



Università degli Studi di Genova
Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Energetica, Gestionale e dei Trasporti - DIME
Via all'Opera Pia, 15/A
16145 Genova

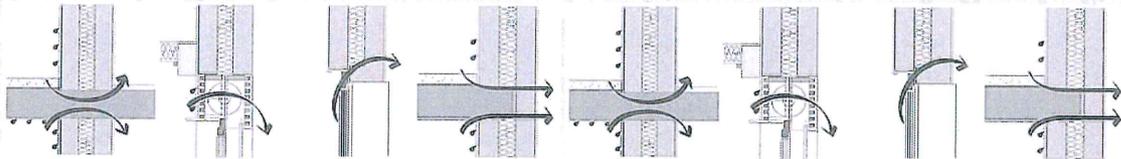


Infrastrutture Recupero Energia
Agenzia Regionale Ligure
Via XX Settembre, 41
16121 Genova

VALUTAZIONE DELLA TRASMITTANZA TERMICA LINEARE

DI ALCUNI ELEMENTI EDILIZI PIANI:

- **NODO SOLAIO CONTROTERRA**
- **NODO DAVANZALE PASSANTE DELLA FINESTRA**



Handwritten signature in blue ink.



Università degli Studi di Genova
Dipartimento di Ingegneria Meccanica,
Energetica, Gestionale e dei Trasporti - DIME
Via all'Opera Pia, 15/A
16145 Genova



Infrastrutture Recupero Energia
Agenzia Regionale Ligure
Via XX Settembre, 41
16121 Genova

Pubblicazione chiusa il 12/04/2021



La Regione Liguria con la pubblicazione della l.r. 29 maggio 2007 n.22 e ss.mm.ii. è stata una delle prime regioni italiane ad avviare il processo di certificazione energetica degli edifici, con la finalità di introdurre sul proprio territorio un efficace strumento per il miglioramento della qualità del patrimonio edilizio, attraverso la sensibilizzazione dei cittadini, la crescita dei professionisti e delle imprese del settore.

Dal 2007 ad oggi, la Regione ha istituito l'elenco dei certificatori liguri, creato il Sistema Informativo degli Attestati di Prestazione Energetica della Liguria (SIAPEL), fornito ai certificatori un servizio di assistenza tecnico-amministrativa ed un software per la redazione degli attestati di prestazione energetica (CELESTE), certificato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI).

Nel 2016 la Regione ha completato il recepimento della Direttiva 2010/31/UE attraverso la pubblicazione della l.r. n. 32/2016 *"Modifiche alla legge regionale 29 maggio 2007, n. 22 (Norme in materia di energia) e al relativo regolamento di attuazione"*, adeguando la normativa regionale vigente ai DM 26/06/2015.

IRE S.p.A (Infrastrutture Recupero Energia S.p.A.), ai sensi dell'articolo 6 bis, comma 2, lettera d), della l.r. n.22/2007 e ss.mm.ii., è lo strumento operativo soggetto ai poteri di direttiva ed indirizzo della Regione Liguria nell'ambito del settore energetico. In particolare, IRE S.p.A. fornisce supporto tecnico alla Regione per la gestione dell'intero processo di certificazione energetica sul territorio. Tra le attività istituzionali condotte da IRE S.p.A. è compresa quella di supporto tecnico-amministrativo ai professionisti liguri per l'uso del software CELESTE. Tale programma implementa le norme UNI/TS 11300 e consente la valutazione degli indicatori presenti sull'Attesto di Prestazione Energetica (APE), calcolati sulla base di una serie di dati di input che caratterizzano il sistema involucro-impianto e di algoritmi contenuti nella suddetta normativa. In particolare, il calcolo delle dispersioni attraverso i ponti termici è condotto secondo l'*"Abaco dei ponti termici"* pubblicato dalla Regione Lombardia e realizzato attraverso la collaborazione di Politecnico di Milano, ANCE e CESTEC.

Nel corso dell'anno 2014, IRE S.p.A. ha istituito per conto di Regione Liguria un tavolo tecnico di confronto con gli Ordini ed i Collegi professionali liguri coinvolti nel processo di certificazione energetica. Nell'ambito degli incontri è emersa la richiesta di integrare nel software CELESTE ulteriori archetipi non ancora previsti per il calcolo dei ponti termici. Sulla base di tale richiesta si è sviluppata un'attività congiunta tra IRE S.p.A. ed il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti – DIME dell'Università degli Studi di Genova, rivolta a definire specifici algoritmi da implementare nel software regionale. Presso il DIME è stata quindi sviluppata un'attività di ricerca con il significativo coinvolgimento della Prof.ssa Marchitto, del Prof. Cavalletti e del Prof. Borelli, di cui il presente documento costituisce un risultato. La collaborazione tra IRE S.p.A. e il DIME è stata formalizzata con una convenzione a titolo non oneroso stipulata in data 1° aprile 2016 avente come responsabili scientifici l'Ing. Ludovica Marengo e il Prof. Enrico Nannei per IRE S.p.A. e il Prof. Ing. Corrado Schenone per il DIME e con oggetto *"Collaborazione a titolo non oneroso per la valutazione della trasmittanza termica lineare di alcuni elementi edilizi piani"*.



Lo studio ha riguardato le seguenti tipologie edilizie:

- nodo solaio controterra;
- nodo davanzale passante della finestra.

Il lavoro condotto consente di rendere più completo il quadro dei ponti termici considerati dal software CELESTE, evitando il ricorso ad approssimazioni basate su analogie talvolta improprie ed uniformando la metodologia di calcolo.

Responsabile scientifico DIME-UNIGE

Prof. Ing. Corrado Schenone

Responsabili scientifici IRE S.p.A.

