



QUADERNO TECNICO PER IL PROFESSIONISTA **PONTI TERMICI IN EDILIZIA**

Luglio 2017

BigMat
HOME OF BUILDERS

  
www.bigmat.it

SOMMARIO

1. TEORIA E NORMATIVA

DISPERSIONI DI CALORE ATTRAVERSO L'INVOLUCRO	2
PONTI TERMICI: CARATTERISTICHE E TIPOLOGIE	6
· Modellazione e calcolo dei ponti termici	7
VERIFICHE TERMICHE: LA TRASMITTANZA TERMICA MEDIA E IL COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO GLOBALE	10
· Trasmittanza termica media	10
· Coefficiente medio di scambio termico	11
INCIDENZA DEI PONTI TERMICI SUI CONSUMI ENERGETICI	13
CONDENSAZIONE DEL VAPORE ACQUEO IN CORRISPONDENZA DEI PONTI TERMICI	13
CONSIGLI RIPORTATI SULLA UNI EN ISO 13788	14
VERIFICA IGROMETRICA IN PROSSIMITÀ DI UN PONTE TERMICO	15
REGOLE PER UNA BUONA PROGETTAZIONE	16

2. CORREZIONE DEI PONTI TERMICI

COSA VUOL DIRE CORREGGERE I PONTI TERMICI	18
· Ponti termici negli edifici di nuova costruzione	19
· Ponti termici negli edifici esistenti	19
PRODOTTI SPECIFICI PER RISOLVERE I PONTI TERMICI	19
· I materiali isolanti igroscopici	19
· Taglio termico del balcone	20
· Bancale con isolamento termico	20
· Cassonetto isolato	21
· Materiali iperisolanti	21
DEGRADO CAUSATO DAI PONTI TERMICI	21
PERIZIE TECNICHE IN CASO DI CONTENZIOSI	22

3. TECNICHE DI INTERVENTO

PROCEDURA DI CALCOLO	24
PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA DUE PARETI VERTICALI	25
PONTE TERMICO DI UN PILASTRO INSTALLATO IN UNA PARETE VERTICALE	28
· Caso 1) muratura monostrato	28
· Caso 2) muratura a cassetta con isolamento in intercapedine	29
PONTE TERMICO DI UN BALCONE	33
· Il dis-connettore termico	36
PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN BASAMENTO SU TERRENO	37
PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN SOLAIO INTERPIANO	40
PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN SOLAIO DI COPERTURA	44
PONTE TERMICO DI UN BANCALE DI UNA FINESTRA	46
PONTE TERMICO DI UN CASSONETTO	49
CASI PARTICOLARI	53
· Ponte termico di un balcone con isolamento termico continuo	53
· Ponte termico d'angolo tra una parete verticale e una copertura inclinata in legno	55
· Ponte termico di un bancale di una finestra	58

GLOSSARIO	60
------------------------	-----------

BIBLIOGRAFIA	61
---------------------------	-----------

1.

TEORIA E NORMATIVA

Il tema dei ponti termici negli edifici è, attualmente, uno dei più complessi da trattare nell'ambito della valutazione della prestazione energetica degli edifici. Le conseguenze di una errata progettazione o esecuzione dei dettagli edilizi, può avere effetti dannosi sia sotto il profilo del comfort termico (formazioni di muffe e condensazione superficiali) sia di quello economico (aumenti dei consumi energetici). Con l'obbligo del rispetto dei requisiti minimi di prestazione energetica introdotti dapprima dalle Direttive Europee 2002/91/CE e 2010/31/UE e successivamente in Italia con il D.M. 26/06/2015, oggi si cerca di rendere ancora più evidente l'importanza della corretta valutazione dei ponti termici nella progettazione di un edificio di nuova costruzione o di ristrutturazione di uno esistente.

Il nostro scopo è fornire al lettore (progettista, applicatore, ecc.) gli elementi di base per l'individuazione dei ponti termici offrendo alcune indicazioni generali per la loro correzione e riduzione delle dispersioni termiche da essi provocate.

DISPERSIONI DI CALORE ATTRAVERSO L'INVOLUCRO

Le dispersioni termiche attraverso un componente edilizio vengono descritte attraverso la trasmittanza termica U che rappresenta la quantità di calore che attraversa una superficie di 1 m^2 se sottoposta a una differenza di temperatura (tra interno ed esterno) di 1 K (ovvero $1 \text{ }^\circ\text{C}$) e si indica in W/mqK . Più bassa è la trasmittanza termica meno calore disperde la struttura (vedi Quaderno Tecnico Isolamento termico, Dicembre 2016).

La definizione della trasmittanza si basa sull'ipotesi semplificativa di flusso monodirezionale, ovvero che il calore si propaghi nella sola direzione perpendicolare alla superficie della chiusura considerata: parete, finestra, pavimento o solaio (vedi Figura 1).

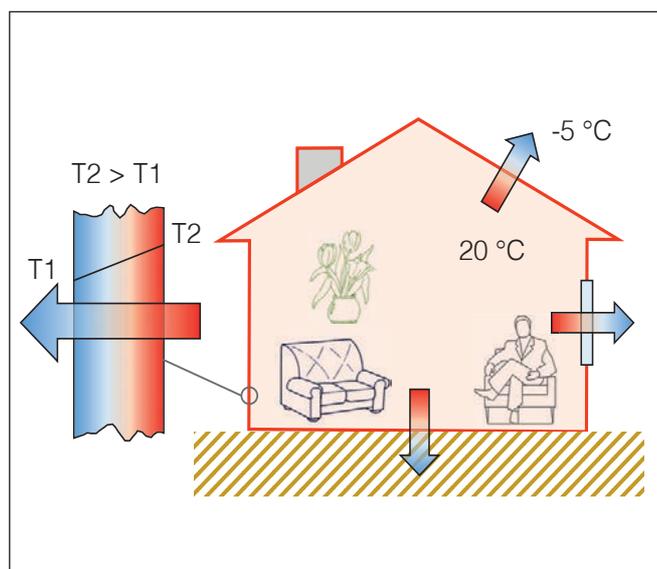


Figura 1 - Flusso termico e direzione di propagazione del calore monodirezionale

Secondo tale ipotesi, volendo valutare l'andamento della temperatura nella struttura si riscontra quanto segue:

- tutti i punti appartenenti a uno stesso piano, parallelo alla struttura, hanno uguale temperatura, tali piani sono definiti "piani delle isoterme" e pertanto il flusso di calore è perpendicolare alle isoterme (vedi Figura 2);
- la temperatura diminuisce progressivamente, procedendo dalla superficie interna (più calda) verso quella esterna (più fredda), in funzione delle resistenze termiche degli strati che compongono la struttura secondo un andamento lineare schematizzabile con una linea spezzata. Così nell'esempio della Figura 3, tutti i punti sulla superficie interna avranno 20 °C, mentre i punti che si trovano in un piano corrispondente alla metà dello spessore della parete avranno 12 °C e infine i punti che giacciono sulla superficie esterna avranno 5 °C.

Nella realtà, l'edificio è un sistema molto complesso e la sua morfologia è tale da far decadere l'ipotesi di flusso monodirezionale specialmente in quei "punti singolari", detti ponti termici, e la trasmittanza termica non è in grado di quantificare le perdite di calore.

In tali zone si ha infatti una "distorsione" delle isoterme che non sono più parallele tra loro, né parallele alla superficie disperdente, ma presentano un andamento curvilineo che si accentua nelle zone dove l'effetto del ponte termico è maggiore.

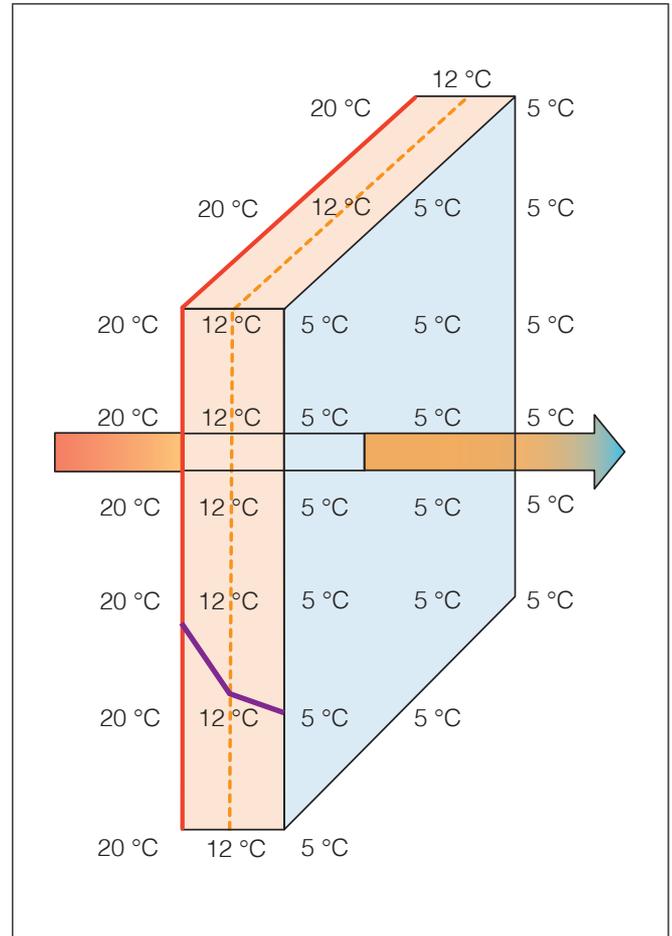


Figura 3 - Flusso termico monodimensionale per una parete con variazione di temperatura in una sola direzione. Maggiore è la resistenza termica R_t dello strato (o minore la conducibilità termica λ) e maggiore sarà la pendenza della spezzata.

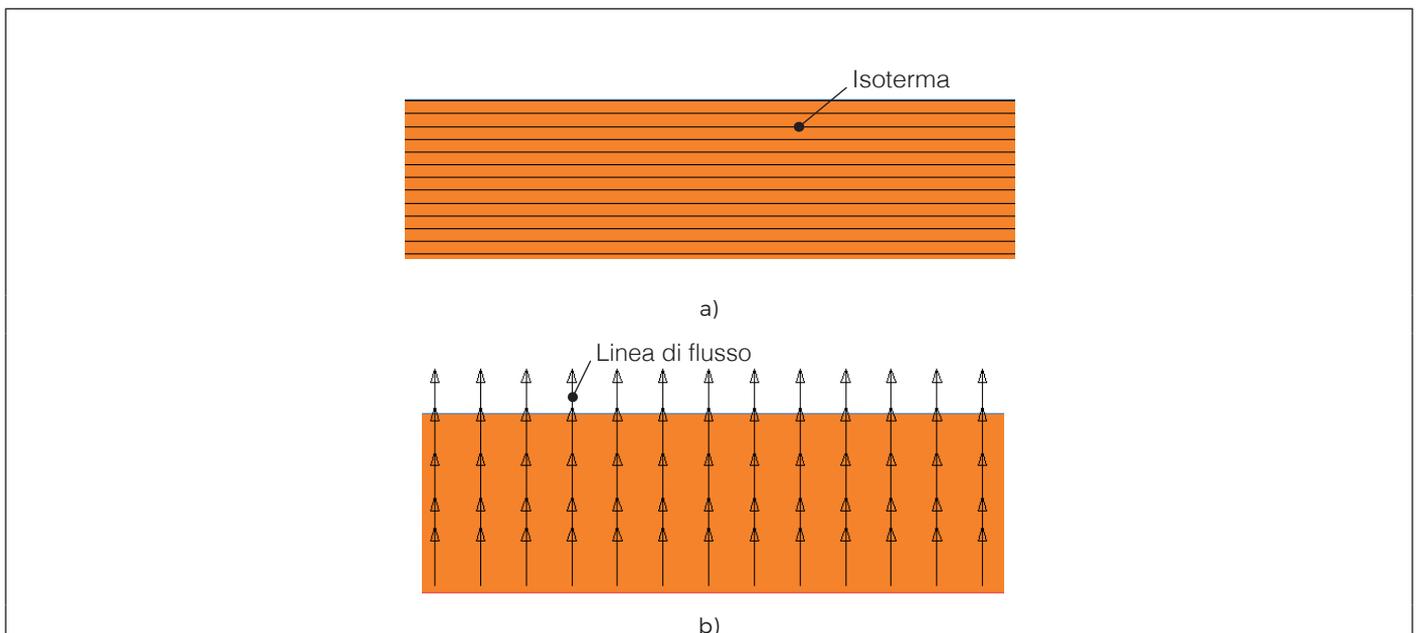


Figura 2 - a) Linee isoterme delle temperature per una parete piana sottoposta a una differenza di temperatura ai due lati. b) Flusso termico monodimensionale per una parete piana sottoposta a una differenza di temperatura ai due lati.

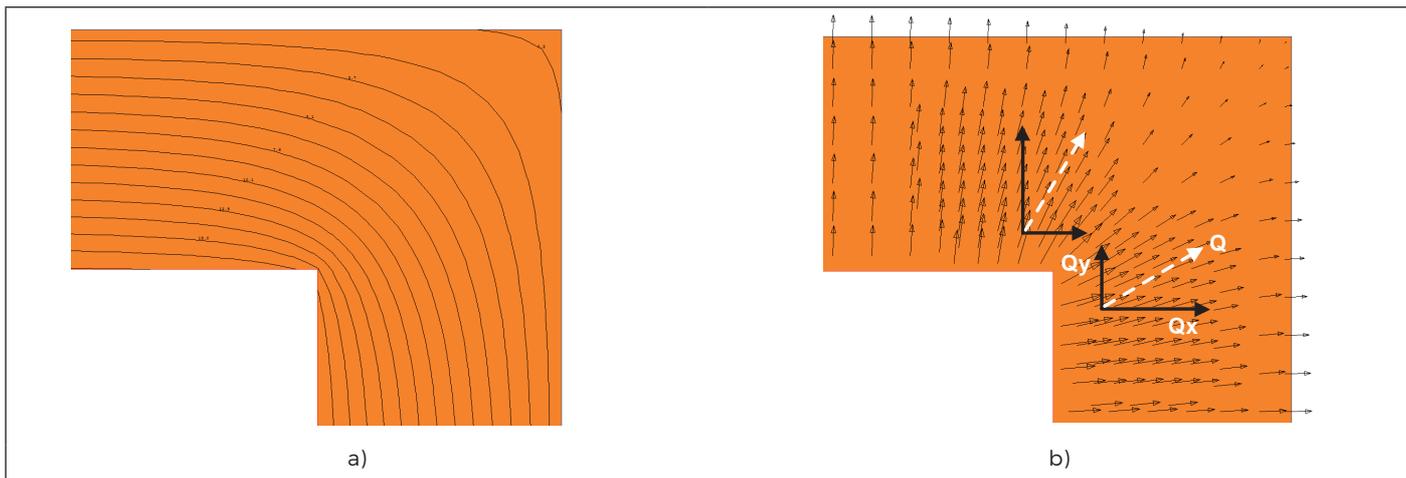


Figura 4 - a) Linee isoterme delle temperature di una intersezione tra due pareti verticali. b) Flusso termico bidimensionale di una intersezione tra due pareti verticali. Q flusso totale, Q_x componente orizzontale, Q_y componente verticale.

Poiché il flusso termico è sempre perpendicolare alle isoterme, nella zona del ponte termico si ha una maggiore concentrazione delle linee di flusso con andamento bidirezionale, come nel caso degli angoli formati da due pareti verticali (vedi Figura 4), o addirittura tridimensionale come negli spigoli dati dall'intersezione di due pareti e solaio (vedi Figura 5).

Le zone di concentrazione del flusso termico danno luogo sia al raffreddamento delle superfici prossime al ponte termico sia alla riduzione del grado di isolamento complessivo della parete con conseguenti variazioni del bilancio termico.

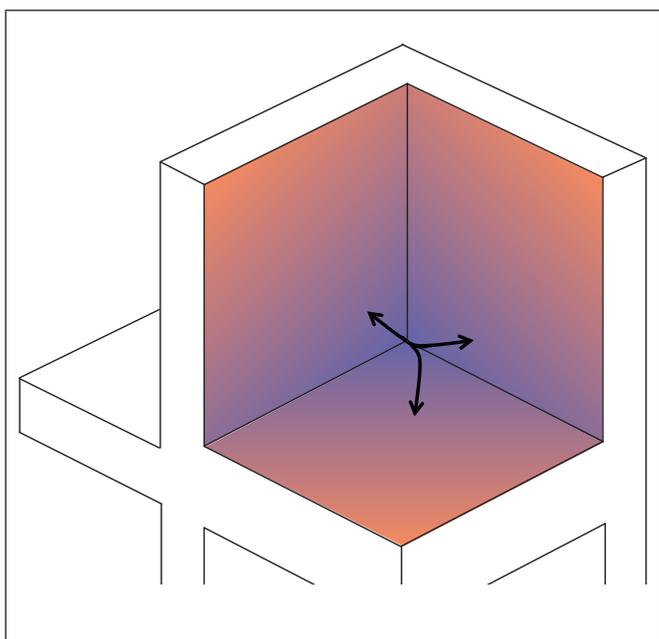


Figura 5 - Flusso termico tri-dimensionale in uno spigolo di una parete con un pavimento

Oltre alla geometria dell'involucro, anche la presenza di elementi con caratteristiche tali da "interrompere la continuità materiale" della struttura considerata influisce sulla modalità della propagazione del calore. Questo è il caso tipico di un pilastro inserito in una parete come riportato in Figura 6: quando si è in prossimità del pilastro le isoterme tenderanno ad allontanarsi per via della maggiore conducibilità termica di quest'ultimo. Come si può notare, le dispersioni di calore avvengono sia nella direzione normale della parete e del pilastro (freccie verso l'alto della Figura 6b) che in quella parallela alle linee isoterme, ovvero dalla parete verso il pilastro.

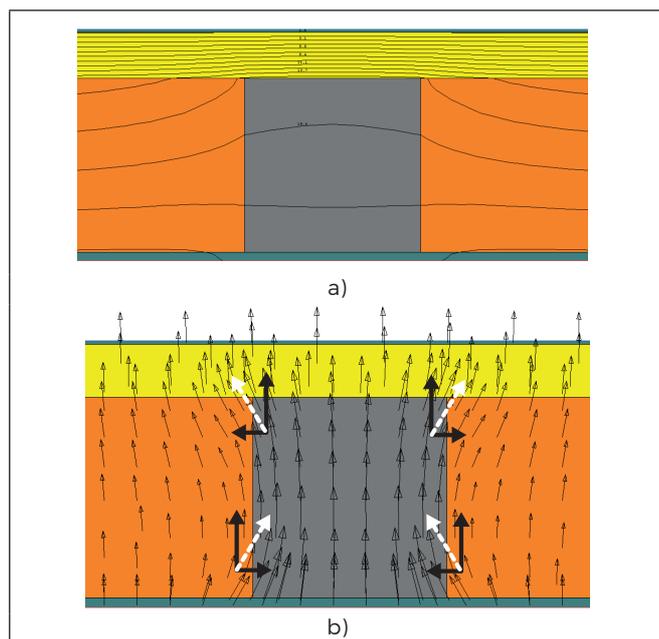


Figura 6 - a) Linee isoterme delle temperature di una parete piana con un pilastro all'interno. b) Flusso termico bidimensionale di una parete piana con un pilastro all'interno.

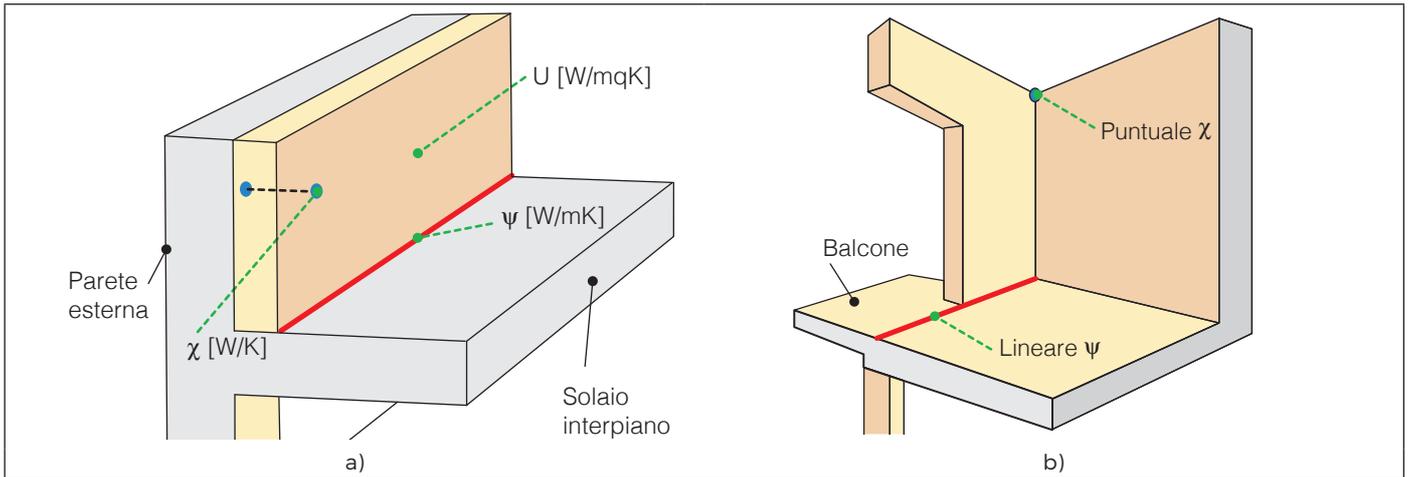


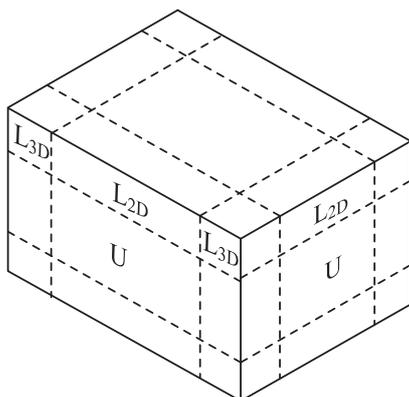
Figura 7 - a) Differenza tra trasmittanza termica U (dispersione termica su una superficie), trasmittanza termica lineica o lineare ψ (dispersione termica su una linea) e trasmittanza termica puntuale χ (dispersione termica in un punto). b) Trasmittanza termica lineica o lineare ψ e trasmittanza termica puntuale χ .

Tale fenomeno distorce il campo termico facendo inclinare la direzione del flusso termico (freccie bianche tratteggiate in Figura 6b). Questo avviene poiché le particelle del pilastro possiedono una temperatura inferiore rispetto a quelle adiacenti alla parete e di conseguenza il calore si trasferisce spontaneamente dalle particelle aventi una temperatura maggiore a quelle con una temperatura minore. Quando il flusso di calore non è più monodirezionale, si parla di *trasmittanza termica lineica* e infine nel caso di una dispersione in un punto si parla di *trasmittanza termica puntuale*, rispettivamente indicate con i simboli ψ e χ nella Figura 7.

In termini molto semplici, il parametro ψ [W/mK] rappresenta la differenza tra la dispersione termica in 2D del nodo geometrico/strutturale (e quindi comprensivo del ponte termico) e quanto disperderebbe il nodo stesso se il ponte termico non esistesse. Ovvero, rappresenta il flusso di calore disperso dal ponte termico per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura di 1 K (per approfondimenti vedi il box qui sotto).

In maniera analoga, il parametro χ rappresenta il flusso di calore aggiuntivo di un singolo punto di dispersione (tasselli, chiodi, spigolo, ecc.) e si esprime in W/K.

IL FLUSSO TERMICO BI- E TRI-DIMENSIONALE



Quando il flusso è monodimensionale, per sapere quanto calore Q_{1D} disperde la parete basta moltiplicare la trasmittanza U per l'area complessiva S della parete per la differenza di temperatura.

$$Q_{1D} = U \cdot S \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

Quando il flusso è bidimensionale, l'espressione

matematica è molto più complessa ed è funzione del coefficiente di scambio termico L_{2D} espresso in W/mK:

$$Q_{2D} = L_{2D} \cdot l \cdot \Delta T \text{ [W]}$$

Dove:

- l è la lunghezza della parte bidimensionale;
- ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno.

Il coefficiente L_{2D} comprende sia la dispersione legata al componente monodimensionale sia quella legata al componente bidimensionale.

Secondo la UNI EN ISO 10211 infatti il coefficiente L_{2D} [W/mK] è dato dalla formula:

$$L_{2D} = \sum_i U_i \cdot l_i + \psi$$

Da cui per differenza si ottiene il valore della trasmittanza termica lineica:

$$\psi = L_{2D} - \sum_i U_i \cdot l_i$$

In maniera analoga viene definito il termine χ dove al posto di L_{2D} ci sarà il coefficiente L_{3D} che descrive lo scambio termico in tre dimensioni.



Figura 8 - a) Ponte termico tra parete e solaio di copertura. b) Ponte termico dello spigolo costituito tra le pareti e il pavimento.

PONTI TERMICI: CARATTERISTICHE E TIPOLOGIE

Per quanto detto nelle pagine precedenti un ponte termico è una zona dell'involucro caratterizzata da un diverso andamento del flusso di calore rispetto alle altre strutture. Oltre a registrare un aumento delle dispersioni di calore, in tali punti si ha un abbassamento della temperatura superficiale con il rischio di formazione di condensa e muffe (vedi Figura 8) che determinano problemi di salubrità degli ambienti interni.

Secondo il D.Lgs 192/2005 relativamente al contenimento dei consumi energetici degli edifici: "il ponte termico rappresenta la discontinuità di isolamento termico che si può verificare in corrispondenza agli innesti di elementi strutturali (solai e pareti verticali o pareti verticali tra loro)".

La normativa tecnica, in particolare la UNI EN ISO 10211, lo definisce come: "parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo per effetto di: una compenetrazione totale o parziale di materiali con

conduttività termica diversa nell'involucro edilizio; una variazione dello spessore della costruzione; per le 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". In linea generale i ponti termici possono essere individuati da due tipi di discontinuità, come di seguito descritte.

Discontinuità geometriche: causate dalla diversa geometria delle chiusure, come per esempio nel caso di un angolo di due pareti verticali (vedi Figura 9), di un'intersezione tra una parete interna e una esterna oppure di una variazione di spessore di qualsiasi elemento edilizio (ad esempio cavedi, nicchie per l'alloggiamento dei termosifoni, vani tecnici e canne fumarie);

Discontinuità termiche: causate dalle diverse caratteristiche di isolamento termico dei materiali che compongono la chiusura edilizia, come per esempio nel caso di un pilastro inserito in una parete (vedi Figura 9) o di elementi strutturali che costituiscono una parete in cartongesso.

