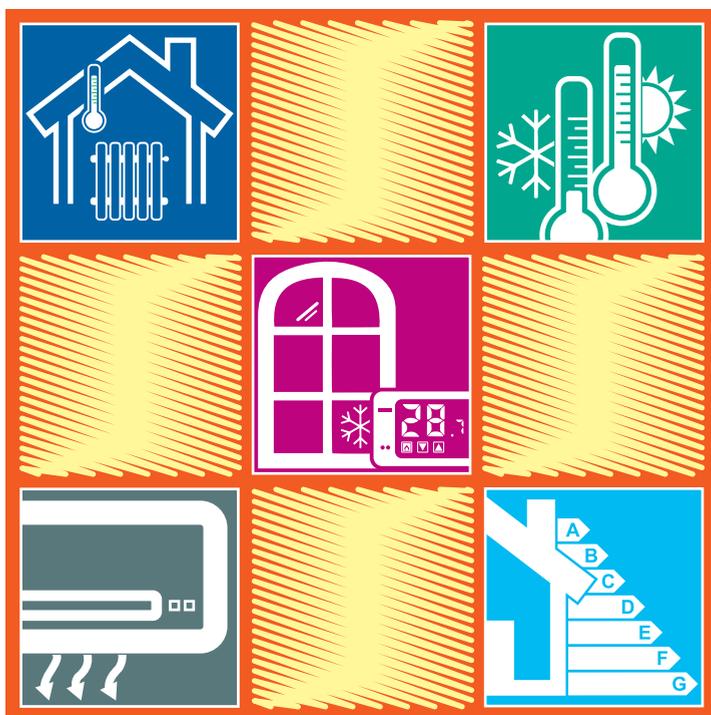


Marco Berti

PONTI TERMICI IN EDILIZIA

TIPOLOGIE, MISURA, CALCOLO E CORREZIONE



INDICE

INTRODUZIONE	p.	1
1. INVOLUCRO EDILIZIO E TRASMISSIONE DEL CALORE	"	3
1.1. Premessa	"	3
1.2. Involucro e grandezze di controllo	"	4
1.3. Il trasporto del calore (o energia termica).....	"	5
1.4. Le resistenze (e conduttanze) termiche elementari.....	"	8
1.5. La resistenza (e trasmittanza) termica totale.....	"	18
1.6. Il coefficiente di scambio termico per trasmissione.....	"	23
2. MATERIALI ISOLANTI E MISURE NEI PONTI TERMICI	"	27
2.1. Premessa	"	27
2.2. Sistemi d'isolamento (cenni)	"	30
2.3. I materiali isolanti	"	31
2.4. Materiali isolanti di origine minerale.....	"	34
2.5. Materiali isolanti sintetici	"	42
2.6. Materiali isolanti naturali di origine vegetale.....	"	45
2.7. Materiali isolanti naturali di origine animale.....	"	53
2.8. Pannelli isolanti sottovuoto.....	"	54
2.9. Misura e conoscenza sperimentale dei ponti termici	"	56
3. ANALISI E CORREZIONE DEI PONTI TERMICI	"	63
3.1. Premessa	"	63
3.2. Definizione e funzionamento dei ponti termici.....	"	64
3.3. Isotherme, flusso di calore e ponti termici	"	66
3.4. Le dimensioni spaziali del flusso di calore	"	69
3.5. Le trasmittanze (e il trasporto di calore) nei ponti termici	"	71
3.6. Funzionamento, correzione e controllo dei ponti termici.....	"	74
3.7. Consigli pratici per la correzione dei ponti termici	"	81
4. CLASSIFICAZIONE, TIPOLOGIE E CALCOLO DEI PONTI TERMICI	"	96
4.1. Grandezze fondamentali	"	96
4.2. Ponti termici e perdite di calore.....	"	99
4.3. Tipologie e calcolo dei ponti termici	"	105
4.4. Ponti e accoppiamento termico.....	"	118

4.5.	Ponti e scambio termico con ambienti non climatizzati	p.	126
4.6.	Abaco descrittivo (semplificato) dei ponti termici	"	135
4.7.	Applicazione numerica sul calcolo dei ponti termici.....	"	145
5.	UNITÀ ABITATIVA (SPERIMENTALE) E PONTI TERMICI	"	150
5.1.	Obiettivo	"	150
5.2.	Descrizione dell'unità abitativa (o modulo)	"	150
5.3.	Strutture di scambio termico con l'esterno.....	"	151
5.4.	Anagrafica dei ponti termici	"	154
5.5.	Calcolo dei ponti e degli accoppiamenti termici	"	157
5.6.	Ponti termici e flussi di calore.....	"	158
6.	CONCLUSIONI	"	160
	BIBLIOGRAFIA, NORMATIVA E RISORSE DI RETE	"	162

ANALISI E CORREZIONE DEI PONTI TERMICI

3.1. Premessa

1.

Un sistema è costituito da un insieme di unità in mutua interazione e in relazione con il mondo esterno. Un sistema è un'entità finalizzata, ha uno scopo.

Le unità (o sottosistemi) che lo compongono hanno tutte altrettanti e distinti scopi, i quali si compongono e realizzano (in condizioni fisiologiche) l'obiettivo di sistema.

2.

Un sistema edilizio è un sistema di tipo tecnologico e ambientale, ovvero è costituito da un insieme di unità tecnologiche e ambientali. Per unità (o sottosistema) si intende un insieme di entità – tutte finalizzate a determinati scopi – i quali si compongono nell'obiettivo dell'intero sistema.

Ad esempio, il sistema edilizio (nella sua totalità) ha – tra i diversi obiettivi – quello **della protezione e del riparo dei residenti dallo stress del mondo esterno**. L'entità tecnologica dedicata a questo scopo è l'involucro, che realizza questo specifico obiettivo attraverso il controllo della stabilità della (propria) forma e delle grandezze termocinetiche.

L'entità involucro a sua volta è composta da unità più semplici, o elementari: le chiusure verticali; le chiusure orizzontali; le chiusure trasparenti; le coperture ecc.; le quali collaborano al raggiungimento degli obiettivi d'involucro e di sistema.

Le strutture d'involucro sono strutture a strati (o stratigrafie): ad ogni strato corrisponde un obiettivo prestazionale che partecipa al perseguimento dell'obiettivo (o prestazione) dell'intera stratigrafia.

Per quanto detto, l'involucro pare essere – per il sistema edilizio medesimo – una sorta di “pelle” o membrana di comunicazione con il mondo esterno.

Il carattere prestazionale dell'involucro – ovvero il sistema delle prestazioni d'involucro – determina il funzionamento energetico del complessivo sistema edilizio.

3.

