

PARTE 1 – INVOLUCRO DEGLI EDIFICI E AMBIENTE

ISOLAMENTO TERMICO DEGLI EDIFICI

1

1.1 Trasmissione di calore

In continuazione si generano scambi di calore tra l'edificio il suo ambiente. In termini generali, si possono considerare tre modalità di trasmissione di calore:

- l'irraggiamento, che è un fenomeno elettromagnetico come la luce, le onde radio, i raggi X, ma su lunghezze d'onda diverse. Queste ultime dipendono dalla temperatura e dalla materia del corpo emittente. La capacità di un corpo di emettere secondo una certa lunghezza d'onda si chiama emissività, e può variare da un massimo di 1 a un minimo di 0;
- la conduzione, che è un fenomeno di scambio di calore tra corpi solidi;
- la convezione, che corrisponde allo scambio di calore tra un corpo solido e un fluido.

ESEMPI

- Quando l'aria calda migra verso l'esterno attraverso il condotto di un cammino o attraverso una finestra non perfettamente chiusa, si tratta di una trasmissione per convezione.
- Quando il calore è trasmesso verso l'esterno attraverso una parete spessa o un pannello isolante in facciata, si tratta di una trasmissione per conduzione.
- È soprattutto per irraggiamento che il calore viene trasmesso dall'interno verso il cielo sereno in una notte fredda attraverso elementi vetrati senza imposte e tende, o che il calore del sole arriva fino alla terra.
- Il corpo umano scambia calore con l'ambiente con le stesse modalità: è l'assorbimento dell'irraggiamento solare che permette di compensare la freschezza dell'aria quando si è a torso nudo in montagna.
- Un abbigliamento pesante di lana aumenta la resistenza alla trasmissione di calore per conduzione. La respirazione costituisce uno scambio di calore per convezione. In inverno, inspiriamo aria fredda ed espiriamo aria calda.
- All'interno il corpo mantiene una temperatura stabile grazie all'energia procurata dagli alimenti. L'edificio mantiene le proprie condizioni di comfort all'interno grazie all'energia elettrica o a sorgenti combustibili.

Il primo metodo per risparmiare energia (primo anche dal punto di vista storico) consiste nella riduzione delle dispersioni per convezione attraverso le aperture. Il secondo consiste nel miglioramento dell'isolamento dell'involucro. L'isolamento di una parete determina più precisamente la resistenza globale agli scambi termici, dato che la sua resistenza è sempre dovuta a effetti di accumulo, come, per esempio, la resistenza alla conduzione dello spessore della parete.

La parte relativa di due resistenze – resistenza alla conduzione nello spessore e resistenza agli scambi superficiali – nella resistenza globale di una parete dipende generalmente (escludendo i muri molto spessi) da specifici materiali isolanti: qualora utilizzati, la resistenza degli scambi superficiali è trascurabile, altrimenti è spesso predominante. Le vecchie pareti non isolate, le finestre e le porte vetrate, le grandi serre, per esempio, comportano resistenze a scambi superficiali che bisogna considerare nel calcolo della resistenza termica per determinare l'energia utile necessaria.

1.2 Resistenza alla conduzione

La resistenza alla conduzione della parete dipende dal materiale e dallo spessore. Così, se lo spessore di una parete viene raddoppiato, anche la resistenza alla conduzione raddoppia. Nel passato, lo spessore dei muri era dunque il principale mezzo per aumentare questa resistenza, ma al giorno d'oggi lo sviluppo dei materiali isolanti permette di migliorare più efficacemente la resistenza alla conduzione in spessore di parete.

Questi materiali isolanti, apparsi alla fine del secolo scorso sotto forma di materiali di origine vegetale, sono spesso costituiti, al giorno d'oggi, da fibre minerali o polimeri: polistirene (PSE) o poliuretano (PUR). Leggeri e performanti, hanno il problema di contenere cloro-fluoro-carburi (CFC), un gas nocivo per lo strato di ozono. Esistono anche varianti senza CFC.

La resistenza alla trasmissione di calore di una parete si misura attraverso un coefficiente di resistenza termica R , espresso in $\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$.

Inversamente proporzionale, il coefficiente di trasmittanza di una parete (U , in $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$) è definito come segue:

$$U = \frac{1}{R_{\text{th}}}$$

Un ponte termico è una linea di trasmissione di calore, che interrompe l'isolamento. Viene descritto con l'aiuto di un coefficiente di trasmissione Ψ (in $\text{W}/\text{m} \text{°C}$).