Prof. Ing. Enrico Nannei

Dott. Ing. Ludovica Marengo



Indice

1. Introduzione	6
2. Normativa di riferimento	6
3. Procedimento dello studio	7
4. Nomenclatura.....	11
5. Archetipi dei ponti termici	13

ALLEGATI:

- Allegato 1 "Parametri di riferimento"





1. Introduzione

Il presente documento riporta i risultati di uno studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti – DIME dell'Università degli Studi di Genova, in collaborazione con IRE S.p.A. (Infrastrutture Recupero Energia S.p.A.), finalizzato all'ampliamento dell'abaco dei ponti termici implementato nel software CELESTE. Tale abaco è derivato dall'“*Abaco dei ponti termici*” pubblicato dalla Regione Lombardia e realizzato attraverso la collaborazione di Politecnico di Milano, ANCE e CESTEC.

Lo studio ha riguardato l'analisi e la modellizzazione delle seguenti tipologie edilizie:

- nodo solaio controterra;
- nodo davanzale passante delle finestre.

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 la valutazione della trasmittanza termica lineare in funzione dei principali parametri geometrici e termici, nonché i campi di validità e gli intervalli di confidenza relativi.

2. Normativa di riferimento

L'analisi è stata svolta facendo riferimento alle seguenti norme:

- **UNI EN ISO 10211:2018** Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati;
- **UNI EN ISO 14683:2018** Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento;
- **UNI EN ISO 13370:2018** Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo;
- **UNI/TS 11300-1:2014** Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale;
- **UNI/TR 11552:2014** Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici;
- **UNI EN ISO 6946:2018** Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo;
- **UNI EN ISO 10077-1:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità;
- **UNI EN ISO 10077-2:2018** Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 2: Metodo numerico per i telai;
- **UNI 10355:1994** Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo;
- **UNI 10351:2015** Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto;
- **ISO 7345:2018** Prestazione termica degli edifici e dei componenti edilizi - Grandezze fisiche e definizioni.



3. Procedura di analisi adottata

Le due tipologie oggetto di studio sono costituite da famiglie di ponti termici nel seguito indicate come archetipo del ponte termico.

La Tabella 1 di seguito riportata mostra gli archetipi studiati, la loro codifica e il numero dei ponti termici appartenenti a ciascun archetipo.

In particolare, si è adottata la codifica CTR per la “giunzione tra una parete o tamponamento perimetrale e la soletta controterra” e la codifica PF per la “giunzione del davanzale passante della finestra con parete o tamponamento perimetrale”. Nel primo caso si sono esaminate cinque diverse configurazioni, mentre nel secondo tre.

Archetipo	Codifica	Numero
Giunzione tra una parete o tamponamento perimetrale e la soletta controterra	CTR	1-5
Giunzione del davanzale passante della finestra con parete o tamponamento perimetrale	PF	1-3

Tabella 1 – Codifica degli archetipi di ponte termico

Strumento di calcolo

La valutazione della trasmittanza termica lineare per le due configurazioni studiate è stata effettuata mediante l'utilizzo del codice di calcolo per la simulazione termofluidodinamica THERM, nell'ipotesi di regime stazionario e dominio bidimensionale.

Il software è stato sviluppato dal Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL) dell'Università della California, con il supporto dell'U.S.Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Il programma è nato specificamente per studiare l'andamento dei flussi di calore bidimensionali all'interno di componenti edilizi come finestre, pareti, fondazioni, tetti. Si tratta di un software pubblico, ad uso gratuito, che permette anche di individuare problemi di formazione di condensa superficiale e interstiziale, fornendo le temperature esterne e interne dei vari strati.

THERM rappresenta lo stato dell'arte nell'analisi dei ponti termici ed è internazionalmente utilizzato dai tecnici interessati alla trasmissione del calore negli edifici. Mediante questo strumento di calcolo è possibile modellare gli effetti della trasmissione del calore bidimensionale in componenti come finestre, muri, fondazioni, tetti, porte e altri elementi in cui i ponti termici rivestono un ruolo significativo. L'analisi della trasmissione del calore consente di valutare l'efficienza energetica di un componente edilizio e di modellizzare la distribuzione di temperatura al suo interno.



L'analisi della trasmissione del calore per conduzione e irraggiamento in geometria bidimensionale si basa sul metodo degli elementi finiti, che consente di modellizzare le diverse geometrie dei componenti edilizi. Questo metodo richiede che la sezione trasversale di un elemento edilizio sia divisa in una mesh composta da elementi non sovrapposti, che viene realizzata automaticamente utilizzando il metodo Finite Quadtree. Dopo aver definito la geometria della sezione trasversale, le proprietà del materiale e le condizioni al contorno, il software crea una mesh della sezione, esegue l'analisi del campo di temperature, produce una stima dell'errore, se necessario affina la mesh e restituisce infine la soluzione.

Validazione del Software THERM

Per verificare la validità dei risultati, si è fatto riferimento all'appendice A della norma UNI EN ISO 10211:2008 ed in particolare al secondo caso di studio proposto nella normativa.

La geometria del caso adottato è quella riportata nella Figura 1, mentre le dimensioni, le proprietà dei materiali e le condizioni al contorno usate, sono quelle descritte in Tabella 2, in conformità alla sopracitata norma.

