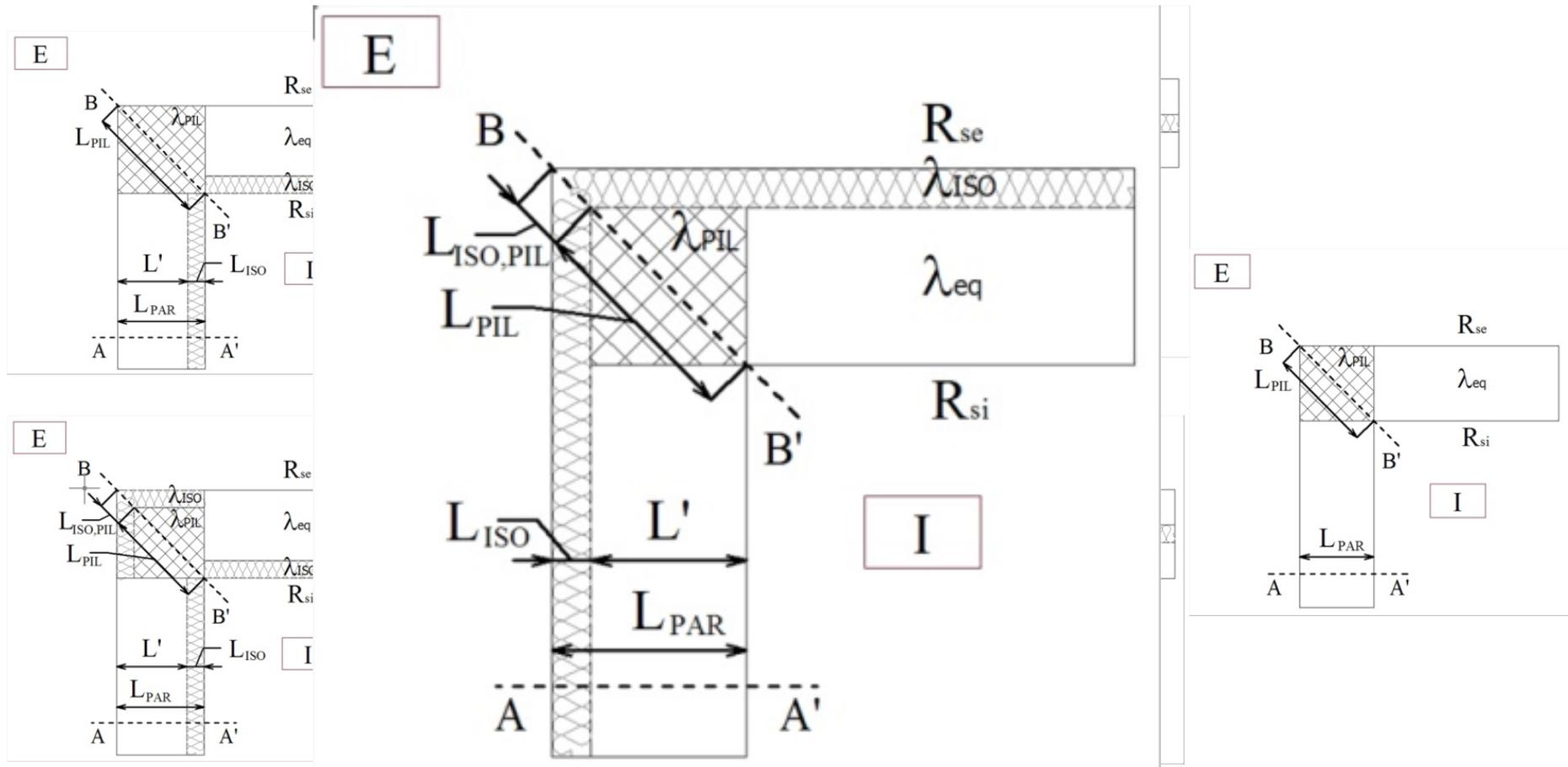


- Angolo rientrante con pilastro



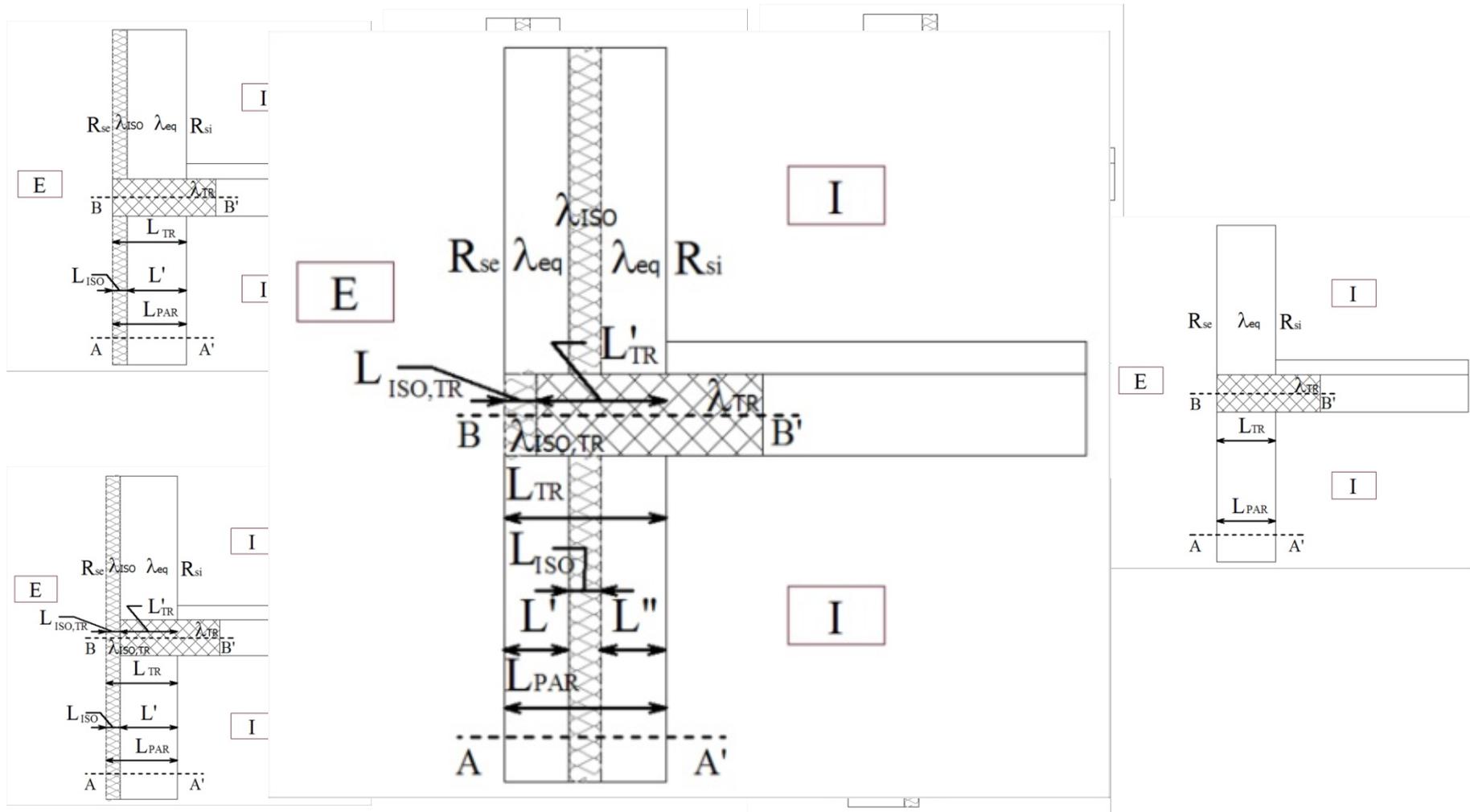