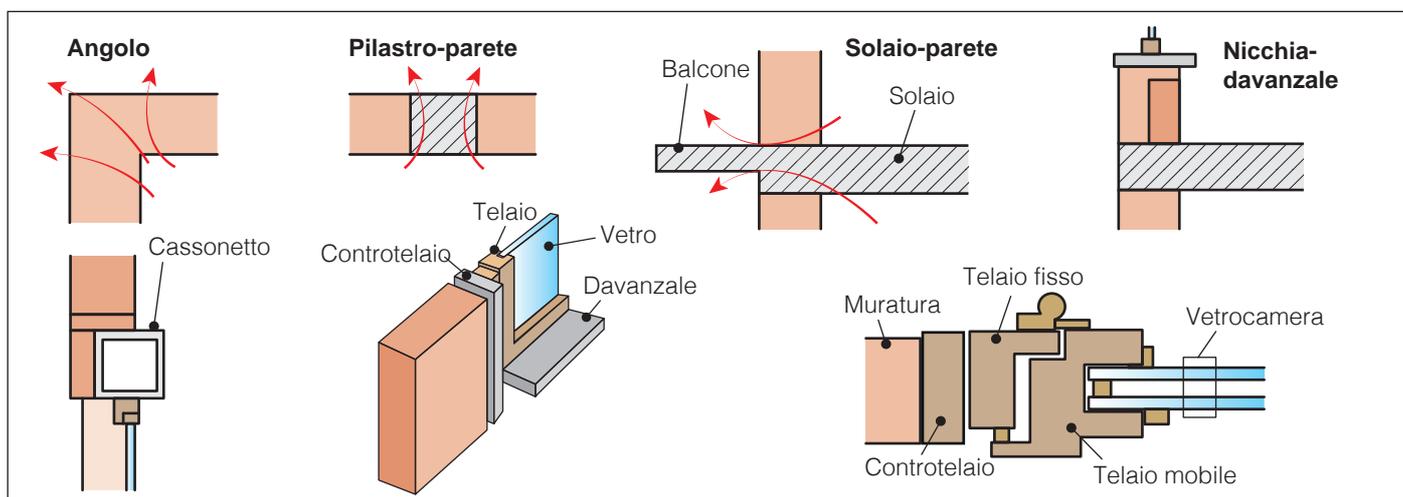


Figura 9 - Esempi di ponti termici con discontinuità geometrica (angolo e balcone) e termica (pilastro, davanzale, cassonetto e infisso)

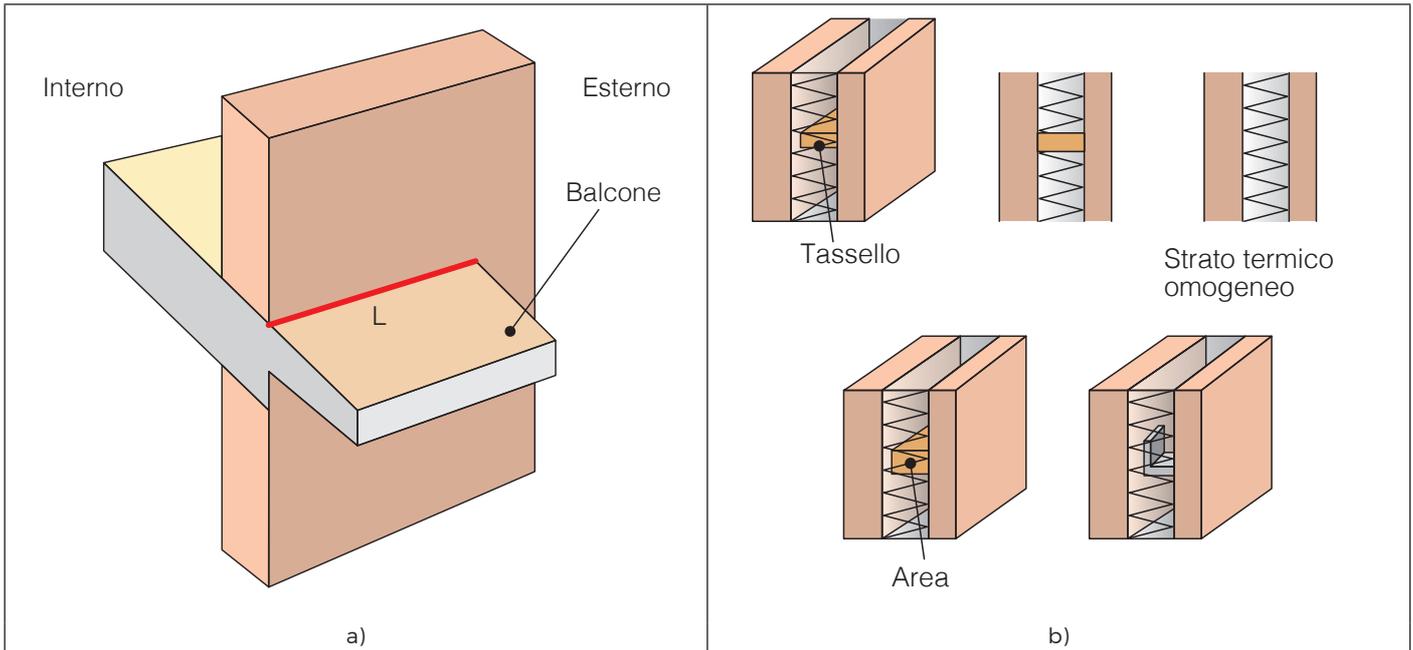


Figura 10 - Discontinuità mista: a) ponte termico di un balcone; b) ponti termici puntuali

A queste possono aggiungersi anche dei casi particolari di **discontinuità miste** dovute alla contemporanea presenza di discontinuità geometrica e materica.

Ad esempio un balcone in aggetto verso l'esterno (vedi Figura 10a) che interrompe l'isolamento termico della parete oppure una discontinuità geometrica puntuale, come per esempio lo spigolo dovuto dall'intersezione di 3 superfici piane, oppure i tasselli strutturali (vedi Figura 10b) che sorreggono un isolamento a cappotto esterno.

MODELLAZIONE E CALCOLO DEI PONTI TERMICI

L'effetto di un ponte termico diminuisce progressivamente allontanandosi dal nodo.

Secondo la norma UNI EN 10211 l'area di influenza è valutabile in 3 volte lo spessore dell'elemento considerato o comunque 1 metro.

Oltre tale distanza il flusso torna a essere monodimensionale e perpendicolare alla struttura (vedi Figura 11).

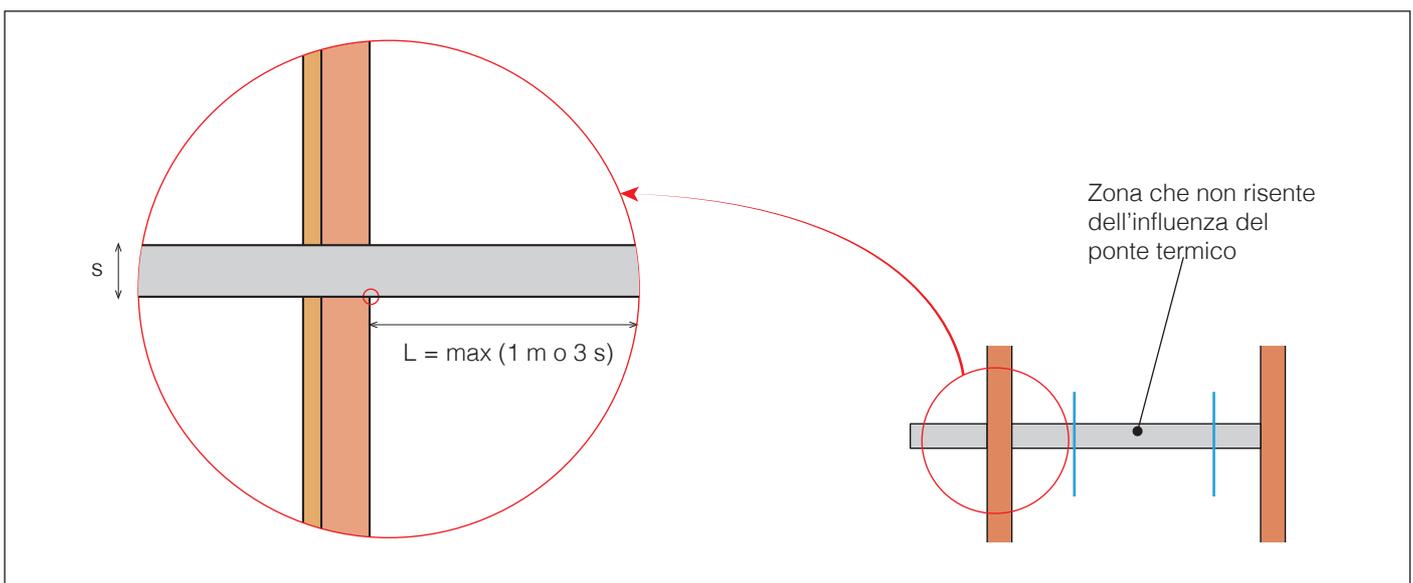


Figura 11 - Area di influenza di un ponte termico in accordo alla UNI EN ISO 10211

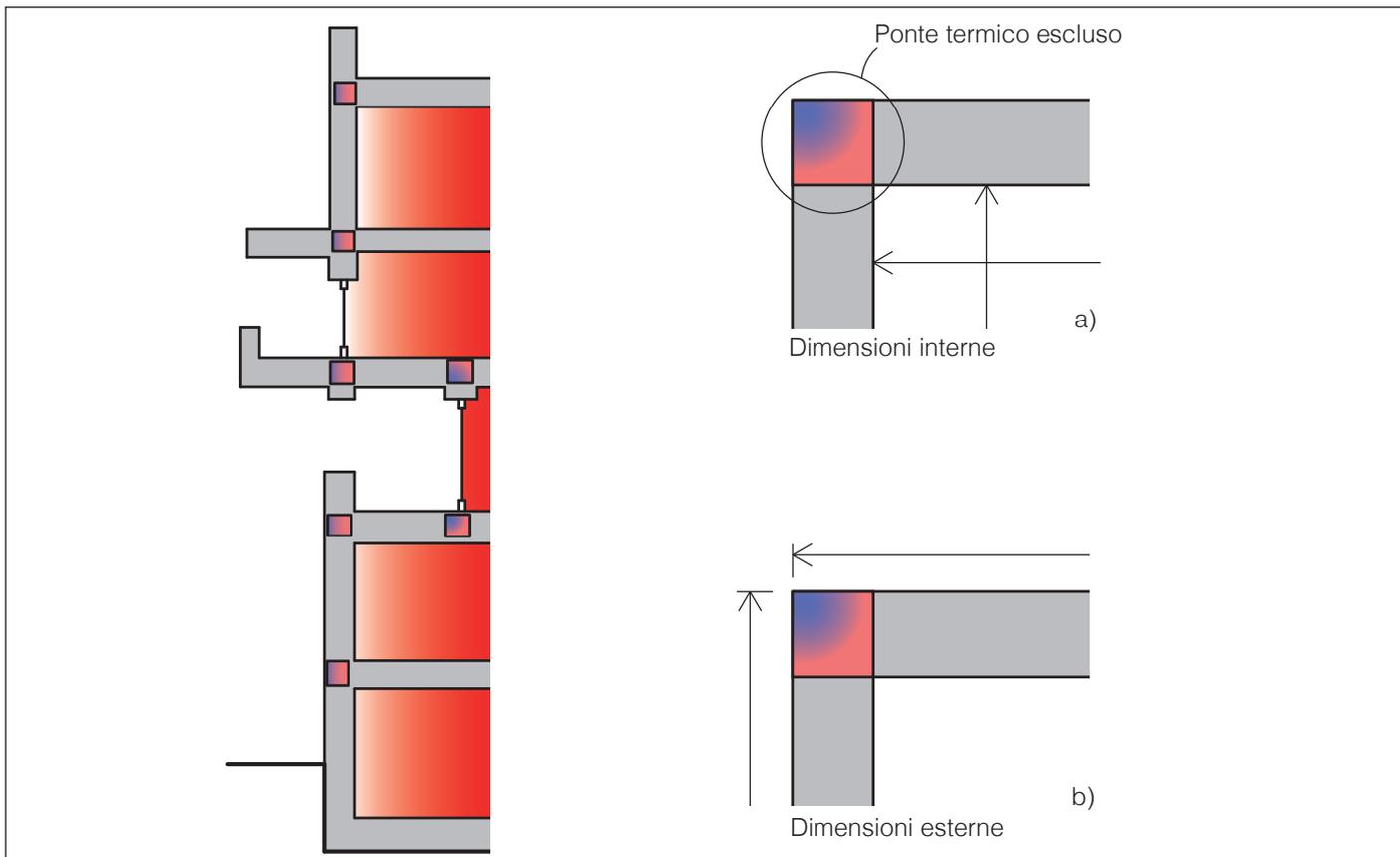


Figura 12 - Rappresentazione schematica dei ponti termici in una sezione verticale

Per quanto riguarda il calcolo delle dispersioni termiche, poiché lo spessore dell'involucro non può essere definito mediante la sua linea mediana, è possibile riferire i ponti termici alle dimensioni nette interne oppure alle dimensioni lorde esterne dell'edificio (vedi Figura 12).

La differenza principale tra i due riferimenti è quella che nel primo caso non si tiene conto degli incroci in prossimità dei ponti termici, mentre nel secondo caso sì.

È doveroso affermare che la scelta della modalità di riferimento delle dimensioni non influisce sul calcolo: scegliendo una o l'altra modalità le dispersioni termiche di un edificio non cambiano, rimangono le stesse (vedi esempio di calcolo a pag. 12). Considerando che con le dimensioni esterne si avrebbe più superficie disperdente rispetto al caso opposto (con le dimensioni interne), viene naturale pensare che le dispersioni relativamente ai ponti termici siano differenti nell'uno e nell'altro caso. In generale, si può affermare che nella quasi totalità dei casi, i ponti termici riferiti alle dimensioni interne siano maggiori rispetto a quelle esterne. I ponti termici riferiti alle dimensioni esterne po-

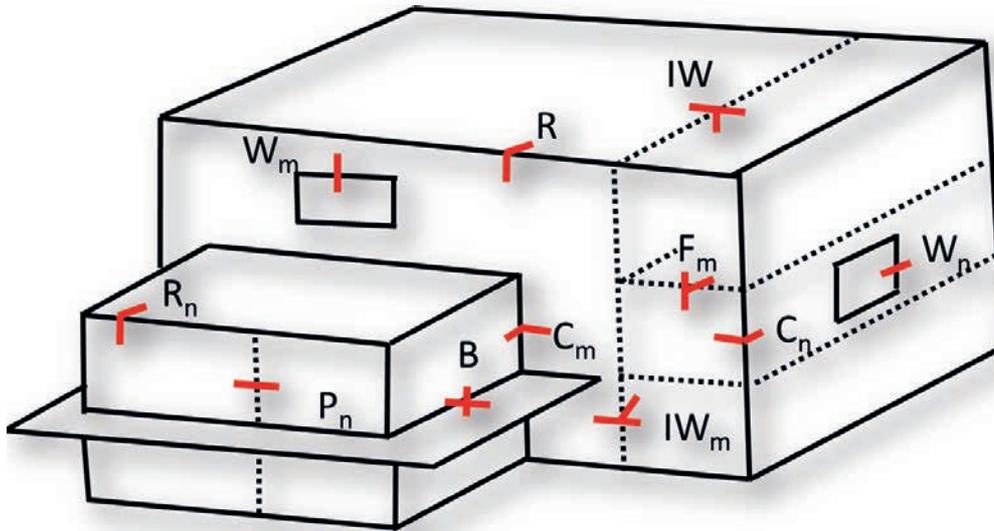
trebbero essere nulli o addirittura negativi, ma questo non deve far supporre che anche le dispersioni siano nulle o negative. La parte della dispersione legata ai ponti termici è calcolata nel flusso monodimensionale degli incroci considerati nelle dimensioni lorde esterne.

Ad esempio, per un ponte termico d'angolo, nel caso in cui si faccia riferimento alle dimensioni esterne, la dispersione termica è inclusa nelle dispersioni dell'intera parete (vedi Figura 12, caso b), mentre se si fa riferimento alle dimensioni interne, è necessario aggiungere la dispersione del ponte termico a quella della parete (vedi Figura 12, caso a). La scelta del riferimento alle dimensioni (interne o esterne) è lasciata al progettista sulla base della sua esperienza professionale e del tipo di calcolo da effettuare, l'importante è che mantenga lo stesso criterio per ogni caratteristica dimensionale: se dovesse scegliere le dimensioni interne per il calcolo delle dispersioni, anche i ponti termici devono essere considerati quelli interni, in caso contrario con le dimensioni esterne dovranno essere presi in considerazioni i ponti termici riferiti alle dimensioni esterne.



TIPOLOGIE DI PONTI TERMICI SECONDO LA NORMA UNI EN ISO 14683

Si indicano di seguito le principali tipologie di ponte termico così come riportato nella norma UNI EN ISO 14683 e schematizzate nella figura qui sotto.



- **R = ponte termico di copertura**

È dato dalla connessione tra il solaio di copertura con la parete verticale.

- **C = ponte termico d'angolo**

È dato dalla intersezione di due pareti verticali; può essere verso l'esterno (C_n) o verso l'interno (C_m).

- **F = ponte termico di pavimento**

È dato dalla connessione dei basamenti e pareti che sono rivolti verso l'esterno o verso ambienti non riscaldati.

- **IW = ponte termico dovuto alle pareti interne**

È dato dalla connessione tra la parete divisoria interna e la parete esterna.

- **P = ponte termico dovuto ai pilastri**

È dato dalla presenza di un pilastro che interrompe la continuità dello strato isolante della parete esterna.

- **B = ponte termico dovuto ai balconi**

Situazione nella quale viene interrotta la continuità dell'isolamento della parete esterna mediante un elemento orizzontale che mette in comunicazione l'ambiente interno con quello esterno.

- **W = ponte termico degli infissi**

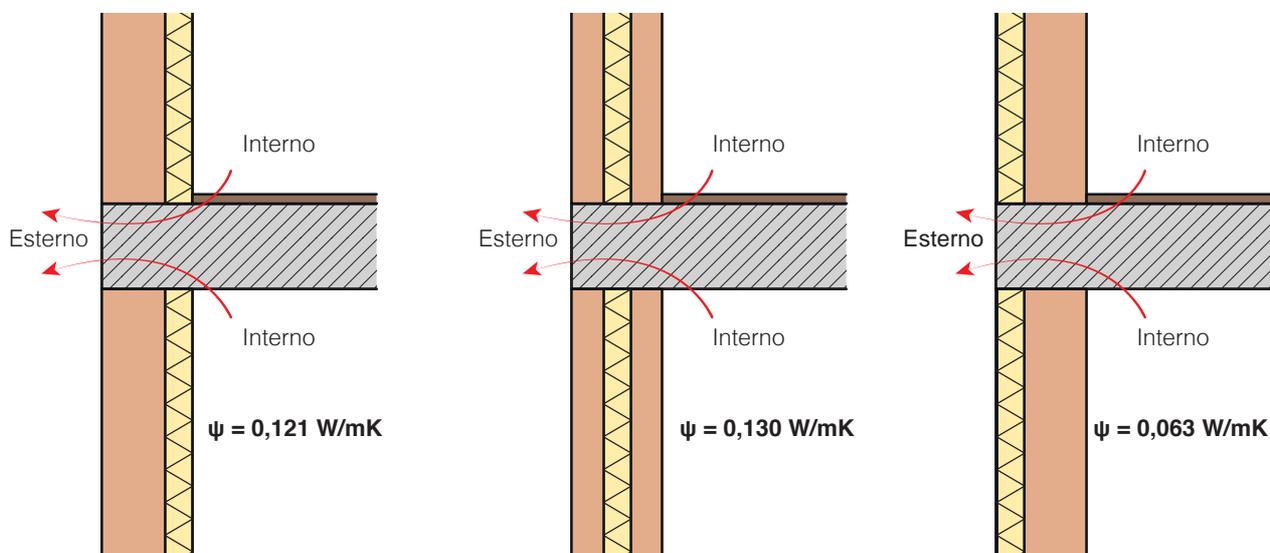
È dato dall'inserimento di un serramento che interrompe la continuità dell'isolamento termico della parete (o della copertura). In genere la posizione del serramento rispetto al filo esterno della parete può influire sulle dispersioni del ponte termico. Nel caso degli infissi è doveroso citare che esistono altri due ponti termici di non facile valutazione: il davanzale e il cassonetto. Il **davanzale** è dovuto alla presenza di un elemento di diverso materiale che in genere viene appoggiato sulla parete e mette in comunicazione direttamente l'ambiente interno con l'ambiente esterno. In molti casi, il bancale copre il radiatore dislocato nella nicchia appositamente predisposta mentre il **cassonetto** è legato alla presenza di una scatola (in genere di legno) rivolta verso l'ambiente interno e da un elemento portante esterno (in genere in cemento armato) che contiene la tapparella della finestra. La combinazione di una variazione di spessore della parete esterna con diversi materiali provoca un notevole incremento delle dispersioni di calore concentrate al di sopra della finestra.



LA POSIZIONE DELL'ISOLANTE INFLUENZA IL PONTE TERMICO?

Nel calcolare l'influenza dei ponti termici in un edificio, la posizione dello strato isolante (interna, esterna o intermedia) assume grande importanza in quanto questa influisce sul valore del coefficiente di trasmissione lineica ψ .

Così negli esempi riportati in figura fatta l'ipotesi di ricorrere alle misure nette interne, si ha che nel caso di isolamento termico interno il valore di ψ risulta pari a 0,121 W/mK, nel caso di isolamento intermedio risulta pari a 0,130 W/mK, mentre nel caso di isolamento esterno risulta essere pari a 0,063 W/mK.



Influenza della posizione dello strato isolante sul valore del coefficiente di trasmissione lineica ψ calcolato con software agli elementi finiti

VERIFICHE TERMICHE: LA TRASMITTANZA TERMICA MEDIA E IL COEFFICIENTE DI SCAMBIO TERMICO GLOBALE

Il Decreto Requisiti Minimi, entrato in vigore il primo ottobre 2015, stabilisce che, nelle verifiche termoigrometriche, la trasmittanza non può più prescindere dal calcolo dei ponti termici.

A seconda degli ambiti di intervento (vedi l'approfondimento sulla "Normativa sull'efficienza energetica: le nuove regole del DM 26/06/2015" sul sito www.bigmat.it), i parametri da confrontare con i limiti normativi sono la trasmittanza termica media (U_{media}) e/o il coefficiente di scambio termico globale per trasmissione (H'_T) riportati nelle Tabelle 1 e 2.

TRASMITTANZA TERMICA MEDIA

La trasmittanza termica media (U_{media}) è definita nella norma UNI 14683 mediante la formula:

$$U_{media} = \frac{\sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k f_p \cdot \psi_k \cdot l_k}{A_{tot}}$$

Dove:

- U_{media} = è la trasmittanza media della struttura considerata [W/mqK];
- A_{tot} = area totale della struttura considerata [mq];
- U_i = trasmittanza termica dell'elemento i-esimo che compone la struttura (ad esempio una parete, ma anche le nicchie di alloggiamento dei radiatori);
- A_i = area dell'elemento i-esimo (parete, nicchia, ecc.);
- ψ_k = ponte termico k-esimo [W/mK];
- l_k = lunghezza del ponte termico [m];
- f_p = fattore di ponderazione del ponte termico pari a 1 o 0,5 (ad esempio nel caso dell'angolo il fattore è 0,5 in quanto metà compete a una parete e la seconda metà all'altra parete; nel caso di un pilastro interno alla parete vale 1).

Tabella 1 - Valore limite per le trasmittanze termiche U[W/mqK] delle superfici confinanti con l'esterno sia per ristrutturazioni importanti di secondo livello sia per riqualificazioni energetiche

ZONA CLIMATICA	PARETI VERTICALI		COPERTURE		PAVIMENTI		FINESTRE, PORTE	
	DA (*) 01.10.15	DA (**) 01.01.19/21						
A e B	0,45	0,40	0,34	0,32	0,48	0,42	3,20	3,00
C	0,40	0,36	0,34	0,32	0,42	0,38	2,40	2,00
D	0,36	0,32	0,28	0,26	0,36	0,32	2,10	1,80
E	0,30	0,28	0,26	0,24	0,31	0,29	1,90	1,40
F	0,28	0,26	0,24	0,22	0,30	0,28	1,70	1,00

(*) per tutti gli edifici; (**) dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici a uso pubblico e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli edifici.

- I valori di trasmittanza di pareti, coperture e pavimenti, si considerano comprensive dei ponti termici all'interno delle strutture oggetto di riqualificazione (ad esempio ponte termico tra finestre e muro) e di metà del ponte termico al perimetro della superficie oggetto di riqualificazione.
- Nel caso in cui fossero previste aree limitate di spessore ridotto, quali sottofinestre e altri componenti, i limiti devono essere rispettati con riferimento alla trasmittanza media della rispettiva facciata.
- Nel caso di strutture rivolte verso il terreno, i valori limite di trasmittanza devono essere rispettati dalla trasmittanza equivalente della struttura tenendo conto dell'effetto del terreno calcolata secondo la UNI EN ISO 13370.

Tabella 2 - Valori limite del coefficiente medio globale di scambio termico H'_T limite in funzione del rapporto di forma S/V e della zona climatica [Tabella 10, Appendice A, Allegato 1 del Decreto Requisiti Minimi]

ZONA CLIMATICA	NUOVE COSTRUZIONI, DEMOLIZIONI E RISTRUTTURAZIONI			AMPLIAMENTI E RISTRUTTURAZIONI DI SECONDO LIVELLO
	S/V ≥ 0,7	0,7 > S/V ≥ 0,4	0,7 > S/V	
A e B	0,58	0,63	0,80	0,73
C	0,55	0,60	0,80	0,70
D	0,53	0,58	0,80	0,68
E	0,50	0,55	0,75	0,65
F	0,48	0,53	0,70	0,62

COEFFICIENTE MEDIO DI SCAMBIO TERMICO

Il coefficiente medio di scambio termico globale per trasmissione (H'_T) riferito all'unità di superficie disperdente è definito come somma dei coefficienti di scambio termico per trasmissione verso l'ambiente esterno (H_D), verso il terreno (H_G) verso gli ambienti non climatizzati (H_U) e verso altri ambienti climatizzati a temperature diverse (H_A) diviso la sommatoria di tutte le superfici degli elementi di involucro opachi e trasparenti:

$$H'_T = \frac{H_{tr,adj}}{\sum_i A_i} = \frac{H_D + H_G + H_U + H_A}{\sum_i A_i}$$

Il generico coefficiente di trasmissione si calcola con la formula di seguito riportata:

$$H_X = b_{tr,X} \cdot (\sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \psi_k \cdot I_k + \sum_j \chi_j)$$

Dove:

- χ è la trasmittanza termica del ponte termico puntuale;
- $b_{tr,\chi}$ è il fattore di correzione che dipende dalla temperatura dell'ambiente sull'altro lato dell'elemento costruttivo; tale fattore è uguale a 1 solo se l'elemento costruttivo separa l'ambiente abitato dall'aria esterna.

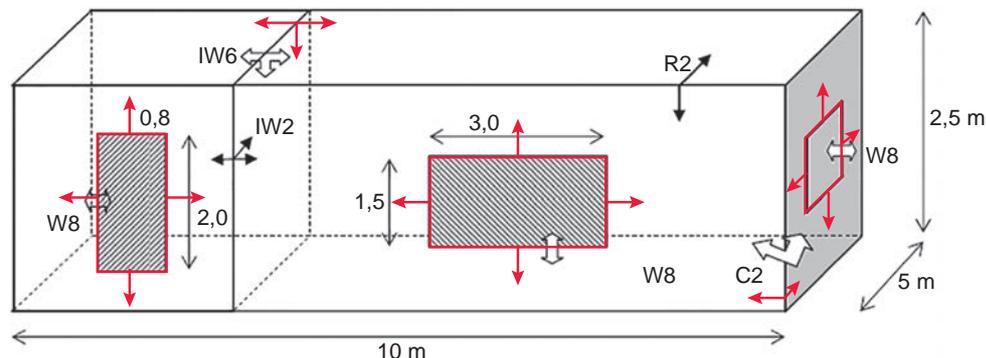
Nel caso di scambio termico verso l'esterno si ha:

$$H_D = 1 \cdot (\sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \psi_k \cdot I_k)$$

In estrema sintesi, il coefficiente H'_T rappresenta una trasmittanza termica media dell'involucro edilizio, pesata sulle aree, che tiene conto sia dei componenti opachi sia di quelli trasparenti sia dei ponti termici e corretta per tener conto dei salti di temperatura relativi a ciascun elemento costruttivo.



ESEMPIO DI CALCOLO DI PONTI TERMICI



In riferimento alla figura [fonte UNI EN ISO 14683] l'analisi geometrica delle caratteristiche delle strutture conduce ai risultati sotto riportati:

Valutazione con le superfici interne

ELEMENTO EDILIZIO	U [W/(mqK)]	A _i [mq]	U · A _i [W/K]
Pareti	0,40	64,4	25,76
Tetto	0,30	50,0	15,00
Pavimento	0,38	50,0	19,00
Finestre	3,50	9,0	31,50
Porta	3,00	1,6	4,80
Totale			96,06

PONTE TERMICO	TIPOLOGIA	Ψ _i [W/(m K)]	l _i [m]	Ψ _i · l _i [W/K]
Parete/tetto	R2	0,65	30,0	19,50
Parete/parete	C2	0,10	10,0	1,00
Partizione/parete	IW2	0,50	5,0	2,50
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,0	0,00
Architrave	W8	0,60	23,6	14,16
Totale				37,16

Valutazione con le superfici esterne

ELEMENTO EDILIZIO	U [W/(mqK)]	A _e [mq]	U · A _e [W/K]
Pareti	0,40	76,88	30,75
Tetto	0,30	59,36	17,81
Pavimento	0,38	50,0	19,00
Finestre	3,50	9,0	31,50
Porta	3,00	1,6	4,80
Totale			103,86

PONTE TERMICO	TIPOLOGIA	Ψ _e [W/(m K)]	L _e [m]	Ψ _e · L _e [W/K]
Parete/tetto	R2	0,65	30,0	19,50
Parete/parete	C2	-0,10	10,8	-1,08
Partizione/parete	IW2	0,50	5,4	2,70
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,6	0,00
Architrave	W8	0,60	23,6	14,16
Totale				31,98

Da cui si ricavano:

$$H_D = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \Psi_k \cdot l_k = 96,06 + 37,16 = 133,22 \text{ [W/K]} \text{ riferito alle misure interne}$$

$$H_D = \sum_i U_i \cdot A_i + \sum_k \Psi_k \cdot l_k = 103,86 + 31,98 = 135,84 \text{ [W/K]} \text{ riferito alle misure esterne}$$

Questi calcoli, derivanti dall'applicazione della norma UNI EN ISO 14683, hanno carattere puramente indicativo e didattico.

INCIDENZA DEI PONTI TERMICI SUI CONSUMI ENERGETICI

I ponti termici provocano un aumento della dispersione di calore, e quindi, dei consumi energetici. È dimostrato che più è alto il livello di isolamento termico, maggiore è l'incidenza dei ponti termici. Pertanto i ponti termici hanno un effetto negativo percentualmente molto più alto negli edifici di nuova costruzione rispetto a quelli esistenti privi di isolamento.

Ad esempio nella Figura 13, prendendo in esame un edificio con cappotto esterno, si vede che al migliorare della trasmittanza U (da 0,30 W/mqK a 0,15) l'incidenza dei ponti termici sale dal 21% al 23% confermando che questo fenomeno non deve essere assolutamente trascurato e sottovalutato.