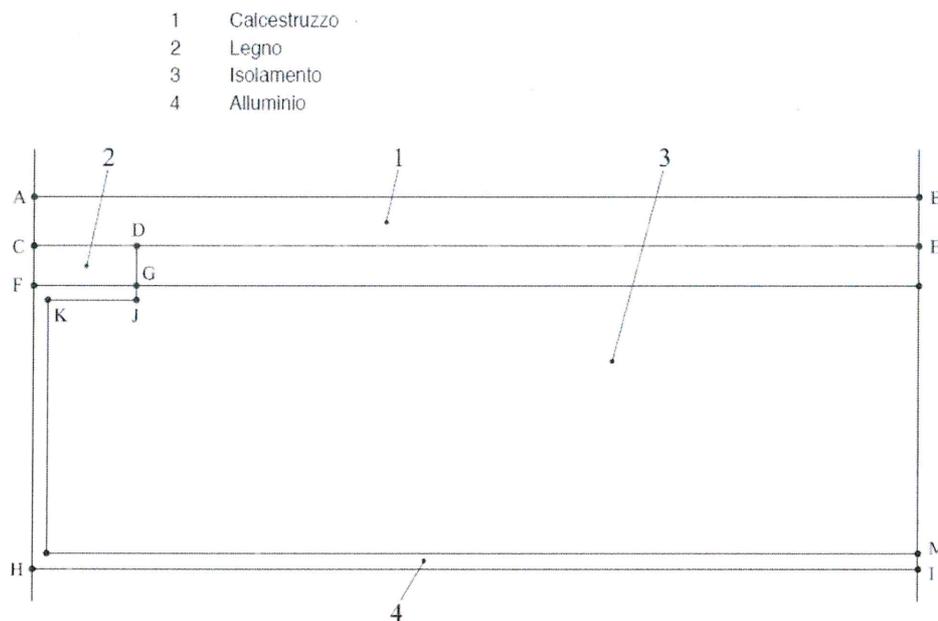


Figura 1 – Appendice A norma UNI EN ISO 10211:2008 – Caso 2



Dimensioni mm	Conduttività termica W/(mK)	Condizioni al contorno
AB = 500	1: 1.15	AB: 0 °C con $R_{se} = 0.06 (m^2K)/W$
AC = 6	2: 0.12	HI: 20 °C con $R_{sj} = 0.11 (m^2K)/W$
CD = 15	3: 0.029	
CF = 5	4: 230	
EM = 40		
GJ = 1,5		
IM = 1,5		
FG – KJ = 1,5		

Tabella 2 – Appendice A norma UNI EN ISO 10211:2008 – Descrizione caso 2

Per poter definire “validi” i risultati ottenuti con il codice di calcolo impiegato, la norma prevede il rispetto delle seguenti condizioni:

- le temperature ottenute per i punti nodali della geometria in esame non devono discostarsi per più di 0.1°C da quelli riportati in Tabella 3;
- il flusso termico non deve differire per più di 0.1 W/m da quello riportato nella norma che, per il caso in esame, è 9.5 W/m.

Temperatura °C		
A: 7.1		B: 0.8
C: 7.9	D: 6.3	E: 0.8
F: 16.4	G: 16.3	
H: 16.8		I: 18.3

Tabella 3 – Appendice A norma UNI EN ISO 10211:2008 – Soluzione numerica caso 2

Dai calcoli effettuati con il programma di calcolo impiegato, sono stati ottenuti valori di temperatura che si discostano da quelli della Tabella 3 di una quantità inferiore a 0.1 °C.

In Figura 2 è riportata una rappresentazione della distribuzione di temperatura ricavata dai calcoli effettuati con il codice di calcolo impiegato.

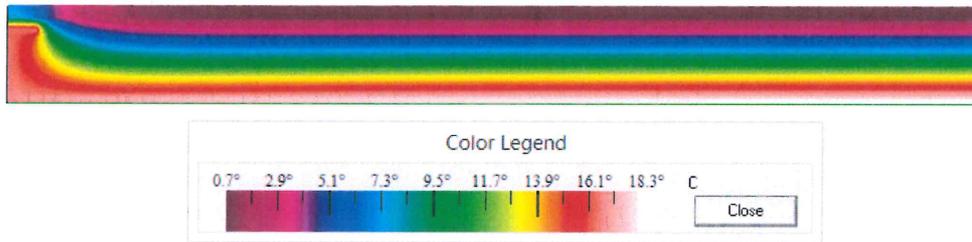


Figura 2 – Profilo di temperatura ricavato dal calcolo

Per quanto riguarda il flusso termico, il valore ottenuto mediante i calcoli è pari a 9.49 W/m. Tale valore rispetta il vincolo della UNI 10211:2008, in quanto si discosta di un valore inferiore a 0.1 W/m dai 9.5 W/m previsti dalla norma.



4. Nomenclatura

Nella Tabella 4 di seguito riportata sono elencate le grandezze utilizzate nell'ambito del presente documento, specificando per ognuna di esse la simbologia e la corrispondente unità di misura.

Grandezza	Simbolo	U.M.
Coefficiente di accoppiamento termico	$L_{i,j}$	W/K
Conduttanza del pacchetto tecnologico	$C = \frac{1}{\sum \frac{L_i}{\lambda_i}}$	W/(m ² K)
Conduttività termica	λ	W/(mK)
Conduttività termica equivalente del pacchetto tecnologico	$\lambda_{eq} = C \cdot L$	W/(mK)
Diagonale	d	m
Resistenza termica	$R = \frac{L}{\lambda}$	m ² K/W
Resistenza termica equivalente della parete	R_{par}	m ² K/W
Resistenza termica equivalente della soletta	R_f	m ² K/W
Resistenza termica superficiale interna ¹	$R_{si} = \frac{1}{h_i}$	m ² K/W
Resistenza termica superficiale esterna ¹	$R_{se} = \frac{1}{h_e}$	m ² K/W
Resistenza termica totale	$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$	m ² K/W

¹ Si raccomanda di utilizzare sempre i valori standard che sono congruenti con le trasmittanze degli elementi edilizi di cui alla norma UNI/TR 11552:2014



Grandezza	Simbolo	U.M.
Spessore	L	m
Spessore equivalente della soletta	$L_{eq,f}$	m
Spessore totale del davanzale passante della finestra	L_{dp}	m
Trasmittanza termica	$U = \frac{1}{R_T}$	W/(m ² K)
Trasmittanza termica lineare	ψ	W/(mK)
Esterno	E	
Interno	I	
Sotto	S	