- Angolo sporgente con pilastro



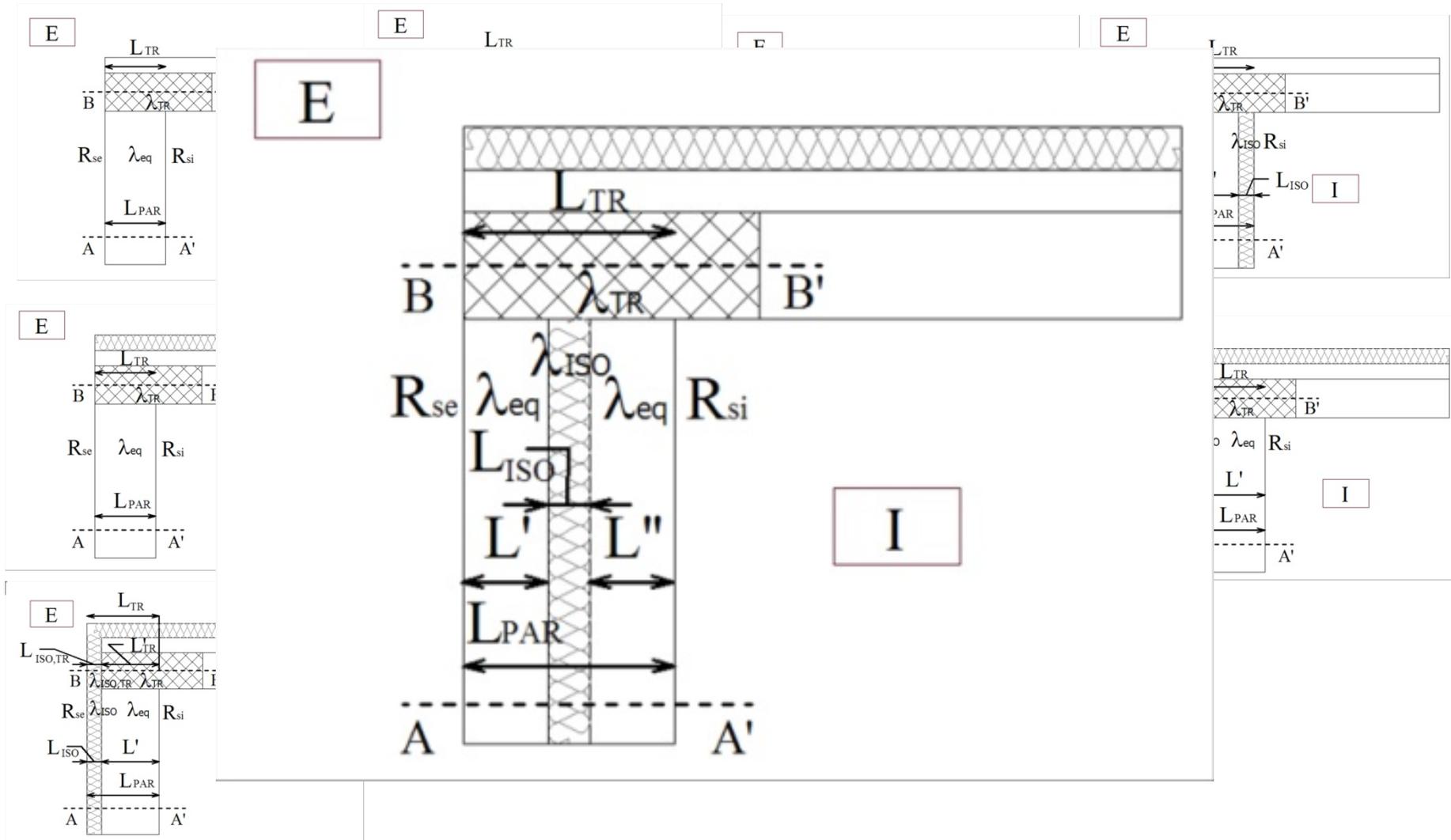


■ Parete solaio