Il carattere prestazionale dell'involucro si può classificare come segue:

- **involucro conservativo**: svolge una funzione di accumulo del calore. È dotato di una grande inerzia termica: smorza e sfasa le onde “calde” in ingresso (nel periodo estivo) e in uscita (nel periodo invernale). Dal punto di vista morfologico ha la seguente antinomia: “grandi” superfici murarie e “piccole” superfici trasparenti.
- **involucro bioclimatico (o selettivo)**: svolge una funzione differenziata con l'orientamento. È conservativo nella direzione Nord (ed Ovest) e selettivo nella direzione Sud

(ed Est). Pertanto: “grandi” superfici murarie e “piccole” superfici trasparenti nella parte conservativa e viceversa in quella selettiva. La parte d’involucro selettiva è dotata di schermi solari ed è finalizzata alla raccolta dell’energia solare.

4.

Dal punto di vista meramente descrittivo – il sottosistema involucro – è scomponibile in due grandi categorie di unità tecnologiche:

- 1) le unità o strutture opache, quelle denominate involucro opaco;
- 2) le unità o strutture trasparenti o involucro trasparente.

Volendo ulteriormente scomporre il sistema involucro in diverse unità, abbiamo:

- chiusure orizzontali e oblique superiori (tetti piani, a falde e coperture in genere);
- chiusure orizzontali inferiori di contatto con il terreno (solai contro terra e su vespaio);
- chiusure orizzontali inferiori (solai su pilotis, su scantinati, su garage e locali in genere);
- chiusure verticali opache (pareti perimetrali);
- chiusure verticali trasparenti (infissi/serramenti).

3.2. Definizione e funzionamento dei ponti termici

Definizione

1.

Un ponte termico rappresenta una discontinuità costruttiva (e prestazionale) dell’involucro. In altri termini, le chiusure verticali e orizzontali presentano una determinata **resistenza termica**, la quale assume – nelle zone che funzionano da ponte termico – un valore “molto” ridotto. Di conseguenza (in inverno) la temperatura sulla faccia interna è “bassa”: il ponte è “freddo”. Viceversa – all’esterno – il ponte è “caldo”.

Dal punto di vista prestazionale, un ponte termico “freddo” sulla faccia interna, implica un’elevata probabilità di formazione del processo di condensazione superficiale. Diversamente, un ponte termico “caldo” sulla faccia esterna, implica una particolare evidenza nelle immagini termografiche, dove sarà rappresentato da zone con colori “caldi”.

2.

In termini di **trasmissione termica** (stazionaria) – ossia di capacità di trasmissione/dispersione del calore – il ponte termico presenterà un valore piuttosto elevato e darà luogo a perdite rilevanti. Pertanto, la sua presenza nelle chiusure d’involucro, avrà come conseguenza l’incremento della trasmissione media dell’involucro medesimo.

3.

Dal punto di vista quantitativo le perdite di calore in corrispondenza dei ponti termici possono raggiungere un valore di circa il 20% delle dispersioni totali. Come conseguenza pratica abbiamo: **condense interne, macchie, muffe ed il progressivo deterioramento delle strutture locali d’involucro.**

4.

Dal punto di vista normativo – secondo la UNI EN ISO 10211-1 – abbiamo la seguente definizione di **ponte termico**:

“Parte dell’involucro edilizio dove **la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo** per effetto di:

- 1) compenetrazione totale o parziale di **materiali con conduttività termica diversa**, e/o
- 2) **variazione dello spessore** della costruzione, e/o
- 3) differenze tra l’area della **superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno**, come avviene per esempio in corrispondenza dei giunti tra parete e pavimento o parete e soffitto”.

Nella seguente figura 3.1 sono rappresentati i casi descritti nella precedente definizione.

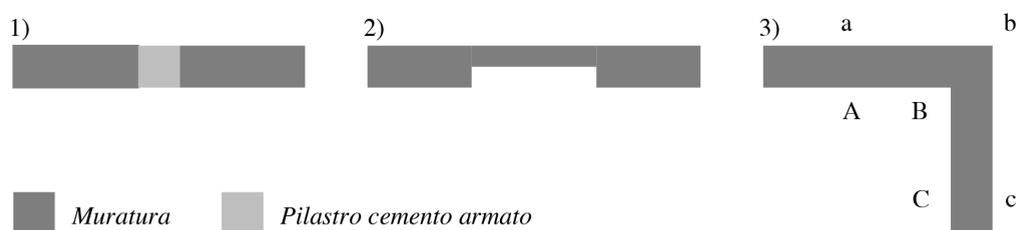


Figura 3.1. *Tipologie ponti termici*

- **Caso 1:** muro perimetrale dove l’inserimento del pilastro in calcestruzzo armato determina una variazione della resistenza termica di parete.
- **Caso 2:** sottofinestra dove la variazione di spessore determina una significativa variazione di resistenza termica.
- **Caso 3:** angolo tra pareti perimetrali; la superficie disperdente ABC è minore della corrispondente superficie disperdente abc : si determina l’effetto ponte.

Il punto di vista descrittivo

1.

Per ponte termico si intende una zona d’involucro – spazialmente limitata – dove si verifica una **disomogeneità**, o comunque una variazione **nel materiale, nella geometria della struttura** ovvero in ambedue gli aspetti. Ovvero una discontinuità fisica (del materiale), geometrica o di entrambi i caratteri.

2.

Dal punto di vista termocinetico, qualunque sia la discontinuità (o disomogeneità) che lo determina, un ponte è caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:

- decremento della resistenza termica (ovvero aumento della trasmittanza);
- incremento del flusso di calore verso l’esterno (ovvero delle perdite);
- riduzione della temperatura superficiale interna.

Le patologie prestazionali

Dal punto di vista prestazionale, un ponte termico – che presenta un “basso” livello d’isolamento (ossia una ridotta resistenza termica) – è essenzialmente **instabile**:

- il livello d’isolamento si riduce progressivamente nel tempo.

L’instabilità deriva dal seguente processo:

- il difetto d’isolamento genera la condensa che imbibisce il muro e riduce ulteriormente l’isolamento medesimo. Il fenomeno (reiterato nel tempo) porta progressivamente al peggioramento delle prestazioni termocinetiche della stratigrafia (riduzione della resistenza termica), e può anche giungere (se trascurato) al deterioramento delle prestazioni relative alla stabilità di forma: disgregazione delle opere di finitura e di quelle staticamente resistenti.

Classificazione

Dal punto di vista qualitativo si potrebbe definire un ponte termico come un “pezzo” d’involucro dove è molto facilitato il passaggio del calore. Da punto di vista della classificazione possiamo suddividere le tipologie dei ponti termici come segue:

- **ponti termici di struttura**: dovuti alle discontinuità del materiale nelle congiunzioni tra strutture diverse;
- **ponti termici di forma**: dovuti alle discontinuità della forma.