Tabella 4 – Parametri utilizzati



5. Archetipi dei ponti termici

Nel seguito sono riportate le schede relative agli archetipi studiati:

- Nodo solaio controterra
 - **CTR. 1** “Nodo tra parete portante e soletta controterra”;
 - **CTR.2** “Nodo tra parete di tamponamento e soletta controterra”;
 - **CTR.3** “Nodo tra parete portante e solaio controterra (SOL13 UNI 11552)”;
 - **CTR.4** “Nodo tra parete portante e solaio a terra su muricci”;
 - **CTR.5** “Nodo tra parete di tamponamento e solaio su intercapedine o seminterrato”;

- Nodo davanzale passante della finestra
 - **PF.1** “Discontinuità strutturale rappresentata dal davanzale passante della finestra”, in presenza di telaio in appoggio;
 - **PF.2** “Discontinuità strutturale rappresentata dal davanzale passante della finestra”, in presenza di telaio interposto con trasmittanza: $3 < U_{\text{telaio}} \leq 7 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - **PF.3** “Discontinuità strutturale rappresentata dal davanzale passante della finestra”, in presenza di telaio interposto con trasmittanza: $1 \leq U_{\text{telaio}} \leq 3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Si precisa che l’abaco proposto vale per strutture esistenti NON isolate; non è quindi applicabile a strutture con stratigrafie provviste di strati di materiale isolante.



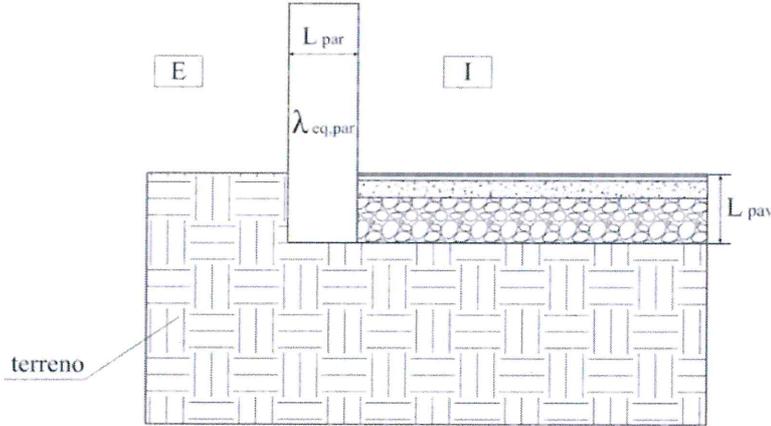
CTR.1	NODO TRA PARETE PORTANTE E SOLETTA CONTROTERRA	
Ponte termico formato dalla giunzione di una parete perimetrale di una struttura in muratura portante con una soletta controterra.		
SEZIONE VERTICALE		
<p style="text-align: right;">$\lambda_{\text{terreno}} = 2 \text{ W/(mK)}$</p>		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = -0.009 - 0.037U_{pav} - 0.5L_{par} + 0.120\left(\frac{\lambda_{eq,par} + \lambda_{eq,pav}}{2}\right) + 0.633 d \quad \left[\frac{W}{mK}\right]$		
<p>Con:</p> <p><i>Trasmittanza della soletta</i> $U_{pav} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{pav}}{\lambda_{eq,pav}}} \quad \left[\frac{W}{m^2K}\right]$</p> <p><i>Diagonale</i> $d = \sqrt{L_{par}^2 + L_{pav}^2} \quad [m]$</p>		
<p>Campo di validità</p> <p style="text-align: center;">B qualsiasi; $0.3 \leq L_{par} \leq 1.3 \text{ [m]}$; $0.1 \leq L_{pav} \leq 0.4 \text{ [m]}$; $0.6 \leq \lambda_{eq,par} \leq 3.6 \left[\frac{W}{mK}\right]$; $0.5 \leq \lambda_{eq,pav} \leq 2.07 \left[\frac{W}{mK}\right]$;</p>		
<p>Intervallo di confidenza</p> $IC^{95\%} = \pm 0.0674 \quad \left[\frac{W}{mK}\right]$		
<p>Nota: per la definizione di B "Dimensione caratteristica" e di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".</p>		



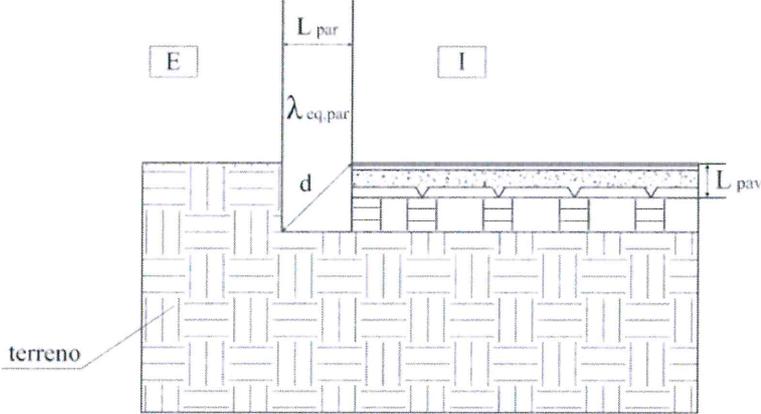
CTR.2	NODO TRA PARETE DI TAMPONAMENTO E SOLETTA CONTROTERRA	
Ponte termico formato dalla giunzione di una parete di tamponamento di un edificio con struttura portante in C.A. con una soletta controterra.		
SEZIONE VERTICALE		
$\lambda_{\text{terreno}} = 2 \text{ W}/(\text{mK})$		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = -0.129 + 0.456 C_{pav} - 0.125 \left(\frac{U_d}{U_{pav}} \right) + 0.268 \lambda_{eq,pav} + 0.388 \left(\frac{L_{pav}}{d} \right) +$ $+ 0.585 L_{pav} - 0.1873 R_f \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Con:		
Trasmittanza lungo la diagonale	$U_d = \frac{1}{0.15 + \frac{d}{\lambda_{eq,pav}}}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
Diagonale	$d = \sqrt{L_{par}^2 + L_{pav}^2}$	[m]
Spessore equivalente della soletta	$L_{eq,f} = L_{par} + \lambda_{terreno} (R_{si} + R_f)$	[m]
Resistenza termica della soletta	$R_f = \frac{L_{pav}}{\lambda_{eq,pav}}$	$\left[\frac{m^2K}{W} \right]$
Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} < B$	$U_{pav} = \frac{2\lambda_{terreno}}{\pi B + L_{eq,f}} \ln \left(\frac{\pi B}{L_{eq,f}} + 1 \right)$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} \geq B$	$U_{pav} = \frac{\lambda_{terreno}}{0.4758 + L_{eq,f}}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
Conduttanza apparente	$C_{pav} = \frac{1}{\frac{1}{U_{pav}} - 0.17}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
Campo di validità	B qualsiasi; $0.24 \leq L_{par} \leq 0.54$ [m]; $0.15 \leq L_{pav} \leq 0.55$ [m] $0.3 \leq \lambda_{eq,par} \leq 2.07$ $\left[\frac{W}{mK} \right]$; $0.6 \leq \lambda_{eq,pav} \leq 2.07$ $\left[\frac{W}{mK} \right]$	
Intervallo di confidenza	$IC^{95\%} = \pm 0.046$ $\left[\frac{W}{mK} \right]$	
Nota: per la definizione di B "Dimensione caratteristica" e di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".		