Un altro aspetto che spesso viene trascurato è l'incidenza dei ponti termici nel periodo estivo. L'impianto di raffrescamento riduce i carichi termici interni (cioè il calore prodotto negli ambienti per la presenza di persone e elettrodomestici) e quelli esterni dovuti all'irraggiamento solare. Le dispersioni di calore, che in questo caso sono entranti negli ambienti e non uscenti (come nel periodo invernale), dovute ai ponti termici potrebbero avere una incidenza negativa come nel periodo invernale, ma di valore differente come recentemente dimostrato.

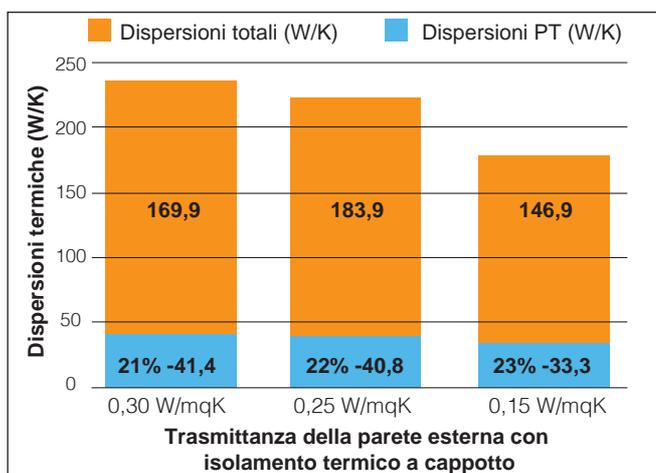


Figura 13 - Incidenza delle dispersioni dei ponti termici in funzione dell'isolamento termico delle pareti esterne di un edificio [Fonte A. Gorrino. Sviluppo e validazione di modelli di calcolo della prestazione energetica dell'edificio: ponti termici e componenti speciali di involucro - Tesi di dottorato 2012]

CONDENSAZIONE DEL VAPORE ACQUEO IN CORRISPONDENZA DEI PONTI TERMICI

La condensazione del vapore acqueo dell'aria è un fenomeno complesso che si verifica in presenza di particolari condizioni ambientali. Per umidità si intende la quantità di vapore contenuta nell'aria ed è funzione della temperatura. **Più alta è la temperatura maggiore è la quantità di vapore che l'aria è in grado di contenere.** L'umidità può essere espressa in termini assoluti (cioè quanti grammi di vapore sono presenti in 1 kg di aria) oppure relativi (UR), espressa come valore percentuale, in riferimento al massimo quantitativo che l'aria può contenere a quella data temperatura.

Guardando il grafico di Figura 14, prendendo in considerazione il puntino giallo sulla curva UR50% vuol dire che a 20 °C il contenuto di vapore assoluto è di circa 8 g/kg di aria.

Quando il vapore acqueo aumenta nell'aria anche la sua umidità cresce (freccia verde); quando l'aria non sarà più in grado di contenere altro vapore si dirà che essa è saturata (puntino verde sulla curva blu). In condizioni di saturazione qualunque ulteriore quantità di vapore aggiunto all'aria condenserà.

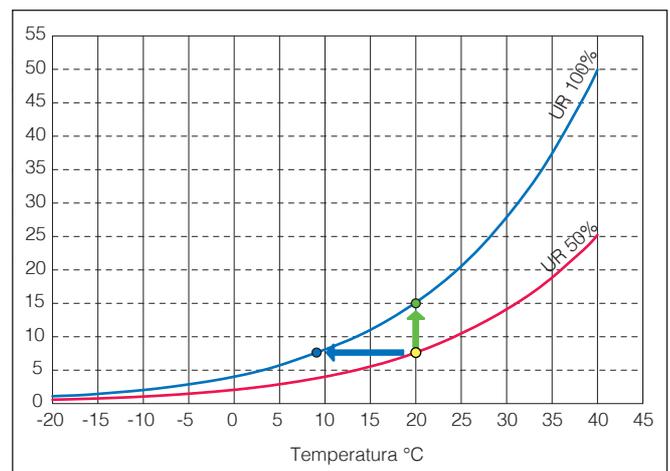


Figura 14 - Diagramma psicrometrico semplificato in cui è rappresentato l'andamento dell'umidità relativa in funzione della temperatura. La curva blu rappresenta la curva di saturazione (umidità relativa 100%), la curva rossa rappresenta la curva di umidità relativa del 50%. La freccia verde indica il raggiungimento della condizione di saturazione per effetto di un eccesso di produzione di vapore. La freccia blu indica il raggiungimento della temperatura di rugiada al diminuire della temperatura nell'ambiente mantenendo costante il contenuto di vapore assoluto.

Le condizioni di saturazione possono essere raggiunte non solo per aumento del vapore, ma anche per abbassamento della temperatura senza variazione del quantitativo assoluto di vapore nell'ambiente (freccia blu). Nella condizione di UR 50% a 20 °C si raggiunge la condizione di saturazione a 9 °C.

Se invece l'umidità relativa dell'ambiente è del 65% (puntino nero sulla curva arancione in Figura 15) la condizione di saturazione per raffreddamento viene raggiunta a una temperatura di 13 °C più alta di 4 °C del caso precedente.

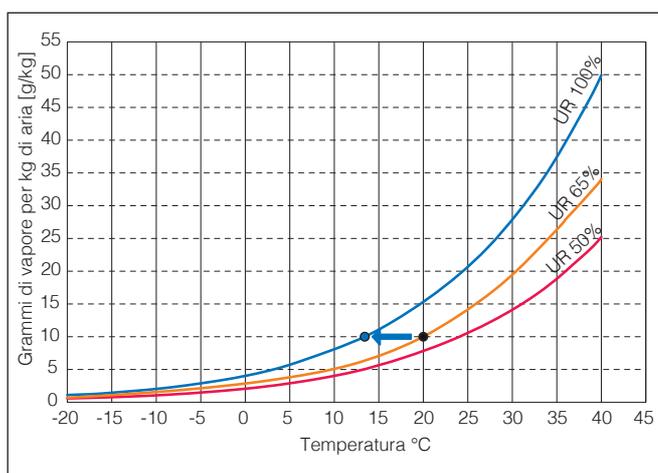


Figura 15 - Raggiungimento della temperatura di rugiada partendo da una condizione di UR 65% a 20 °C

La temperatura alla quale inizia la condensazione è chiamata **temperatura di rugiada** e riveste una notevole importanza nella fisica dell'edificio poiché è strettamente correlata con i fenomeni di condensazione superficiale delle pareti.

Tuttavia, ben più gravi sono le conseguenze provocate dalle muffe che, a differenza delle condensazioni superficiali, si manifestano quando l'UR è dell'80%. Ad esempio nel caso di UR 65% a 20 °C la temperatura alla quale si ha il rischio di muffa è di 15 °C (più alta di quella di rugiada).

Poiché in corrispondenza dei ponti termici si verificano ulteriori abbassamenti della temperatura il rischio di muffa e condensa è più alto che nel resto dell'edificio e pertanto deve essere tenuto sotto controllo.

Per ulteriori approfondimenti vedi Quaderno Tecnico Isolamento termico in edilizia pagg. 21, 22 e 23.

CONSIGLI RIPORTATI SULLA UNI EN ISO 13788

Nella norma UNI EN ISO 13788:2013 - *Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo*, sono riportati alcuni criteri di intervento per modificare strutture risultate non idonee nella valutazione della condensa interstiziale. La norma descrive in maniera sintetica e speditiva alcune linee di intervento qualora l'oggetto di analisi non risulti idoneo secondo i criteri normativi.

Si riporta che, in linea generale, un migliore comportamento igrometrico della struttura può essere ottenuto intervenendo sulla disposizione degli strati secondo i seguenti criteri:

- disposizione verso il lato più esterno degli strati aventi una maggiore resistenza termica;
- disposizione verso il lato più interno degli strati caratterizzati da maggiore resistenza alla diffusione al vapore.

In generale, la soluzione con il cappotto isolante sul lato esterno garantisce il criterio a) mentre una barriera o un freno al vapore disposto sul lato interno dell'ambiente soddisfa il criterio b).

Mettendo in pratica entrambe le soluzioni si ha un migliore comportamento igrometrico della struttura.

Si mette in evidenza che l'uso della barriera al vapore sicuramente da un lato impedisce al vapore di migrare verso l'esterno, scongiurando quindi eventuali condensazioni interstiziali all'interno delle strutture, ma dall'altro rende gli ambienti molto "ermetici" soprattutto con il diffondersi di infissi ad altissima tenuta.

In altre parole, l'uso della barriera al vapore è necessario solo quando non se ne può fare a meno. Ad esempio se si interviene con un isolamento sul lato interno, in molti casi è necessario prevedere una barriera al vapore, soprattutto se si utilizzano materiali isolanti aventi una bassa resistenza al vapore. Si raccomanda sempre una verifica della condensazione interstiziale quando si opta per tale scelta, anche nei casi in cui la normativa non la preveda.

Un'altra raccomandazione sulla barriera al vapore riguarda la sua posizione qualora sia presente uno strato isolante disposto sul lato interno. Spesso si sbaglia a posizionare la barriera inserendola, ad esempio, verso il lato più freddo dell'isolante, andando a peggiorare la situazione. La posizione corretta è sul lato interno tra la rifinitura interna (ad esempio il cartongesso) e l'isolante.

È opportuno richiamare l'attenzione sul fatto che la presenza della barriera al vapore spesso comporta altri inconvenienti quali una riduzione dell'asciugamento estivo e perdita delle sue caratteristiche con il tempo. Al fine di aumentare la possibilità di smaltimento dell'acqua condensata, è inoltre anche possibile prevedere un'opportuna ventilazione con l'aria esterna. La ventilazione purtroppo è un altro aspetto che spesso viene trascurato per la risoluzione dei problemi dovuti alla condensazione superficiale e interstiziale mentre sarebbe opportuno prevedere idonei sistemi di ventilazione dell'aria per scongiurare tali fenomeni o semplicemente ricambiare aria agli ambienti quando è necessario.

VERIFICA IGROMETRICA IN PROSSIMITÀ DI UN PONTE TERMICO

Sebbene la normativa tecnica UNI EN ISO 13788 prevedesse il controllo della formazione della muffa in corrispondenza dei ponti termici, il DPR 59/09 aveva la lacuna di non richiamare tale norma e di prendere in considerazione solo i rischi di condensa superficiale e interstiziale. L'entrata in vigore del DM 26/06/2015 ha posto in evidenza l'importanza di assicurare anche l'assenza di muffe con particolare riferimento ai ponti termici. Ciò significa garantire sulla superficie interna del ponte termico una temperatura T_{si} maggiore, non tanto della temperatura di rugiada, ma di quella critica ($T_{critica}$) per la quale si ha una UR dell'80%.

Poiché la temperatura T_{si} dipende dalla resistenza termica del nodo strutturale in esame e dalle condizioni climatiche interne ed esterne, il parametro

igrometrico che mette in relazione questi tre elementi è il **"fattore di temperatura (f_{Rsi})"** definito dalla seguente relazione:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e}$$

Dove:

T_{si} = temperatura superficiale interna;

T_e = temperatura esterna;

T_i = temperatura interna.

La verifica, svolta per tutti i mesi dell'anno in conformità alla UNI EN 13788, è positiva se **il fattore di temperatura (f_{Rsi}) è maggiore del fattore di temperatura del mese più a rischio ($f_{Rsi\ max}$) calcolato considerando, nella formula qui sopra, al posto della temperatura superficiale interna (T_{si}) la temperatura $T_{critica}$.**

Il fattore di temperatura è un numero che varia tra 0 e 1 e rappresenta l'abbassamento in percentuale della temperatura superficiale interna rispetto alla differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

$f_{Rsi} = 1$

Rappresenta la condizione ideale ma è impossibile fisicamente da ottenere in quanto la temperatura sulla superficie del ponte termico è uguale a quella dell'aria dell'ambiente interno.

$f_{Rsi} = 0$

Rappresenta la condizione peggiore perché la temperatura sulla superficie del ponte termico è identica a quella esterna. Anche questa condizione non si verifica mai.

Se è impossibile realizzare un nodo strutturale con f_{Rsi} pari a 1, a causa della discontinuità data dal ponte stesso, è sempre meglio cercare di ottenere un valore più alto possibile.

Ricapitolando quattro sono i parametri che governano la formazione di condensa superficiale e/o muffe:

1. condizione climatiche esterne;
2. qualità termica dell'involucro sintetizzata con il parametro f_{Rsi} ;
3. quantità di vapore prodotta internamente;
4. temperatura interna e sistema di riscaldamento (l'intermittenza dell'impianto e zone non riscaldate possono indurre problemi di umidità).

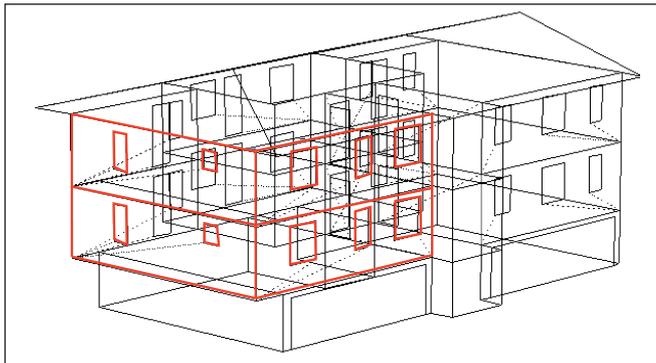


Figura 16 - Individuazione dei ponti termici mediante le intersezioni delle superfici interne dell'edificio che disperdono calore

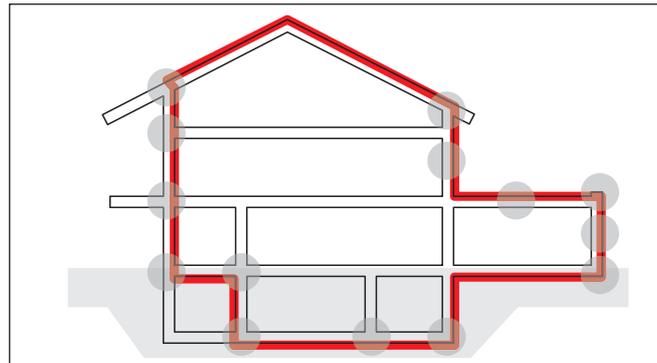


Figura 17 - Individuazione dei ponti termici mediante la ricerca della continuità dell'isolamento termico

REGOLE PER UNA BUONA PROGETTAZIONE

Un primo passo per l'individuazione dei ponti termici è quello di cercare tutte le discontinuità geometriche dell'edificio. Questa operazione può essere eseguita avendo cura di considerare tutte le intersezioni delle superfici interne: in questo modo si ottiene una schematizzazione dell'edificio che in gergo si chiama "fil di ferro" (o *wireframe*, vedi Figura 16). Tutte le linee che sono rivolte verso l'ambiente esterno, o verso ambienti non riscaldati, rappresentano dei ponti termici aventi una discontinuità geometrica. Una volta individuate sulla carta tutte le possibili zone soggette a una dispersione termica più elevata è possibile procedere con una corretta progettazione garantendo il più possibile la continuità dell'isolamento termico secondo la regola del "pennarello rosso" (vedi Figura 17).

Nelle nuove costruzioni il tecnico, insieme al direttore dei lavori, deve porre molta attenzione all'esecuzione in opera dei dettagli costruttivi, in

particolare agli elementi dove il rischio di cattiva esecuzione può portare il maggior danno (posa in opera dei serramenti, pilastri e angoli, accurato accostamento dell'isolamento).

Nel caso degli edifici esistenti, per poter valutare la fattibilità dell'intervento volto a ridurre le dispersioni dei ponti termici, potrebbe essere utile procedere con:

- lettura dei progetti, planimetrie, piante, sezioni e qualsiasi documentazione tecnica nelle quali sono riportate le caratteristiche geometriche e tecnologiche dell'edificio;
- ispezione visiva *in situ* al fine di individuare evidenti zone di muffe sulle chiusure oggetto di intervento;
- uso della termocamera a infrarossi per individuare le discontinuità più nascoste alla vista (l'immagine termografica consente di rendere visibile, anche a tecnici non esperti, la temperatura superficiale dell'oggetto inquadrato e quindi comprendere il relativo flusso di calore e di dispersioni termiche associate come pilastri in parete, travi, ecc. (di cui un esempio in Figura 18).

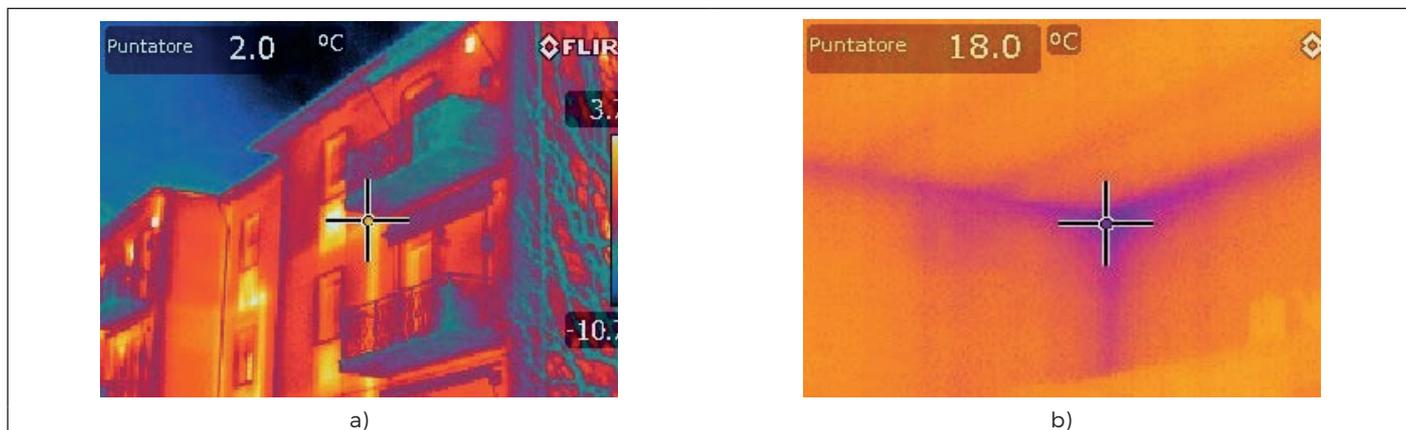


Figura 18 - a) Immagine termografica di ponti termici dovuti alla presenza di pilastri e balconi. b) Immagine termografica di un ponte termico relativo allo spigolo delle pareti e solaio.



LA LEGISLAZIONE E LE NORME TECNICHE DI RIFERIMENTO

Di seguito si riporta un elenco non esaustivo delle principali norme tecniche che affrontano il tema:

- **UNI EN ISO 10211:2008, Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati.** Rappresenta la principale norma per il calcolo analitico con il metodo agli elementi finiti per i modelli geometrici in 2D e 3D. Utilizzando il metodo prescritto dalla norma è possibile stimare l'andamento di tutti i flussi termici che attraversano il componente edilizio e il relativo campo delle temperature.
- **UNI EN ISO 14683:2008, Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento.** La norma riporta i requisiti relativi alla creazione dei cataloghi dei ponti termici. Inoltre sono indicati i valori di riferimento della trasmittanza termica lineica dei più comuni ponti termici (si sottolinea che, attualmente tali valori non possono essere utilizzabili per il calcolo della prestazione energetica degli edifici).
- **UNI EN ISO 6946:2008, Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo.** In questa norma è indicato il metodo di calcolo per valutare la trasmittanza termica delle chiusure opache. In relazione ai ponti termici, la norma propone un metodo di calcolo dettagliato per la correzione delle dispersioni termiche dei fissaggi meccanici allo scopo di ottenere una trasmittanza termica puntuale al fissaggio.
- **UNI EN ISO 13370:2008, Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo.** La norma si riferisce al calcolo dei parametri di trasmissione termica degli elementi di edifici in contatto con il terreno includendo l'effetto dei ponti termici. In particolare si tiene conto dell'interazione tra pavimento e parete e delle proprietà termiche del suolo.
- **UNI EN ISO 10077-1:2007, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità.**
- **UNI EN ISO 10077-2:2012, Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 2: Metodo numerico per i telai.** Entrambe le norme specificano il metodo di calcolo della trasmittanza termica di finestre e porte pedonali, con vetrate o pannelli inseriti in telai di diverso materiale. Il calcolo della trasmittanza termica di una finestra tiene conto della trasmittanza termica lineare del ponte termico dato dall'attacco tra vetro, fermavetro e telaio, o tra pannello opaco e telaio. Il calcolo dei ponti termici del telaio è incluso nel calcolo della trasmittanza, mediante modello numerico ed esclude espressamente i ponti termici dovuti alla posa in opera del serramento.
- **UNI EN ISO 13788:2013, Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.** La norma specifica i criteri di calcolo della temperatura e umidità relative superficiali e interne e i rischi di condensazione superficiale; tiene conto dei ponti termici nel valutare la "qualità termica" di ogni elemento dell'involucro edilizio.
- **UNI EN ISO 13789:2008, Prestazione termica degli edifici - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo.** La norma descrive la procedura di calcolo del coefficiente di scambio termico a partire dai dati geometrici e termofisici, inclusi i ponti termici, da utilizzarsi per determinare la prestazione energetica degli edifici.
- **UNI/TS 11300-1:2014, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva e invernale.** La norma consente di determinare il fabbisogno di energia termica dell'involucro in relazione alle sue caratteristiche geometriche, termofisiche, di destinazione d'uso e climatiche. La procedura di calcolo descritta nella norma tiene conto dei ponti termici, in relazione alla loro dimensione e del coefficiente di trasmissione lineica quale dato di ingresso dei calcoli.
- **UNI 10824-1:2000, Prove non distruttive - Termografia all'infrarosso - Termini e definizioni, e UNI EN 13187:2000, Prestazione termica degli edifici - Rilevazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all'infrarosso.** La norma definisce i criteri per la diagnosi mediante l'uso delle termocamere, utili per individuare la differenza di temperature superficiali negli edifici e i criteri per la redazione (e di lettura) dei report termografici.

2.

CORREZIONE DEI PONTI TERMICI

La correzione dei ponti termici può avere due finalità: da un lato eliminare i fattori di degrado, quali muffe, condense e umidità, aumentando la temperatura superficiale all'interno dell'ambiente, dall'altro ridurre le dispersioni termiche.

In questo capitolo forniremo le indicazioni tecniche di massima per la correzione dei ponti termici.

COSA VUOL DIRE CORREGGERE I PONTI TERMICI

L'espressione "correzione del ponte termico" non sottintende avere un "ponte termico corretto".

In generale, la correzione del ponte termico indica una "riduzione" delle dispersioni termiche della discontinuità, mentre il "ponte termico corretto" si riferisce al tipo di verifica da effettuare per ottemperare ai limiti di trasmittanza termica per le chiusure edilizie.

In sostanza, **la riduzione di un ponte termico potrebbe non indicare un ponte termico corretto.**

Quale che sia la finalità, dal punto di vista pratico la soluzione tecnica per la correzione dei ponti termici (vedi Figura 1) può portare a un miglioramento del coefficiente di trasmissione lineica mediante l'inserimento di uno strato isolante, oppure mediante un taglio termico isolante in modo da separare gli elementi di continuità e di collegamento tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno.

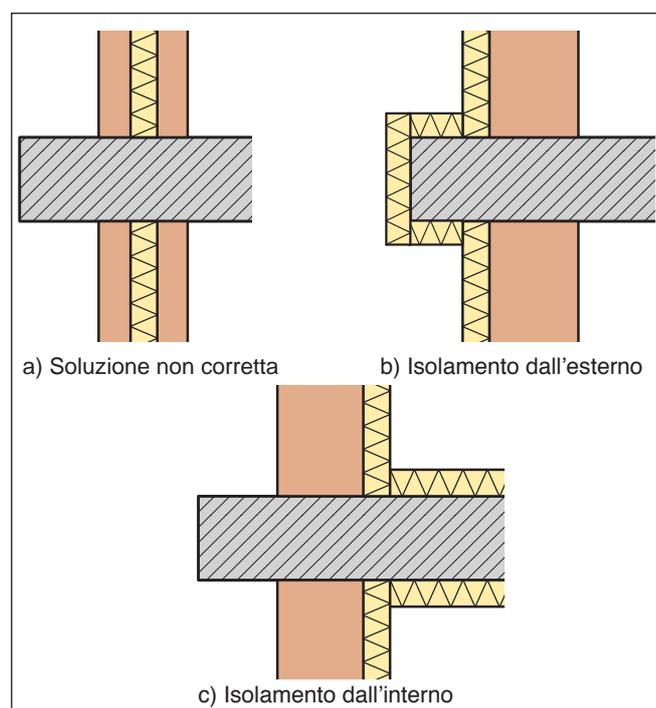


Figura 1 - Riduzione del ponte termico [fonte: appendice nazionale norma UNI EN ISO 13788:2008]

PONTI TERMICI NEGLI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE

Per gli edifici di nuova costruzione la correzione dei ponti termici non esiste. Il ponte termico deve essere studiato nella fase di progetto in modo che la discontinuità termica sia del tutto eliminata. Il progetto del ponte termico richiede tempo, preparazione ed esperienza di calcolo. Al giorno d'oggi ci sono ottimi strumenti di calcolo che permettono uno studio approfondito del ponte termico in fase di progettazione, il tempo dedicato sicuramente sarà ripagato nella fase realizzativa e nella soddisfazione dell'utente.

Un ponte termico studiato nei minimi dettagli consente anche di capire come relazionarsi con chi dovrà realizzare le chiusure in modo da ridurre le dispersioni. In generale, è più difficile costruire un edificio che progettarlo sulla carta.

Progettare un ponte termico in modo da avere le minime dispersioni non vuol dire che quell'elemento sarà realizzato allo stesso modo. Per gli edifici nuovi, ma in genere per tutte le ristrutturazioni importanti, il termine "correzione" dei ponti termici deve essere sostituito da "accortezza" nella realizzazione. È necessario istruire e seguire passo-passo gli operai che realizzano in opera un edificio con ponti termici quasi nulli. Solo in questo modo è possibile ottenere edifici energeticamente efficienti e confortevoli.

PONTI TERMICI NEGLI EDIFICI ESISTENTI

È difficile evitare del tutto un ponte termico negli edifici esistenti attraverso una ristrutturazione dell'isolamento termico dell'involucro. Rispetto agli edifici nuovi ci sono molti vincoli geometrici e costruttivi. La normativa cerca di indurre a una "correzione" del ponte termico attraverso il confronto con la trasmittanza termica limite media. In sostanza, al fine di correggere un ponte termico, bisogna necessariamente aumentare l'isolamento termico sull'involucro. In alcuni casi questo comporta un peggioramento della situazione facendo aumentare la trasmittanza termica lineica (si veda per esempio il caso in Figura 2 a pag. 26) per alcuni ponti termici (intersezione tra due muri, spigoli, intersezione balcone-muro, ecc.). In queste situazioni, prima di scegliere la soluzione "facile" di intervento solo con la tecnica dell'isolamento termico, è necessario prevedere e studiare soluzioni ad hoc che localizzino il fenomeno e ne riducano gli effetti (taglio termico del balcone, bancali isolati, ecc.).

PRODOTTI SPECIFICI PER RISOLVERE I PONTI TERMICI

Esistono diverse soluzioni innovative per la riduzione dei ponti termici, di seguito ne abbiamo approfondite alcune di particolare interesse.

I MATERIALI ISOLANTI IGROSCOPICI

Alcuni materiali isolanti presentano caratteristiche di igroscopicità più elevate rispetto ad altri. L'igroscopicità di un materiale isolante è un fattore molto importante per le applicazioni edilizie poiché permette di assorbire il vapore acqueo sia presente su una parete degradata dalla muffa, sia presente nell'aria dell'ambiente interno.

L'umidità assorbita dal materiale viene poi rilasciata successivamente quando le condizioni diventano più favorevoli (per esempio quando il riscaldamento è acceso oppure quando c'è un adeguato ricambio dell'aria).

Questi materiali sono costituiti principalmente da silicato di calcio. Tali pannelli sono degli isolanti minerali, non fibrosi, a base di idrati di silicato di calcio, calce, sabbia, cemento, acqua e additivi porizzanti (porosità > 95%).

Un pannello in silicato di calcio (vedi Figura 2) può assorbire acqua fino a 3 volte il suo peso. Inoltre, grazie alla sua elevata alcalinità (pH > 10), il silicato di calcio può considerarsi un antimuffa naturale per lavori di ristrutturazione sul lato interno delle pareti (o soffitti) sia degli edifici esistenti, sia per le nuove costruzioni. Pertanto è ideale per la correzione dei ponti termici nelle zone molto degradate dalla muffa e in particolar modo dall'umidità da condensa.



Figura 2 - Pannello in silicato di calcio a basso spessore per isolamento dall'interno con risoluzione dei problemi di muffa

TAGLIO TERMICO DEL BALCONE

Si tratta dell'inserimento di uno strato isolante tra il balcone e il solaio interno in modo da poter avere una certa continuità dell'isolamento del muro (vedi Figura 3). In commercio ne esistono di diverse tipologie e di diverso materiale. Alcune tipologie presentano dei ferri per poter permettere la continuità dell'armatura tra il solaio interno e il balcone esterno, mentre in altre è possibile inserire i ferri di armatura dopo l'installazione del taglio termico e prima del getto di calcestruzzo. In generale, per garantire un corretto funzionamento della mensola, in corrispondenza del taglio termico si usano materiali che resistono bene sia alla trazione (armatura in acciaio) sia alla compressione (elementi ad alta densità) fornendo comunque un buon isolamento termico.