La conducibilità o conduttività termica λ (in $\text{W}/\text{m} \text{°C}$) permette di valutare la qualità intrinseca del materiale. Essa può essere considerata come un flusso di calore (in watt) che attraversa 1 m^2 di materiale con spessore di 1 m , in presenza di una differenza di temperatura di 1 °C tra le due facce del materiale (in regime stazionario – vedi capitolo 2).

1.2.1 Calcolo della resistenza termica e del coefficiente U

La resistenza alla conduzione termica R_{th} di una parete, con uno spessore e (in metri), composta da un solo materiale omogeneo con conducibilità termica λ nota, si calcola così:

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda}$$

La tabella 1.1 riassume alcuni esempi, sapendo che, per ciascun materiale, esistono diversi valori di conduttività. Si dimostra che la conduttività termica dei materiali isolanti è nettamente inferiore a quella degli altri materiale.

Esempi

Calcolo di resistenze termiche R_{th} di alcune pareti semplici:

- 100 mm di polistirene espanso sinterizzato:

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,1}{0,042} = 2,38 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

- 200 mm di calcestruzzo in aggregati pesanti:

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,2}{1,8} = 0,11 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

- 40 mm di legno:

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,04}{0,15} = 0,27 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

Tabella 1.1 – Esempi di valori di conduttività

Tipo di materiale	Conduttività termica λ (in W/m°C)
Pietra dura	2,5
Pietra tenera	2,0
Calcestruzzo in aggregati pesanti	1,8
Calcestruzzo in aggregati leggeri	0,5
Malta	1,2
Gesso	0,30
Legno	0,15
Acciaio	52,0
Alluminio	230,0
Vetro	1,0
Bitume in feltro	0,25
Asfalto	1,15
Isolante in polistirene espanso – sinterizzato	0,042
– estruso	0,031
Isolante in poliuretano	0,030
Isolante in fibre minerali	0,041

1.2.2 Dispersioni superficiali delle pareti composte

La maggior parte delle pareti di un involucro moderno è composta, cioè costituita da diversi strati di diversi materiali. La resistenza termica di una parete composta (R_{thc}) è calcolata sommando le singole resistenze degli strati che la compongono:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3} \dots$$

e

$$U = \frac{1}{R_{thc}}$$

Nota

Il coefficiente U di una parete composta non è uguale alla somma dei coefficienti degli strati. Per calcolarlo, bisogna conoscere la resistenza termica R_{thc} della parete. In questo modo la resistenza termica di una parete composta di 200 mm di calcestruzzo in aggregati pesanti e di 100 mm di polistirene espanso sinterizzato (par. 1.2.1 per il calcolo di ogni strato) è:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_{th2} = \frac{e}{\lambda_1} + \frac{e_1}{\lambda_2}$$

$$\frac{0,20}{1,8} + \frac{010}{0,042} = 0,11 + 2,38 = 2,49 \text{ m}^2 \cdot \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$U = \frac{1}{R_{thc}} = \frac{1}{2,49} = 0,40 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Moltiplicando il coefficiente U di una parete per la propria superficie A (in m^2) si ottiene un coefficiente di dispersione per trasmissione H_T (in $W/^\circ C$) della parete, cioè la potenza in watt necessaria per mantenere una differenza di temperatura di $1^\circ C$ tra l'esterno e l'interno, ossia:

$$H_T = U \cdot A$$

Per $10 m^2$ di una parete composta da 200 mm di calcestruzzo e da 100 mm di polistirene espanso, H_T è uguale a:

$$H_T = U \cdot A = 0,40 \cdot 10 = 4 \frac{W}{^\circ C}$$

Il coefficiente di dispersione per trasmissione globale del sistema delle pareti di un locale o di un immobile permette una prima stima della potenza P o energia termica (in W o in kW) di riscaldamento da installare. Si ottiene moltiplicando il coefficiente di dispersione di ciascuna parete in contatto con l'esterno del locale per la differenza di temperatura massima (ΔT_{max} in $^\circ C$) tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Questa differenza è determinata dalla temperatura interna fissata e dalla temperatura esterna minima. La UNI 10349/94 descrive i livelli di temperatura medi mensili dei capoluoghi italiani. In questo modo:

$$\Delta T_{max} = (\text{temperatura fissata} - \text{temperatura di base}).$$

La potenza del riscaldamento da installare P è uguale a:

$$P = H_T \cdot \Delta T_{max} = [(U_1 \cdot A_1) + (U_2 \cdot A_2) + (U_3 \cdot A_3) \dots] \cdot \Delta T_{max}$$

