

## INDICE

---

<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>1. Nozioni di base</b>	<b>9</b>
1.1 Fisica del ponte termico	14
1.2 Attenuazione dei ponti termici	23
<b>2. Conseguenze dei ponti termici</b>	<b>31</b>
2.1 Inefficienza energetica	31
2.2 Effetti igienico-sanitari	34
2.3 Degradi strutturali	36
2.4 Termoforesi	38
2.5 Formazione di muffa	40
2.5.1 Condizioni favorevoli alla formazione di muffa	41

---

2.5.2	Effetti sulla salute	42
2.5.3	Interventi	43
2.5.4	Tipi di muffa	45
<b>3.</b>	<b>Quantificazione delle dispersioni di calore</b>	<b>47</b>
3.1	Leggi fisiche alla base del ponte termico	47
3.2	Normativa tecnica di riferimento	49
3.3	Atlanti dei ponti termici	52
3.4	Grandezze fisiche di riferimento	55
3.5	Parametri per il calcolo dei ponti termici	57
3.6	Modelli di calcolo di un ponte termico	59
3.7	Calcolo delle dispersioni attraverso un ponte termico	65
3.7.1	Calcolo di $\psi$ in un modello bidimensionale	66

## INDICE

---

3.7.2	Calcolo di $\psi$ e di $\chi$ in un modello tridimensionale	68
3.8	Calcolo della temperatura superficiale minima $\theta_{si\ min}$	72
3.9	Calcolo del fattore di temperatura superficiale $f_{Rsi}$	75
	<b>Appendice</b>	<b>79</b>
<b>A.1</b>	<b>Software per il calcolo dei ponti termici</b>	<b>79</b>
A.1.1	Il software Therm 6.3	84
A.1.2	Guida all'uso del software Therm 6.3	86
A.1.3	Calcolo di $\psi$ e di $f_{Rsi}$ con Therm 6.3	108
<b>A.2</b>	<b>Incidenza dei ponti termici nella valutazione energetica degli edifici</b>	<b>126</b>
<b>A.3</b>	<b>Calcolo del fattore di temperatura minimo per garantire la non-formazione di muffa</b>	<b>135</b>
<b>A.4</b>	<b>Esempi di calcolo</b>	<b>140</b>
A.4.1	Calcolo del coefficiente di trasmittanza termica lineica	140

---

A.4.2	Risanamento di una parete perimetrale	152
A.4.3	Analisi del nodo tra parete perimetrale e solaio intermedio	159
	<b>Bibliografia</b>	<b>203</b>
	<b>Le guide pratiche del Master Casaclima</b>	<b>211</b>

Nell'affrontare il calcolo delle dispersioni energetiche per trasmissione attraverso gli elementi opachi e trasparenti di un edificio, non si può tralasciare la valutazione del contributo dato dalla geometria e dalla non omogeneità delle proprietà termiche che caratterizzano gli elementi disperdenti dell'involucro edilizio.

Per poter calcolare correttamente il comportamento termico di un edificio, questo deve essere pensato non come un sistema composto semplicemente da pareti, solai, coperture e finestre, ma come un sistema complesso, in cui è necessario considerare la dispersione termica che avviene anche negli angoli, negli spigoli, nei particolari sistemi di connessione presenti nell'edificio (attacco finestra-parete, attacco balcone-parete, attacco pilastro-parete, ecc.), ovvero nei cosiddetti ponti termici.

I ponti termici possono essere definiti come porzioni localizzate nell'involucro di un edificio, nelle quali non sono valide le ipotesi di flusso termico monodimensionale, alla base del calcolo semplificato delle dispersioni termiche.

Nella maggioranza dei casi, vale la seguente regola:

*Un ponte termico, dal punto di vista del bilancio energetico di un edificio, rappresenta una via di fuga preferenziale del calore.*

Negli edifici in cui non sono considerati i ponti termici e il relativo flusso di calore, la dispersione termica globale può essere elevata.

La conseguenza del flusso di calore addizionale, imputabile ai ponti termici, è il raffreddamento locale delle superfici interne, che possono rag-

giungere le condizioni di condensa superficiale o interstiziale e favorire la formazione di muffa. I ponti termici, quindi, possono minacciare la salubrità delle strutture dell'edificio e dell'ambiente interno.

La progettazione, l'analisi ed il calcolo dei ponti termici, ai fini del risparmio energetico, del comfort indoor e della qualità costruttiva di un edificio, assumono un ruolo di fondamentale importanza e non devono mai essere dimenticati o sottovalutati.