file
EN



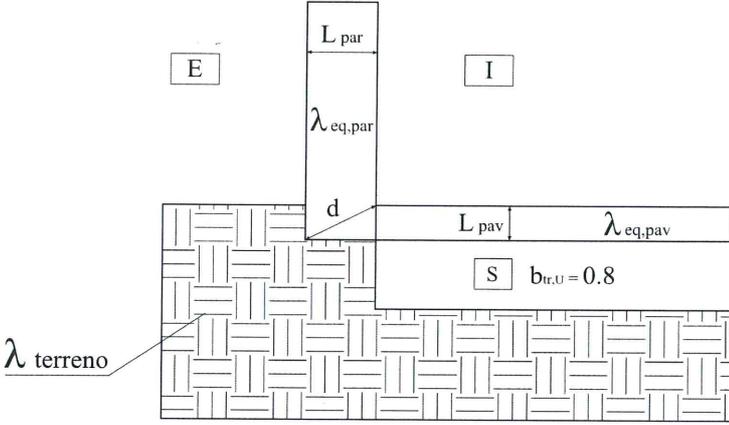
CTR.3	NODO TRA PARETE PORTANTE E SOLAIO CONTROTERRA (SOL13 UNI 11552:2014)	
Ponte termico formato dalla giunzione di una parete portante in muratura, realizzata su fondazione superficiale continua (non disegnata nello schema in quanto assunto $\lambda_{ter}=\lambda_{cls}$), e il solaio controterra con stratigrafia ricavata dal caso SOL 13 della norma UNI 11552:2014.		
SEZIONE VERTICALE		
 <p style="text-align: right;">$\lambda_{terreno}=2 W/(mK)$</p>		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = 0.732 - 1.162C_{pav} + 0.139 \left(\frac{U_{par} + U_{pav}}{2} \right) \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Con:		
<i>Trasmittanza della parete</i>	$U_{par} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{par}}{\lambda_{eq,par}} + R_{se}}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
<i>Spessore equivalente della soletta</i>	$L_{eq,f} = L_{par} + \lambda_{terreno} (R_{si} + R_f)$	[m]
<i>Resistenza termica della soletta</i>	$R_f = \frac{L_{pav}}{\lambda_{eq,pav}}$	$\left[\frac{m^2K}{W} \right]$
<i>Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} < B$</i>	$U_{pav} = \frac{2\lambda_{terreno}}{\pi B + Leq,f} \ln \left(\frac{\pi B}{Leq,f} + 1 \right)$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
<i>Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} \geq B$</i>	$U_{pav} = \frac{\lambda_{terreno}}{0,4758 + Leq,f}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
<i>Conduttanza equivalente della soletta</i>	$C_{pav} = \frac{1}{\frac{1}{U_{pav}} - 0.17}$	$\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
Campo di validità		
$B \text{ qualsiasi}; \quad 0.3 \leq L_{par} \leq 1.3 \text{ [m]}; \quad 0.35 \leq L_{pav} \leq 0.55 \text{ [m]}$ $0.6 \leq \lambda_{eq,par} \leq 3.9 \left[\frac{W}{mK} \right]; \quad 0.28 \leq R_f \leq 0.45 \left[\frac{m^2K}{W} \right]$		
Intervallo di confidenza		
$IC^{95\%} = \pm 0.037 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Nota: per la definizione di B "Dimensione caratteristica" e di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".		