Ponti termici di struttura (o di discontinuità nei materiali)

I ponti termici di struttura si trovano nelle congiunzioni di strutture diverse:

- a) congiunzione tra il pilastro e la parete perimetrale che lo contiene;
- b) congiunzione tra un solaio in latero-cemento (struttura orizzontale) e la parete perimetrale (struttura verticale) ecc..

Ponti termici di forma (o di discontinuità geometrica)

I ponti termici di forma si trovano nei nodi tecnologici ove esiste un cambiamento di giacitura (o direzione) dei piani strutturali, ad esempio: angolo – o spigolo – tra due pareti perimetrali (verticali) diversamente orientate ecc..

Sovente, soprattutto nei sistemi edilizi a scheletro indipendente – in un ponte termico relativo alla discontinuità geometrica (ad esempio un ponte d’angolo) – si sommano due effetti ponte:

- 1) la riduzione della resistenza termica per la discontinuità di forma (ad esempio: angolo tra due pareti verticali);
- 2) la riduzione della resistenza termica per la discontinuità di struttura (ad esempio la congiunzione tra il pilastro d’angolo e le due pareti verticali concorrenti).

3.3. Isotherme, flusso di calore e ponti termici

1.

Le superfici (o curve) isoterme rappresentano **il luogo geometrico dei punti a temperatura costante**. Od anche il luogo geometrico dove avvengono trasformazioni isoterme (a temperatura costante). **Ad ogni superficie isoterma corrisponde una temperatura**. Superfici isoterme diverse corrispondono a temperature distinte.

Le linee di flusso termico rappresentano la “corrente” del calore che fluisce spontaneamente da temperature maggiori verso temperature minori. **Le linee di flusso termico sono – in ogni punto – normali alla superficie isoterma passante per il punto medesimo.**

Ad esempio, in una parete indefinita (condizione ideale) – come quella di figura 3.2 – il sistema delle superfici isoterme è dato dal fascio di piani paralleli alle facce della parete medesima. Ad ogni temperatura corrisponde un piano isoterma. Il flusso di calore – che va dalla temperatura interna T_i alla temperatura esterna T_e – è un fascio di rette con direzione normale ai piani isotermi, ossia ortogonale alla parete stessa.

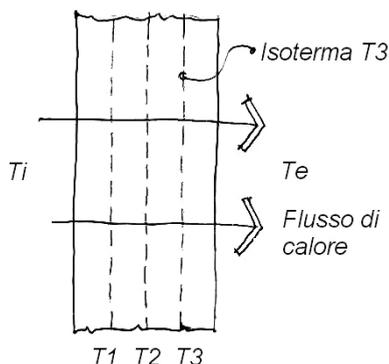


Figura 3.2. *Isoterme in una parete ideale indefinita*

2.

Le “curve” isoterme possono avere un andamento rettilineo o curvilineo. Quando sono rettilinee, il flusso di calore si distribuisce in modo uniforme sulla loro superficie. Quando si incurvano, **presentando delle convessità (o concavità), il flusso di calore si concentra su queste zone – le “punte” delle isoterme** – che divengono dei punti di “facile” passaggio del calore, dei luoghi di concentrazione delle linee di flusso termico. Volendo fare un paragone, le convessità delle isoterme funzionano come l’effetto punta dei parafulmini: attirano le scariche elettriche, ovvero – nel nostro caso – attirano il calore.

La valutazione quantitativa dell’andamento delle isoterme richiede l’impiego di metodi numerici fondati sugli elementi finiti. Per i nostri scopi – relativi alle esigenze di progetto, di diagnosi e di cantiere – è sufficiente avere un’idea qualitativa del loro andamento.

Il ponte termico e le isoterme

1.

Un ponte termico – nel sistema involucro – è una zona dove le superfici isoterme **assumono un andamento localmente incurvato, ovvero divengono concave o convesse**. In parole diverse, allorquando le isoterme variano la loro direzione (o giacitura), qualunque ne sia il motivo, siamo in presenza di un punto (o nodo) che funziona da ponte termico.

2.

Nella seguente figura 3.3 vediamo **il nodo strutturale pilastro-parete**, dove le isoterme –

nell'interno del pilastro – assumono il caratteristico andamento convesso, da cui si ricavano le seguenti informazioni:

- la temperatura superficiale della faccia interna del pilastro è minore di quella della parete limitrofa;
- la convessità delle “curve” isoterme tende a concentrare il flusso di calore attraverso la via privilegiata del pilastro.

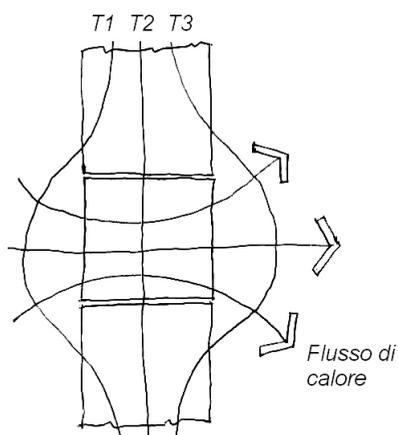


Figura 3.3. Ponte termico pilastro-parete e curve isoterme
(cfr. [10] M. Berti, *Breviario di energetica*)

Termografia e diagnosi della “patologia” ponte termico

1.

L'immagine termografica (a colori o in bianco e nero) rappresenta la quantità di calore irradiata dal soggetto ripreso; pertanto, i colori “caldi” (o le tonalità tendenti al bianco) corrisponderanno ad una forte emissione di calore, al contrario, i colori “freddi” (o le tonalità tendenti al nero) corrisponderanno ad una debole emissione termica.

Per quanto detto, da una serie di rappresentazioni termografiche dell'involucro – fatte in diverse ore del giorno e con l'impianto termico a regime – sarà possibile determinare (in modo puntuale) l'eventuale presenza e andamento dei ponti termici.

Dal punto di vista operativo la ricerca dei ponti termici può essere svolta riprendendo **l'involucro dall'interno o dall'esterno**. La cosa si presenta con differenti risultati, infatti, un ponte termico visto dall'interno è “freddo”, viceversa un ponte visto dall'esterno è “caldo”. Pertanto, mentre nel primo caso (punto di vista interno) l'immagine proporrà i ponti con linee (o zone) “fredde” o scure, nel secondo caso (punto di vista esterno) l'immagine proporrà i ponti con linee (o zone) “calde” o chiare.

2.

Immagini termografiche riprese dall'interno (dell'involucro)

Per quanto detto, l'immagine termografica di un ponte termico – ripreso dall'interno – si tinge di scuro, in quanto la superficie radiante è “fredda” (cfr. figura 3.4).



Figura 3.4. Ponte termico visto dall'interno

Dal punto di vista della classificazione il ponte termico di figura 3.4 corrisponde in parte al ponte termico di forma, vale a dire a quello dovuto ad una discontinuità geometrica (il nodo d'angolo o spigolo), ed in parte al ponte termico di struttura – in funzione dei materiali utilizzati nelle strutture piane che definiscono lo spigolo.