Si ponga, per esempio, un locale di un appartamento in cui involucro è costituito da $10 m^2$ di parete composta da calcestruzzo (per 200 mm) e polistirene estruso sinterizzato (per 100 mm) senza ponti termici, per una differenza massima tra l'interno l'esterno di:

$$\Delta T_{max} = 20 - (-7) = 27 \text{ }^\circ C$$

Che è la differenza tra la temperatura interna fissata per gli alloggi e la temperatura di base per un determinato luogo, per esempio $-7 \text{ }^\circ C$.

È quindi necessaria una energia termica di:

$$P = H_T \cdot \Delta T_{max} = 4,0 \cdot 27 = 108 \text{ W} = 0,11 \text{ kW}.$$

Partendo da questo calcolo, conviene considerare anche il fenomeno delle resistenze di scambi superficiali, per il ricambio dell'aria (vedi cap. 3).

1.3 Resistenze di scambi superficiali

Le resistenze di scambi superficiali (o più semplicemente «resistenze superficiali») influenzano il coefficiente della trasmittanza U degli elementi di parete.

Per esempio, per un vetro di 4 mm (caso tipico), il coefficiente U dovrebbe essere:

$$U = \frac{\lambda}{e} = \frac{1,0}{0,004} = 250 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}.$$

Per una piccola serra con una superficie vetrata di 30 m², il coefficiente di dispersione per trasmissione globale dovrebbe essere:

$$H_T = U \cdot A = 250 \cdot 30 = 7500 \frac{W}{^\circ C}$$

L'energia necessaria, a una prima stima, per una differenza massima a interno ed esterno di 25° C dovrebbe dunque esser uguale a:

$$P = H_T \cdot \Delta T_{\max} = 7500 \cdot 27 = 202500 \text{ W} = 203 \text{ kW}$$

Questo valore corrisponde alla potenza di una caldaia per un edificio pubblico o un immobile per appartamenti.

Se fosse così, non ci sarebbe praticamente differenza tra finestre chiuse e finestre aperte, e sarebbe possibile riscaldare le stanze con molti elementi vetrati senza dispersioni.

Allo stesso modo, con alcuni muri vecchi poco spessi e tende, considerando soltanto la conduzione attraverso uno spessore, i bisogni energetici ottenuti attraverso il calcolo sarebbero molto elevati e praticamente impossibili da soddisfare.

È grazie alle resistenze di scambi superficiali che è possibile riscaldare in maniera razionale l'interno di tali involucri.

Infatti, una vetrata verticale ha un coefficiente U all'incirca di 6 W/m²°C e non di 250 W/m²°C, essendo le resistenze di scambi superficiali esterna (R_e) e interna (R_i) in m²°C/W.

In questo fenomeno complesso intervengono principalmente l'irraggiamento e la convezione:

- l'irraggiamento avviene attraverso la facciata della parete e la sua intensità dipende dalla temperatura e da altre caratteristiche radiative dell'ambiente, come il colore e la composizione della parete stessa. Questa capacità di irradiare è chiamata «emissività». Essa varia con il variare delle lunghezze d'onda emesse. In questo modo, le superfici metalliche brillanti hanno una debole emissività (per esempio: una bottiglia thermos);
- la convezione è dovuta ai movimenti dell'aria a ridosso della parete; essa aumenta con il vento. La resistenza di scambi superficiali è maggiore quando la superficie irradia poco (bassa emissività) e l'aria è calma.

Un vento forte aumenta le dispersioni di una vetrata di 1/3 rispetto a un clima calmo, quelle di un muro di mattoni di 1/10 e di un muro isolato praticamente mai.

La tabella 1.2 illustra le diverse resistenze di scambi superficiali forfettarie utilizzate.