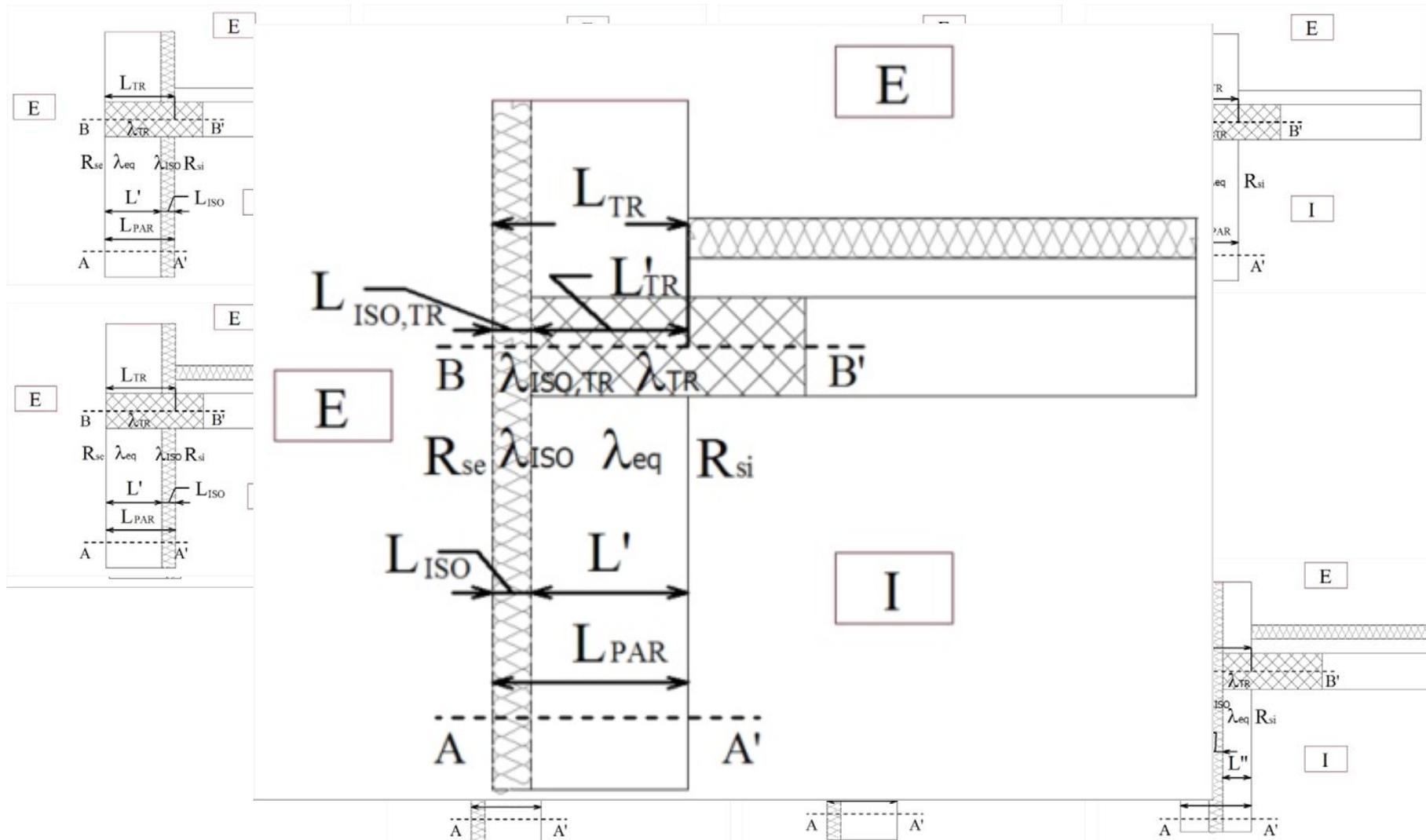


- Parete con copertura piana



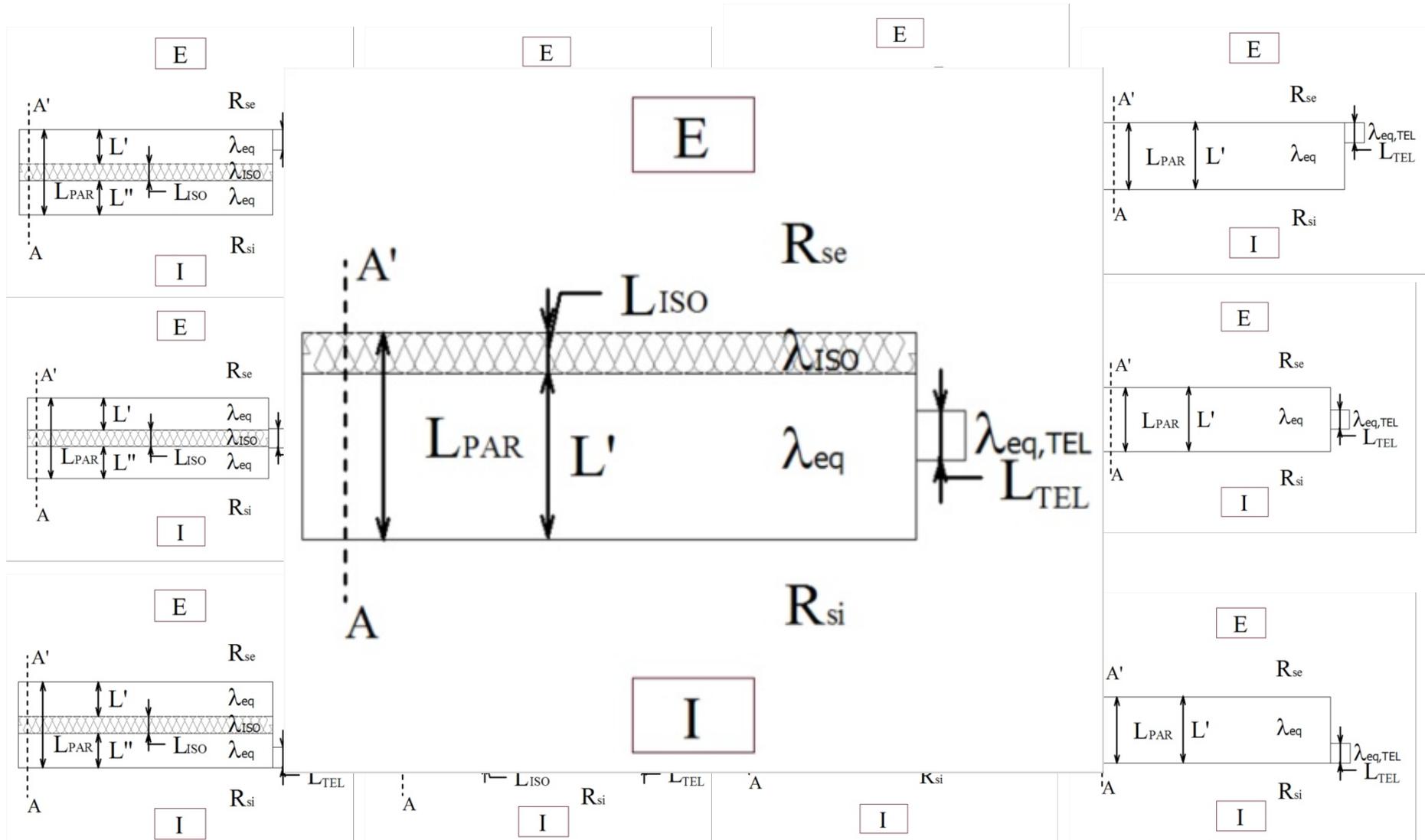