Da un punto di vista termico, la soluzione garantisce la riduzione del ponte termico di circa il 70-80% rispetto a una soluzione tradizionale (assenza del taglio termico). In alternativa, è possibile risolvere il problema del ponte termico del balcone "staccandolo" dalla struttura muraria e fissandolo o attraverso tiranti posti sul tetto, oppure attraverso dei pilastri.

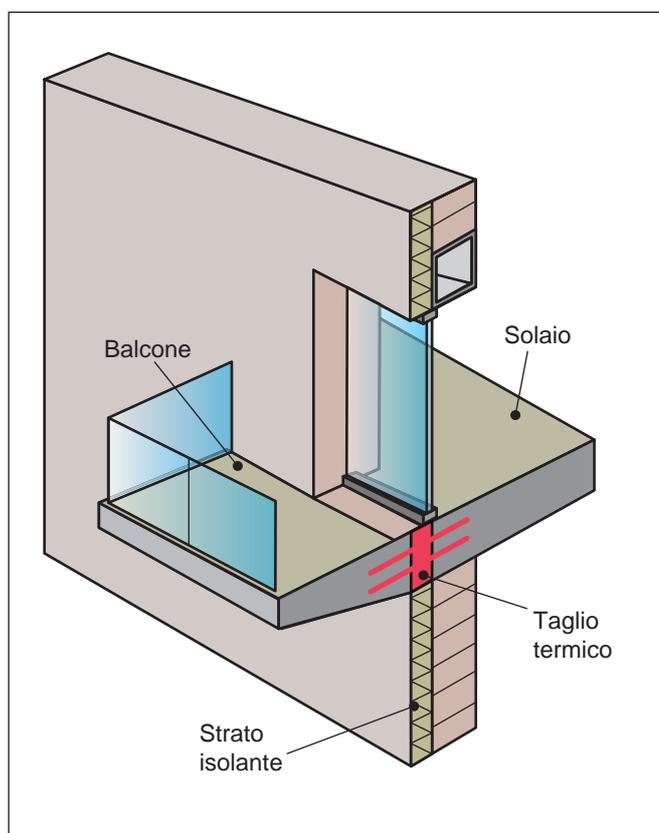


Figura 3 - Taglio termico del balcone

BANCALE CON ISOLAMENTO TERMICO

Il bancale della finestra è uno dei ponti termici per eccellenza. Ci sono varie tecniche per ridurre questo ponte termico. In commercio esiste un bancale realizzato con un'anima in polistirene circondata da calcestruzzo fibrorinforzato e provvisto di armature tradizionali. Tale soluzione garantisce una riduzione del ponte termico del 50-60% rispetto a un bancale tradizionale.

• Rivestimento del bancale

Il "rivestimento del bancale" (vedi Figura 4) è una soglia aggiuntiva da appoggiare a quella preesistente avente uno sporto fino allo spessore dell'eventuale cappotto esterno. Lo sporto ricopre la soglia anche verticalmente in modo da ridurre le dispersioni termiche del ponte termico.

• Controtelai passanti

Un'altra tecnica valida per ridurre il ponte termico del bancale è quella di creare un taglio termico nel bancale (vedi Figura 5). Questo può essere ottenuto o attraverso l'inserimento di materiale isolante (il bancale quindi risulta diviso in due parti) o attraverso l'inserimento di un controtelaio con lo stesso scopo dell'isolante ma con caratteristiche di resistenza meccanica superiori.

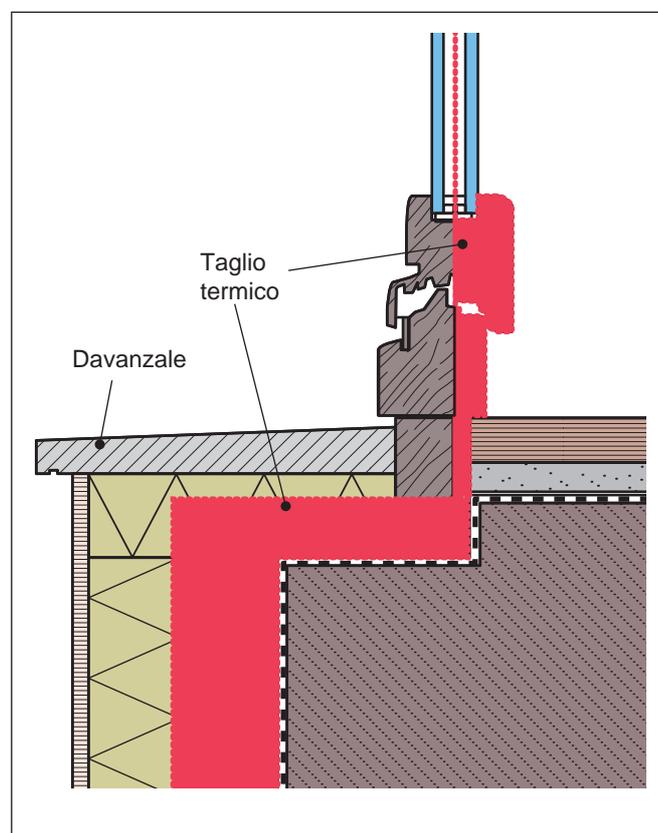


Figura 4 - Riduzione del ponte termico del bancale tramite un rivestimento isolante

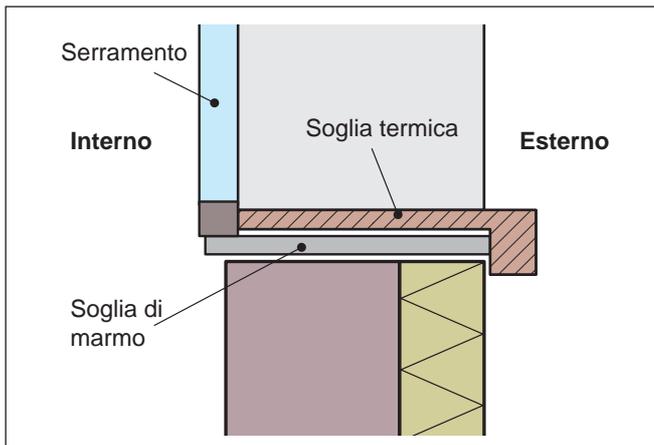


Figura 5 - Taglio termico del bancale mediante il control telaio della finestra

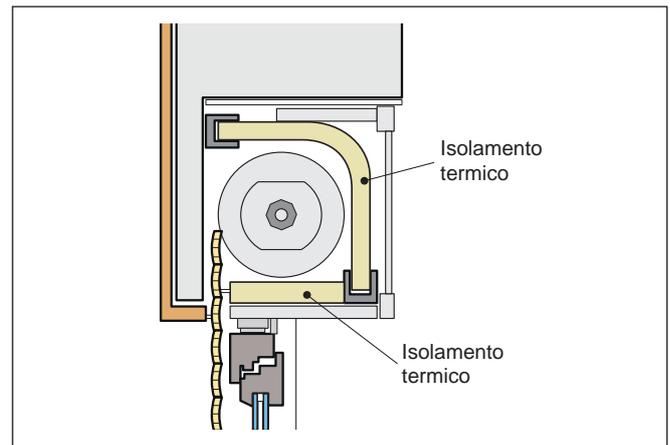


Figura 6 - Cassonetto con isolamento termico al suo interno

CASSONETTO ISOLATO

Il ponte termico del cassonetto è spesso trascurato non perché le dispersioni siano limitate, ma per incapacità o inesperienza. Le dispersioni termiche in prossimità dei cassonetti (specialmente se non isolati) sono elevate soprattutto se si pensa che lo scopo del cassonetto sia solo quello di ospitare il sistema oscurante. Ci sono sistemi che possono ridurre le dispersioni del cassonetto intervenendo sulla zona interna semplicemente inserendo uno strato di isolante (vedi Figura 6).

MATERIALI IPERISOLANTI

I materiali iperisolanti, rispetto agli isolanti di tipo tradizionale (0,030-0,060 W/mK) hanno la peculiarità di avere una conducibilità termica molto bassa (0,013-0,014 W/mK) con spessori ridotti (0,5-3 cm).

Il superisolamento di tali materiali può essere ottenuto o attraverso l'eliminazione dell'aria all'interno del materiale (in questo caso si parla di pannelli isolanti sottovuoto - Vacuum Insulation Panel, VIP) oppure cercando di intrappolarla in pori di dimensione molto piccola (al fine di limitare fortemente gli scambi termici).

Questa ultima tecnica è utilizzata mediante gli areogel o altri materiali nano-porosi.

Questi materiali possono essere usati sia per ridurre le dispersioni sia per correggere eventuali discontinuità termiche (per esempio un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali). Nei casi in cui è possibile intervenire solo sul lato interno, l'uso di questi materiali può essere vantaggioso anche in termini di spazio, poiché si otterrebbe un elevato isolamento termico con esigui spessori.

DEGRADO CAUSATO DAI PONTI TERMICI

I ponti termici influiscono negativamente non solo sui consumi energetici, ma anche sul comfort abitativo. A causa della disomogeneità della distribuzione delle temperature superficiali nell'ambiente abitato, essi determinano, infatti, un abbassamento della temperatura radiante che è un indice del livello di comfort.

La temperatura media radiante può essere definita come la temperatura media delle pareti con le quali il corpo umano scambia energia: più bassa è la temperatura delle pareti e minore è la temperatura media radiante e, di conseguenza, maggiore sarà la quantità di energia che il corpo scambia per irraggiamento verso la parete, aumentando la sensazione "di freddo" come rappresentato qualitativamente in Figura 7.

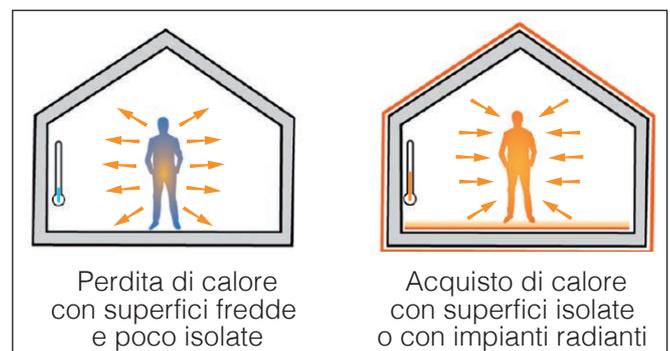


Figura 7 - La sensazione di comfort termico è una condizione soggettiva e dipende non solo dalla temperatura dell'aria, ma anche dalla temperatura radiante. Se le superfici che ci circondano sono fredde, il corpo umano dissipa più calore aumentando la propria sensazione di "freddo".



a)



b)



c)

Figura 8 - a) Macchie di colore scuro in prossimità del ponte termico tra parete e solaio. b) Macchie di colore scuro in prossimità del ponte termico dell'architrave della finestra. c) Macchie di colore scuro in prossimità del ponte termico del davanzale della finestra.

Ai problemi di comfort termico possono seguire anche quelli igienico-sanitari con la formazione di macchie e muffe. Le muffe e le alghe rappresentano elementi di degrado biologico che si moltiplicano mediante microrganismi presenti nell'aria (spore). La presenza delle impurità presenti sulla pittura delle pareti e dei microrganismi nell'aria, aiutati da sfavorevoli condizioni di temperatura e umidità degli ambienti, ne facilita il proliferare.

Inizialmente il degrado è di tipo estetico con formazione di macchie formate da puntini di colore nero che con il tempo progrediscono fino a diventare vere e proprie aree nere come nel caso di Figura 8a, in corrispondenza del ponte termico tra parete e solaio, o delle Figure 8b e 8c in corrispondenza dei ponti termici degli architravi delle finestre e dei davanzali. Il davanzale, solitamente in marmo, presenta una conducibilità termica molto alta ($> 2 \text{ W/mK}$) e crea una discontinuità termica nella parete. Anche se il radiatore aiuta ad aumentare la temperatura, quando l'impianto viene spento, a causa dello scarso livello di isolamento associato a un ridotto spessore della nicchia si possono creare le condizioni favorevoli per la formazione di macchie e condense.

A lungo andare le muffe determinano la polverizzazione e sfogliamento dell'intonaco e un odore sgradevole all'interno degli ambienti.

Infine, da non sottovalutare sono i danni strutturali che i ponti termici potrebbero determinare.

La disomogenea distribuzione delle temperature all'interno del nodo strutturale può provocare, nei casi più gravi, tensioni interne con conseguente degradazione dei materiali che costituiscono il nodo.

PERIZIE TECNICHE IN CASO DI CONTENZIOSI

I danni dovuti alla presenza di ponti termici possono essere causa di contenzioso giuridico ed è quindi necessario svolgere una perizia tecnica.

In primo luogo è bene accertarsi se il danno sia effettivamente da attribuire al ponte termico o ad altri fattori. Ad esempio, spesso confuso con un ponte termico è l'umidità derivante dalla rottura delle tubazioni all'interno delle pareti così come il fenomeno dell'umidità di risalita dovuto invece alla mancanza di adeguata impermeabilizzazione delle strutture controterra. Negli edifici di nuova costruzione alcune volte si evidenziano macchie sulle pareti a opera dell'umidità di costruzione presente nei materiali quando, al termine della costruzione, non viene dato il tempo necessario (in genere qualche mese) all'edificio di asciugare tale umidità.



TUTTA COLPA DEL PONTE TERMICO?

Alcuni aspetti comportamentali contribuiscono ad amplificare i fenomeni di degrado. Tra questi possiamo annoverare:

- **Una cattiva conduzione dell'impianto di riscaldamento.**

L'accensione e spegnimento dell'impianto, in alcuni momenti della giornata, lascia sempre fredde le pareti perimetrali esterne con il rischio di raggiungere la temperatura di rugiada. Sarebbe molto più opportuno un funzionamento differenziato tra il giorno e la notte impostando, ad esempio, una temperatura di 20 °C di giorno (o quando si usa l'edificio) e una temperatura di 18 °C di notte (o quando non si usa l'edificio) al fine di evitare che la temperatura scenda sotto i valori critici.

- **La mancanza di ventilazione degli ambienti.**

Il mancato ricambio d'aria oltre a rappresentare un problema di salubrità impedisce lo smaltimento del vapore che viene prodotto quotidianamente negli ambienti abitati e che in alcuni momenti della giornata può raggiungere valori critici. Per le nuove costruzioni, in classe energetica A, questo fenomeno è meno sentito in quanto spesso è previsto un impianto di ventilazione meccanica controllata VMC con recuperatore di calore.

- **Errato posizionamento del mobilio in aderenza alle pareti.**

Quando i mobili vengono addossati alle pareti esterne, non viene garantita un'adeguata ventilazione delle zone più fredde che sono più facilmente soggette a fenomeni di condensazione superficiale.



La verifica visiva, unitamente all'esperienza del tecnico e all'uso di opportune strumentazioni, consente di fare un primo screening. La documentazione è uno strumento essenziale di supporto per il tecnico, i cui contenuti devono essere verificati rispetto alla configurazione in sito e all'esecuzione del cantiere.

Nel caso di ponti termici lineari come balconi o finestre la zona ammalorata si estende per tutta la lunghezza del ponte termico mentre sono inalterate le altre parti. Visivamente si nota una macchia con un alone, come se fosse una goccia d'olio su una tavola, che segue l'andamento del ponte termico. La macchia è delineata rispetto al resto della muratura e ha una zona "più bagnata" che coincide con la dimensione interna del ponte termico ma non presenta fenomeni di percolazione o tracce di gocciolamento. Queste ultime sono dovute ad altri fenomeni di degrado o alla mancanza di tenuta all'acqua degli elementi edilizi. La verifica della temperatura superficiale al tatto, ovvero appoggiando la mano in prossimità del ponte termico e della struttura, consente di valutare in maniera empirica la differenza di temperatura e di confermare la presenza del ponte termico. L'uso della termocamera consente di individuare la distribuzione delle temperature superficiali e l'estensione del ponte termico.

Un'ulteriore verifica qualitativa strumentale in sito può essere eseguita attraverso il termo-igrometro al fine di valutare il livello di umidità presente nel muro.

Il termo-igrometro è costituito da un circuito elettrico aperto che viene chiuso quando viene messo a contatto con l'acqua contenuta all'interno della struttura muraria. L'acqua imbibita nella struttura muraria funziona come conduttore elettrico e, per tale ragione, lo strumento misura la resistenza elettrica e/o l'intensità di corrente in relazione alla quantità di acqua contenuta nella muratura.

Gli strumenti sopracitati non forniscono dati quantitativi sul ponte termico in termini di prestazione energetica e/o di valori di trasmittanze termiche lineiche o puntuali. Queste analisi possono essere fatte solo mediante uso di software agli elementi finiti dopo aver ricostruito la stratigrafia dell'involucro e modellato correttamente il nodo strutturale. La documentazione tecnica (Legge 10/91, disegni, planimetrie, ecc.) è uno strumento di supporto essenziale ma i contenuti dovranno essere verificati, ad esempio attraverso carotaggi, rispetto alla reale configurazione in sito. In questo modo il tecnico è in grado di stimare il danno inteso come riduzione della prestazione energetica, o errata valutazione della prestazione energetica, a causa di un ponte termico non correttamente calcolato.

3.

TECNICHE DI INTERVENTO

Dopo aver spiegato il concetto di correzione dei ponti termici, in questo ultimo capitolo faremo un'analisi qualitativa delle tecniche progettuali, più usate per la correzione dei ponti termici con lo scopo di dare al progettista, ma anche agli applicatori, degli spunti utili di riflessione per la propria attività.

Sottolineiamo però che, poiché l'analisi dipende dalle "condizioni al contorno" dell'edificio quali geometria e dimensioni dell'involucro, stratigrafia e tipologie di materiali e, infine, fascia climatica di riferimento, i risultati si riferiscono ai modelli studiati e non potranno essere generalizzati.

PROCEDURA DI CALCOLO

I calcoli sono svolti, per mezzo di un software con simulatore agli elementi finiti, in accordo con le norme UNI EN 10211:2008 e UNI EN 13788:2013 rispettivamente per le trasmittanze termiche lineiche e il rischio formazione muffa. Inoltre sono state fatte le seguenti ipotesi:

- regime stazionario;
- ponti termici riferiti alle misure interne nette;
- località di riferimento Bologna;
- temperatura interna dell'aria pari a 20 °C e temperatura esterna pari a 0 °C;
- per ogni caso studio si inizierà da una condizione di partenza (non isolata) e si cercherà di correggerla trovando la migliore soluzione. Si evidenzieranno le variazioni percentuali di trasmittanza termica e di trasmittanza termica lineica e verrà inoltre evidenziato il punto del nodo strutturale in cui la temperatura superficiale è a rischio condensa;
- in relazione alla verifica del rischio di formazione di muffa e condensa sono state utilizzate come condizioni climatiche esterne rispettivamente le temperature medie mensili e umidità relative dell'aria esterna in accordo alla UNI EN 10349-1:2016, mentre per quelle interne rispettivamente una temperatura dell'aria di 20 °C e una umidità relativa del 65% in accordo alla UNI EN 13788:2013;
- temperatura di rugiada T_r pari a 13,2 °C;
- temperatura critica per la formazione delle muffe $T_{critica}$ pari a 16,7 °C.

Le conducibilità termiche utilizzate sono da considerarsi di riferimento per ogni materiale usato nelle simulazioni; ogni altro materiale con caratteristiche simili può avere prestazioni termiche maggiori o minori rispetto a quelle riportate.

Per ogni modello non sono state considerate le finiture aventi esigui spessori (5-15 mm), quali intonaco interno o esterno, rinzaffo livellatore di verticalità della muratura, malta cementizia per l'incollaggio di pannelli termoisolanti, malta cementizia per la rasatura con rete di rinforzo, rivestimento minerale base di silicato di potassio, pavimentazione, adesivo cementizio per pavimentazione, materassino acustico anticalpestio, ecc. Tali materiali sono stati esclusi poiché lo scopo della trattazione è valutare l'incidenza del ponte termico per le soluzioni con isolamento termico rispetto a quelle nelle quali è assente, e non ottenere un valore preciso della trasmittanza termica lineica. Nel caso in cui si volesse migliorare la precisione dei calcoli si consiglia di modellare tutti gli strati (comprese le finiture) che costituiscono il ponte termico.

In particolare saranno studiati:

- ponte termico d'angolo tra due pareti verticali;
- ponte termico di un pilastro installato in una parete verticale;
- ponte termico di un balcone;

- ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un basamento su terreno;
- ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un solaio interpiano;
- ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un solaio di copertura;
- ponte termico di un bancale di una finestra;
- ponte termico di un cassonetto.

PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA DUE PARETI VERTICALI

Il modello si riferisce a un ponte termico d'angolo ottenuto dalla intersezione tra due pareti verticali esterne. In Figura 1a è riportato lo schema geometrico del modello privo di isolamento termico, mentre in Figura 1b è riportato lo stesso modello, ma opportunamente modificato. In particolare, nella soluzione modificata è stato aggiunto uno strato di isolamento termico sul lato esterno della parete dello spessore di 8 cm.

Tabella 1 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,909
Isolamento termico in polistirene estruso XPS	0,08	0,040	2,000

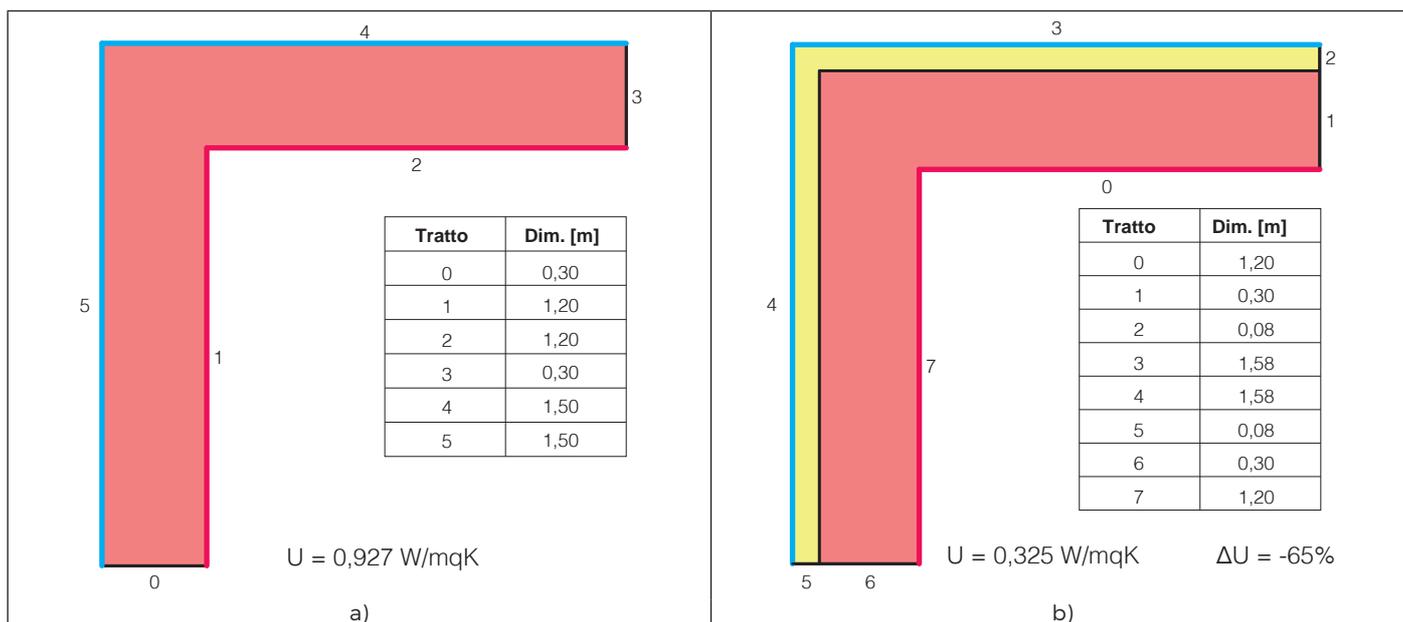


Figura 1 - a) Stratigrafia di un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali non isolate, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali isolate dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

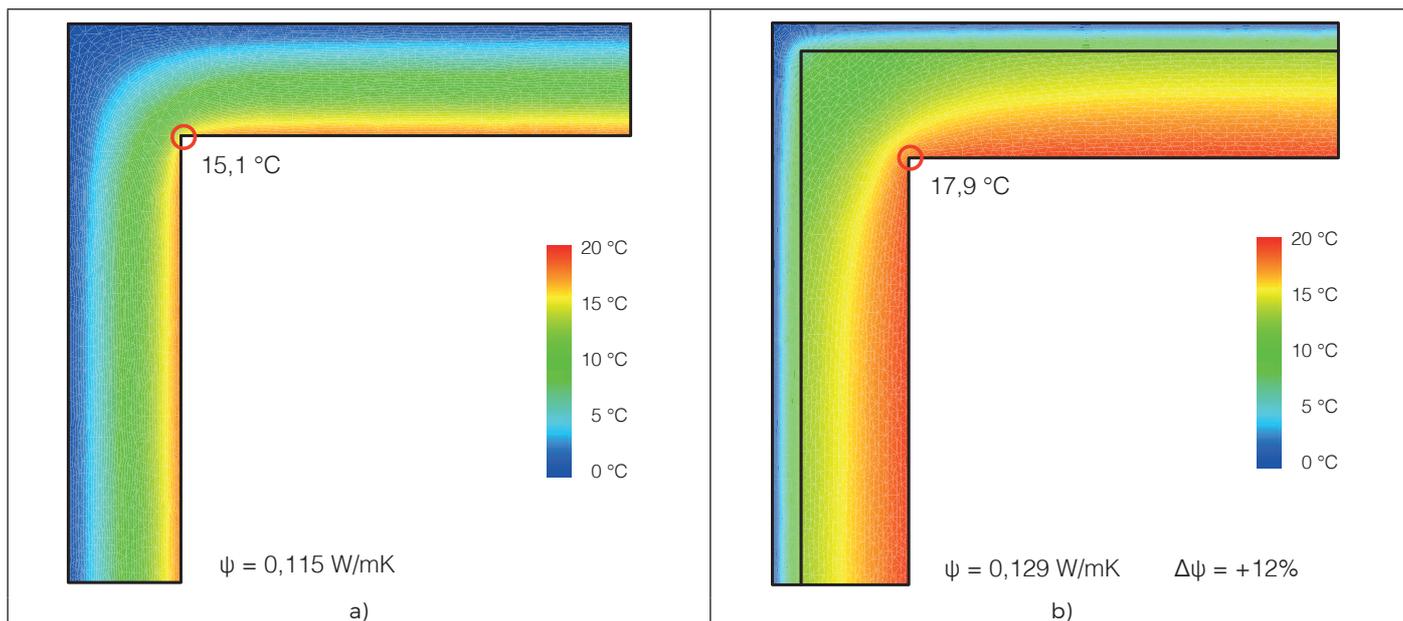


Figura 2 - a) Ponte termico d'angolo tra due pareti verticali non isolate, $\psi = 0,115 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico d'angolo tra due pareti verticali isolate all'esterno, $\psi = 0,129 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

Con questa modifica si nota che la trasmittanza termica della parete si riduce del 65% (da 0,927 a 0,325 W/mqK), mentre la trasmittanza termica lineica aumenta del 12% (passando da un valore di 0,115 a 0,129 W/mK).

Il fatto che aumenti la trasmittanza termica lineica non deve far supporre un peggioramento della situazione o una "non correzione" del ponte termico. Si noti che le prestazioni termiche della situazione modificata sono aumentate dato che la trasmittanza termica è diminuita (- 65%) e la temperatura in prossimità del ponte termico è aumentata di oltre 2 °C (passando da 15,1 a 17,9 °C) come riportato rispettivamente nelle Figure 2a e 2b.

In alcuni casi, un aumento dell'isolamento termico può avere come conseguenza una maggiore incidenza del ponte termico, ma questo non implica delle maggiori dispersioni termiche.

Gli aspetti da tenere in considerazione per un cappotto esterno sono legati soprattutto alla corretta posa in opera. In genere prima di installare i pannelli isolanti sulla muratura, la buona prassi prevede la posa di uno strato di rinzafo (5-10 mm) che ha lo scopo di livellare la verticalità della muratura e uno strato di malta cementizia per l'incollaggio di pannelli termoisolanti (5 mm). La finitura di un cappotto esterno può essere completata con una rasatura provvista di una rete di rinforzo e un



OCCHIO ALLA POSA!

Che si tratti di isolamento dall'interno o dall'esterno, è necessario fare molta attenzione alla posa dell'isolante nella zona d'angolo della parete poiché nel tempo potrebbero comparire piccole lesioni sulla superficie legate alla differenza di dilatazione termica dei materiali. La presenza di una rete di rinforzo sotto l'intonaco e, in generale, l'osservanza delle regole della posa a regola d'arte dei cappotti, potrebbe aiutare ad evitare tali fenomeni. Inoltre, sarebbe utile garantire una perfetta aderenza tra lo strato isolante e la parete in modo da evitare eventuali spazi di aria che potrebbero agevolare condense di vapore o infiltrazioni di acqua.