Tabella 1.2 – Valori forfettari della resistenza di scambi superficiali (in m²°C/W)

Trasmissione	Parete a contatto con l'esterno			Parete a contatto con un locale chiuso		
	R _i	R _e	R _i + R _e	R _i	R _e	R _i + R _e
Orizzontale (muri)	0,13	0,04	0,17	0,13	0,13	0,26
Ascendente (coperture)	0,10	0,04	0,14	0,10	0,10	0,20
Discendente (solai bassi)	0,17	0,04	0,21	0,17	0,17	0,34

1.4 Calcolo della resistenza termica globale

La resistenza termica globale R_{thc} si calcola dunque considerando le resistenze di scambi superficiali:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_{th3...} + R_e + R_i;$$

$$U = \frac{1}{R_{thc}}$$

Così, la resistenza termica globale R_{thc} di una parete verticale con 200 mm di calcestruzzo in aggregati pesanti e con 100 mm di polistirene espanso sinterizzato (par. 1.2.1) è uguale a:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_{th2} + R_e + R_i$$

$$= \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + R_e + R_i$$

$$= \frac{0,20}{1,8} + \frac{0,10}{0,042} + 0,04 + 0,13 = 2,66 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$$

Dunque:

$$U = \frac{1}{R_{thc}} = \frac{1}{2,66} = 0,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

L'apporto della resistenza di scambi superficiali della resistenza globale è soltanto del 6% $([0,13 + 0,04]/2,66)$.

Per quanto riguarda un muro in calcestruzzo in aggregati pesanti di 200 mm, il coefficiente R_{thc} è uguale a:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_e + R_i$$

$$= \frac{e_1}{\lambda_1} + R_e + R_i$$

L'apporto della resistenza di scambi superficiali nella resistenza globale è dunque del 61% $(0,17/0,28)$.

Per quanto riguarda un muro di legno di 40 mm:

$$R_{thc} = \sum R_{th} = R_{th1} + R_e + R_i = \frac{e_1}{\lambda_1} + R_e + R_i$$

$$= \frac{0,04}{0,15} + 0,04 + 0,13 = 0,44 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{°C}}{\text{W}}$$

$$U = \frac{1}{R_{thc}} = \frac{1}{0,44} = 2,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

La parte della resistenza di scambi superficiali è dunque del 39% $(0,17/0,44)$.

La tabella 1.3 permette di confrontare la resistenza termica globale di diverse pareti, indicando la percentuale della resistenza di scambi superficiali.

Tabella 1.3 – Percentuale della resistenza di scambi superficiali nella resistenza globale di diverse pareti

Tipo di pareti	R_{thc}	$\frac{R_i + R_e}{R_{thc}}$ (in %)
Muro di 0,24 m in mattoni e intonaco interno	0,40	50
Muro di 0,22 m in mattoni con 0,12 m di isolante	3,30	5
Muro di pietra tenera di 1 m	1,10	16
Muro in calcestruzzo di 0,20 m	0,28	60
Muro in calcestruzzo di 0,20 m con 0,10 m di isolante	2,66	6
Finestra vecchia tipo «industriale» in acciaio con vetro singolo	0,16	100

La resistenza di scambi superficiali spiega l'efficacia degli strati d'aria nei doppi vetri o alcuni tipi di muro.

In un'intercapedine d'aria debolmente ventilata, la convezione è minima e la resistenza alla conduzione dell'aria contribuisce anche alla resistenza termica. La tabella 1.4 presenta i valori della resistenza R_l delle intercapedini d'aria non ventilate. È possibile disporre già in produzione, su una faccia rivolta verso l'intercapedine d'aria, uno strato metallico fine che diminuisca l'emissività, per migliorare la resistenza termica.

Esistono alcuni materiali da costruzione che contengono alveoli, come i blocchi alleggeriti in calcestruzzo o in muratura. Si comportano come insiemii complessi di strati d'aria. È possibile attribuire loro valori di conduttività termica λ apparente approssimativa. Il produttore deve fornire un valore della resistenza media R_{th} di un blocco particolare con uno spessore dato.

Allo stesso modo, per i sistemi misti, per i solai con putrelle e o pignatte le finestre (vetro + serramento), il produttore deve fornire i valori medi R_{thc} del sistema.

Tabella 1.4 – Valori forfettari della resistenza R_l in diverse intercapedini d'aria non ventilate

Trasmissione	Resistenza R_l (in $m^2 \cdot ^\circ C/W$) secondo lo spessore dell'intercapedine				
	$e = 7$	$e = 15$	$e = 25$	$e = 50$	$e = 100$
Ascendente (coperture)	0,13	0,16	0,16	0,16	0,16
Orizzontale (facciate)	0,13	0,17	0,18	0,18	0,18
Discendente (solai bassi)	0,13	0,17	0,19	0,21	0,22

1.5 Ponti e termici e dispersioni dell'involucro

Gli scambi di calore introdotti fino a questo punto sono solo di tipo superficiale. Le linee di trasmissione, descritte attraverso il coefficiente ψ , sono comunemente chiamate «ponti termici».