Questo manuale fornisce le informazioni teoriche di base relative ai ponti termici, in modo da consentire a tutti di comprendere la natura fisica del fenomeno e di stimare correttamente l'incidenza del ponte termico in un calcolo energetico, utilizzando la normativa tecnica di riferimento ed un metodo numerico dettagliato di calcolo agli elementi finiti del flusso termico in condizioni al contorno stazionarie, tramite l'utilizzo del software gratuito Therm.

Il presente manuale non prevede l'analisi dei dettagli costruttivi e le eventuali correzioni dei ponti termici presenti.

Il fabbisogno di energia termica di un edificio  $Q_{H,nd}$ <sup>(1)</sup>, durante la stagione di riscaldamento, è dato dalla differenza fra le dispersioni termiche compressive e i guadagni termici complessivi:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} (Q_{sol} + Q_{int}) \quad [J]$$

dove:

$$Q_{H,tr} = \text{scambio termico per trasmissione} \quad [J]$$

$$Q_{H,ve} = \text{scambio termico per ventilazione} \quad [J]$$

$$\eta_{H,gn} = \text{fattore di utilizzazione degli apporti termici gratuiti} \quad [-]$$

$$Q_{sol} = \text{apporti termici solari} \quad [J]$$

$$Q_{int} = \text{apporti termici interni} \quad [J]$$

Lo scambio termico per trasmissione considera i flussi termici monodimensionali attraverso l'involucro edilizio e i flussi termici bidimensionali e tridimensionali attraverso i ponti termici.

I ponti termici sono configurazioni geometriche e strutturali dell'involucro termico<sup>(2)</sup> dell'edificio, in corrispondenza delle quali decadono le ipotesi di flusso termico monodimensionale tra le superfici interna ed esterna di un elemento costruttivo.

Si è in presenza di ponti termici in parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto di:

<sup>(1)</sup> UNI/TS 11300-1.

<sup>(2)</sup> L'involucro termico è costituito da tutti gli elementi di un edificio (pareti, finestre, solai, ecc.), che delimitano gli ambienti caldi (riscaldati) dall'esterno oppure da ambienti freddi (non riscaldati).

- compenetrazione totale o parziale di materiali con conduttività termica diversa (disomogeneità di struttura);
- variazione dello spessore della costruzione (disomogeneità di forma);
- differenze tra l'area della superficie disperdente sul lato interno e quella del lato esterno (disomogeneità di forma).

Da un punto di vista pratico, generalmente, i ponti termici caratterizzano quelle aree in cui le dispersioni termiche sono maggiori.

Esempi di ponti termici sono:

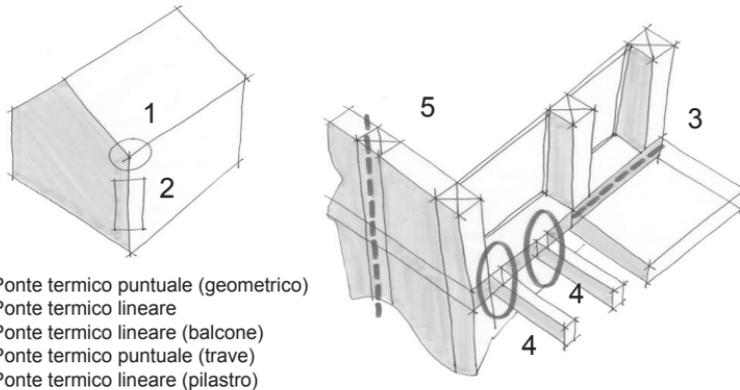
- pilastro in calcestruzzo armato in una parete in laterizio;
- nicchia dei radiatori e in generale nicchie tecniche nelle pareti;
- collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura.

Il "passaggio privilegiato" di calore dovuto al ponte termico genera principalmente due effetti:

- una modifica del flusso termico rispetto alle zone prive di ponti termici;
- un abbassamento delle temperature superficiali interne, con il rischio di formazione di fenomeni di condensa superficiale e muffa.

Si possono individuare le seguenti tipologie di ponti termici (fig. 1.1):

- ponti termici di tipo lineare, quando il flusso termico è bidimensionale;
- ponti termici di tipo puntuale, quando il flusso termico è tridimensionale.



1. Ponte termico puntuale (geometrico)
2. Ponte termico lineare
3. Ponte termico lineare (balcone)
4. Ponte termico puntuale (trave)
5. Ponte termico lineare (pilastro)

fig. 1.1 Tipologie di ponte termico

Il ponte termico lineare è quantificato dalla trasmittanza termica lineica  $\psi$  [W/mK]. Tale parametro rappresenta il flusso termico che attraversa, in regime stazionario, il ponte termico per metro di lunghezza e per una differenza di temperatura di un kelvin tra gli ambienti interno ed esterno. Per il calcolo si utilizza un modello bidimensionale.