CTR.4	NODO TRA PARETE PORTANTE E SOLAIO A TERRA SU MURICCI	
Ponte termico formato dalla giunzione di una parete portante con solaio controterra, avente una stratigrafia caratterizzata da "muricci antichi".		
SEZIONE VERTICALE		
 <p style="text-align: right;">$\lambda_{\text{terreno}} = 2 \text{ W/(mK)}$</p>		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = -0,025 - 0,006C_{par} + 0,080 \frac{U_d}{U_{pav}} + 0,207d - 0,08 \frac{(R_{T,par} + R_{pav})}{2} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
<p>Con:</p> <p><i>Trasmittanza lungo la diagonale</i> $U_d = \frac{1}{0,15 + \frac{d}{\lambda_{eq,pav}}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$</p> <p><i>Diagonale</i> $d = \sqrt{L_{par}^2 + L_{pav}^2} \quad [m]$</p> <p><i>Spessore equivalente della soletta</i> $L_{eq,f} = L_{par} + \lambda_{terreno} (R_{si} + R_f) \quad [m]$</p> <p><i>Resistenza termica della soletta</i> $R_f = \frac{L_{pav}}{\lambda_{eq,pav}} \quad \left[\frac{m^2K}{W} \right]$</p> <p><i>Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} < B$</i> $U_{pav} = \frac{2\lambda_{terreno}}{\pi B + L_{eq,f}} \ln \left(\frac{\pi B}{L_{eq,f}} + 1 \right) \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$</p> <p><i>Trasmittanza soletta se $L_{eq,f} \geq B$</i> $U_{pav} = \frac{\lambda_{terreno}}{0,4758 + L_{eq,f}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$</p> <p><i>Resistenza termica pavimento</i> $R_{pav} = \frac{1}{U_{pav}} \quad \left[\frac{m^2K}{W} \right]$</p>		
<p>Campo di validità</p> <p style="text-align: center;">B qualsiasi ; $0,3 \leq L_{par} \leq 1,3 \quad [m]$; $1 \leq U_{pav,13370} \leq 2 \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$; $0,6 \leq \lambda_{eq,par} \leq 3,9 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$</p>		
<p>Intervallo di confidenza</p> <p style="text-align: center;">$IC^{95\%} = \pm 0,087 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$</p> <p>Nota 1: per la definizione di B "Dimensione caratteristica" e di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento". Nota 2: Per il calcolo di C_{pav} e di $\lambda_{eq,par}$ occorre considerare gli strati facenti parte della soletta al netto dello spessore dei muricci.</p>		

Handwritten signature 17



CTR.5	NODO TRA PARETE DI TAMPONAMENTO E SOLAIO SU INTERCAPEDINE O SEMINTERRATO	
Ponte termico formato dalla giunzione di una parete di tamponamento, realizzata al di sopra di una trave rovescia o di un altro elemento in calcestruzzo armato, e il solaio al di sopra di una intercapedine areata o di un seminterrato non riscaldato.		
SEZIONE VERTICALE		
		
$\lambda_{\text{terreno}} = 2 \text{ W/(mK)}$		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = 0.519 - 0.134U_d - 0.146 \left(\frac{U_{par}}{U_d} \right) + 0.083 \left(\frac{U_{par} + U_{pav}}{2} \right) + 0.228 \frac{L_{pav}}{d} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Con:		
Trasmittanza lungo la diagonale	$U_d = \frac{1}{0.15 + \frac{d}{\lambda_{\text{terreno}}}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	
Diagonale	$d = \sqrt{L_{par}^2 + L_{pav}^2} \quad [m]$	
Trasmittanza della parete	$U_{par} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{par}}{\lambda_{eq,par}} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	
Trasmittanza del solaio	$U_{pav} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{pav}}{\lambda_{eq,pav}} + R_{si}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	
Campo di validità		
$B \text{ qualsiasi}; \quad 0.24 \leq L_{par} \leq 0.54 \quad [m]; \quad 0.15 \leq L_{pav} \leq 0.55 \quad [m]$		
$0.3 \leq \lambda_{eq,par} \leq 2.1 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]; \quad 0.5 \leq \lambda_{eq,pav} \leq 2.07 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Intervallo di confidenza		
$IC^{95\%} = \pm 0.0285 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Nota: per la definizione di B "Dimensione caratteristica" e di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".		



PF.1	DISCONTINUITÀ STRUTTURALE RAPPRESENTATA DAL DAVANZALE PASSANTE DELLA FINESTRA	
<p>Ponte termico strutturale formato dalla discontinuità rappresentata dalla piana della finestra in presenza di telaio in appoggio. Nel calcolo non intervengono la posizione del serramento, la sporgenza della piana e la tipologia del telaio.</p>		
SEZIONE VERTICALE		
TRASMITTANZA TERMICA LINEARE		
$\psi_l = -0.064 - 0.036U_{par} - \frac{0.037}{U_{par}} + 0.082U_{dp} + 0.834L_{par} + 0.076 \left(\frac{\lambda_{dp} + \lambda_{eq,par}}{2} \right) \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Con:		
<i>Trasmittanza equivalente del davanzale passante</i>	$U_{dp} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{dp}}{\lambda_{dp}} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	
<i>Trasmittanza della parete</i>	$U_{par} = \frac{1}{R_{si} + R_{par} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	
<i>Resistenza termica della parete</i>	$R_{par} = \frac{L_{par}}{\lambda_{eq,par}} \quad \left[\frac{m^2K}{W} \right]$	
Campo di validità		
$0.18 \leq L_{par} \leq 0.49 \quad [m];$ $0.3 \leq \lambda_{eq,par} \leq 3.6 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]; \quad 1.6 \leq \lambda_{dp} \leq 3.6 \quad \left[\frac{W}{mK} \right];$		
Intervallo di confidenza		
$IC^{95\%} = \pm 0.103 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$		
Nota: per la definizione di IC "Intervallo di confidenza" vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".		

19

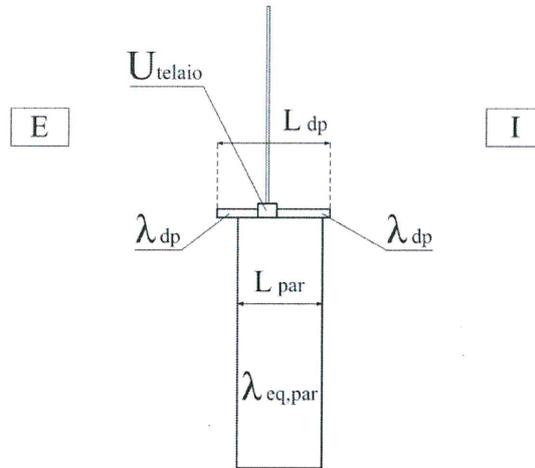


PF.2

DISCONTINUITÀ STRUTTURALE RAPPRESENTATA DAL
 DAVANZALE PASSANTE DELLA FINESTRA

Ponte termico strutturale formato dalla discontinuità rappresentata dalla piana della finestra in presenza di telaio interposto avente $U_{\text{telaio}} > 3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nel calcolo non intervengono la sporgenza della piana e la posizione del serramento.