3.

Immagini termografiche riprese dall'esterno (dell'involucro)

Per quanto detto l'immagine termografica di un ponte termico – ripreso dall'esterno – si tinge di chiaro, in quanto la superficie radiante è “calda” (cfr. figura 3.5).

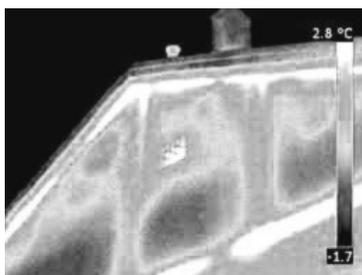


Figura 3.5. Ponti termici visti dall'esterno

Dal punto di vista della classificazione i ponti termici di figura corrispondono ai ponti termici di struttura e di forma. Saranno semplicemente di struttura per quanto riguarda l'interazione (o discontinuità) pilastro-parete perimetrale. Saranno di forma (ed anche di struttura) nell'interazione solaio-parete. Sempre in tema d'impiego della termografia – finalizzato alla diagnosi e controllo delle “patologie” trasmissive (ricerca e correzione dei ponti termici) – è opportuno puntualizzare che la camera termografica va usata in ingresso e in uscita al processo di correzione, vale a dire:

- 1) nella fase di ricerca, analisi e diagnosi dello stato trasmissivo dell'involucro;
- 2) nelle successiva fase di verifica delle correzioni apportate.

3.4. Le dimensioni spaziali del flusso di calore

1.

Il flusso termico – in (W) – rappresenta una corrente di calore che scorre da una zona “calda” ad una zona “fredda”.

Il flusso è rappresentabile con una linea (ad andamento rettilineo o curvilineo) che è sempre ortogonale ad una superficie isoterma.

Abbiamo tre modelli spaziali del flusso termico:

- **flusso termico mono-dimensionale (ad una dimensione o lineare)**: la corrente di calore è rettilinea e normale ai piani delle isoterme;
- **flusso termico bi-dimensionale (a due dimensioni o piano)**: la corrente di calore ha un andamento curvilineo, contenuto in un piano e normale alle superfici isoterme;
- **flusso termico tri-dimensionale (a tre dimensioni o spaziale)**: la corrente di calore ha un andamento curvilineo, contenuto nello spazio e normale alle superfici isoterme.

2.

Flusso termico mono-dimensionale (ad una dimensione o lineare)

È un modello che rappresenta il comportamento termocinetico di un caso frequente: il flusso di calore attraverso un muro perimetrale nella zona centrale del medesimo. Il muro si considera indefinito. Il flusso è ortogonale alla parete. Il processo di trasmissione del calore si può rappresentare con il solo asse x ortogonale al muro perimetrale (cfr. figura 3.6).

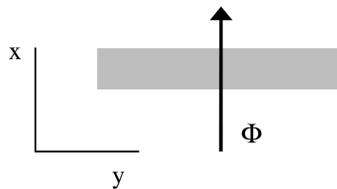


Figura 3.6. *Flusso termico monodimensionale*

Dalla precedente figura abbiamo che il flusso termico ha solo la componente secondo l'asse x e non ha componente secondo y . In altre parole il flusso di calore è **monodimensionale**.

Dal punto di vista quantitativo un flusso monodimensionale è “controllato” dalla trasmittanza U (che si può definire di superficie) con le dimensioni fisiche (W / m^2K).

Flusso termico bi-dimensionale (a due dimensioni o piano)

È un modello che rappresenta il comportamento termocinetico di un caso ugualmente frequente: la zona d'angolo tra due pareti perimetrali. Ambedue i muri si considerano indefiniti e formano un angolo diedro. Lo spigolo dell'angolo diedro (la linea retta) è la zona topica del ponte termico (cfr. figura 3.7).

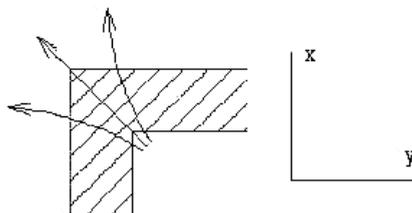


Figura 3.7. *Flusso termico bidimensionale*

Dalla precedente figura abbiamo che il flusso termico ha la componente secondo l'asse x e la componente secondo y . In altre parole il flusso di calore è **bidimensionale**.

Dal punto di vista quantitativo un flusso bidimensionale è “controllato” dalla trasmittanza lineare (o lineica) ψ con le dimensioni fisiche (W/mK).

Flusso termico tri-dimensionale (a tre dimensioni o spaziale)

È un modello che rappresenta il comportamento termocinetico di casi frequenti:

- a) il vertice costituito dall'intersezione di due pareti perimetrali con il solaio piano di copertura;
- b) i punti di fissaggio – mediante tasselli – del cappotto esterno alla parete ecc..

In questi casi il flusso termico è una curva spaziale (a tre dimensioni), ed ha componenti secondo gli assi ortogonali di riferimento (x, y, z). In altre parole il flusso di calore è **tridimensionale**.

Dal punto di vista quantitativo un flusso tridimensionale è “controllato” dalla trasmittanza puntuale χ con le dimensioni fisiche (W/K).

3.5. Le trasmittanze (e il trasporto di calore) nei ponti termici

1.

Da un punto di vista quantitativo la “patologia” denominata ponte termico ha uno stato di funzionamento (o meglio, di malfunzionamento) determinato dal valore della relativa resistenza termica, ovvero della corrispondente trasmittanza termica. In altri termini, per la valutazione energetica del contributo dei ponti termici alle perdite d'involucro è necessario conoscere due variabili:

- a) l'estensione geometrica del ponte;
- b) il valore della **trasmittanza termica**.

2.

Trasmittanza termica puntuale

È relativa ad un **ponte termico puntuale**:

- dove l'andamento delle linee del flusso termico è spaziale, ovvero, per qualunque sezione del flusso medesimo e in qualunque direzione l'andamento dello stesso è differente.

In un ponte puntuale (o puntiforme) abbiamo un incremento di perdita del calore dovuto al ponte medesimo, ossia abbiamo una perdita – che si somma a quella ordinaria – quantificata dalla trasmittanza termica puntuale (χ) misurata in (W/K).

Esempio classico per comprendere la presenza dei ponti puntiformi è la tassellatura di fissaggio di un cappotto esterno alla parete perimetrale: ogni tassello rappresenta una perdita che si aggiunge alla perdita della parete con cappotto.

3.

Trasmittanza termica lineare (o lineica)

È relativa ad un **ponte termico lineare**:

- dove l'andamento delle linee del flusso termico è piano, ovvero, per qualunque sezione del flusso medesimo parallela al piano stesso l'andamento del flusso termico è costante.