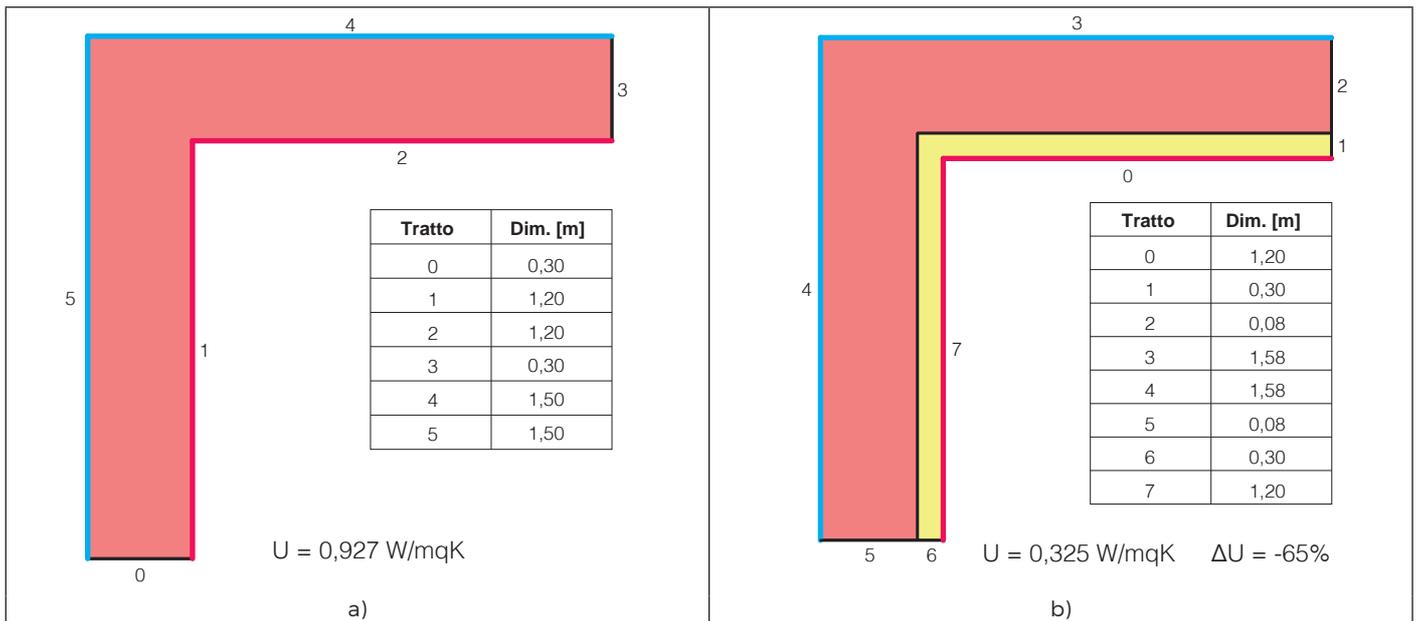


Figura 3 - a) Stratigrafia di un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali non isolate, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico d'angolo tra due pareti verticali isolate dall'interno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

rivestimento minerale di silicato di potassio per la protezione esterna.

Nel caso di isolamento dall'interno con pari spessore, vedi Figura 3, la trasmittanza termica della parete rimane invariata ma, come riportato in Figura 4, si ottiene una riduzione della trasmittanza termica lineica del 60% (da 0,115 a 0,046 W/mK).

Inoltre nella Figura 4b, si nota un aumento di oltre 3 °C della temperatura superficiale in prossimità del ponte termico dato che si superano i 18 °C. Si precisa che per la soluzione di partenza (vedi Figura 1a) la verifica della condensa in prossimità del ponte termico è negativa, mentre per le altre due (vedi Figure 1b e 3b) risulta positiva.

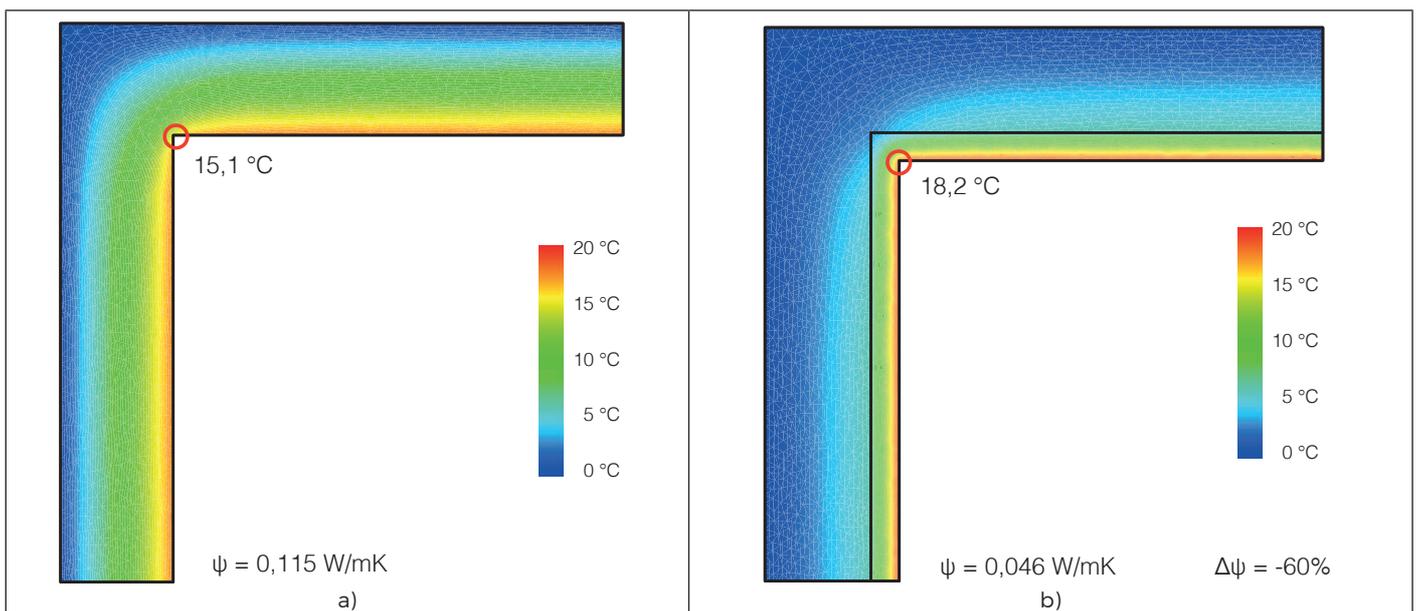


Figura 4 - a) Ponte termico d'angolo tra due pareti verticali non isolate, $\psi = 0,115 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico d'angolo tra due pareti verticali isolate dall'interno, $\psi = 0,046 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO DI UN PILASTRO INSTALLATO IN UNA PARETE VERTICALE

CASO 1) MURATURA MONOSTRATO

Il caso si riferisce a un ponte termico legato alla presenza di un pilastro in cemento armato in una parete verticale esterna. In Figura 5a è riportato lo schema geometrico della soluzione in assenza di isolamento termico, mentre in Figura 5b è riportato lo stesso modello opportunamente modificato.

In particolare è stato aggiunto un isolamento termico sul lato esterno della parete dello spessore di 8 cm. Con questa modifica si nota che la trasmittanza termica della sola parete, senza considerare il pilastro e il relativo ponte termico, si riduce del 65% (da 0,927 a 0,325 W/mqK), mentre la trasmittanza termica lineica diminuisce dell'87% (da 0,302 a 0,040 W/mK) come evidenziato in Figura 6. Le prestazioni della parete con il pilastro sono aumentate notevolmente osservando anche la temperatura minima in prossimità del pilastro che raggiunge quasi i 19 °C evitando il rischio di formazione sia di muffa sia di condensa.

Tabella 2 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico di un pilastro installato in una parete verticale in laterizio

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,909
Isolamento termico in polistirene estruso XPS	0,08	0,040	2,000
Pilastro in cemento (0,30 · 0,30 m)	-	0,870	0,345

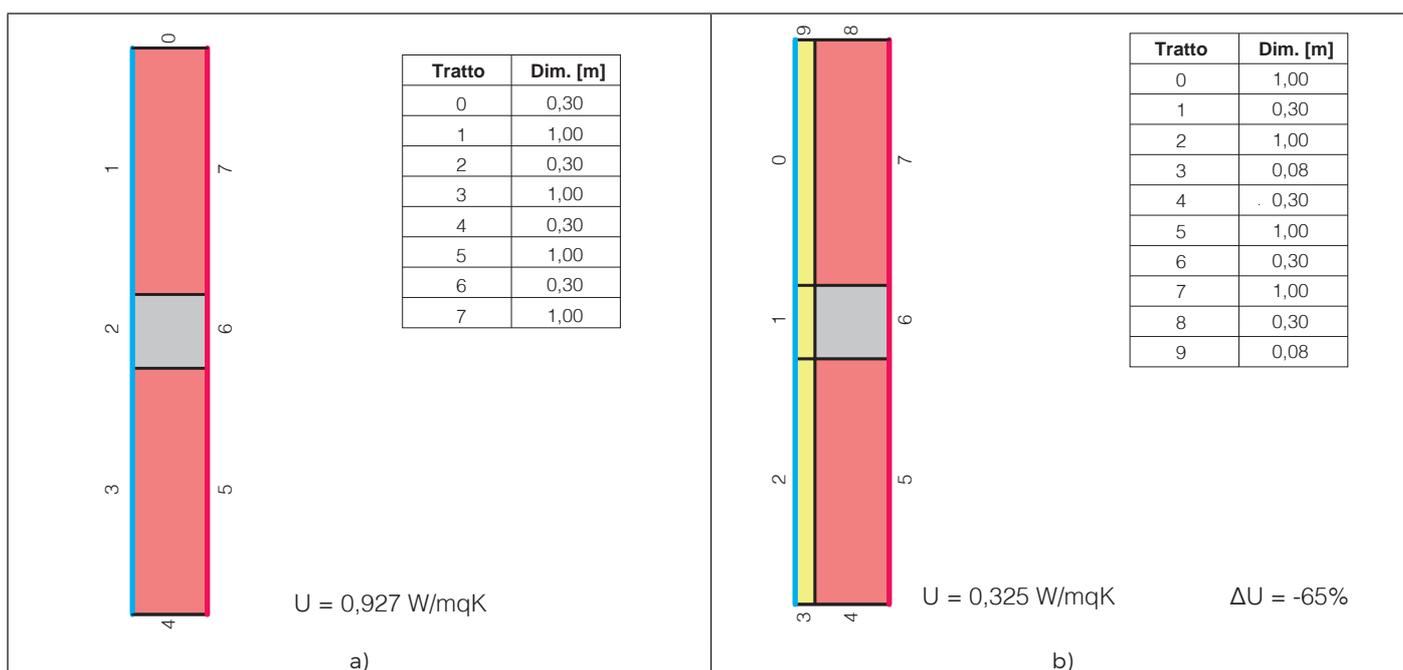


Figura 5 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro (0,30 · 0,30) in una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento).
 b) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro (0,30 · 0,30) in una parete isolata dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

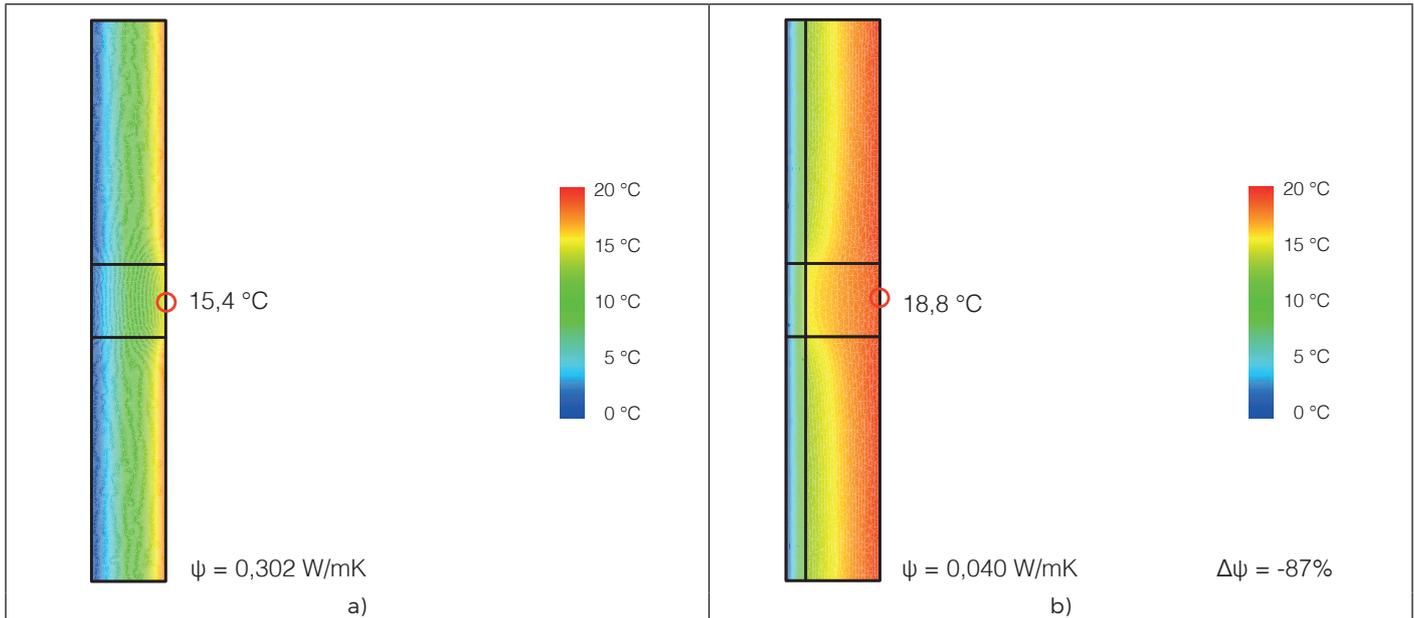


Figura 6 - a) Ponte termico di un pilastro (0,30 · 0,30) in una parete non isolata, $\psi = 0,302 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un pilastro (0,30 · 0,30) in una parete isolata esternamente, $\psi = 0,040 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

CASO 2) MURATURA A CASSETTA CON ISOLAMENTO IN INTERCAPEDINE

Nel caso di parete a “cassetta” le dispersioni del ponte termico sono influenzate dalla modalità di posa dell’isolamento termico in prossimità del pilastro.

Al fine di quantificare l’incidenza del ponte termico in funzione della modalità di posa dell’isolamento termico sul pilastro, si riporta nella Figura 7a a pag. 30 la soluzione “poco accurata” con pilastro di dimensioni 0,40 · 0,45 m, privo di isolamento termico, mentre in

Figura 7b a pag. 30 la stessa soluzione “migliorata”, con il pilastro ricoperto da uno strato di isolamento termico di 4 cm sul lato esterno; in questo caso le dimensioni del pilastro si riducono a 0,40 · 0,41 m. In Tabella 3 sono riportate le caratteristiche termofisiche delle soluzioni simulate.

Nella configurazione “migliorata” la trasmittanza termica lineica si riduce del 38% (da 0,509 a 0,313 W/mK), mentre la temperatura superficiale in prossimità del pilastro aumenta di circa 1 °C (da 16,6 a 17,5 °C) come evidenziato nelle Figure 8a e 8b a pag. 30.

Tabella 3 - Caratteristiche termofisiche dei materiali del caso di un ponte termico di un pilastro installato in una parete a “cassetta” in laterizio

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio forato	0,12	-	0,758
Isolamento termico in polistirene espanso in intercapedine	0,08	0,040	2,000
Muratura in laterizio forato	0,25	-	0,364
Pilastro in cemento (0,40 · 0,45 m)	-	0,87	0,345
Isolamento termico in polistirene estruso XPS sul pilastro	0,04	0,040	1,000

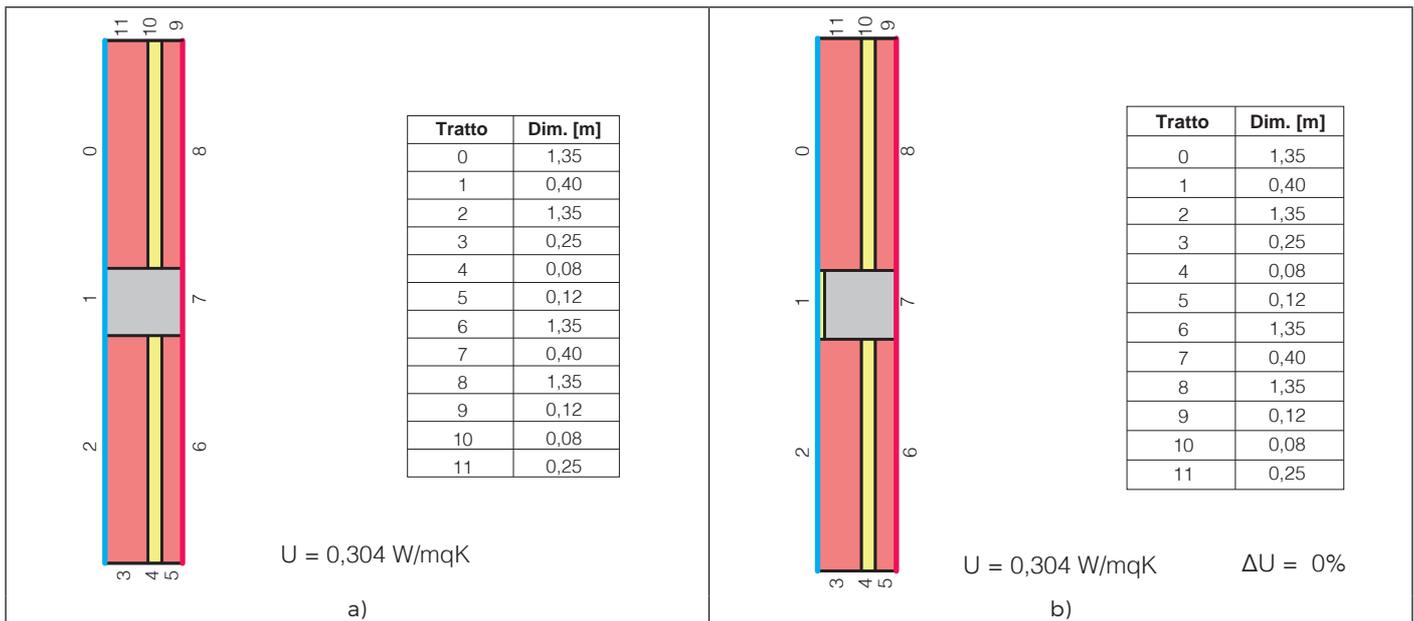


Figura 7 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro (0,40 · 0,45) in una parete a cassetta isolata, U = 0,304 W/mqK (riferimento). b) Stratigrafia relativa a un ponte termico di un pilastro (0,40 · 0,41) isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, U = 0,304 W/mqK (soluzione modificata).

In entrambe le soluzioni non c'è rischio di muffa e condensa ma, date le migliori prestazioni termiche, si preferisce usare la soluzione della Figura 7b rispetto a quella della Figura 7a. **Per migliorare le prestazioni è necessario prolungare lo strato di isolamento termico esterno del pilastro su entrambi i lati (in genere di una lunghezza pari alla larghezza del pilastro, ma è possibile valutarla in**

maniera più precisa con un calcolo numerico agli elementi finiti) come riportato nella Figura 9b. Osservando i risultati delle simulazioni della configurazione modificata in Figura 10b e confrontandoli con quelli precedenti (vedi Figura 10a) si nota una notevole riduzione della trasmittanza termica lineica (-42%) fino a raggiungere il valore di 0,183 W/mK partendo dal valore di 0,313 W/mK.

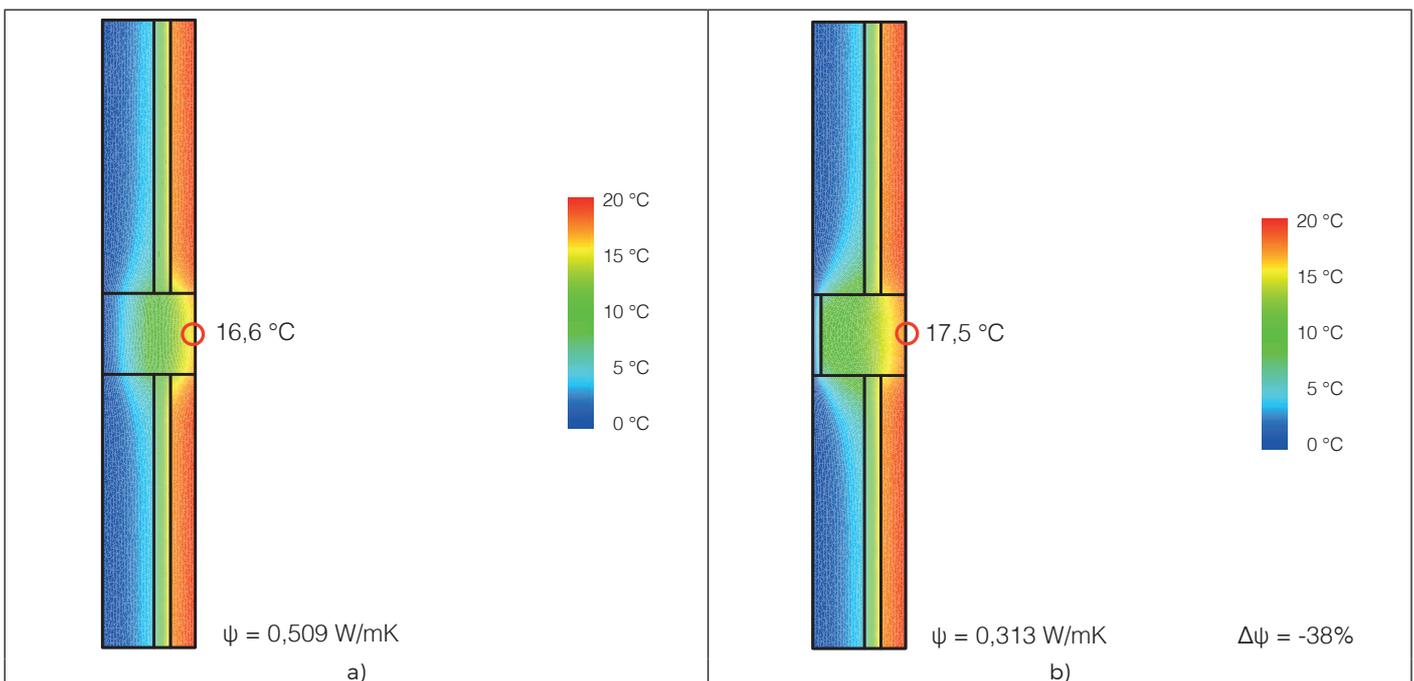


Figura 8 - a) Ponte termico di un pilastro in una parete a cassetta isolata, ψ = 0,509 W/mK (riferimento). b) Ponte termico di un pilastro isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, ψ = 0,313 W/mK (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

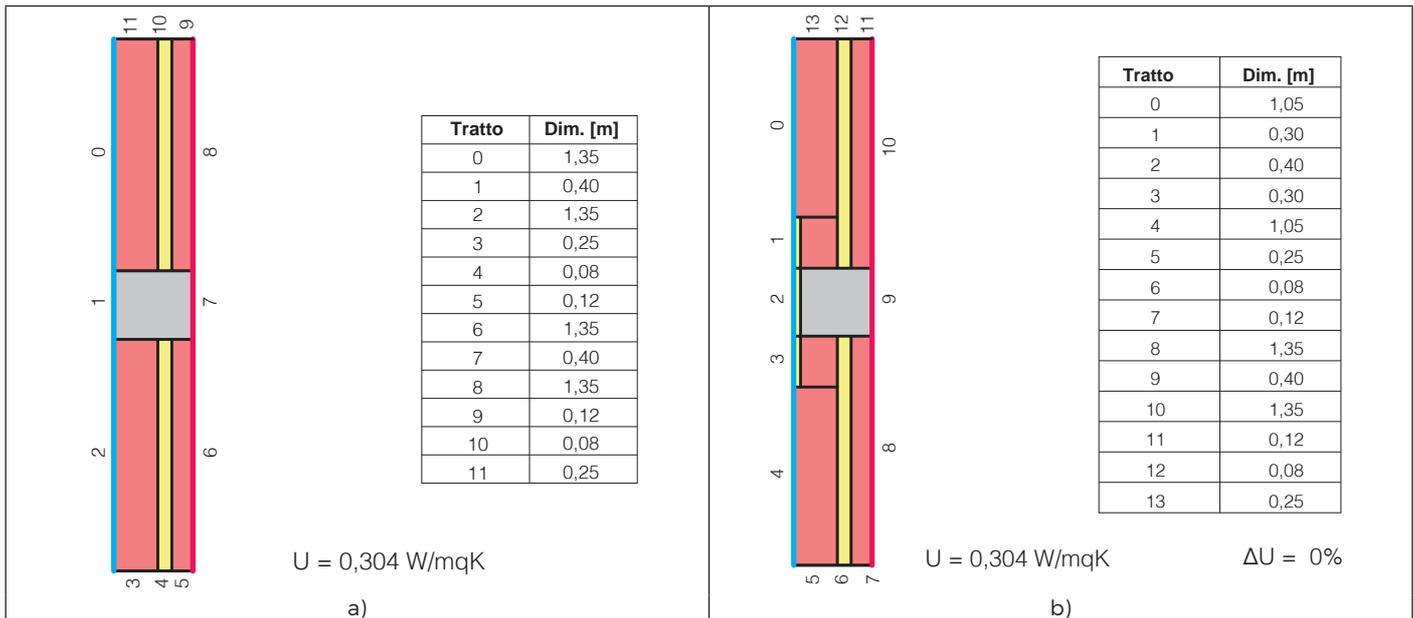


Figura 9 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $U = 0,304 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro maggiormente isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $U = 0,304 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Una soluzione molto accurata, anche se non di facile realizzazione, sarebbe quella di isolare anche i fianchi del pilastro in modo da avere la continuità dell'isolamento come in Figura 11b a pag. 32.

I risultati mostrano che con tale accorgimento si ottengono dei risultati simili alla soluzione prece-

dente (Figura 10b). Si nota infatti dalla Figura 12b (a pag. 32), che il valore della trasmittanza termica lineica è di $0,200 \text{ W/mK}$, di poco superiore al precedente della Figura 10b. Le due soluzioni sono praticamente quelle che attualmente vengono utilizzate più frequentemente per risolvere il ponte termico del pilastro in muratura.