SEZIONE VERTICALE



TRASMITTANZA TERMICA LINEARE

$$\psi_l = -0.111 - 0.027R_{\text{par}} + 0.034U_{\text{dp}} + 0.049\lambda_{\text{eq,par}} + 0.813L_{\text{par}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

Con:

Trasmittanza equivalente del davanzale passante

$$U_{\text{dp}} = \frac{1}{R_{\text{si}} + \frac{L_{\text{dp}}}{\lambda_{\text{dp}}} + R_{\text{se}}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Resistenza termica della parete

$$R_{\text{par}} = \frac{L_{\text{par}}}{\lambda_{\text{eq,par}}} \quad \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$$

Campo di validità

$$3 < U_{\text{telaio}} \leq 7 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]; \quad 0.18 \leq L_{\text{par}} \leq 0.49 \quad [\text{m}];$$

$$0.3 \leq \lambda_{\text{eq,par}} \leq 3.6 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]; \quad 1.6 \leq \lambda_{\text{dp}} \leq 3.6 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right];$$

Intervallo di confidenza

$$IC^{95\%} = \pm 0.098 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$$

Nota: per la definizione di IC "Intervallo di confidenza" e di U_{telaio} vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".

File del 9

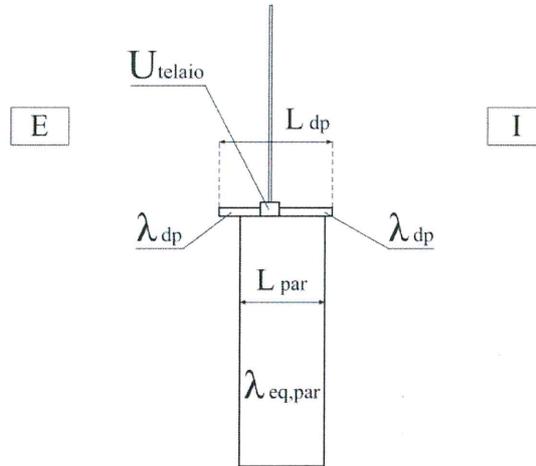


PF.3

DISCONTINUITÀ' STRUTTURALE RAPPRESENTATA DAL
DAVANZALE PASSANTE DELLA FINESTRA

Ponte termico strutturale formato dalla discontinuità rappresentata dalla piana della finestra in presenza di telaio interposto avente $U_{telaio} \leq 3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Nel calcolo non intervengono la sporgenza della piana e la posizione del serramento.

SEZIONE VERTICALE



TRASMITTANZA TERMICA LINEARE

$$\psi_I = -0.237 + 0.076U_{dp} - 0.016 \frac{U_{dp}}{U_{par}} + 0.078 \lambda_{eq,par} + 0.734 L_{par} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Con:

Trasmittanza equivalente del davanzale passante

$$U_{dp} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{dp}}{\lambda_{dp}} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Trasmittanza della parete

$$U_{par} = \frac{1}{R_{si} + R_{par} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Resistenza termica della parete

$$R_{par} = \frac{L_{par}}{\lambda_{eq,par}} \quad \left[\frac{m^2K}{W} \right]$$

Campo di validità

$$1 \leq U_{telaio} \leq 3 \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]; \quad 0.18 \leq L_{par} \leq 0.49 \quad [m];$$

$$0.3 \leq \lambda_{eq,par} \leq 3.6 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]; \quad 1.6 \leq \lambda_{dp} \leq 3.6 \quad \left[\frac{W}{mK} \right];$$

Intervallo di confidenza

$$IC^{95\%} = \pm 0.101 \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

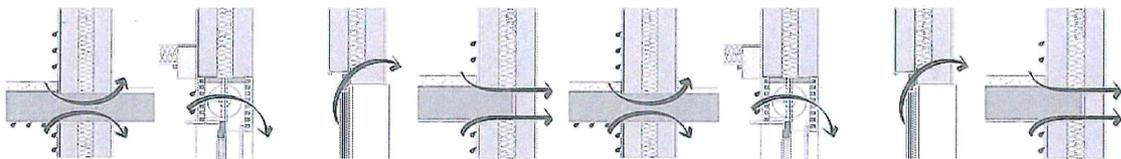
Nota: per la definizione di IC "Intervallo di confidenza" e di U_{telaio} vedere Allegato 1 "Parametri di riferimento".

Handwritten signature



Allegato 1

Parametri di riferimento



Handwritten signature



Indice

1. Dimensione caratteristica (B) del pavimento controterra.....	24
2. Intervallo di confidenza ($IC^{95\%}$).....	25
3. Trasmittanza termica del serramento (U_{telaio})	26



1. Dimensione caratteristica (B) del pavimento controterra

Per tenere conto della natura tridimensionale del flusso termico nel terreno, occorre introdurre la "dimensione caratteristica" (B) del pavimento, definita come l'area del pavimento (A) divisa per il suo semiperimetro (0.5P), in accordo con quanto precisato nella norma UNI EN ISO 13370:2008:

$$B = \frac{A}{0.5P} \quad [m]$$

In particolare, in caso di:

- pavimento di lunghezza infinita: la "dimensione caratteristica B" è rappresentata dalla larghezza del pavimento;
- pavimento a base quadrata: la "dimensione caratteristica B" è uguale a metà del lato;
- piano interrato: la "dimensione caratteristica B" è calcolata prendendo in considerazione l'area ed il perimetro del pavimento del piano interrato, escludendo lo spessore delle pareti del piano interrato stesso. Il flusso termico scambiato comprende un termine addizionale, funzione del perimetro e della profondità del pavimento dell'interrato al di sotto del livello del terreno esterno. P è il perimetro esposto del pavimento, ovvero la lunghezza totale delle pareti che separano l'edificio riscaldato dall'ambiente esterno o da uno spazio non riscaldato esterno alla parte termicamente isolata del fabbricato.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla già citata norma UNI EN ISO 13370:2008.