In un ponte lineare (o lineico) abbiamo un incremento di perdita del calore dovuto al ponte medesimo, ossia abbiamo una perdita – che si somma a quella ordinaria – quantificata dalla trasmittanza termica lineare (o lineica) (ψ) misurata in (W/mK).

Esempio classico di ponte lineare è lo spigolo dell'angolo formato da due pareti perimetrali. Questa linea di congiunzione (lo spigolo appunto) rappresenta una perdita che si aggiunge alle perdite della due pareti interconnesse.

Osservazione

Nel sistema edilizio viene definita un'altra trasmittanza termica lineare, quella relativa ai distanziali nei doppi o tripli vetri, che hanno la funzione di mantenere costante la distanza tra i singoli vetri e, al contempo, di garantire la tenuta del fluido (aria o gas nobile) ivi "imprigionato".

4.

Trasmittanza termica unitaria (d'involucro)

È relativa alla struttura ordinaria ovvero alla sua stratigrafia. Si potrebbe definire come la trasmittanza termica "di fondo", quella che viene incrementata dalla presenza dei ponti termici – ossia dalle altre trasmittanze: quella lineica e quella puntuale. È denominata con il simbolo (U) ed ha le unità di misura in (W/m^2K). Esempio classico è la trasmittanza della struttura denominata muro perimetrale.

5.

Stratigrafie e ponti termici

Da un punto di vista più descrittivo, il ponte termico – in quel complesso di stratigrafie che compongono l'intero involucro – deriva e si colloca in una delle seguenti situazioni:

- nella linea di congiunzione di due stratigrafie diverse (anche complanari), che introducono una discontinuità tecnologica (differenti spessori e materiali negli strati componenti);
- nella linea di congiunzione di due stratigrafie uguali, che formano un angolo diedro (o spigolo) e introducono una discontinuità geometrica.

La presenza di un ponte termico – in senso lato – comporta una diversa distribuzione delle temperature nella stratigrafia, con le note conseguenze di una probabile formazione di condensa superficiale (ed anche interstiziale). Il ponte termico (per quanto detto) si può rappresentare come una discontinuità del modello stratigrafico; una "patologia" che improvvisamente muta le caratteristiche fisiche, geometriche e dei materiali degli strati.

La soluzione del ponte termico – più propriamente la **correzione** del ponte – si ottiene **riqualificando la stratigrafia**, ovvero riproponendola per come dovrebbe essere, oppure – cosa più frequente – riqualificando la sola trasmittanza termica lineare (ossia incrementando il livello d'isolamento) con lo scopo di annullare l'effetto ponte e riportare le perdite al valore medio d'involucro.

6.

Variabilità della trasmittanza

Per non dar luogo a confusione è bene puntualizzare un aspetto che, di fatto, è rimasto in precedenza sotteso. La trasmittanza di un "pezzo" d'involucro rappresenta la perdita di calore sotto

certe condizioni: salto di temperatura unitario e superficie unitaria; **la trasmittanza unitaria** – se non per un materiale teorico (inesistente) – **sarà sempre maggiore di zero.**

Diversamente avviene per i ponti termici. La trasmittanza di un ponte (lineare o puntuale) è una perdita che si somma a quella di fondo, per cui – nel caso di ponte corretto o misurato con determinati criteri – può diventare persino nulla (perdite uguali alle perdite di fondo) o negativa (perdite minori delle perdite di fondo).

In conclusione abbiamo le seguenti situazioni:

- quando le perdite unitarie del ponte sono minori o uguali alle perdite unitarie d’involucro la trasmittanza lineare o puntuale del ponte diventa minore o uguale a zero;
- quando le perdite unitarie del ponte sono maggiori delle perdite unitarie d’involucro la trasmittanza lineare o puntuale del ponte diventa maggiore di zero.

In sintesi, dal punto di vista meramente fisico, il ruolo della trasmittanza lineare o puntuale è quello di quantificare l’incremento (o decremento) delle perdite di calore dovute al ponte medesimo, con lo scopo di variare (in via quantitativa) le cosiddette perdite di fondo.

Per quanto detto:

- la trasmittanza termica d’involucro è sempre maggiore di zero, in quanto le perdite (nella realtà) sono sempre presenti. Da cui abbiamo il seguente campo di variabilità: $U > 0$.
- la trasmittanza termica lineare o puntuale è minore, maggiore o uguale a zero, in funzione delle caratteristiche proprie del ponte termico e del relativo metodo di misura.

7.

Scambio termico e ponti termici

La perdita unitaria di energia o scambio termico dell’involucro per trasmissione verso l’esterno è dato dalla seguente relazione:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \quad (3.1)$$

Dove:

- H_D coefficiente di scambio termico diretto (per trasmissione) verso l’ambiente esterno (W/K);
- A_i area della struttura i-esima (m^2);
- U_i trasmittanza termica unitaria della struttura i-esima (W/m^2K);
- l_k lunghezza del giunto (ponte termico) k-esimo (m);
- ψ_k trasmittanza lineare (o lineica) del giunto (ponte termico) k-esimo (W/mK);
- χ_j trasmittanza puntuale del j-esimo ponte termico puntiforme (W/K).

Nell’analisi del comportamento dei ponti termici si assume (nella quasi totalità dei casi) $\chi_j = 0$ – ovvero **si considera trascurabile l’effetto dei ponti puntiformi.**

Diversamente, quando l’effetto non può essere trascurato, la loro valutazione deve essere fatta, caso per caso, attraverso un processo di misura (con il termoflussimetro) in prossimità del ponte medesimo.

In conclusione – al fine della valutazione di H_D – date le variabili A_i ed l_k (caratteristiche geometriche dell’edificio) rimangono da determinare le trasmittanze U_i e ψ_k , dove:

- la trasmittanza termica unitaria (U_i) si valuta attraverso i calcoli espressi nel capitolo 1, ovvero attraverso la misura con il termoflussimetro (cfr. paragrafo 2.9);
- la trasmittanza termica lineare (ψ_k) si valuta (come vedremo nel seguito) attraverso tabelle, abachi, atlanti ecc., ovvero attraverso la misura con il termoflussimetro (cfr. paragrafo 2.9).

3.6. Funzionamento, correzione e controllo dei ponti termici

1.

Significato di correzione

La correzione di un ponte termico – che è una “malattia” dell’involucro – consiste nella messa in opera di quei provvedimenti tecnologici che ne annullano o riducono gli effetti.

L’effetto di un ponte consiste in una “forte” perdita di calore. La riduzione dell’effetto di un ponte consiste nella riduzione o annullamento delle dispersioni termiche.

In termini operativi **la correzione di un ponte termico si ottiene incrementando la sua resistenza termica**, ovvero aggiungendo localmente opportuni strati di materiale isolante.