Il ponte termico puntuale è quantificato dalla trasmittanza termica puntuale  $\chi$  [W/K]. Tale parametro rappresenta il flusso termico che attraversa, in regime stazionario, il ponte termico per una differenza di temperatura di un kelvin tra gli ambienti interno ed esterno. Per il calcolo si utilizzano modelli tridimensionali o interpolazioni matematiche.

---

Nell'involucro di un edificio è possibile individuare diversi ponti termici (fig. 1.2):

1. Nodo parete perimetrale / solaio di copertura
2. Nodo parete perimetrale / serramento (parte superiore)
3. Nodo copertura piana / serramento (parte inferiore)
4. Balcone
5. Nodo parete perimetrale / serramento (parte inferiore)
6. Nodo parete perimetrale / solaio intermedio
7. Nodo balcone / serramento (parte inferiore)
8. Nodo parete contro terra / solaio su vano non riscaldato
9. Nodo parete interna / solaio su vano non riscaldato
10. Nodo solaio contro terra / parete verso vano non riscaldato
11. Nodo parete interna / solaio contro terra
12. Nodo parete verso vano scala / solaio contro terra
13. Nodo parete verso vano scala / solaio intermedio
14. Nodo parete verso vano scala / solaio verso sottotetto non riscaldato
15. Nodo parete verso sottotetto non riscaldato / solaio intermedio
16. Nodo parete verso sottotetto non riscaldato / solaio di copertura
17. Connessione pareti perimetrali
18. Pilastro in una parete perimetrale
19. Nodo parete perimetrale/parete interna
20. Nodo parete perimetrale/serramento

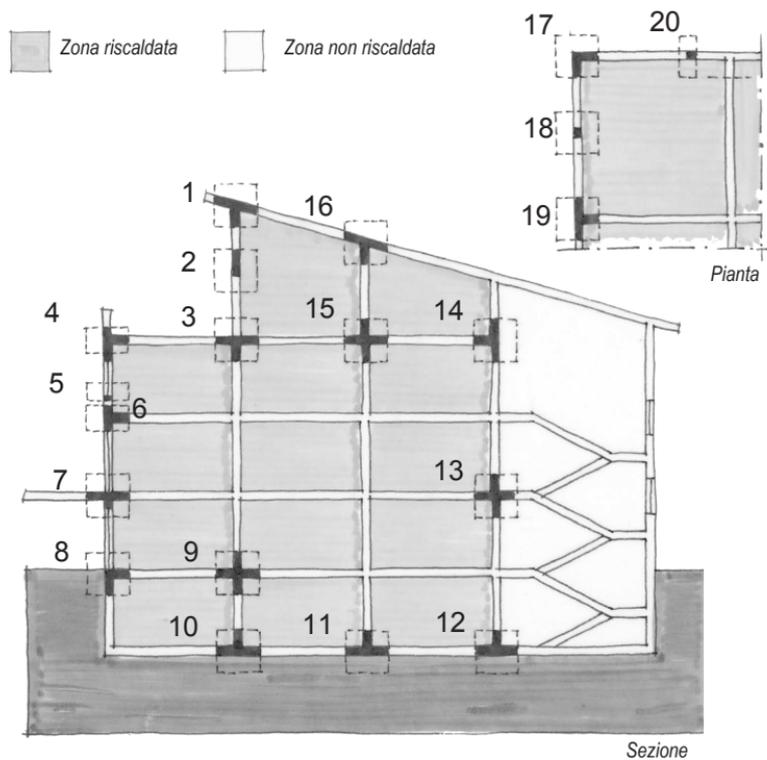


fig. 1.2 Posizione dei ponti termici

<sup>(3)</sup> La trasmissione di calore per conduzione è definita come il passaggio di energia tra due zone a temperatura diversa di un corpo solido, liquido o gassoso e privo di significativo trasporto di materia.

<sup>(4)</sup> Si definisce flusso termico monodimensionale il flusso di calore perfettamente perpendicolare alle superfici interne ed esterne dell'elemento costruttivo.

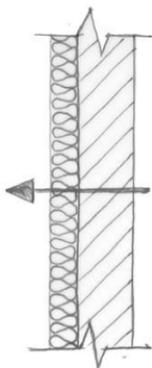


fig. 1.3 Flusso monodimensionale

## 1.1 FISICA DEL PONTE TERMICO

I ponti termici possono essere identificati come le parti dell'involucro termico in cui decadono le ipotesi di flusso termico monodimensionale in regime stazionario; ciò determina variazioni del flusso di calore e conseguentemente della temperatura superficiale.