2. Intervallo di confidenza ($IC^{95\%}$)

Per ogni tipologia di archetipo analizzato, le correlazioni per il calcolo della trasmittanza lineare sono corredate dall'indicazione relativa all'intervallo di confidenza entro il quale è possibile trovare il valore reale con una probabilità pari al 95%.

L'intervallo di confidenza è calcolato in funzione dell'errore standard della stima, secondo la seguente relazione:

$$IC^{95\%} = 2 \cdot s_{x,y} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Per campioni piccoli quali quelli usati per la derivazione delle correlazioni analizzate, l'errore standard della stima è calcolato attraverso la seguente espressione:

$$s_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Psi_i - \Psi_{stim,i})^2}{N - 2}} \quad \left[\frac{W}{mK} \right]$$

dove:

- N è il numero di punti calcolati attraverso le simulazioni in due dimensioni e usati per la derivazione della correlazione;
- $\Psi_i \left[\frac{W}{mK} \right]$ è il valore della trasmittanza lineare ottenuto dal calcolo attraverso la simulazione in due dimensioni, per la coppia di parametri i -esima;
- $\Psi_{stim,i} \left[\frac{W}{mK} \right]$ è la stima del valore di trasmittanza lineare ottenuto attraverso la correlazione, per la coppia di parametri i -esima.

L'intervallo di confidenza così ottenuto è relativo alla schematizzazione adottata per le diverse tipologie di ponte termico.

In caso di utilizzo delle correlazioni per nodi che presentano differenze rispetto agli schemi corrispondenti, la probabilità che la stima della trasmittanza termica lineare ricada all'interno dell'intervallo di confidenza potrebbe risultare inferiore al 95% indicato.



3. Trasmittanza termica del serramento (U_{telaio})

L'intervallo di trasmittanza entro cui effettuare le simulazioni è stato scelto facendo riferimento alla UNI EN ISO 10077-1:2007/ EC 1:2010 e alla UNI EN ISO 10077-2:2004.

Sono state considerate le seguenti tipologie di telaio:

- telaio in legno tenero avente una trasmittanza U_{telaio} pari a $1.9 \text{ W/m}^2\text{K}$
- profilo metallico con una trasmittanza pari a $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A partire da questi valori di trasmittanza, attraverso la formula inversa usata per il calcolo della resistenza sono stati ricavati i rispettivi valori di conduttività termica equivalente da utilizzare per il calcolo bidimensionale.

Ai fini dell'analisi, è stato assunto un serramento costituito da materiale pieno, senza cavità, di conduttività termica pari al valore di conduttività termica equivalente ricavata. Questa assunzione non costituisce un'ipotesi semplificativa nel caso di serramenti in legno, realizzato con un blocco pieno anche nella pratica corrente, mentre semplifica l'approccio nel caso di serramento in metallo, generalmente costituito da un profilo cavo con geometrie complesse e molto diverse a seconda del costruttore.

È importante sottolineare come questa semplificazione non introduce errori significativi nel calcolo effettuato, in quanto non vi è la necessità di analizzare nel dettaglio i profili di temperatura all'interno del serramento, quanto piuttosto di valutare l'effetto che il serramento provoca, nel suo complesso, sulla parete con la quale è accoppiato.

Sotto queste ipotesi, nota la trasmittanza del telaio (U_{telaio}) ed il suo spessore (L_{telaio}), è possibile calcolare la sua conduttività equivalente a partire da:

$$U_{\text{telaio}} = \frac{1}{R_{\text{telaio}}} = \frac{1}{R_{si} + \frac{L_{\text{telaio}}}{\lambda_{eq,\text{telaio}}} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

dove:

- $U_{\text{telaio}} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ è la trasmittanza termica del telaio;
- $R_{\text{telaio}} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$ è la resistenza termica del telaio;
- $R_{si} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$ è la resistenza termica superficiale interna;
- $R_{se} \left[\frac{m^2K}{W} \right]$ è la resistenza termica superficiale esterna;
- $L_{\text{telaio}} [m]$ è lo spessore del telaio;
- $\lambda_{eq,\text{telaio}} \left[\frac{W}{mK} \right]$ è la conduttività termica equivalente del telaio.



Dall'espressione precedente si ricava il valore della conduttività equivalente:

$$\lambda_{eq,telaio} = \frac{L_{telaio}}{\left(\frac{1}{U_{telaio}} - R_{si} - R_{se}\right)} \quad \left[\frac{W}{mK}\right]$$

dove:

- $\lambda_{eq,telaio} \left[\frac{W}{mK}\right]$ è la conduttività termica equivalente del telaio;
- $L_{telaio} [m]$ è lo spessore del telaio;
- $U_{telaio} \left[\frac{W}{m^2K}\right]$ è la trasmittanza termica del telaio;
- $R_{si} \left[\frac{m^2K}{W}\right]$ è la resistenza termica superficiale interna;
- $R_{se} \left[\frac{m^2K}{W}\right]$ è la resistenza termica superficiale esterna.

Pertanto, i valori ottenuti sono:

- $\lambda_{eq,telaio} = 0.168 \left[\frac{W}{mK}\right]$ per il serramento in legno tenero;
- $\lambda_{eq,telaio} = 5.077 \left[\frac{W}{mK}\right]$ per il serramento in profilo metallico.