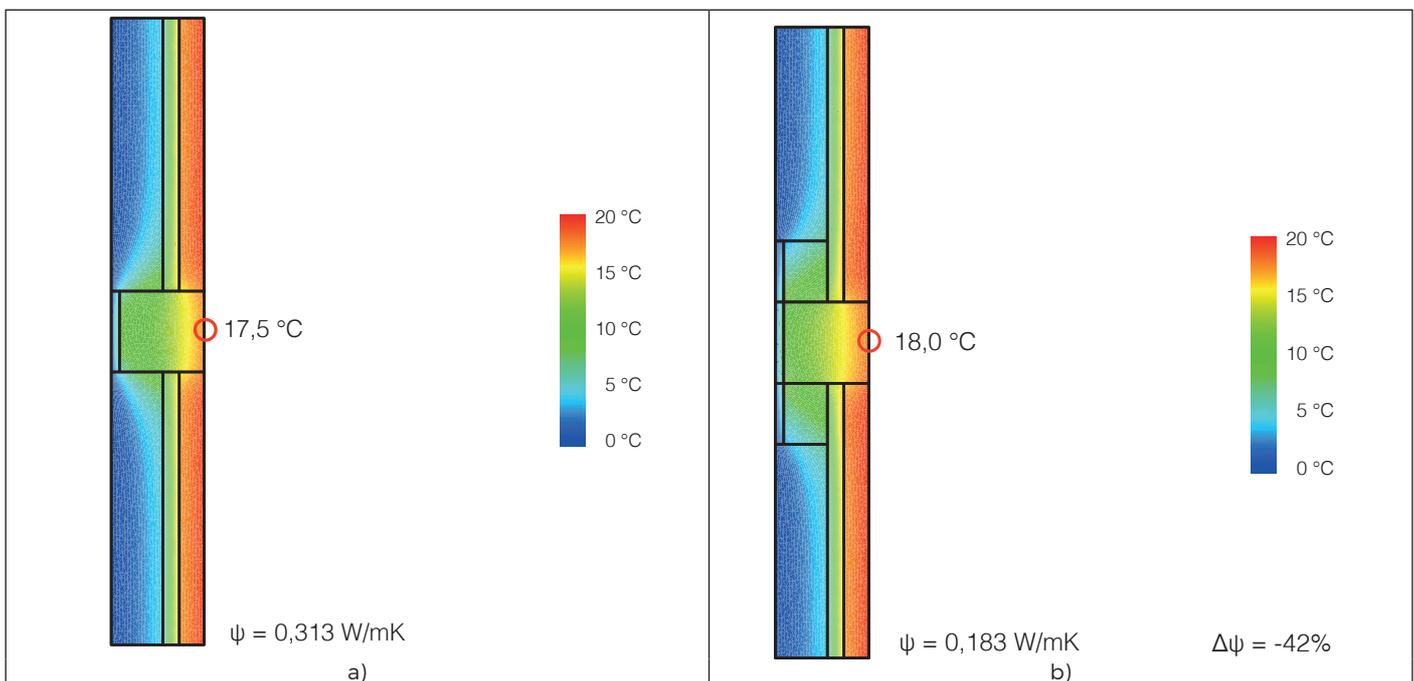


Figura 10 - a) Ponte termico di un pilastro isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $\psi = 0,313 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un pilastro maggiormente isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $\psi = 0,183 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

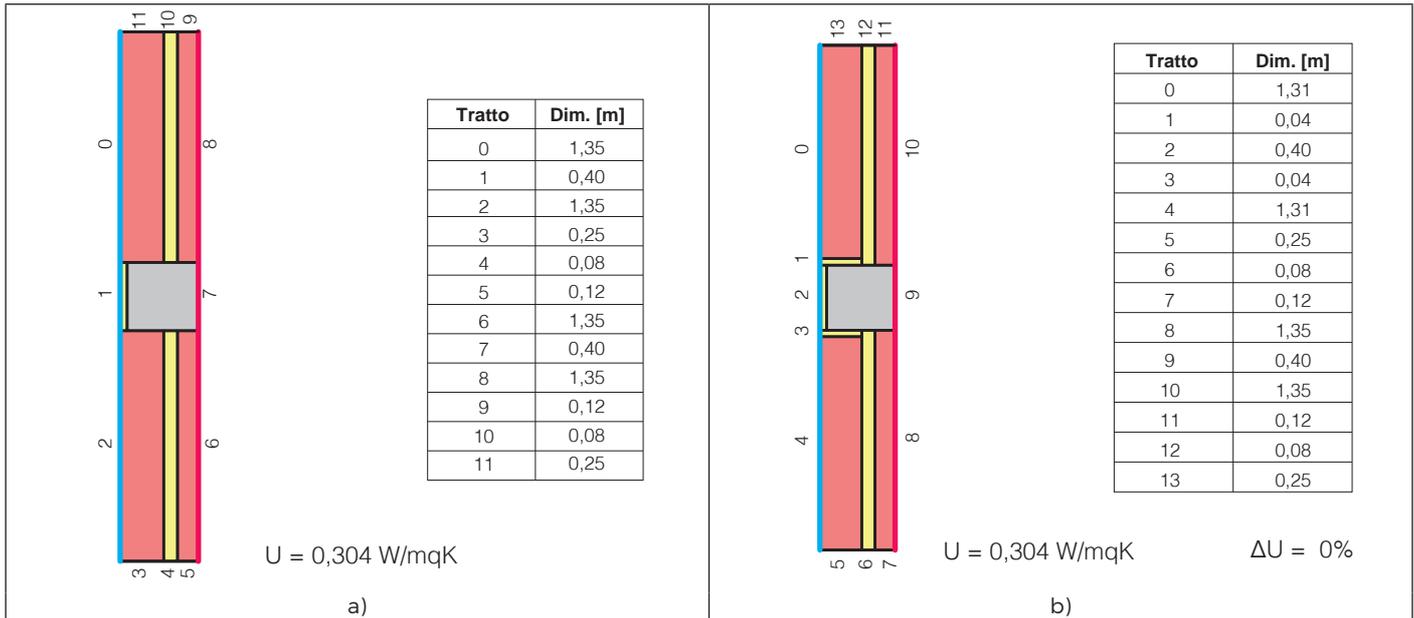


Figura 11 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $U = 0,304 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un pilastro in una parete a cassetta con isolamento continuo, $U = 0,304 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

In genere si preferisce utilizzare la prima soluzione (Figura 9b) per semplicità e velocità di messa in opera.

Uno dei problemi che potrebbero evidenziarsi nel tempo è quello delle fessurazioni tra l'isolamento

termico e la muratura sul lato esterno in prossimità del pilastro dovute alle diverse dilatazioni termiche dei materiali.

Sarebbe meglio utilizzare una rete di rinforzo sotto l'intonaco per evitare tali problemi estetici.

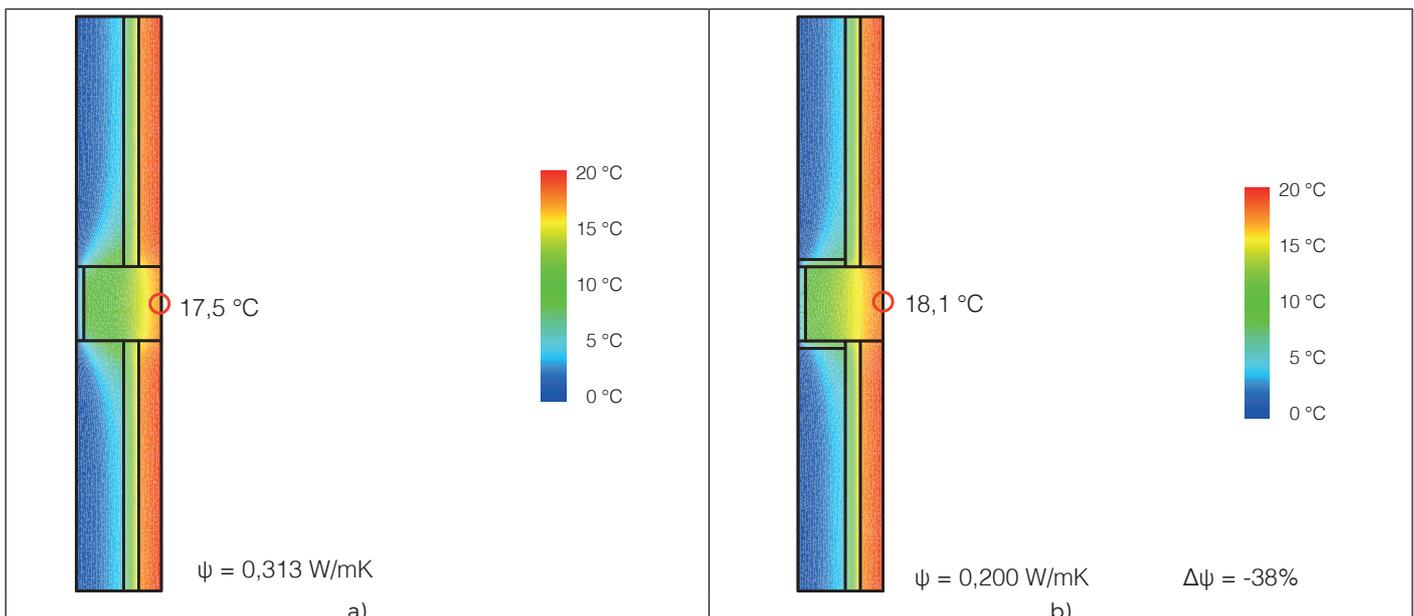


Figura 12 - a) Ponte termico di un pilastro isolato dall'esterno in una parete a cassetta isolata, $\psi = 0,313 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un pilastro in una parete a cassetta con isolamento continuo, $\psi = 0,200 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO DI UN BALCONE

Il balcone (aggetto orizzontale) è uno tra i ponti termici più difficile da risolvere. Esso è dovuto sia a una discontinuità di tipo geometrico sia di tipo termico (compenetrazione della soletta all'interno della muratura). Si riporta in Figura 13a una muratura monostrato in laterizio alveolato con balcone e in Figura 13b la stessa parete con cappotto in polistirene da 8 cm. L'isolamento a cappotto com-

porta una riduzione della trasmittanza termica del 65% (da 0,927 a 0,325 W/mqK), mentre la trasmittanza termica lineica diminuisce solo del 9% (da 0,617 a 0,561 W/mK) come si evince dalle Figure 14a e 14b. La temperatura superficiale nel punto critico aumenta solo di poco più di 1 °C (da 15,3 a 16,7 °C, vedi Figura 14b). Tale aumento però, non è sufficiente a garantire l'assenza di formazione di muffa e condensa (per la località analizzata di Bologna) e pertanto necessita di ulteriori approfondimenti e modifiche progettuali.

Tabella 4 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico di un balcone

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,909
Isolamento termico in polistirene estruso XPS	0,08	0,040	2,000
Pannello isolante di polistirene espanso sinterizzato per il pavimento	0,08	0,040	2,000
Solaio in latero cemento	0,30	-	0,370
Soletta esterna in cemento	0,24	1,200	0,200
Isolamento termico in polistirene estruso XPS sul balcone	0,04	0,040	1,000
Dis-connettore termico	0,08	0,04	2,000

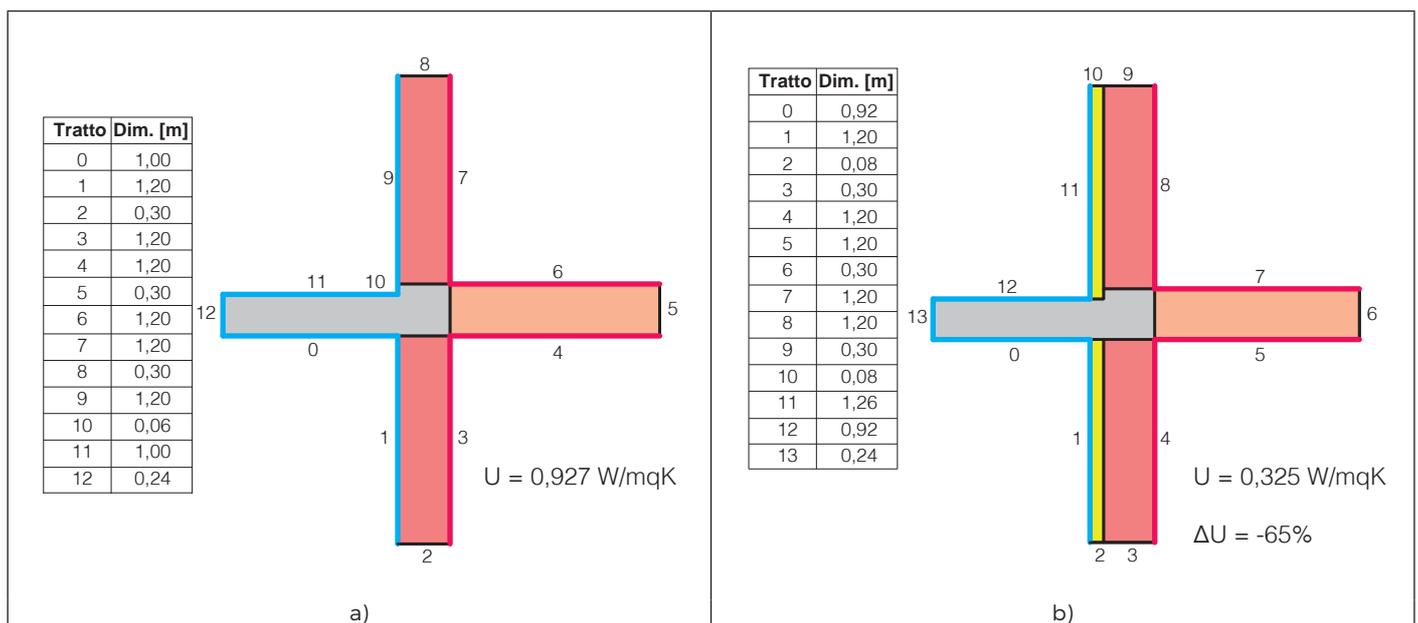


Figura 13 - a) Stratigrafia di un balcone in una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

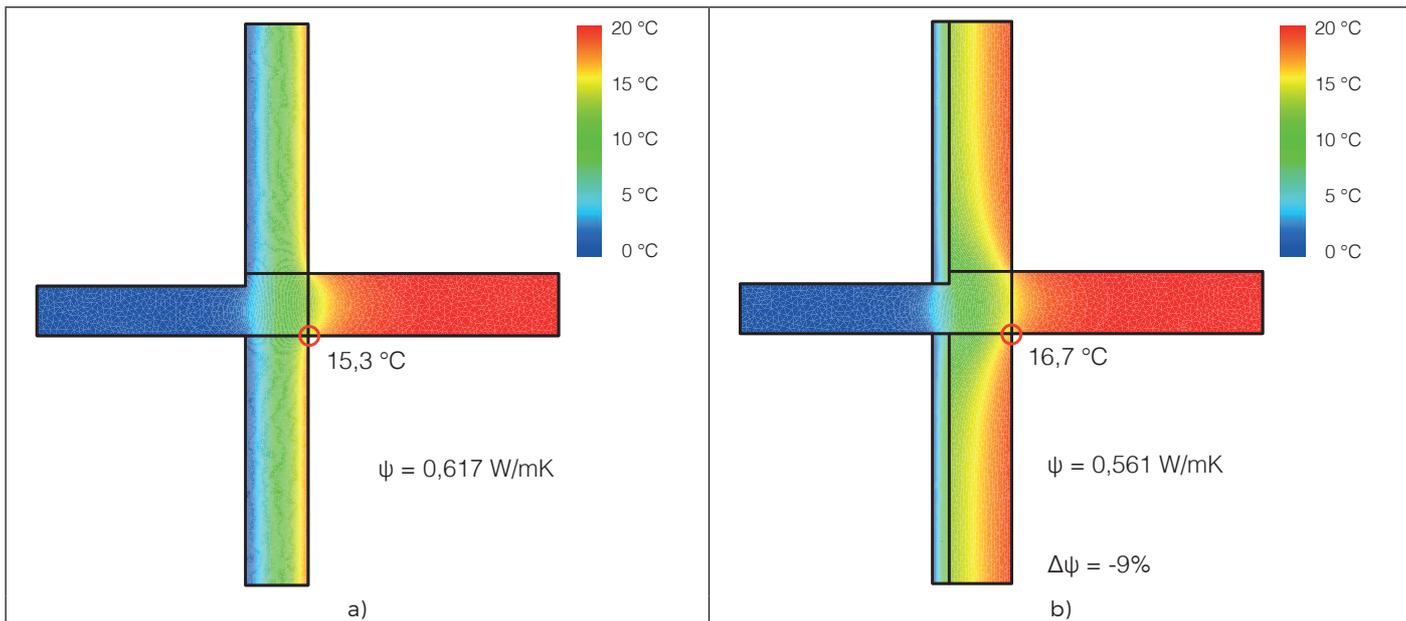


Figura 14 - a) Ponte termico di un balcone in una parete non isolata, $\psi = 0,617 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno, $\psi = 0,561 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

Una soluzione per gli edifici di nuova costruzione è quella di isolare, oltre alla parte esterna, anche l'intradosso del solaio di separazione, posizionando l'isolante termico tra il sottofondo e il massetto di finitura (massetto bistrato). Utilizzando uno spessore di 8 cm di XPS e confrontandolo con la soluzione di riferimento non isolata (vedi Figura 15)

si nota come, la presenza di un strato di isolamento termico sul pavimento, comporta un ulteriore abbassamento della trasmittanza termica lineica del 14% (da 0,617 a 0,532 W/mK) come riportato rispettivamente nelle Figure 16a e 16b. Tuttavia con tale soluzione non si hanno apprezzabili miglioramenti della temperatura superficiale

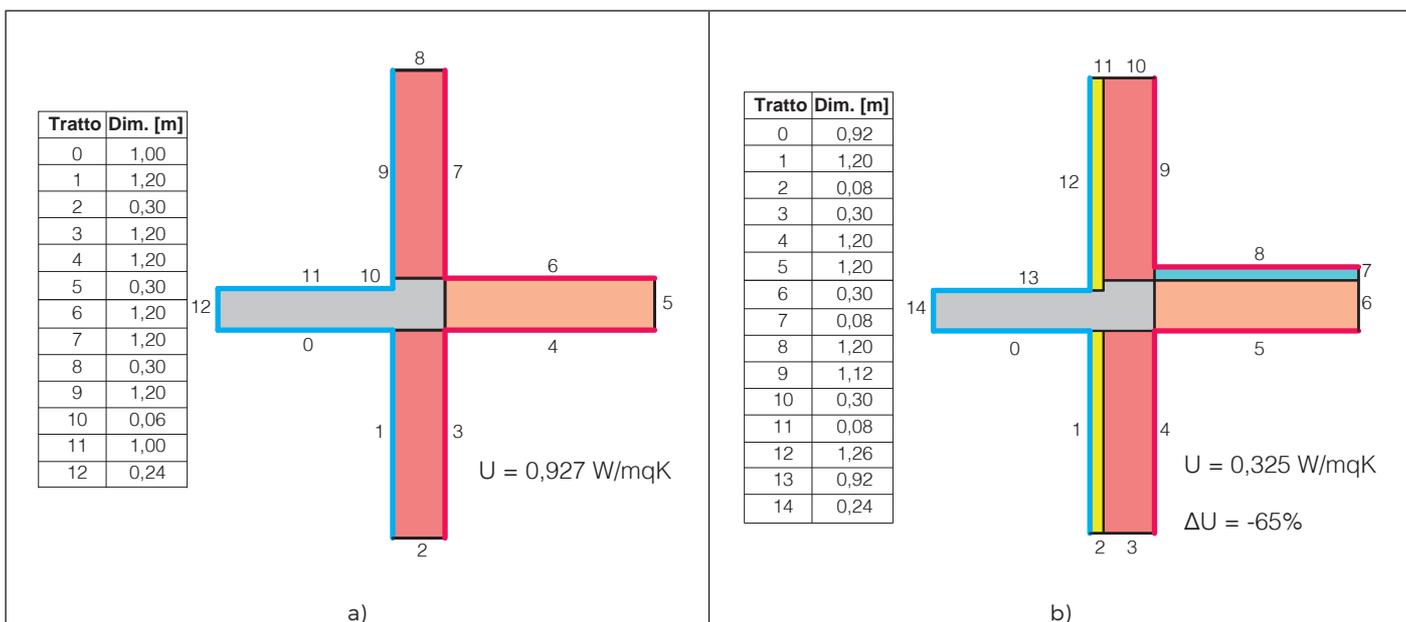


Figura 15 - a) Stratigrafia di un balcone in una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno e pavimento isolato, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

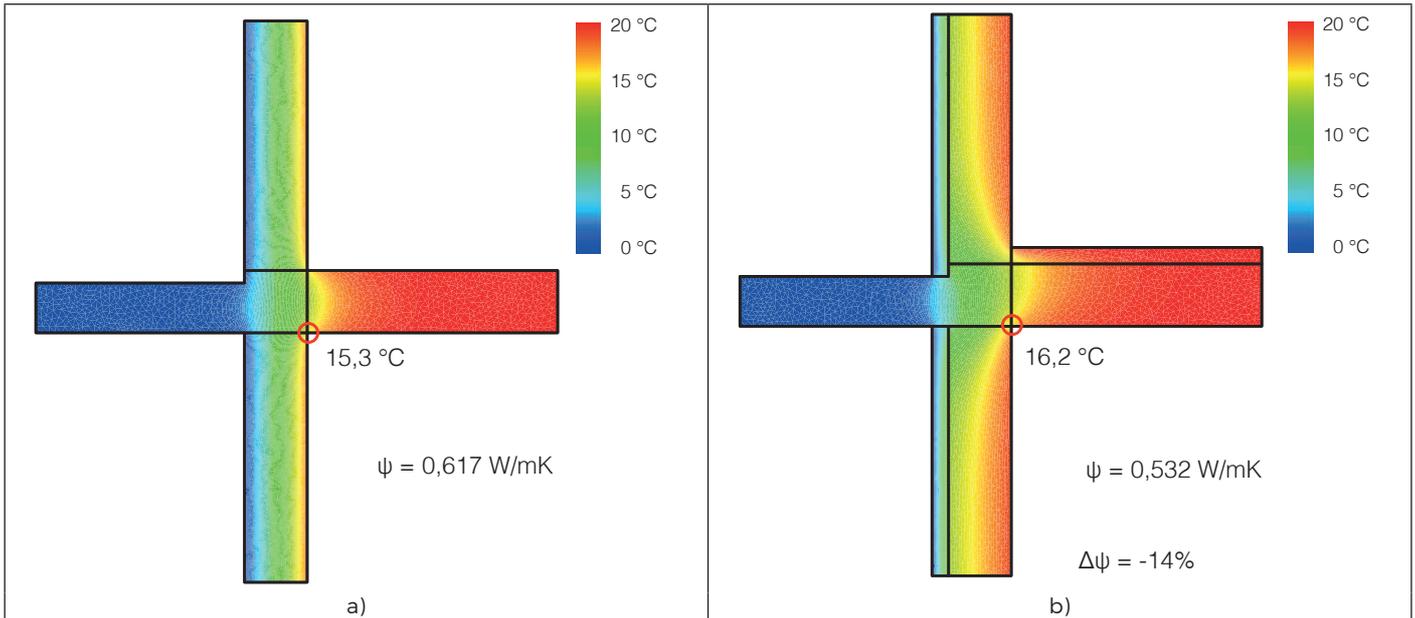


Figura 16 - a) Ponte termico di un balcone in una parete non isolata, $\psi = 0,617 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno e pavimento isolato, $\psi = 0,532 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

in prossimità del ponte termico, anzi i risultati mostrano un peggioramento rispetto alla soluzione di Figura 14b. Anche per questa nuova soluzione esiste il rischio di formazione di muffa e condensa in prossimità del ponte termico. **La soluzione più usata per la riduzione delle dispersioni termiche prevede un isolamento continuo sul lato esterno parete-balcone come riportato in Figura 17b.**

Osservando i risultati in Figura 18b a pag. 36 si nota che la trasmittanza termica lineica si riduce del 38% rispetto alla soluzione precedente (isolamento esterno sulla parete e sull'intradosso del solaio) fino ad arrivare al valore di $0,351 \text{ W/mK}$, mentre la temperatura superficiale supera i 17 °C scongiurando i problemi legati alla formazione di muffa e condensa.

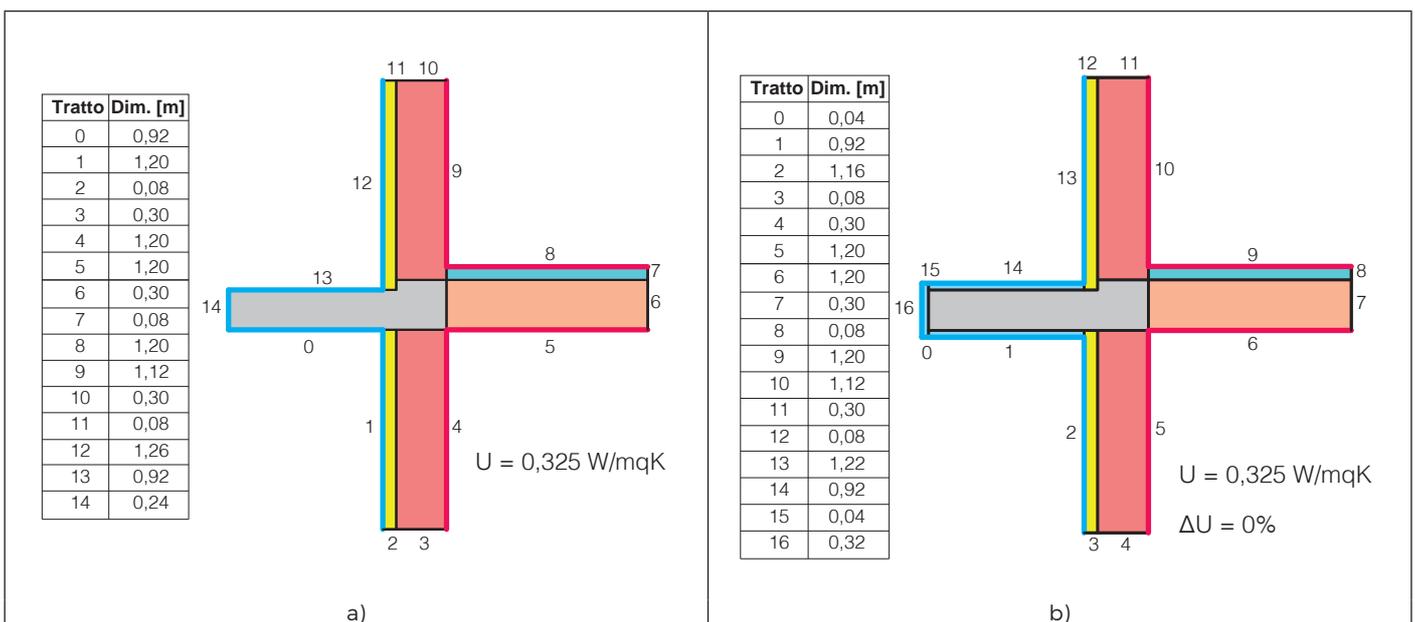


Figura 17 - a) Stratigrafia di un balcone in una parete isolata dall'esterno e pavimento isolato, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un balcone in una parete con isolamento continuo dall'esterno e pavimento isolato, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

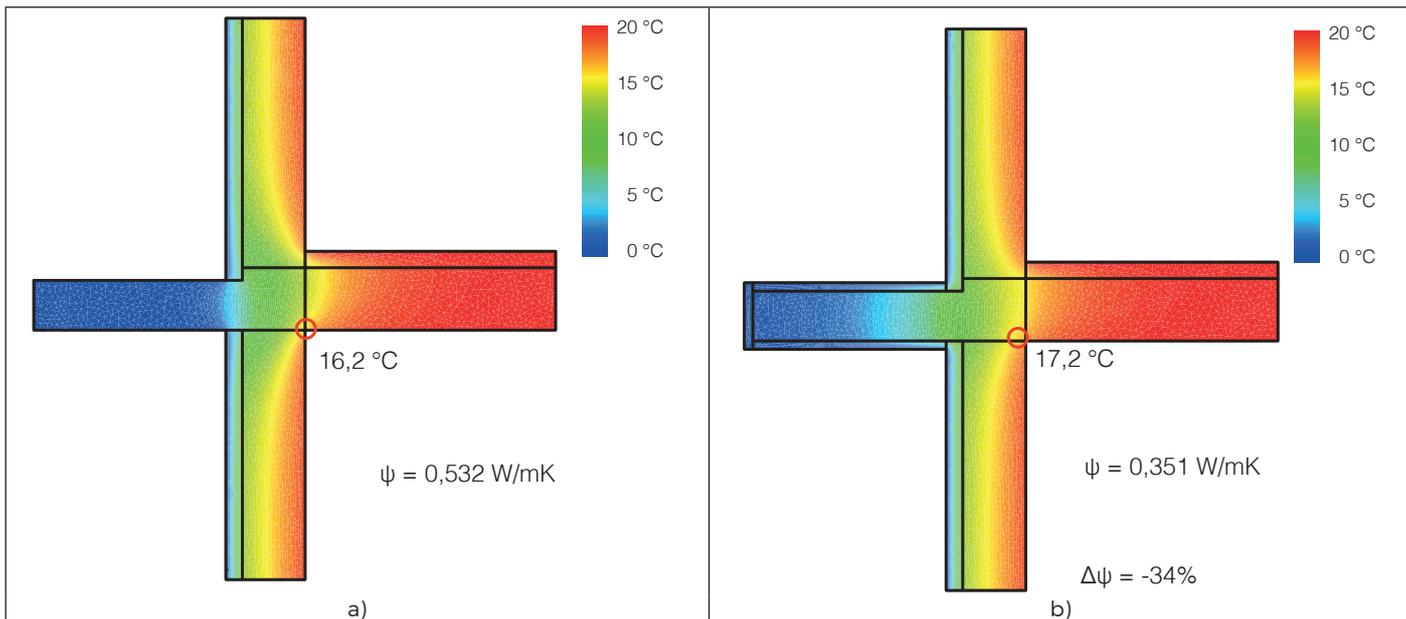


Figura 18 - a) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno e pavimento isolato, $\psi = 0,532 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un balcone in una parete con isolamento continuo dall'esterno e pavimento isolato, $\psi = 0,351 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

IL DIS-CONNETTORE TERMICO

La soluzione ideale per il ponte termico del balcone è quella che prevede l'uso del cosiddetto "dis-connettore termico" (come quello riportato nella Figura 2 a pag. 19). In genere in fase di getto del solaio viene inserito un materiale isolante tra il balcone e il solaio in modo da avere una certa con-

tinuità di isolamento termico della parete esterna così come mostrato in Figura 19b attraverso l'elemento colorato in verde. La solidità del balcone è comunque garantita dalla presenza di un'armatura in ferro di collegamento che penetra il materiale isolante. Nella simulazione della Figura 20b non è stata considerata la presenza dell'armatura (che in