- Parete con copertura piana



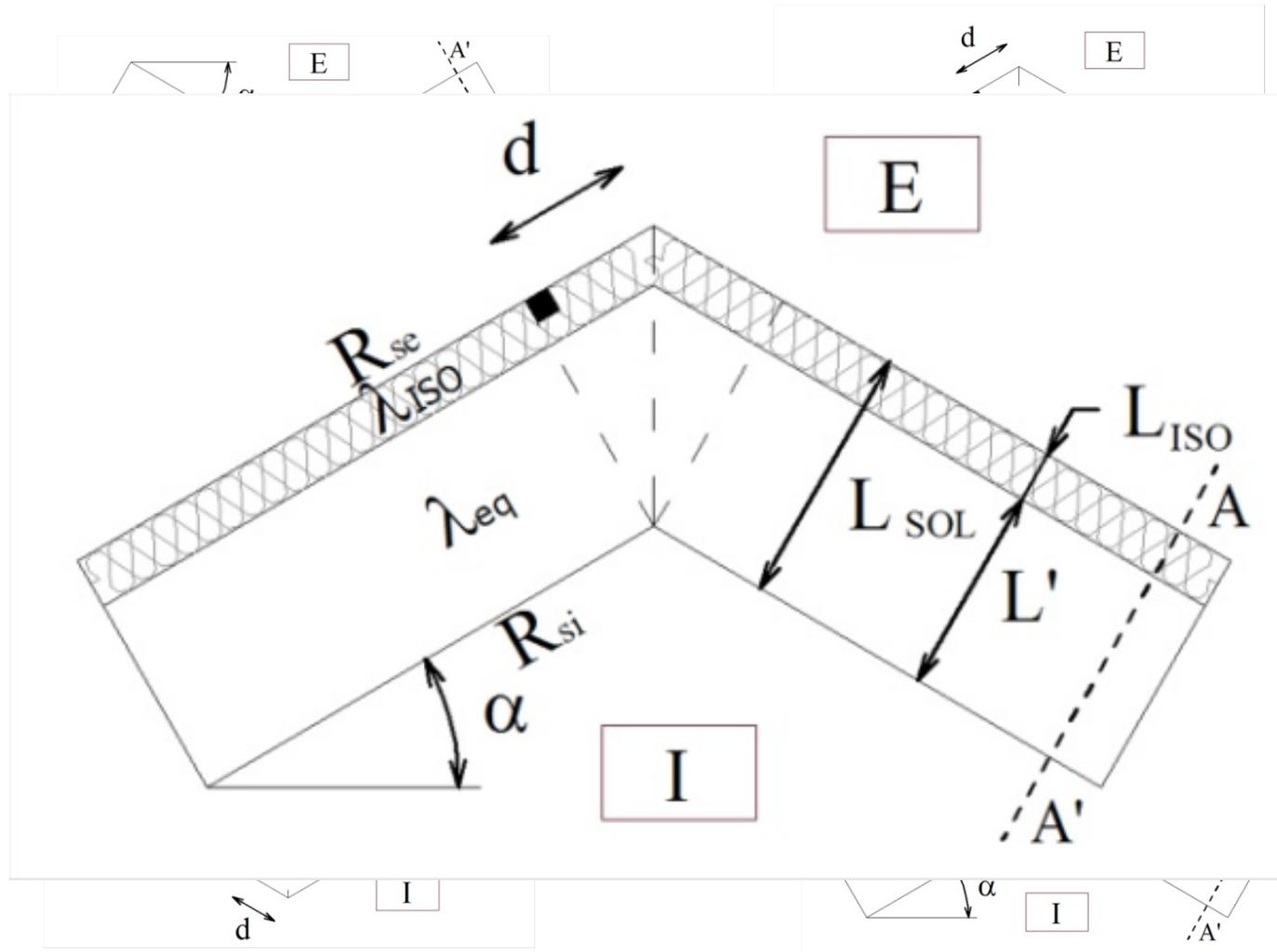


- Parete con serramento.