I ponti termici più comuni sono, per l'isolamento dall'interno, la testata del solaio, le giunzioni tra muri divisori e facciata e i bordi dei tetti piani.

Spessori dei materiali con la stessa resistenza termica:

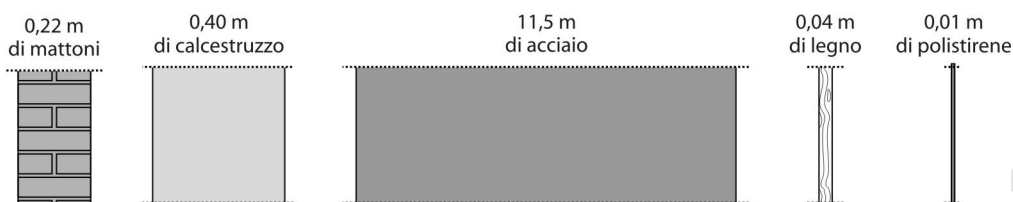
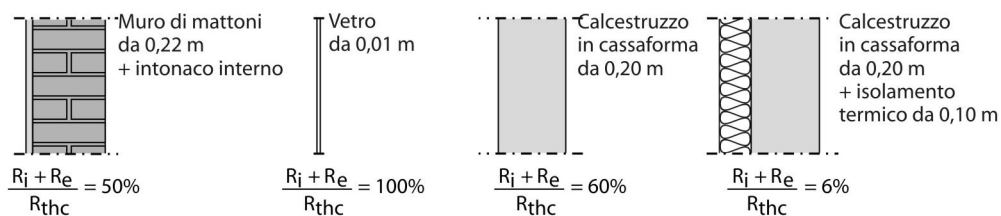


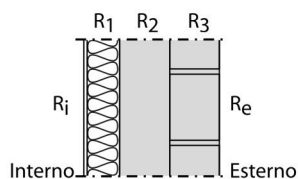
Figura 1.1

Caratteristiche termiche degli involucri

La resistenza degli scambi superficiali è considerevole quando la resistenza alla conduzione della parete stessa è debole:



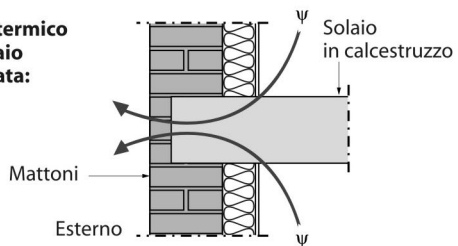
Calcolo di parete composta:



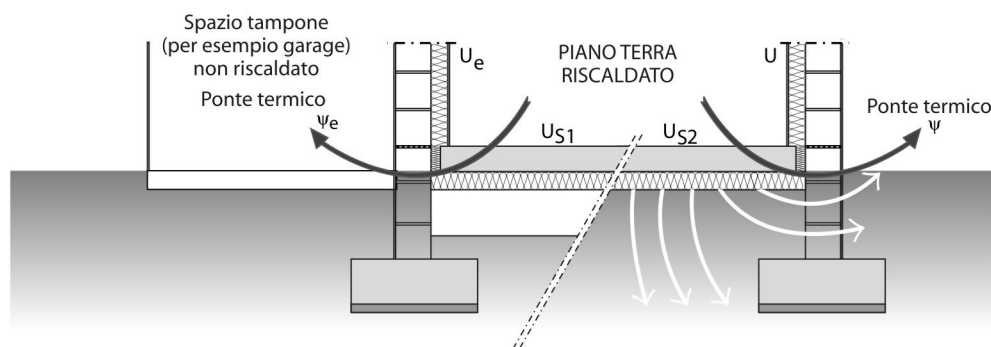
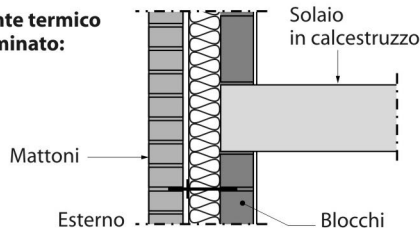
$$R_{thc} = \sum R = R_1 + R_2 + R_3 + R_i + R_e$$

$$U = \frac{1}{R_{thc}}$$

Ponte termico tra solaio e facciata:



Ponte termico eliminato:



Anche i serramenti delle finestre costituiscono una specie di ponte termico. Il loro effetto è considerato nel coefficiente di trasmittanza U medio della finestra.