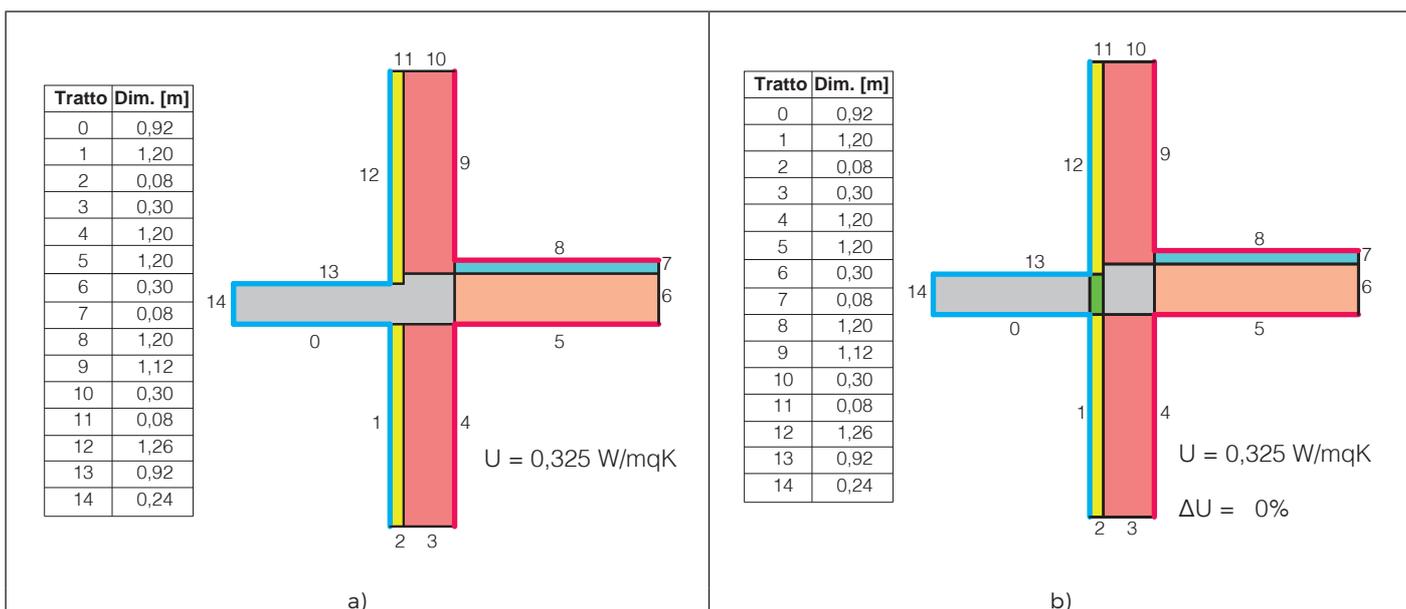


Figura 19 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un balcone (con dis-connettore termico) in una parete isolata dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

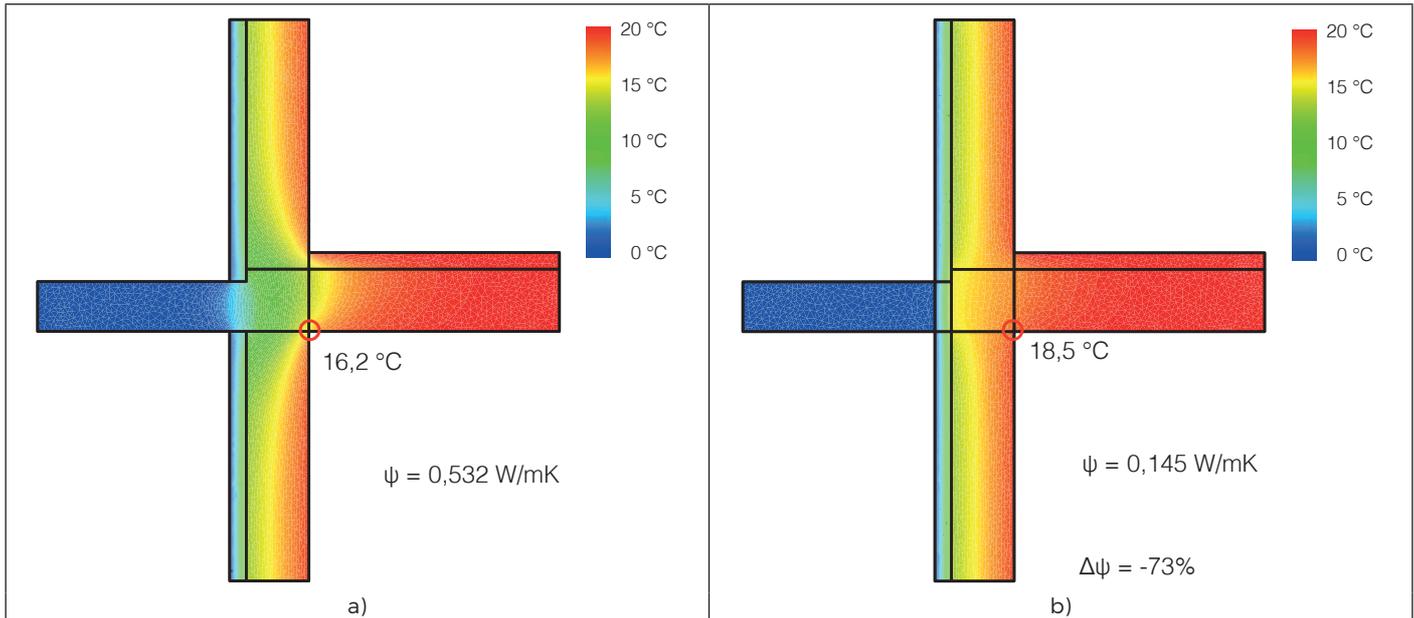


Figura 20 - a) Ponte termico di un balcone in una parete isolata dall'esterno e pavimento isolato, $\psi = 0,532 \text{ W/mK}$ (riferimento).
 b) Ponte termico di un balcone in una parete con isolamento continuo dall'esterno e pavimento isolato, $\psi = 0,351 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

genere provoca un piccolo aumento delle dispersioni termiche) e quindi il caso in questione è da considerarsi "ideale". Si nota come la riduzione della trasmittanza termica lineica supera il 70% rispetto alla soluzione di riferimento della Figura 19b. Con questa soluzione il valore della trasmittanza termica lineica raggiunge il valore di $0,145 \text{ W/mK}$ (molto basso per un ponte termico di un balcone) e la temperatura superficiale nel punto critico è di $18,5 \text{ °C}$. **Tale soluzione viene molto usata soprattutto negli edifici di nuova costruzione anche se esistono soluzioni che prevedono l'installazione del dis-connettore in fase di ristrutturazione anche per edifici esistenti.**

PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN BASAMENTO SU TERRENO

Il seguente ponte termico è dovuto all'intersezione tra una parete esterna e un pavimento che poggia sul terreno. In Figura 21a, a pag. 38, è riportato lo schema geometrico della soluzione in assenza di isolamento termico, mentre in Figura 21b è riportato lo stesso modello opportunamente modificato. In particolare è stato aggiunto sia un isolamento termico sul lato esterno della parete sia sul lato interno del pavimento, entrambi dello spessore di 8 cm.

Tabella 5 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un basamento su terreno

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in calcestruzzo cellulare	0,30	0,13	2,308
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per la parete esterna	0,08	0,040	2,000
Pannello isolante di polistirene espanso sinterizzato per il pavimento	0,08	0,040	2,000
Solaio contro terra in calcestruzzo	0,30	-	0,370
Terreno	2,00	1,5	-

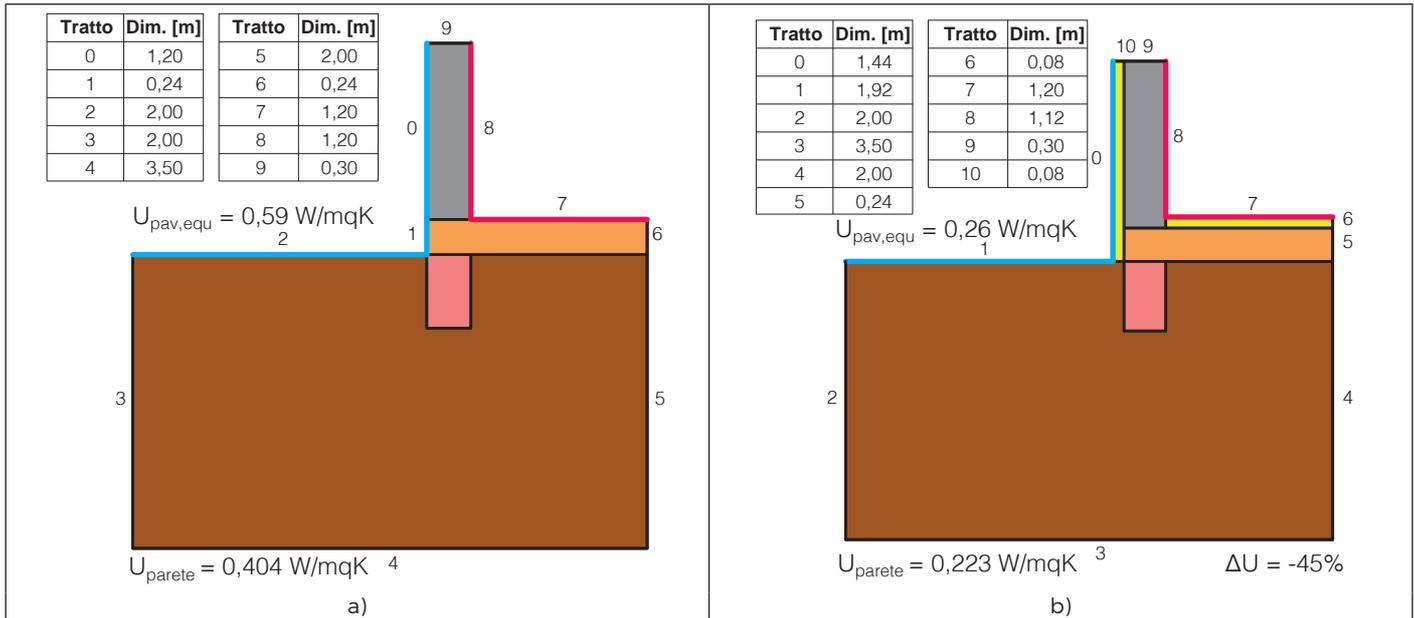


Figura 21 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete e pavimento non isolati, $U_{parete} = 0,404 \text{ W/mK}$, $U_{pav,eq} = 0,59 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e pavimento isolato dall'interno, $U_{parete} = 0,223 \text{ W/mK}$, $U_{pav,eq} = 0,26 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Con questa modifica si nota che le trasmittanze termiche della parete e del pavimento si sono ridotte rispettivamente del 45% e del 56%. La trasmittanza termica lineica è diminuita del 77% (passando da un valore di 0,296 a 0,068 W/mK) come riportato nelle Figure 22a e 22b. La temperatura minima superficiale interna nell'intersezione tra parete e pavimento, nella soluzione con isola-

mento termico è aumentata di 2,5 °C (passando da 14,9 a 17,4 °C). In tale contesto isolato non si generano fenomeni né di condensa né muffa in prossimità del ponte termico.

Nel caso in cui si decidesse di spostare l'isolamento termico della parete dall'esterno verso l'interno e quindi ottenere una certa continuità termica, si avrebbe la soluzione di Figura 23b.

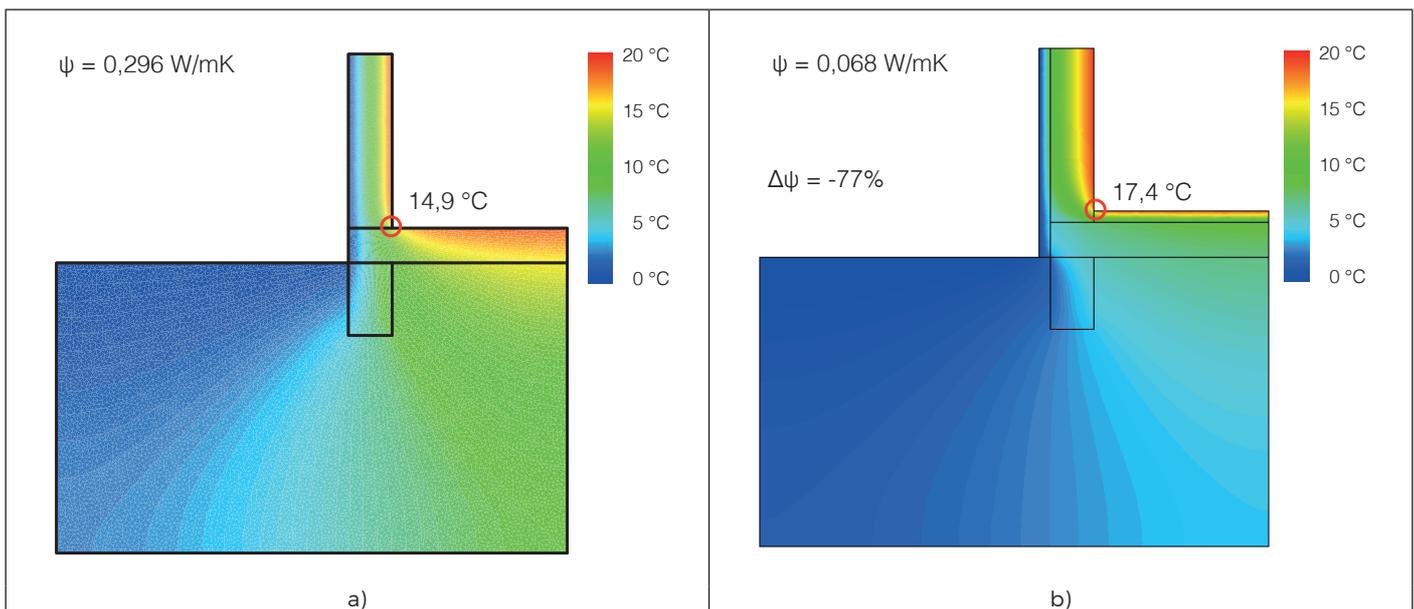


Figura 22 - a) Ponte termico di un incrocio tra parete e pavimento non isolati, $\psi = 0,296 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e pavimento isolato dall'interno, $\psi = 0,068 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

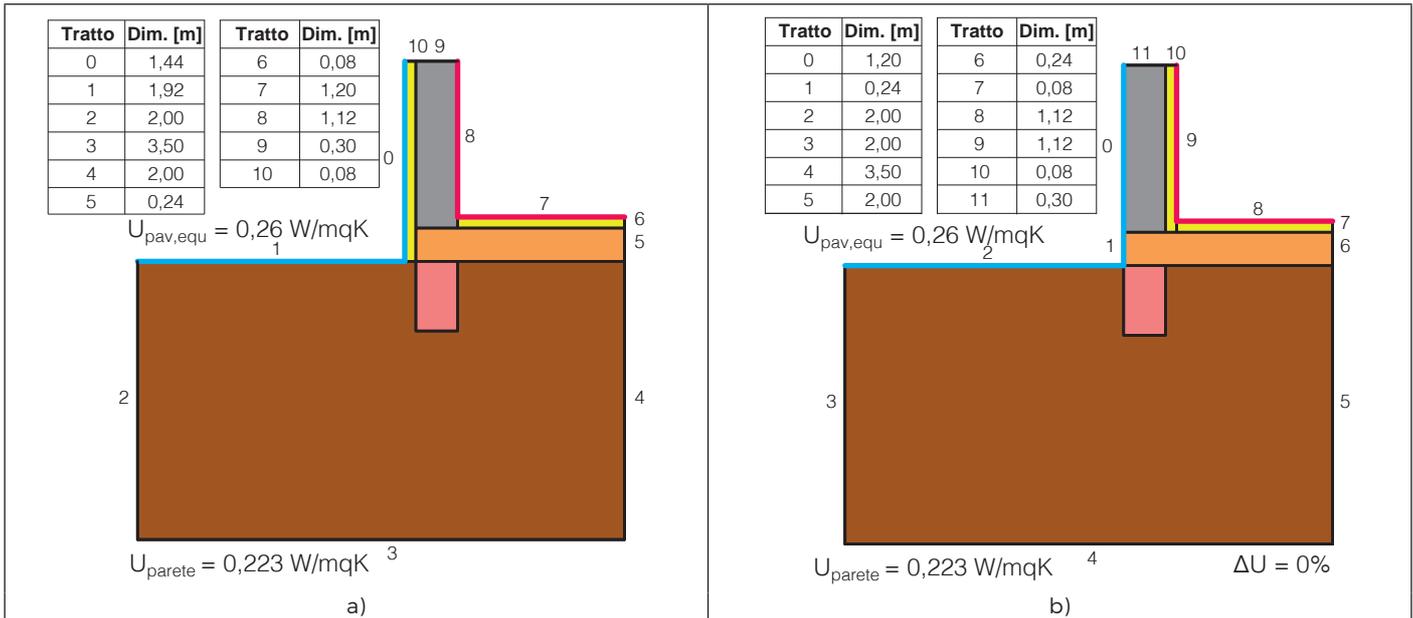


Figura 23 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e pavimento isolato dall'interno, $U_{parete} = 0,223 \text{ W/mK}$, $U_{pav, equ} = 0,26 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete e pavimento isolati entrambi dall'interno, $U_{parete} = 0,223 \text{ W/mK}$, $U_{pav, equ} = 0,26 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Per questa soluzione si ha una diminuzione della trasmittanza termica lineica del 50% rispetto alla soluzione precedente (isolamento termico sulla parete esterna) come riportato in Figura 22a. L'isolamento interno permette di ottenere una trasmittanza termica lineica di $0,034 \text{ W/mK}$ e una temperatura interna superficiale minima di $18,4 \text{ °C}$ (vedi Figura 24b).

Si rammenta che le soluzioni con isolamento termico sul lato interno necessitano sempre di un approfondimento tecnico maggiore legato non solo agli aspetti della trasmissione del calore, ma anche di quelli inerenti la verifica della condensazione interstiziale (possibile condensa nell'interfaccia tra isolante e parete) e di quelli relativi al cambiamento della capacità areica interna della parete (variazione dell'inerzia termica).

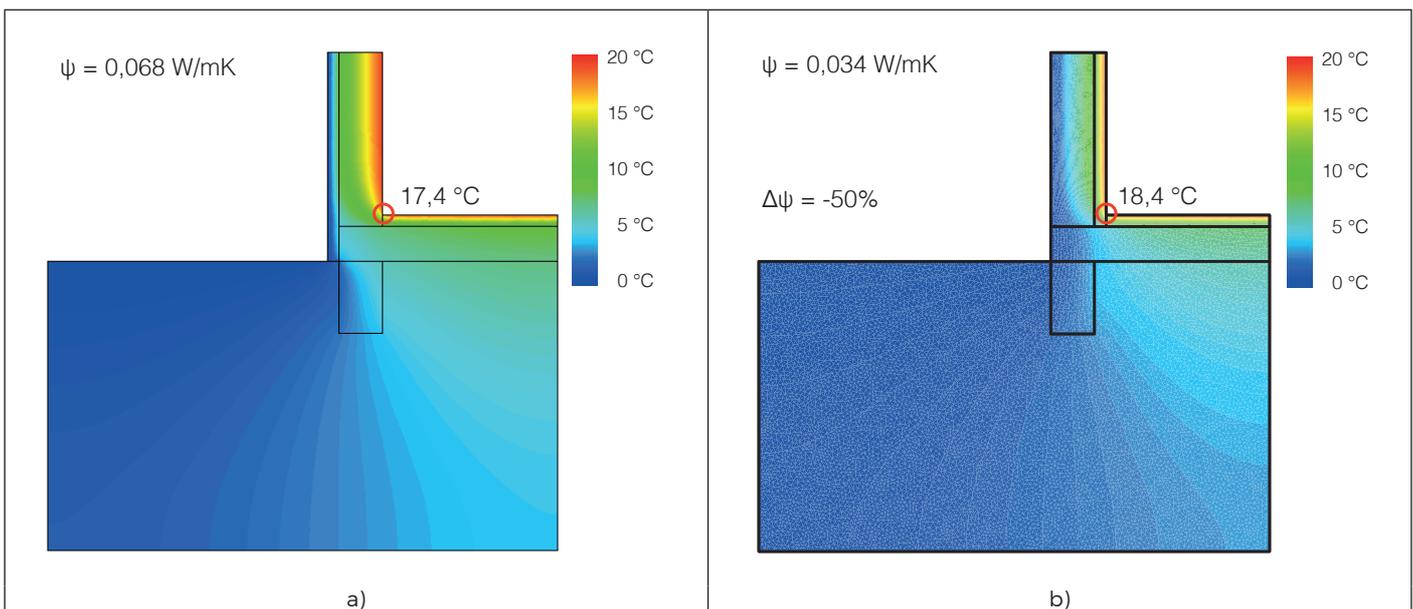


Figura 24 - a) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e pavimento isolato dall'interno, $\psi = 0,068 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra parete e pavimento isolati entrambi dall'interno, $\psi = 0,034 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

Invece, per le soluzioni che prevedono un isolamento sul lato esterno, si deve fare molta attenzione al collegamento tra il cappotto esterno e il marciapiede; in genere, non viene isolato uno spazio di circa 20-30 cm da terra al fine di proteggere il cappotto esterno dalle infiltrazioni d'acqua provenienti dal terreno o dal marciapiede. Operando in questo modo il ponte termico del basamento non è correttamente isolato aumentando di fatto le dispersioni in quella zona.

Sarebbe meglio posare il cappotto non solo su tutto il lato esterno della parete, ma anche nella parte che interessa il marciapiede prevedendo adeguate guaine impermeabilizzanti per la protezione dall'umidità.

PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN SOLAIO INTERPIANO

Il ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un solaio interpiano è molto simile al caso del balcone. In particolare può essere ricondotto al caso di un balcone eliminando la parte in aggetto in esterno; in questo caso il solaio separa i due ambienti che sono stati considerati entrambi riscaldati. In Figura 25a è riportato lo schema geometrico della soluzione in assenza di isolamento termico, mentre in Figura 25b è riportato lo stesso modello opportunamente modificato.

Tabella 6 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un solaio interpiano

Materiale	Spessore [m]	Conduttività termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio semipieno	0,30	-	1,442
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per la parete esterna	0,08	0,040	2,000
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per la soletta	0,04	0,040	1,000
Isolamento termico in lana di roccia per la soletta	0,02	0,040	0,500
Solaio in latero cemento	0,30	-	0,370

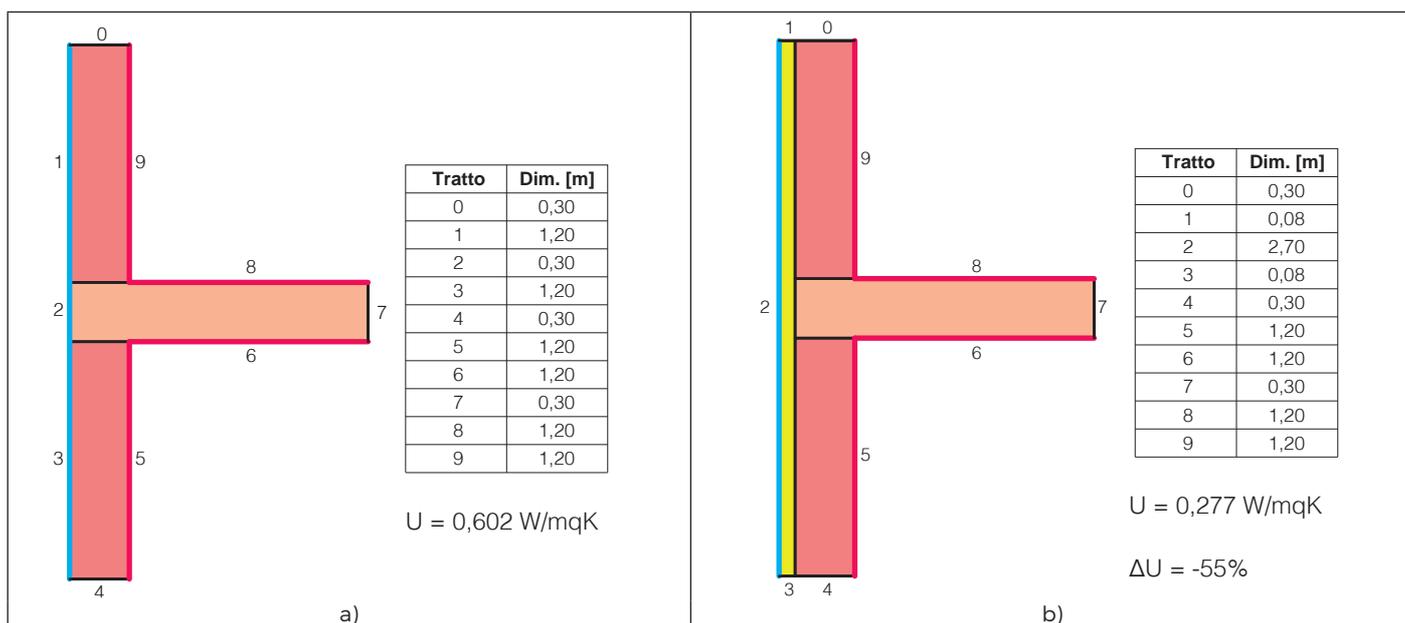


Figura 25 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete non isolata, U = 0,602 W/mqK e un solaio interpiano (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno, U = 0,277 W/mqK e un solaio interpiano (soluzione modificata).

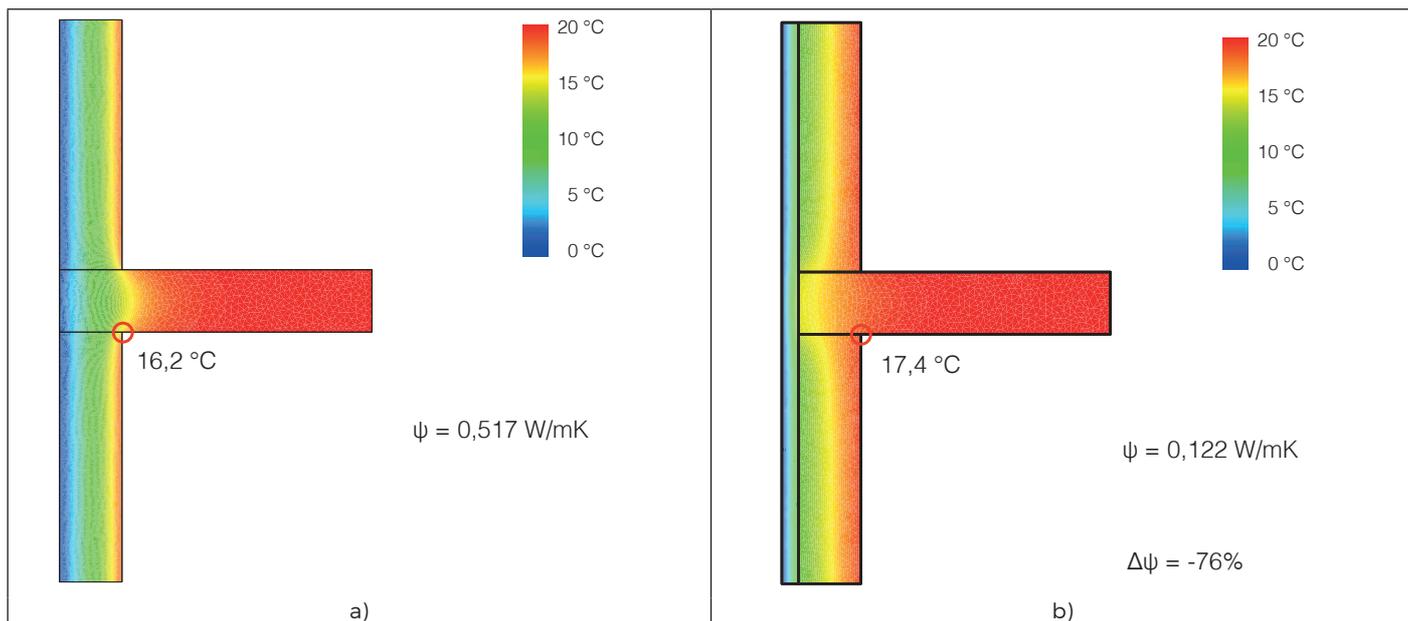


Figura 26 - a) Ponte termico di un incrocio tra parete non isolata e un solaio interpiano, $\psi = 0,517 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e un solaio interpiano, $\psi = 0,122 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

In particolare, nella soluzione modificata è stato aggiunto uno strato di isolamento termico sul lato esterno della parete dello spessore di 8 cm. Con questa modifica si nota che la trasmittanza termica della parete si riduce del 55% (da 0,602 a 0,277 W/mqK) e la trasmittanza termica lineica diminuisce del 76% (passando da un valore di 0,517 a 0,122 W/mK) come meglio evidenziato nella Figura 26. La temperatura minima in prossimità del ponte termico ed evidenziata nelle figure aumenta di quasi 2 °C (passando da 16,2 a 17,4 °C).

Si evidenzia che la presenza dell'isolamento sul lato esterno della parete, in questo caso permette di eliminare il rischio di formazione di muffa e condensa in prossimità del ponte termico.

Al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni termiche della soluzione riportata in Figura 25b, è necessario un inserimento di uno o più strati di isolamento termico nella zona esterna della soletta come riportato in Figura 27b a pag. 42.

In genere si inserisce uno strato con una rigidità maggiore verso l'esterno (in questo caso di 4 cm,

polistirene estruso) e uno con una minore verso la soletta (spessore 2 cm, ad esempio lana di roccia).

Lo strato avente una rigidità minore ha la funzione di "ammortizzare" i micro spostamenti orizzontali del solaio; in questo modo si evitano le fessurazioni dell'isolamento esterno della parete in prossimità del solaio.

In questo caso la trasmittanza termica lineica si riduce del 30% rispetto alla soluzione precedente (Figura 28a a pag. 42), raggiungendo il valore di 0,085 W/mK (Figura 28b).

Si nota anche che la temperatura superficiale del punto critico raggiunge i 19 °C, migliorando di molto le prestazioni termiche del ponte termico.