- Compluvi / displuvi





Schede dell'abaco

| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|---|--|
| <p>Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione.</p> | |
| <p>SEZIONE ORIZZONTALE</p> | |
| | |
| <p>TRASMITTANZA TERMICA LINEARE</p> | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

| SOL.006 | PARETE ISOLATA IN MEZZERIA CON SOLAIO E TRAVE ISOLATA |
|--|---|
| <p>Ponte termico formato dalla giunzione di una parete esterna isolata in mezzeria con solaio, la cui trave è isolata all'esterno.</p> | |
| <p>SEZIONE VERTICALE</p> | |
| | |
| <p>TRASMITTANZA TERMICA LINEARE</p> | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 0.112 + 0.428 \cdot U^* - \frac{0.127}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = -0.290 + 1.015 \cdot U^* - \frac{0.219}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{TR}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza della trave (per lo spessore pari alla parete) | $U_{TR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{ISO,TR}}{\lambda_{ISO,TR}} + \frac{L'_{TR}}{\lambda_{TR}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L''}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $1.08 \leq U^* \leq 1.62 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.12 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |



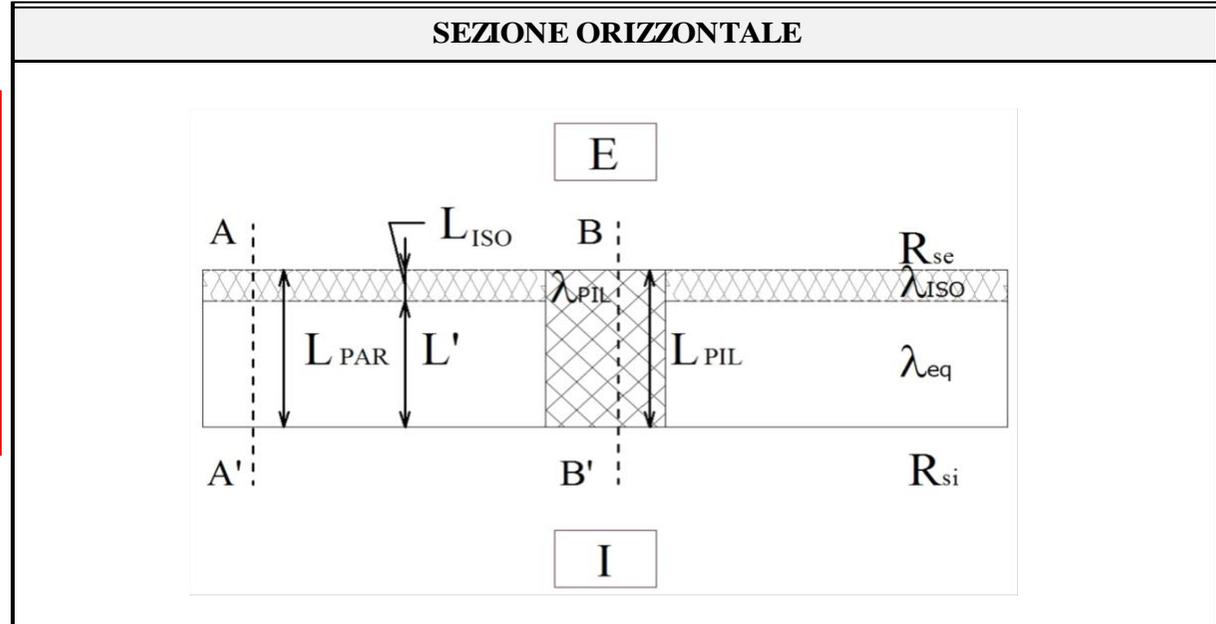
| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmissione adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmissione del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmissione della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | |

- Codifica della tipologia di ponte termico
- Denominazione del ponte termico
- Breve descrizione della tipologia di ponte termico



| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |



- Schema semplificato del ponte termico
- Identificazione dei parametri termofisici necessari



| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{sc}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{sc}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
|----------------------------------|--|
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

- Formulazione della trasmittanza termica lineare del ponte termico
 - riferita alle dimensioni interne
 - riferita alle dimensioni esterne



| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO |
|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | |
| | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Con: | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ |
| Trasmittanza del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

Con:

Trasmittanza adimensionale

$$U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$$

Trasmittanza del pilastro

$$U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

Trasmittanza della parete

$$U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

- Definizione dei parametri necessari per l'uso della correlazione



| PIL.001 | PARETE ESTERNA ISOLATA ALL'ESTERNO CON PILASTRO NON ISOLATO | |
|--|--|--|
| Ponte termico formato dalla giunzione di due pareti uguali isolate dall'esterno, con presenza di pilastro non isolato nella giunzione. | | |
| SEZIONE ORIZZONTALE | | |
| | | |
| TRASMITTANZA TERMICA LINEARE | | |
| Riferita alle dimensioni esterne | $\psi_E = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ | |
| Riferita alle dimensioni interne | $\psi_I = 1.234 - 0.050 \cdot U^* + 0.038 \cdot \lambda_{eq} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ | |
| Con: | | |
| Trasmittanza adimensionale | $U^* = \frac{U_{PIL}}{U_{PAR}}$ | |
| Trasmittanza del pilastro | $U_{PIL} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{PIL}}{\lambda_{PIL}} + R_{sc}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ | |
| Trasmittanza della parete | $U_{PAR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L'}{\lambda_{eq}} + \frac{L_{ISO}}{\lambda_{ISO}} + R_{sc}} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ | |
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14 \quad 0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ | |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ | |

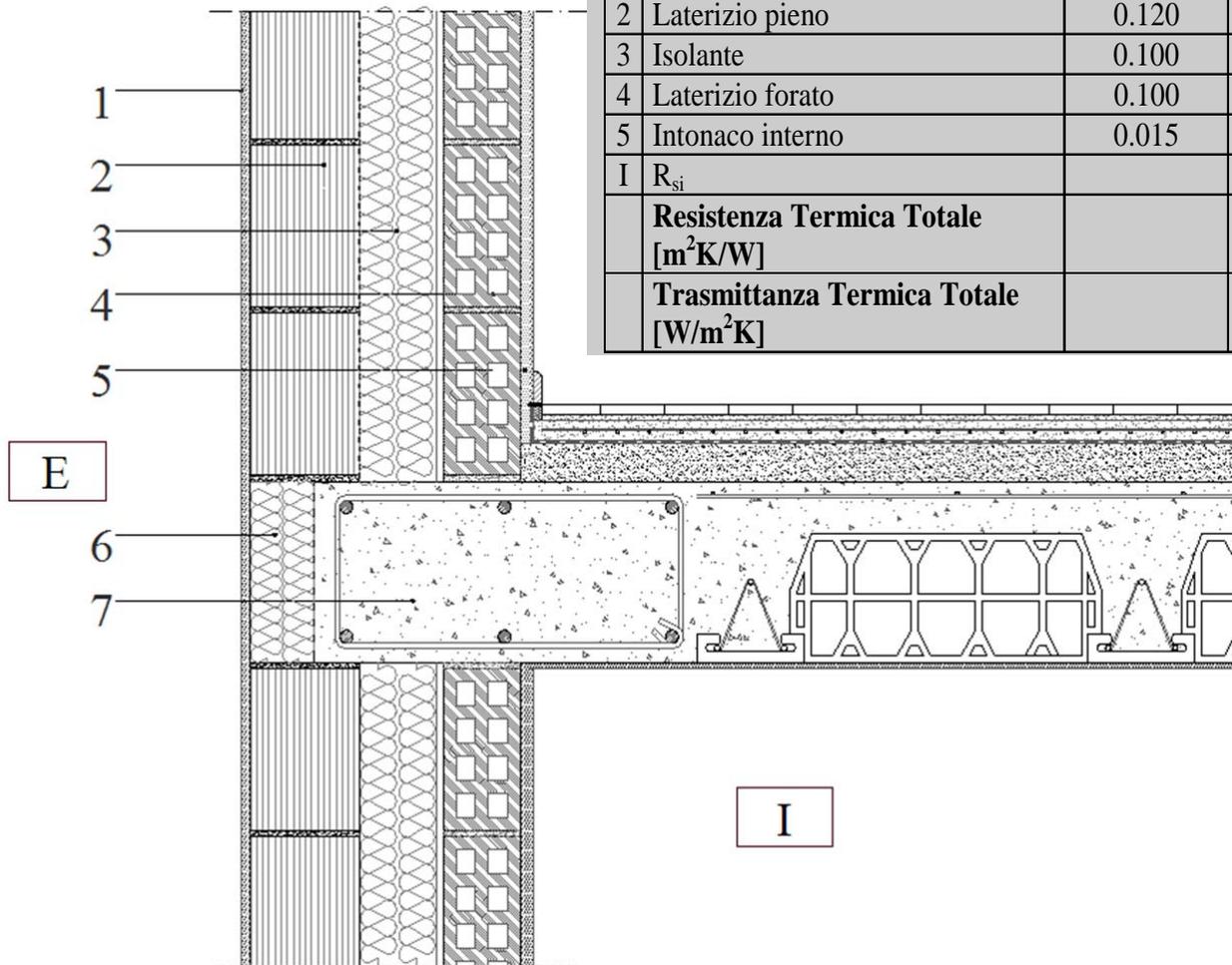
| | | |
|--------------------------|---|---|
| Campo di validità | $5.29 \leq U^* \leq 12.14$ | $0.23 \leq \lambda_{eq} \leq 0.81 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |
| Intervallo di confidenza | $IC_E^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ | $IC_I^{95\%} = \pm 0.06 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ |

- Esplicitazione del campo di validità della formulazione
- Esplicitazione dell'intervallo di confidenza della formulazione



Esempio di calcolo

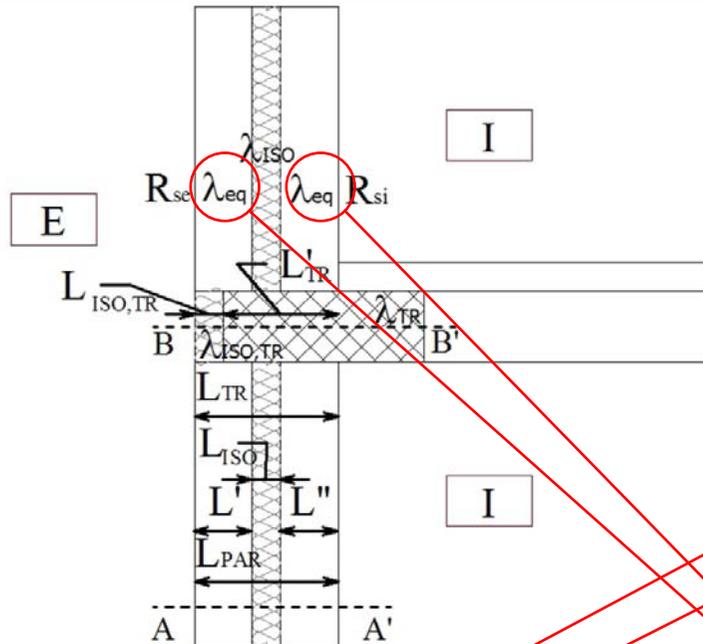
42



| Parete esterna | | | | | |
|---|------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| N | STRATIGRAFIA | Spessore [m] | Densità [kg/m ³] | Conduttività termica [W/mK] | Resistenza termica [m ² K/W] |
| E | R _{se} | | | | 0.040 |
| 1 | Intonaco esterno | 0.015 | 1800 | 0.900 | 0.017 |
| 2 | Laterizio pieno | 0.120 | 1800 | 0.810 | 0.148 |
| 3 | Isolante | 0.100 | 37 | 0.040 | 2.500 |
| 4 | Laterizio forato | 0.100 | 1200 | 0.540 | 0.185 |
| 5 | Intonaco interno | 0.015 | 1400 | 0.700 | 0.021 |
| I | R _{si} | | | | 0.130 |
| Resistenza Termica Totale [m²K/W] | | | | | 3.041 |
| Trasmittanza Termica Totale [W/m²K] | | | | | 0.329 |