L'eliminazione dei ponti termici, che aumentano le dispersioni di energia degli edifici, è uno degli scopi da perseguire (fig. 1.1).

La norma di riferimento è la UNI EN ISO 14683: 2001 «Ponti termici in edilizia».

1.5.1 Spazi tampone

Lo spazio tampone è un mezzo efficace per risparmiare energia. Aumenta le resistenze di scambi superficiali fermando il vento grazie alle proprie pareti esterne.

Qualsiasi spazio chiuso ma non riscaldato che si trovi in contatto con uno spazio riscaldato è uno spazio tampone il cui effetto è particolarmente importante nella costruzione tradizionale (senza isolamento specifico). Al giorno d'oggi, gli spazi tampone a ridosso di muri fortemente isolati sono meno efficaci: la resistenza di questi ultimi è rinforzata soltanto dal 5% al 20%. Si tratta principalmente di garage o di corpi scala di immobili collettivi.

Al contrario, le verande e gli atri d'ingresso hanno sempre effetto positivo: possono rinforzare la resistenza termica dal 30% al 40%, dato che le pareti vetrate sono poco isolanti, senza contare gli apporti di calore solare.

L'effetto di uno spazio tampone si calcola con l'aiuto di un coefficiente b , senza unità. Essa moltiplica:

- i coefficienti di trasmittanza U delle pareti recenti:

$$U_e = b \cdot U;$$

- i coefficienti di trasmissione lineare ψ dei ponti termici:

$$\psi_e = b \cdot \Psi$$

1.5.2 Coefficiente di dispersione

È dunque possibile definire il coefficiente di dispersione per trasmissione dell'involucro H_T come uguale a:

$$H_T = H_T \text{ superfici} + H_T \text{ ponti}$$

dove:

H_T superfici: coefficiente di dispersione attraverso le superfici;

H_T ponti: coefficiente di dispersione lineare (ponti).

Cioè:

$$\begin{aligned} H_T &= (\sum U \cdot A) + (\sum U_e \cdot A_e) + (\sum \psi \cdot L) + (\sum \psi_e \cdot L_e) + H_5 \\ &= (\sum U \cdot A) + (\sum b \cdot U \cdot A_e) + (\sum \psi \cdot L) + (\sum b \cdot \psi \cdot L_e) + H_5, \end{aligned}$$

dove L è la lunghezza del ponte termico (in m).

I termini di questa equazione rappresentano il calcolo dei seguenti coefficienti:

- 1: dispersione di superfici rivolte verso l'esterno;
- 2: dispersione di superfici rivolte su uno spazio non riscaldato (spazio tampone);
- 3: dispersioni lineari verso l'esterno;
- 4: dispersioni lineari verso uno spazio non riscaldato (spazio tampone);
- 5: dispersione di superfici rivolte verso il suolo o un contenitore di scarico. Questo coefficiente comprende le dispersioni verso un sottosuolo, un contenitore di scarico o direttamente verso il suolo (per esempio, una soletta sul terrapieno).

I capitoli seguenti e gli allegati forniscono precisazioni che presentano alcuni esempi riguardanti questi calcoli.

È opportuno aggiungere a questo calcolo di rendimento dell'involucro attraverso il coefficiente di dispersione H_T anche la considerazione del suo grado di impermeabilità all'aria.

Le infiltrazioni di aria esterna sono inserite nei calcoli per il rinnovamento dell'aria e sono espresse attraverso il coefficiente di dispersione per ventilazione H_v (vedi cap. 3, par. 3.5).

1.6 Bibliografia

UNI EN ISO 13789: 2001 «Prestazione termica degli edifici – Coefficiente di perdita di calore per trasmissione – Metodo di calcolo».

UNI/TS 11300-1:2008 «Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale».

UNI/TS 11300-2:2008 «Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria».

«Coefficients K des parois des bâtiments anciens», *Cahier du CSTB*, n. 1682, 1990.

S. Charbonnier, C. Parant, A. Pouget, *Guide de la thermique dans l'habitat neuf*, Éditions du Moniteur, Parigi, 1993.

C. A. Roulet, *Énergétique du bâtiment*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Losanna, 1987.