Nei calcoli semplificati di fisica tecnica dell'edificio comunemente utilizzati, la trasmissione di calore per conduzione<sup>(3)</sup> è calcolata matematicamente in regime stazionario, ipotizzando un sistema continuo, uniforme, isotropo.

Per comprendere la condizione fisica di regime stazionario, basta immaginare che le superfici dell'involucro termico siano a contatto con due sorgenti di capacità termica infinita, in modo da mantenere sempre costanti le temperature delle superfici a contatto. In questo modo il calcolo, indipendente dal fattore tempo, risulta semplificato.

L'ipotesi di stazionarietà è mantenuta anche nei calcoli dei ponti termici bidimensionali e tridimensionali.

Nella realtà, l'ipotesi di flusso termico monodimensionale<sup>(4)</sup> (fig. 1.3) è accettabile in tutti gli elementi costruttivi dell'involucro ad esclusione di:

- angoli generati dall'articolazione nello spazio tridimensionale da pareti (ponte termico geometrico);

- pareti costituite da materiali non omogenei (ponte termico strutturale)
- pareti con spessori non costanti (ponte termico geometrico).

Nella realtà si creano, quindi, delle aree di discontinuità per le quali non è corretto parlare di flusso di calore monodimensionale, ma di flusso di calore bidimensionale (fig. 1.4) e tridimensionale.

Quanto detto può essere reso graficamente disegnando le isoterme<sup>(5)</sup> e le linee di flusso<sup>(6)</sup>.

Solo nel caso di parete priva di ponte termico geometrico e di ponte termico strutturale, le isoterme e le linee di flusso daranno origine ad una griglia ideale perfettamente ortogonale rispetto alle superfici dell'elemento.

In presenza di ponte termico, la griglia ideale subisce delle "perturbazioni" delle temperature e del flusso di calore (fig. 1.5).

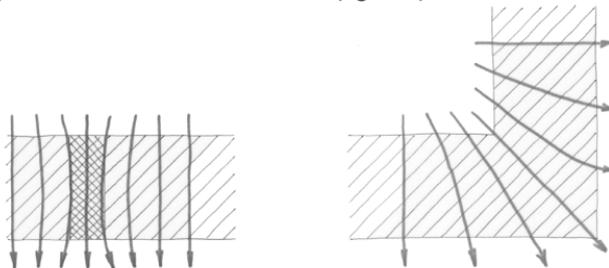


fig. 1.5 Esempi di distribuzione reale "perturbata" delle temperature e del flusso di calore, in presenza di ponte termico strutturale e geometrico

<sup>(5)</sup> Le isoterme sono linee che congiungono i punti della parete che si trovano alla stessa temperatura.

<sup>(6)</sup> Le linee di flusso sono linee ortogonali alle isoterme.

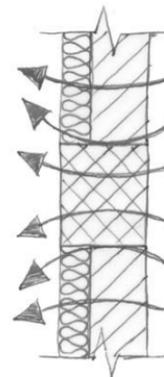
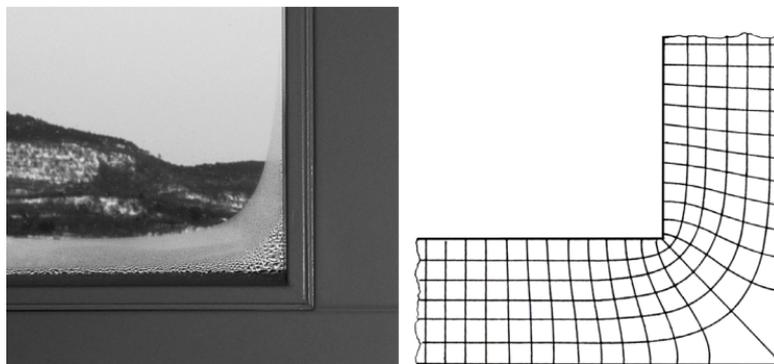


fig. 1.4 Flusso bidimensionale

L'area perturbata si estende oltre i confini dell'elemento di discontinuità, coinvolgendo parti limitrofe, come evidenziato dalle simulazioni grafiche; si può quindi parlare di "zona di ponte termico".

La distribuzione geometrica delle isoterme, come evidenziato dalla formazione di condensa su di una finestra, coincide con la distribuzione teorica delle temperature interne ottenuta tramite simulazione (fig. 1.6).



*fig. 1.6 Distribuzione geometrica delle isoterme, definita dalla formazione di condensa sui vetri*