Correzione ed edilizia sostenibile

Dal punto di vista dell’edilizia o architettura sostenibile, o bioarchitettura, l’intervento sui ponti termici – dal progetto alla realizzazione del manufatto – **è una priorità tecnologica**.

Un involucro edilizio con delle discontinuità che si comportano da ponte termico, è **un involucro difettoso**. Ed è anche una risposta incompleta alle esigenze del committente/utente.

Pertanto – per i costruttori/progettisti che hanno come modello “filosofico” di riferimento la sostenibilità architettonica – **la correzione dei ponti (in ogni fase del processo edilizio) è un obiettivo da conseguire**.

Correzione e normativa

Per i costruttori/progettisti che non hanno un definito modello culturale di riferimento – ovvero che rispondono soprattutto ai modelli economici correnti – **la correzione dei ponti termici è un obbligo di tipo normativo**.

Infatti, il decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 (così come modificato dal decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311) **impone il controllo diretto** della prestazione energetica (invernale) e della trasmittanza termica unitaria dell’involucro, ossia **impone il controllo indiretto del funzionamento dei ponti termici** ed obbliga alla loro eventuale correzione.

In parole diverse, nel D.Lgs. n. 192/2005 non si indica come obiettivo di progetto (o di riqualificazione) la correzione – o il controllo – dell’effetto “patologico” dei ponti termici, ma si indica come obiettivo normativo la verifica delle variabili di prestazione energetica (invernale) e della trasmittanza, le quali non dovranno superare un valore limite definito nei decreti attuativi. Pertanto, dall’obbligo normativo diretto finalizzato al controllo della prestazione/trasmittanza, discende **un obbligo normativo indiretto** di valutazione e correzione dei ponti termici.

Non solo, sempre nel D.Lgs. n. 192/2005 – relativamente a tutte le diverse stratigrafie dell’involucro – si richiede l’analisi del rischio igrometrico (o rischio di condensazione), vale a dire si richiede la valutazione della temperatura dell’aria prossima al paramento interno delle pareti

perimetrali – che dovrà essere maggiore della temperatura di rugiada. In altri termini, significa controllare (struttura per struttura) l'eventuale presenza di superfici interne “fredde” – ponti termici – per procedere alla loro correzione.

2.

Obiettivi del controllo normativo

Per correggere un ponte termico, ovvero per aumentare la sua resistenza termica, è necessario inserire – in corrispondenza del ponte medesimo (verso l'esterno) – uno strato di materiale isolante opportunamente dimensionato.

Dal punto di vista normativo la correzione può essere o meno obbligatoria in funzione delle perdite di calore rispetto alle perdite della parete corrente.

Gli obiettivi normativi sono:

- la valutazione del comportamento trasmissivo dell'involucro, vale a dire il controllo delle trasmittanze delle stratigrafie di confine, le quali dovranno essere inferiori (o uguali) ai valori limite elencati nei decreti attuativi del D.Lgs. n. 192/2005;
- la valutazione del rischio di condensazione, ossia il controllo della temperatura sulla faccia interna dell'involucro, che dovrà – in ogni punto – essere maggiore della temperatura di rugiada.

Il procedimento, di massima, è il seguente:

- censimento (o archivio) delle strutture di confine verso l'esterno – le stratigrafie – che compongono l'involucro del sistema edilizio;
- valutazione di congruenza tra la trasmittanza delle strutture d'involucro censite ed il valore limite espresso dalle norme;
- valutazione (per ogni struttura) della temperatura del paramento interno che dovrà essere sempre maggiore della temperatura di rugiada (o temperatura di saturazione).

3.

Parete corrente e parete fittizia

In ambito normativo si suole distinguere tra **parete corrente** e **parete fittizia**. La parete corrente è quella che in precedenza – in vari passaggi – abbiamo collegato ai cosiddetti valori di “fondo” della trasmittanza, della resistenza termica ecc.. Diversamente, la parete fittizia, è la zona dove si svolge essenzialmente il ponte termico.

Il D.Lgs. n. 192/2005 – così come integrato e modificato dal D.Lgs. n. 311/2006 – definisce i concetti suddetti come segue:

- la **parete fittizia** è un nodo tecnologico, o pezzo di parete (cfr. figura 3.6) che corrisponde all'innesto di una struttura orizzontale (un solaio) o verticale (una partizione interna) con il muro perimetrale, la cosiddetta parete corrente. Di fatto – vista dall'esterno – la parete fittizia si confonde con la parete corrente, ed è il tratto d'involucro dov'è localizzato il ponte termico.

4.

Ponte termico e ponte termico corretto

In termini di parete corrente e di parete fittizia abbiamo:

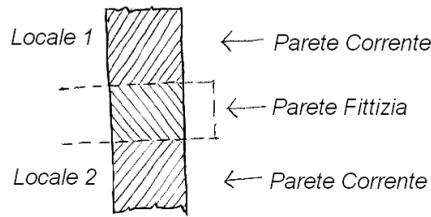


Figura 3.8. Parete fittizia e ponte termico (dal D.Lgs. n. 311/2006)

- **Ponte termico:** è una discontinuità dell’isolamento termico in corrispondenza della parete fittizia. Dove la parete fittizia è il ponte termico stesso, che ha una trasmittanza ($U_{fittizia}$) maggiore della trasmittanza della parete corrente (U).
- **Ponte termico non corretto:** quando la relazione tra le trasmittanze è la seguente:

$$U_{fittizia} \geq 1,15U \text{ (ponte non corretto)} \quad (3.1)$$

- **Ponte termico corretto:** quando la parete fittizia – corrispondente al ponte termico – ha una trasmittanza che non supera del 15% la trasmittanza della parete corrente:

$$U_{fittizia} < 1,15U \text{ (ponte corretto)} \quad (3.2)$$

Dove:

- U trasmittanza della parete corrente;
- $U_{fittizia}$ trasmittanza della parete fittizia (o ponte termico).

5.

La verifica della condensazione superficiale (sul paramento interno)

La parte interna di un ponte termico è notoriamente “fredda”. In prossimità di un ponte non corretto, o scarsamente corretto, si può verificare (con una certa probabilità) il fenomeno della condensazione superficiale.

Nei dettagli, quando la temperatura superficiale interna (T_{si}) sarà minore della temperatura di rugiada T_r , l’aria umida in contatto con il paramento interno inizierà il processo di perdita del calore latente con la formazione di condensa.

La correzione del ponte, che **consiste nell’inserimento di pannelli isolanti sempre più spessi**, determinerà un incremento di T_{si} fino alla condizione $T_{si} > T_r$, che esprime l’assenza del processo di condensazione.