1) CALCOLO DELLA CONDUTTIVITÀ EQUIVALENTE



a) Calcolo della **conduttanza** della parete, escludendo lo strato di isolante

$$C' = \frac{1}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{\frac{0.015}{0.9} + \frac{0.12}{0.81} + \frac{0.1}{0.54} + \frac{0.015}{0.7}} = 2.69 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

b) Calcolo dello **spessore** della parete, escludendo lo strato di isolante

$$L = \sum L_i = 0.015 + 0.12 + 0.1 + 0.015 = 0.25 \text{ m}$$

c) Calcolo della **conduttività** equivalente, escludendo lo strato di isolante

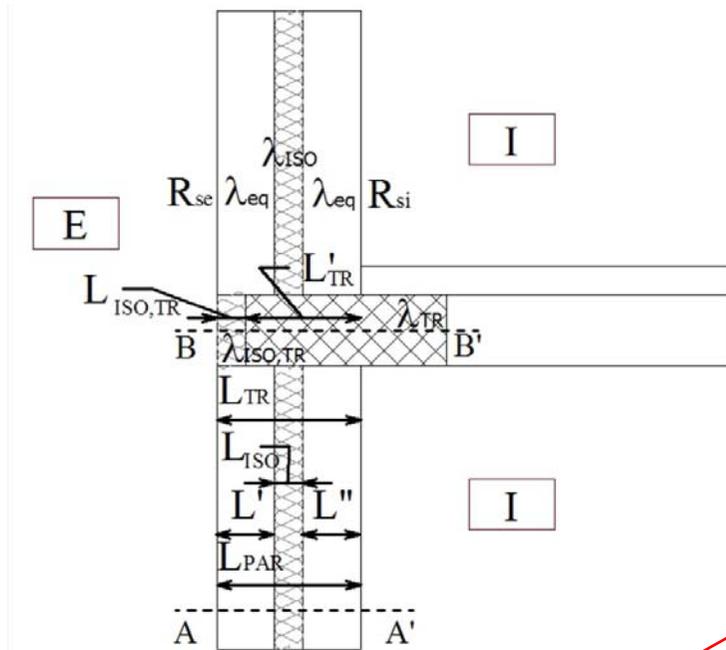
$$\lambda_{eq} = C' \cdot L = 2.69 \cdot 0.25 = 0.673 \frac{W}{m \cdot K}$$

| Parete esterna | | | | | |
|--|------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| N | STRATIGRAFIA | Spessore [m] | Densità [kg/m³] | Conduttività termica [W/mK] | Resistenza termica [m²K/W] |
| E | R _{se} | | | | 0.040 |
| 1 | Intonaco esterno | 0.015 | 1800 | 0.900 | 0.017 |
| 2 | Laterizio pieno | 0.120 | 1800 | 0.810 | 0.148 |
| 3 | Isolante | 0.100 | 37 | 0.040 | 2.500 |
| 4 | Laterizio forato | 0.100 | 1200 | 0.540 | 0.185 |
| 5 | Intonaco interno | 0.015 | 1400 | 0.700 | 0.021 |
| I | R _{si} | | | | 0.130 |
| Resistenza Termica Totale [m²K/W] | | | | | 3.041 |
| Trasmittanza Termica Totale [W/m²K] | | | | | 0.329 |



Esempio di calcolo

2) CALCOLO DELLA TRASMITTANZA DELLA TRAVE U_{TR} , CONSIDERANDO UNO SPESSORE PARI A QUELLO DELLA PARETE.



a) calcolo della conduttività equivalente della trave, escludendo lo strato di isolante

$$C'_{TR} = \frac{1}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i}} = \frac{1}{\frac{0.015}{0.9} + \frac{0.235}{1.91}} = 7.16 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

b) Calcolo dello spessore della trave, escludendo lo strato di isolante

$$L'_{TR} = 0.015 + 0.235 = 0.25 \text{ m}$$

c) Calcolo della conduttività equivalente della trave, escludendo lo strato di isolante

$$\lambda_{eq,TR} = C'_{TR} \cdot L'_{TR} = 7.16 \cdot 0.25 = 1.79 \frac{W}{m \cdot K}$$

| TRAVE ISOLATA | | | | | |
|--|------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| N | STRATIGRAFIA | Spessore [m] | Densità [kg/m³] | Conduttività termica [W/mK] | Resistenza termica [m²K/W] |
| E | Rse | | | | 0.040 |
| 1 | Intonaco esterno | 0.015 | 1800 | 0.900 | 0.017 |
| 6 | Isolante trave | 0.100 | 37 | 0.040 | 2.500 |
| 7 | Trave ca | 0.235 | 2400 | 1.910 | 0.123 |
| I | Rsi | | | | 0.130 |
| Resistenza Termica Totale [m²K/W] | | | | | 2.810 |
| Trasmittanza Termica Totale [W/m²K] | | | | | 0.356 |

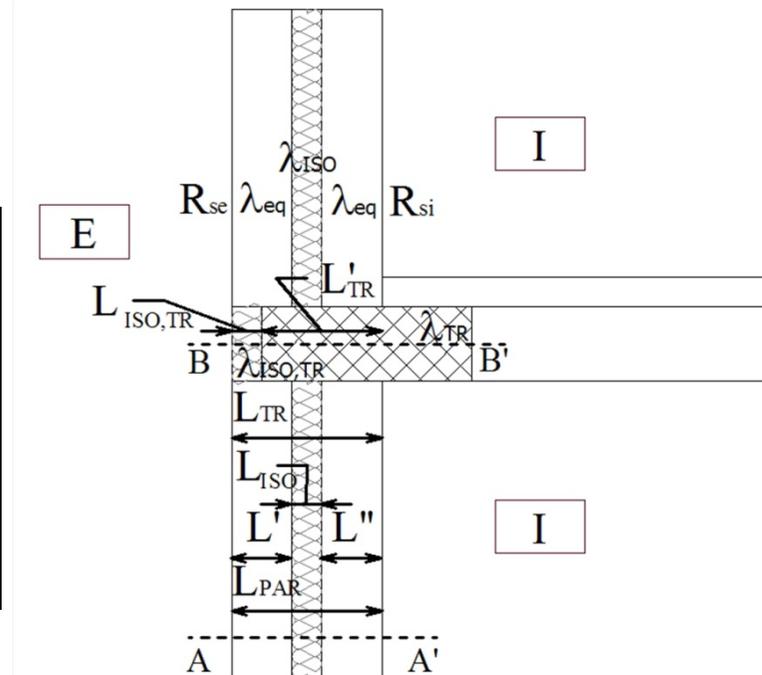


2) CALCOLO DELLA TRASMITTANZA DELLA TRAVE U_{TR} , CONSIDERANDO UNO SPESSORE PARI A QUELLO DELLA PARETE.