Pertanto:

- la correzione di un ponte termico, che si propone di realizzare una trasmittanza della parete fittizia circa uguale alla trasmittanza della parete corrente, deve anche soddisfare il vincolo della condensazione superficiale interna:

$$T_{si} > T_r \quad (3.3)$$

Il calcolo di verifica del processo di condensazione si realizza con programmi agli elementi finiti oppure con metodi semplificati. In ogni caso, il modello di calcolo usa i seguenti valori d’ingresso:

- 1) valori standard dell'aria umida interna;
 - 2) valori standard dell'aria umida esterna.
- **Valori standard interni.** Temperatura dell'aria interna: $T_i = 20$ °C. Umidità relativa dell'aria interna: $UR_i = 65\%$. A cui corrisponde la seguente temperatura di rugiada: $T_r = 13,2$ °C. Pertanto, per quanto riguarda la temperatura superficiale interna, abbiamo il seguente valore obiettivo: $T_{si} = 13,2$ °C, che significa **assenza** di condensazione.
 - **Valori standard esterni.** Temperatura dell'aria esterna in funzione dei gradi-giorno e della zona di riferimento. In sintesi si procede come segue:
 - 1) dal comune di ubicazione dell'edificio si determinano i gradi-giorno (cfr. D.P.R. n. 412/1993);
 - 2) dai gradi-giorno si determina la zona climatica (cfr. D.P.R. n. 412/1993);
 - 3) dalla zona climatica si determina la temperatura esterna di riferimento.
- La relazione tra gradi-giorno e zona climatica è data dalla seguente tabella 3.1:

Intervallo dei gradi giorno (GG)	Zona climatica
$GG \leq 600$	Zona A
$601 \leq GG \leq 900$	Zona B
$901 \leq GG \leq 1400$	Zona C
$1401 \leq GG \leq 2100$	Zona D
$2101 \leq GG \leq 3000$	Zona E
$3001 \leq GG$	Zona F

Tabella 3.1. Zone climatiche e gradi giorno (cfr. D.P.R. n. 412/1993)

La relazione tra zona climatica, gradi-giorno e temperatura esterna è data dalla seguente tabella 3.2:

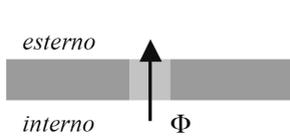
Zona climatica	GG	Temperatura di riferimento aria esterna
Zona A	$GG \leq 600$	5 °C
Zona B	$601 \leq GG \leq 900$	5 °C
Zona C	$901 \leq GG \leq 1400$	5 °C
Zona D (1)	$1801 \leq GG \leq 2100$	0 °C
Zona E	$2101 \leq GG \leq 3000$	0 °C
Zona F	$2101 \leq GG \leq 4000$	0 °C
Zona F	$4001 \leq GG$	- 5 °C

¹ Nella norma la zona D è ulteriormente suddivisa. Nel nostro caso, per semplificare, abbiamo optato per la compattezza di D ed abbiamo scelto la condizione termica più rigida.

Tabella 3.2. Temperature dell'aria esterna

Esempio di calcolo semplificato per la condensazione superficiale

Consideriamo il muro perimetrale con pilastro in calcestruzzo armato come rappresentato in figura 3.9.



Ubicazione edificio: Torino

$GG = 2617$

Zona climatica: E

Spessore del muro e del pilastro: $d = 24\text{cm}$

Conduttività del pilastro in c.a.: $\lambda_{\text{cemento}} = 1,25\text{W/mK}$

Conduttività del muro (mattoni forati): $\lambda_{\text{mattoni}} = 0,3\text{W/mK}$

Figura 3.9. Muratura perimetrale con pilastro in calcestruzzo armato

Calcoliamo il muro di figura 3.9.

PARETE CORRENTE (MURATURA IN FORATI):

Adduttanza interna: $\alpha_i \approx 8\text{W/m}^2\text{K}$. Adduttanza esterna: $\alpha_e = 25\text{W/m}^2\text{K}$.

Trasmittanza termica del muro corrente:

$$U_{\text{corrente}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_{\text{mattoni}}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,24}{0,3} + \frac{1}{25}} = 1,04\text{W/m}^2\text{K}$$

Valori standard di calcolo:

Temperatura interna: $T_i = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Umidità relativa interna: $UR_i = 65\%$.

Dalla tabella 3.2 ($GG = 2617$): Temperatura esterna $T_e = 0\text{ }^\circ\text{C}$.

Salto termico: $\Delta T = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Flusso termico unitario:

$$\Phi = U_{\text{corrente}} \times \Delta T = 1,04 \times 20 = 20,8\text{W/m}^2$$

Flusso termico di adduzione alla parete corrente:

$$\Phi_{\text{adduzione}} = \alpha_i \times (T_i - T_{si}) = 8 \times (20 - T_{si})$$

Equazione di continuità del flusso termico:

$$\Phi = \Phi_{\text{adduzione}}$$

Da cui: $8 \times (20 - T_{si}) = 20,8$

Ovvero: $T_{si} \approx 17,4\text{ }^\circ\text{C}$

PARETE FITTIZIA (PILASTRO):

Adduttanza interna: $\alpha_i \approx 8\text{W/m}^2\text{K}$. Adduttanza esterna: $\alpha_e = 25\text{W/m}^2\text{K}$.

Trasmittanza del muro fittizio (ponte termico):

$$U_{\text{fittizia}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_{\text{cemento}}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,24}{1,25} + \frac{1}{25}} = 2,8\text{W/m}^2\text{K}$$

Valori standard di calcolo:

Temperatura interna: $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Umidità relativa interna: $UR_i = 65\%$.

Dalla tabella 3.2 ($GG = 2617$): Temperatura esterna $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Salto termico: $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Flusso termico unitario:

$$Q = U_{fittizia} \times \Delta T = 2,8 \times 20 = 56 \text{ W / m}^2$$

Flusso termico di adduzione alla parete fittizia (ponte termico):

$$\Phi_{adduzione} = \alpha_i \times (T_i - T_{si}) = 8 \times (20 - T_{si})$$

Equazione di continuità del flusso termico:

$$\Phi = \Phi_{adduzione}$$

Da cui: $8 \times (20 - T_{si}) = 56$

Ovvero: $T_{si} \approx 13 \text{ }^\circ\text{C}$

Osservazione

La trasmittanza della parete corrente (cfr. figura 3.9) vale $U_{corrente} = 1,04 \text{ W / m}^2\text{K}$. Quella della parete fittizia vale $U_{fittizia} = 2,8 \text{ W / m}^2\text{K}$. Il ponte è dovuto alla disomogeneità dei materiali e la trasmittanza della parete fittizia è molto maggiore della trasmittanza della parete corrente. Non solo, in prossimità della parete fittizia abbiamo una temperatura superficiale interna ($T_{si} \approx 13 \text{ }^\circ\text{C}$) minore della temperatura di rugiada ($T_r \approx 13,2 \text{ }^\circ\text{C}$) ovvero abbiamo la formazione della condensa. Pertanto è necessaria la correzione del ponte termico.

La **correzione** si realizza – ad esempio – con pannelli di sughero disposti come un cappotto esterno, aventi lo spessore $d_{sughero} = 13 \text{ cm}$ e conduttività $\lambda_{sughero} = 0,036 \text{ W / mK}$.

Calcoliamo il muro di figura 3.9 con un cappotto esterno in sughero.

PARETE CORRENTE (MURATURA IN FORATI CON CAPPOTTO IN SUGHERO):

Adduttanza interna: $\alpha_i \approx 8 \text{ W / m}^2\text{K}$. Adduttanza esterna: $\alpha_e = 25 \text{ W / m}^2\text{K}$.

Trasmittanza termica del muro corrente:

$$U_{corrente} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_{cemento}} + \frac{d_{sughero}}{\lambda_{sughero}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,24}{0,3} + \frac{0,13}{0,036} + \frac{1}{25}} = 0,22 \text{ W / m}^2\text{K}$$

Valori standard di calcolo:

Temperatura interna: $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Umidità relativa interna: $UR_i = 65\%$.

Dalla tabella 3.2 ($GG = 2617$): Temperatura esterna $T_e = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Salto termico: $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Flusso termico unitario:

$$Q = U_{corrente} \times \Delta T = 0,22 \times 20 = 4,4 \text{ W / m}^2$$

Flusso termico di adduzione al pilastro:

$$\Phi_{\text{adduzione}} = \alpha_i \times (T_i - T_{si}) = 8 \times (20 - T_{si})$$

Continuità del flusso termico:

$$\Phi = \Phi_{\text{adduzione}}$$

Da cui: $8 \times (20 - T_{si}) = 4,4$

Ovvero: $T_{si} \approx 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

PARETE FITTIZIA (PILASTRO CON CAPPOTTO IN SUGHERO):

Adduttanza interna: $\alpha_i \approx 8 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$. Adduttanza esterna: $\alpha_e = 25 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$.

Trasmittanza del muro fittizio (ponte termico):

$$U_{\text{fittizia}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d}{\lambda_{\text{cemento}}} + \frac{d_{\text{sughero}}}{\lambda_{\text{sughero}}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,24}{1,25} + \frac{0,13}{0,036} + \frac{1}{25}} = 0,25 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$$

Valori standard di calcolo:

Temperatura interna: $T_i = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Umidità relativa interna: $UR_i = 65\%$.

Dalla tabella 3.2 (GG = 2617): Temperatura esterna $T_e = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Salto termico: $\Delta T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Flusso termico unitario:

$$Q = U_{\text{fittizia}} \times \Delta T = 0,25 \times 20 = 5 \text{ W} / \text{m}^2$$

Flusso termico di adduzione al pilastro:

$$\Phi_{\text{adduzione}} = \alpha_i \times (T_i - T_{si}) = 8 \times (20 - T_{si})$$

Continuità del flusso termico:

$$\Phi = \Phi_{\text{adduzione}}$$

Da cui: $8 \times (20 - T_{si}) = 5$

Ovvero: $T_{si} \approx 19,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

Conclusione

Dopo la correzione abbiamo quanto segue:

- la temperatura superficiale interna nella parete fittizia è uguale alla temperatura superficiale interna della parete corrente, ed è superiore alla temperatura di rugiada;
- la trasmittanza della parete fittizia non supera del 15% la trasmittanza della parete corrente ed il ponte termico si può considerare corretto (cfr. relazione 3.2).

6.

La verifica della trasmittanza limite delle strutture

Per quanto detto nella definizione della parete fittizia – e della parete corrente – abbiamo quanto segue:

- 1) nel caso di **ponte termico corretto** – quando la parete fittizia ha una trasmittanza non superiore del 15% di quella della parete corrente – **la trasmittanza d’involucro (da verificare a norma di legge) è data dalla trasmittanza della parete corrente;**
- 2) nel caso di **ponte termico non corretto** – quando la parete fittizia ha una trasmittanza uguale o superiore del 15% di quella della parete corrente – **la trasmittanza d’involucro (da verificare a norma di legge) è data dalla trasmittanza media tra quella della parete fittizia e quella della parete corrente.**

In conclusione, la trasmittanza da porre sotto controllo per la verifica di congruenza con i limiti definiti dalla legge (cfr. D.Lgs. n. 192/2005 e s.m.i.), è data, o dalla trasmittanza della parete corrente (caso 1), oppure dalla trasmittanza media tra quella della parete fittizia e quella della parete corrente (caso 2). In concreto, nei casi di riqualificazione energetica (ristrutturazione, manutenzione straordinaria ecc.) – volendo procedere nelle verifiche di legge, ovvero secondo i limiti definiti dai decreti attuativi del D.Lgs. n. 192/2005 – abbiamo i seguenti casi:

- **ponte termico corretto** ($U_{fittizia} < 1,15 U$): la **trasmittanza della parete corrente** dovrà essere congruente con i valori massimi definiti dalla norma;
- **ponte termico non corretto** ($U_{fittizia} \geq 1,15 U$): la **trasmittanza media** – tra quella della parete corrente e quella della parete fittizia – dovrà essere congruente con i valori massimi definiti dalla norma.

7.

Modelli di calcolo

Bisogna distinguere tra calcoli di verifica e calcoli di progetto. Nel caso della verifica (certificazione energetica, legge 10, analisi stratigrafiche ecc.) il procedimento di calcolo viene gestito esclusivamente mediante programmi di calcolo appositamente dedicati. Nel caso del progetto (riqualificazione energetica, manutenzione migliorativa ecc.) si alterna l’uso dei programmi di calcolo con l’uso di modelli numerici semplificati, il tutto con lo scopo di mantenere il controllo cognitivo dell’intero processo.

Osservazione sul dimensionamento dell’isolante

Sfogliando un catalogo commerciale – nel caso di pannelli isolanti termici con superficie standard 200×60 cm – notiamo che lo spessore, che è la dimensione obiettivo del calcolo di dimensionamento, varia in un insieme discreto e limitato di valori, ad esempio: 25 – 35 – 50 – 75 – 100 mm.

Per cui, un calcolo raffinato che conduce a valori con uno o più decimali, oltre ad essere meno “economico” può essere meno opportuno di un calcolo semplificato che definisce, di massima, la classe o intervallo di appartenenza dello spessore, e quindi individua (per la messa in opera) il valore successivo maggiore.

3.7. Consigli pratici per la correzione dei ponti termici

1.

Materiale isolante

Quando una struttura (o stratigrafia) funziona da ponte termico, la sua correzione si realizza “**sommando**” uno strato di materiale isolante alla struttura medesima.