d) Calcolo della trasmittanza della trave, considerando uno spessore pari alla parete

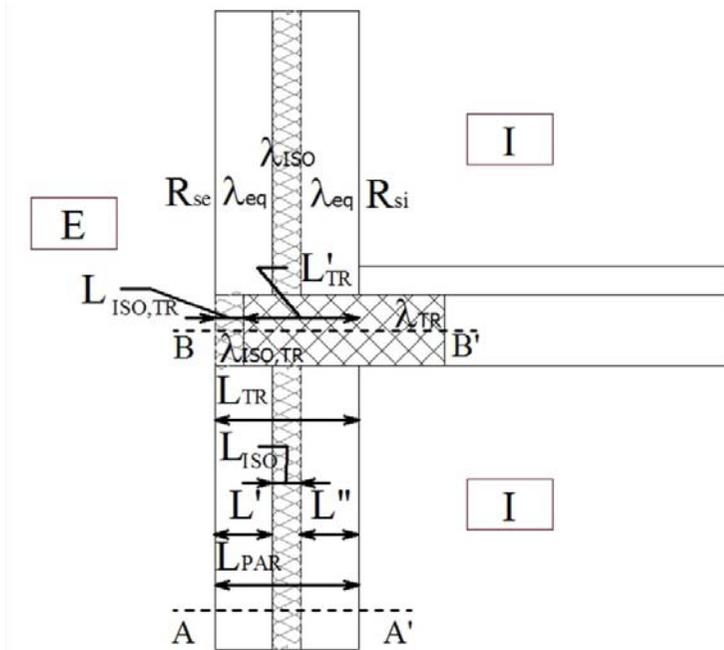
$$U_{TR} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{ISO,TR}}{\lambda_{ISO,TR}} + \frac{L'_{TR}}{\lambda_{eq,TR}} + R_{se}} = \frac{1}{0.13 + \frac{0.10}{0.04} + \frac{0.25}{1.79} + 0.04} = 0.356 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

| TRAVE ISOLATA | | | | | |
|---|------------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|---|
| N | STRATIGRAFIA | Spessore [m] | Densità [kg/m ³] | Conduktività termica [W/mK] | Resistenza termica [m ² K/W] |
| E | R _{se} | | | | 0.040 |
| 1 | Intonaco esterno | 0.015 | 1800 | 0.900 | 0.017 |
| 6 | Isolante trave | 0.100 | 37 | 0.040 | 2.500 |
| 7 | Trave ca | 0.235 | 2400 | 1.910 | 0.123 |
| I | R _{si} | | | | 0.130 |
| Resistenza Termica Totale [m²K/W] | | | | | 2.810 |
| Trasmittanza Termica Totale [W/m²K] | | | | | 0.356 |





3) CALCOLO DELLA TRASMITTANZA ADIMENSIONALE U^* , CALCOLO DELLA TRASMITTANZA TERMICA LINEARE Ψ_E E Ψ_I



a) Calcolo della conduttività equivalente della trave, escludendo lo strato di isolante

$$U^* = \frac{U_{TR}}{U_{PAR}} = \frac{0.356}{0.329} = 1.131$$

b) Calcolo della trasmittanza termica lineare riferita alle dimensioni esterne

$$\Psi_E = 0.112 + 0.428 \cdot U^* - \frac{0.127}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$\Psi_E = 0.112 + 0.428 \cdot 1.131 - \frac{0.127}{0.673} = 0.41 \frac{W}{m \cdot K}$$

c) Calcolo della trasmittanza termica lineare riferita alle dimensioni interne

$$\Psi_I = -0.290 + 1.015 \cdot U^* - \frac{0.219}{\lambda_{eq}} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$$

$$\Psi_I = -0.290 + 1.015 \cdot 1.131 - \frac{0.219}{0.673} = 0.53 \frac{W}{m \cdot K}$$

| TRAVE ISOLATA | | | | | |
|-------------------------------------|------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| N | STRATIGRAFIA | Spessore [m] | Densità [kg/m³] | Conduttività termica [W/mK] | Resistenza termica [m²K/W] |
| E | Rse | | | | 0.040 |
| 1 | Intonaco esterno | 0.015 | 1800 | 0.900 | 0.017 |
| 6 | Isolante trave | 0.100 | 37 | 0.040 | 2.500 |
| 7 | Trave ca | 0.235 | 2400 | 1.910 | 0.123 |
| I | Rsi | | | | 0.130 |
| Resistenza Termica Totale [m²K/W] | | | | | 2.810 |
| Trasmittanza Termica Totale [W/m²K] | | | | | 0.356 |



Scheda commenti

48

| | | |
|---|---------|--|
| Società | | |
| Nome | Cognome | |
| | | |
| Indirizzo | | |
| Telefono | FAX | |
| | | |
| E-mail | | |
| Note/commenti relativi all'impiego dell'abaco dei ponti termici | | |
| (Es. Facilità d'uso, Tipologie di ponte termico non descritte ma necessarie, etc.) | | |
| | | |
| Se, nella definizione di un ponte termico tramite l'ausilio di un programma di calcolo agli elementi finiti, si fossero riscontrate discrepanze significative rispetto ai valori desumibili dall'abaco, si prega di inviare il dettaglio del ponte termico: | | |
| <ul style="list-style-type: none">- dal punto di vista geometrico;- dal punto di vista delle proprietà utilizzate per il calcolo (relativamente ad ogni singolo componente del nodo);- delle condizioni al contorno. | | |
| Inviare le informazioni a: CESTEC SPA | | |
|  | | |



“Grazie per la vostra...

..... pazienza !”



Prof. Livio Mazzarella
Dipartimento di Energia
Politecnico di Milano
livio.mazzarella@polimi.it