Nel caso di isolamento sul lato interno della parete, si avrebbe la soluzione della Figura 29b a pag. 43.

Si nota come la trasmittanza termica della parete rimane la stessa confrontandola con le soluzioni precedenti, mentre il valore della trasmittanza termica lineica aumenta più del doppio se confrontata con la soluzione avente l'isolamento sul lato esterno (vedi Figura 30b a pag. 43).

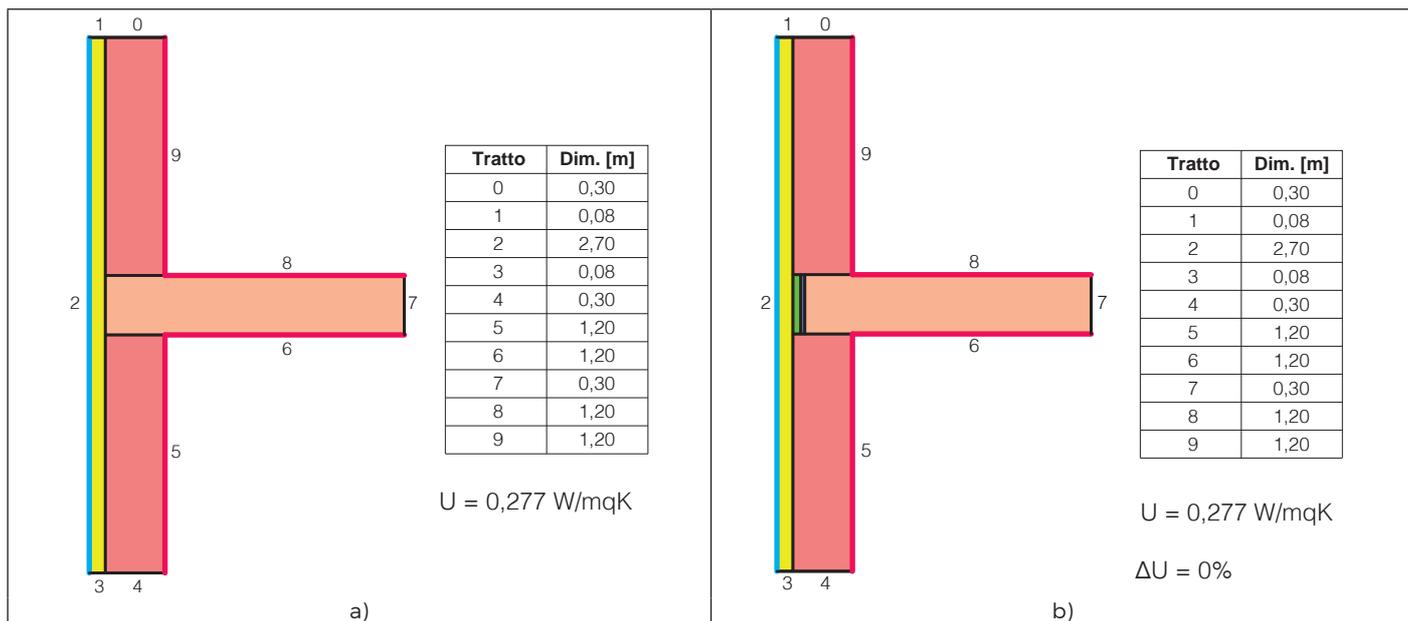


Figura 27 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e un solaio interpiano (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e un solaio interpiano avente un doppio isolamento sul lato corto verso l'esterno (soluzione modificata).

Una soluzione del genere dovrebbe essere adottata solo nel caso in cui sia impossibile agire sul lato esterno della parete (ristrutturazioni di edifici con vincoli sulla facciata esterna) poiché, fermo restando la riduzione delle dispersioni termiche lungo la parete e il miglioramento della temperatura superficiale interna, il fenomeno del ponte termico potrebbe non essere risolto del tutto.

Per migliorare la soluzione, bisognerebbe isolare

il solaio sia a soffitto sia a pavimento al fine di aumentare le temperature critiche in prossimità del ponte termico.

Per il soffitto, in genere ci sono due tipologie di isolamento: la controsoffittatura in cartongesso e i controsoffitti isolanti.

La prima soluzione è costituita da una intelaiatura di legno sulla quale andranno appoggiati dei travi o dei listelli di legno con lo scopo sostenere i

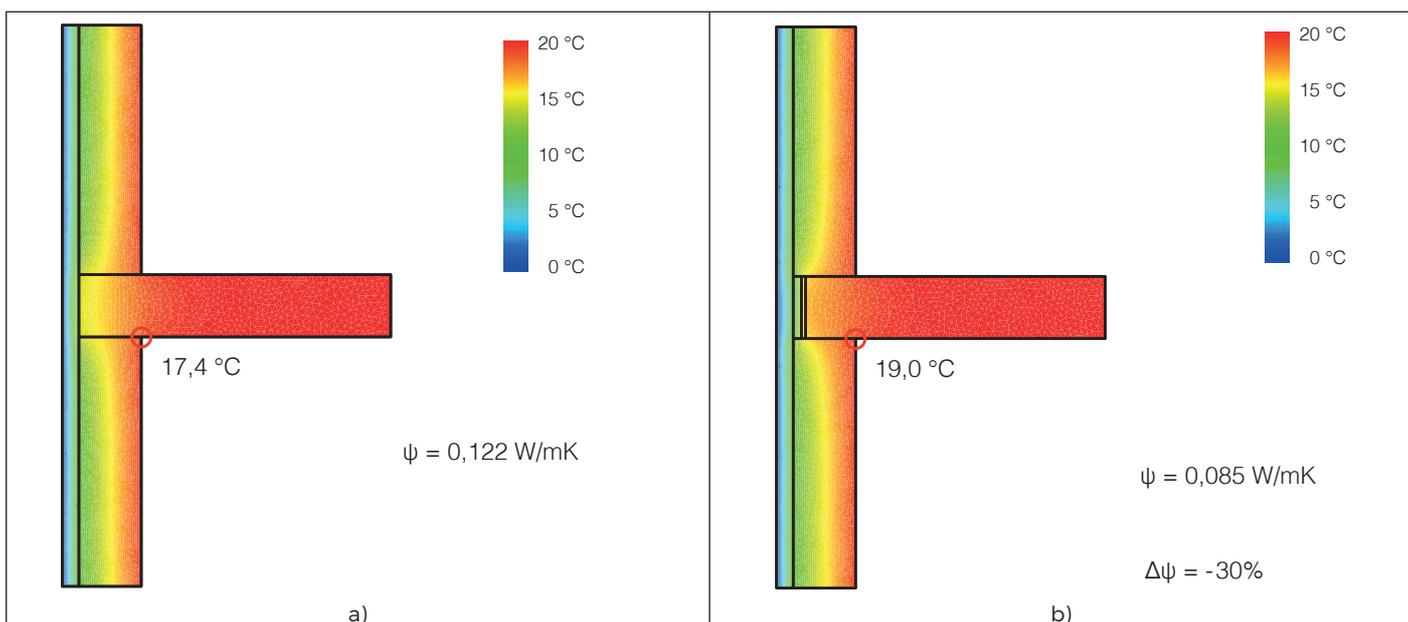


Figura 28 - a) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e un solaio interpiano, $\psi = 0,122 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e un solaio interpiano avente un doppio isolamento sul lato corto verso l'esterno, $\psi = 0,085 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

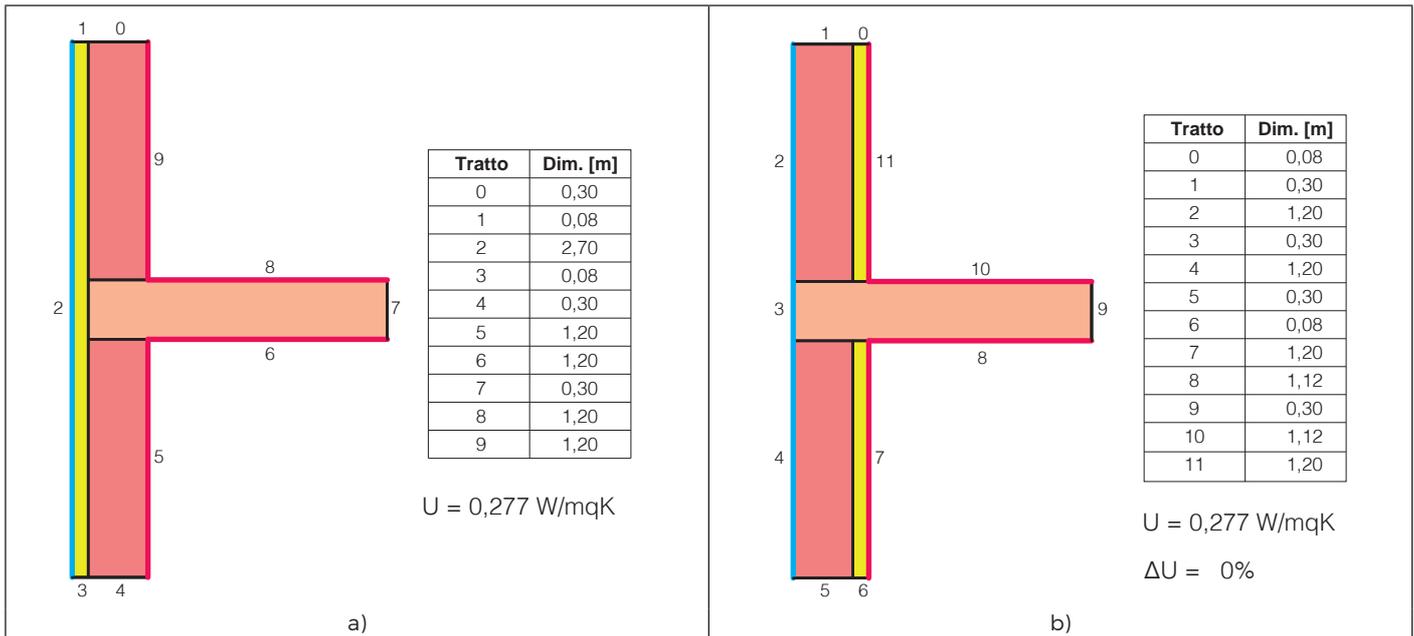


Figura 29 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e un solaio interpiano (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'interno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e un solaio interpiano (soluzione modificata).

materiali isolanti. La lana di roccia è l'isolante termico che di solito viene utilizzato per questo tipo di intervento, ma possono essere utilizzati anche altri materiali isolanti sintetici. Il controsoffitto isolante invece è realizzato mediante una struttura a reticolo sospesa che regge l'isolamento termico; i materassini isolanti vengono poggiati sulla struttura reticolare metallica fissata al soffitto.

L'isolamento a pavimento richiede un materiale che resiste bene alla compressione e al calpestio. Tra i materiali isolanti più usati per la coibentazione del pavimento si possono utilizzare la lana di roccia, feltro in lana di vetro, la vermiculite e una lunga serie di prodotti sintetici, come il polistirene espanso sinterizzato posato sotto forma di lastre rigide.

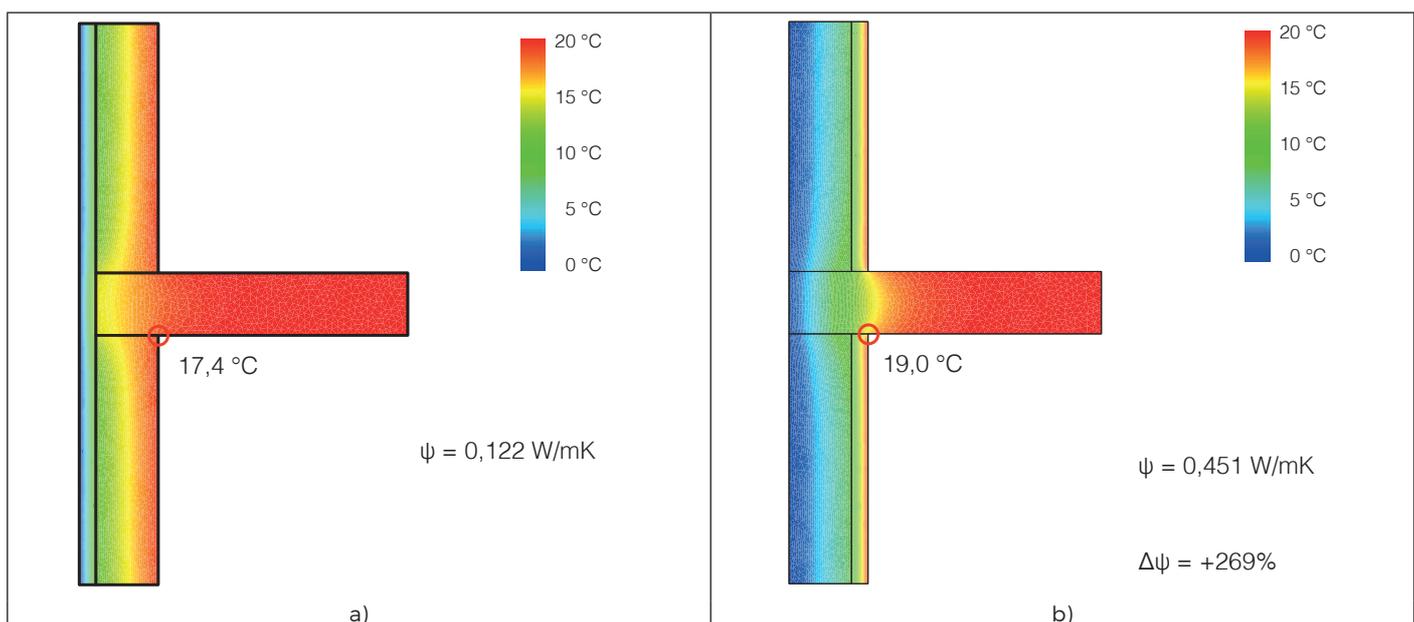


Figura 30 - a) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'esterno e un solaio interpiano, $\psi = 0,122 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra parete isolata dall'interno e un solaio interpiano, $\psi = 0,451 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UN SOLAIO DI COPERTURA

Il caso seguente è relativo a un incrocio tra una copertura piana e una parete verticale. Analoghe considerazioni possono essere fatte con una copertura inclinata. In Figura 31a è riportato lo schema geometrico della soluzione in assenza di isolamento termico, mentre in Figura 31b è riportato lo

stesso modello con opportune modifiche. Le modifiche introdotte riguardano la posa di uno strato di isolamento termico di 8 cm sul lato esterno della copertura fino al parapetto e un isolamento termico di 8 cm sul lato esterno della parete. Le trasmittanze termiche della parete e della copertura si riducono rispettivamente del 55% e 80% come meglio evidenziato nelle Figure 31a e 31b. Dalle simulazioni si evince che la temperatura critica aumenta di quasi 4 °C (passando da 12,2 a 16,1 °C), mentre la trasmittanza termica lineica aumenta

Tabella 7 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico d'angolo tra una parete verticale e un solaio di copertura

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio semipieno	0,30	-	1,442
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per la parete esterna	0,08	0,040	2,000
Isolamento termico in polistirene estruso rigido per la copertura	0,08	0,040	2,000
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per il parapetto	0,04	0,040	1,000
Solaio in latero cemento	0,30	-	0,370
Cordolo in cemento armato	0,30	1,200	0,250

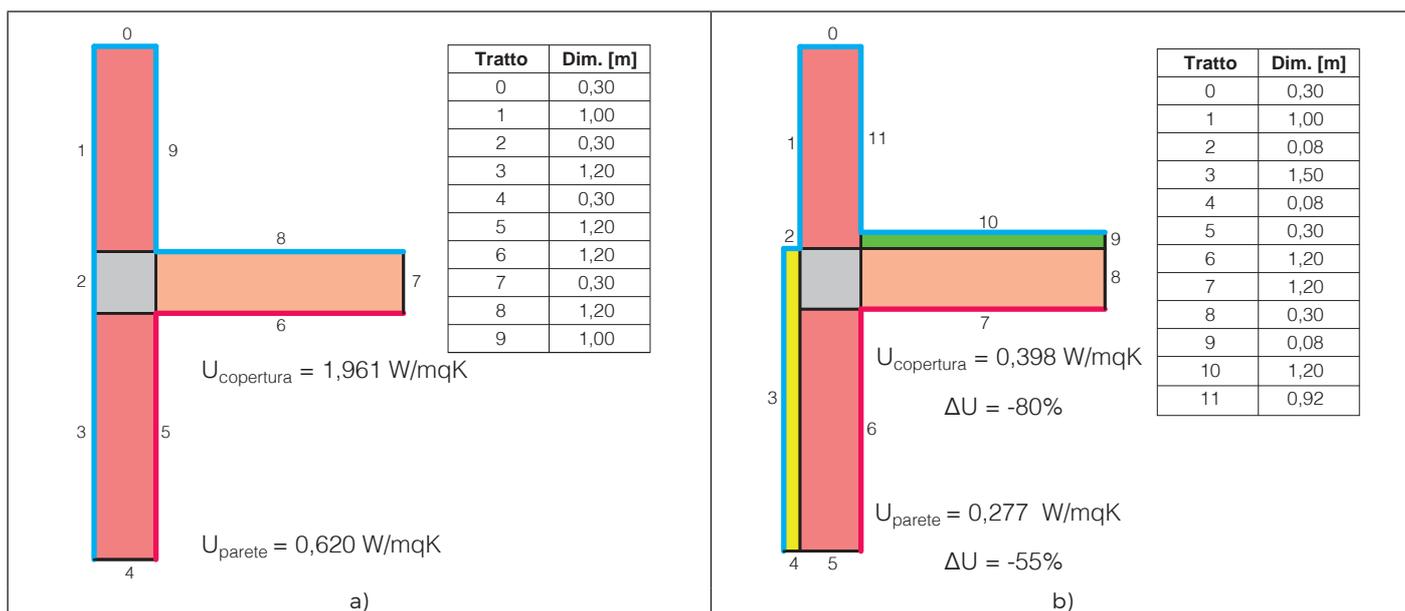


Figura 31 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra una parete non isolata, $U = 0,620 \text{ W/mqK}$ e una copertura piana non isolata, $U = 1,961 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra una parete isolata dall'esterno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e una copertura piana isolata dall'esterno, $U = 0,398 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

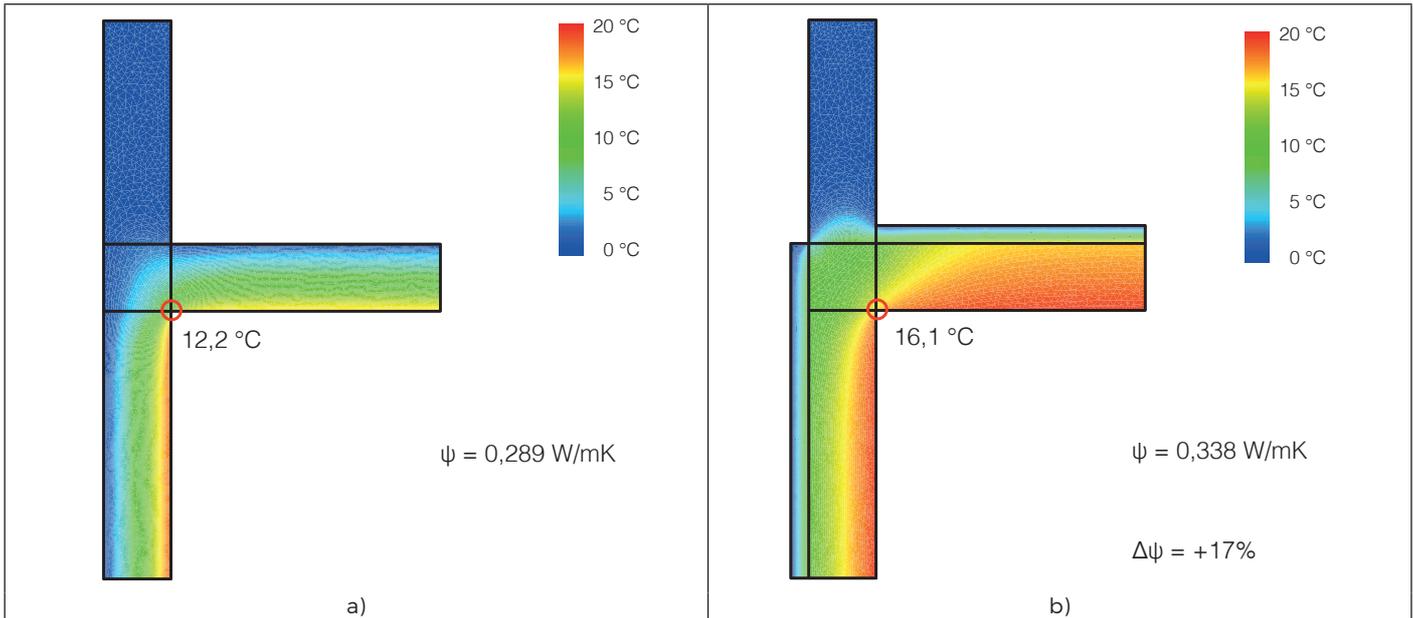


Figura 32 - a) Ponte termico di un incrocio tra una parete non isolata e una copertura piana non isolata, $\psi = 0,289 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra una parete isolata dall'esterno e una copertura piana isolata dall'esterno, $\psi = 0,338 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

sensibilmente passando da 0,289 a 0,338 W/mK come riportato rispettivamente nelle Figure 32a e 32b. Tale aumento è dovuto al fatto che il ponte termico non è del tutto risolto poiché rimane non isolata la zona del cordolo in cemento.

La soluzione corretta è presentata in Figura 33b

e prevede l'isolamento completo e continuo di tutto il cordolo. In questa situazione, confrontata con il caso precedente (vedi Figura 31b) si nota che la trasmittanza termica lineica del ponte termico si abbassa del 39% fino ad arrivare al valore di 0,207 W/mK (vedi Figura 34b a pag. 46).

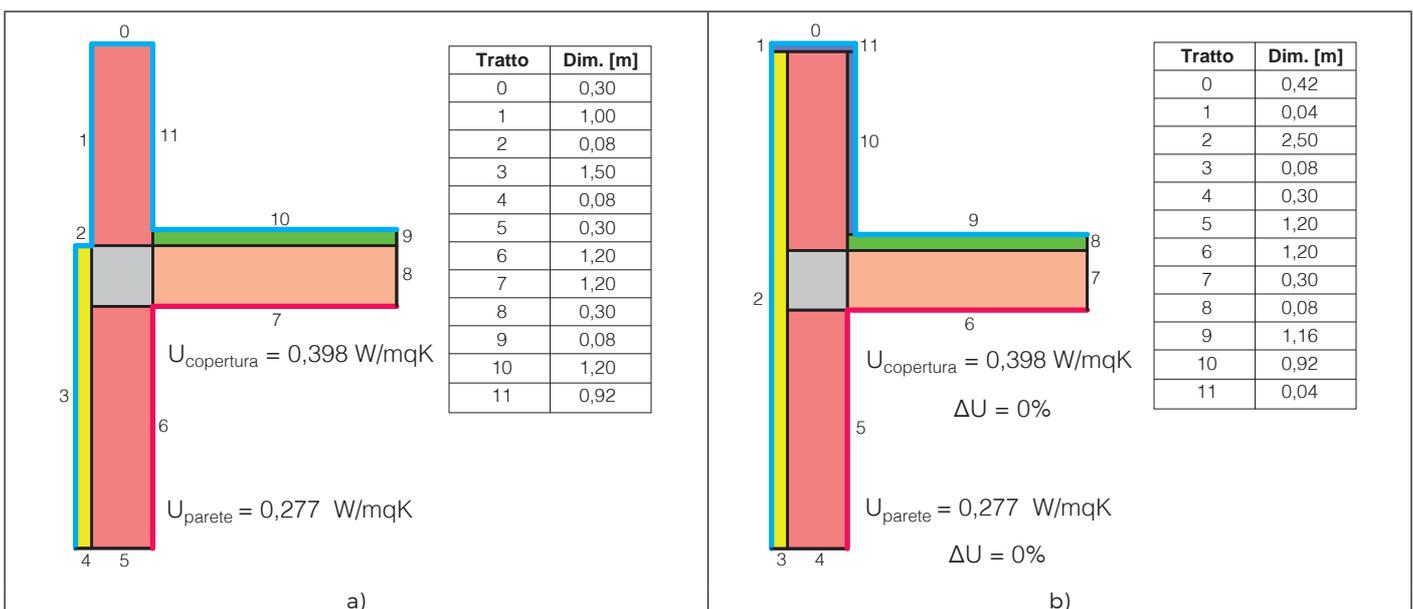


Figura 33 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra una parete isolata dall'esterno, $U = 0,277 \text{ W/mqK}$ e una copertura piana isolata dall'esterno, $U = 0,398 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un incrocio tra una parete e una copertura piana con un isolamento dall'esterno continuo (soluzione modificata).

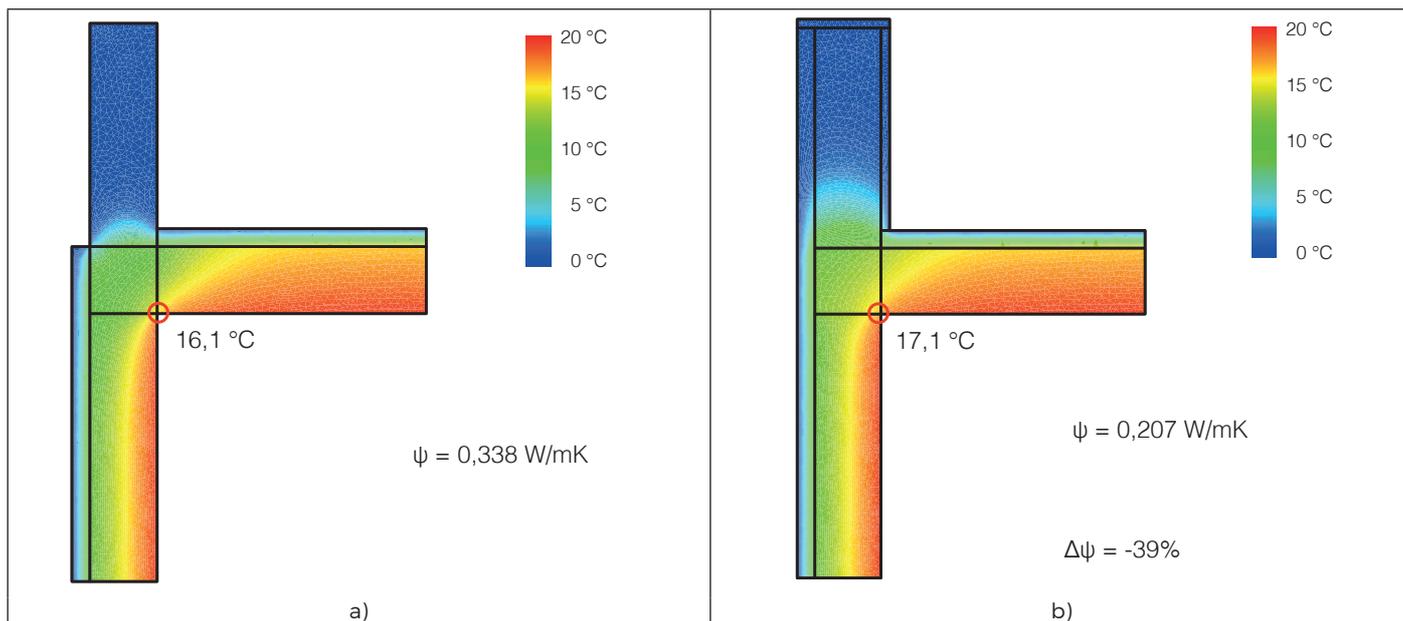


Figura 34 - a) Ponte termico di un incrocio tra una parete isolata dall'esterno e una copertura piana isolata dall'esterno, $\psi = 0,289 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un incrocio tra una parete e una copertura piana con un isolamento dall'esterno continuo, $\psi = 0,207 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO DI UN BANCALE DI UNA FINESTRA

Uno dei problemi più complessi da risolvere è quello del ponte termico del bancale della finestra. Tale situazione si genera per la presenza di un elemento (il bancale o il davanzale) appoggiato sul muro e avente delle caratteristiche termiche differenti rispetto al resto della struttura. In genere il punto interno più freddo è quello relativo all'interfaccia tra il bancale e il muro.

Nelle Figure 35a e 35b sono mostrati rispettivamente una soluzione priva di isolamento termico e una avente la stessa struttura di riferimento, ma con la presenza di isolamento termico. Nella struttura modificata l'isolamento termico è posizionato sul lato esterno del muro e sul lato esterno del bancale. Il bancale, completo dell'isolamento termico aggiunto, può essere rivestito con un ulteriore bancale in alluminio. In questa situazione di continuità termica si può notare che la trasmittanza termica della parete diminuisce del 65%, mentre la trasmittanza termica lineica

Tabella 8 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico di un bancale di una finestra

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,909
Isolamento termico in polistirene estruso XPS per la parete esterna	0,08	0,040	2,000
Isolamento termico polistirene estruso XPS per il bancale	0,02	0,040	0,500
Infisso in legno	0,06	0,162	0,370
Bancale in cemento	0,30	0,870	-
Legno di separazione infisso-bancale	0,05	0,162	-

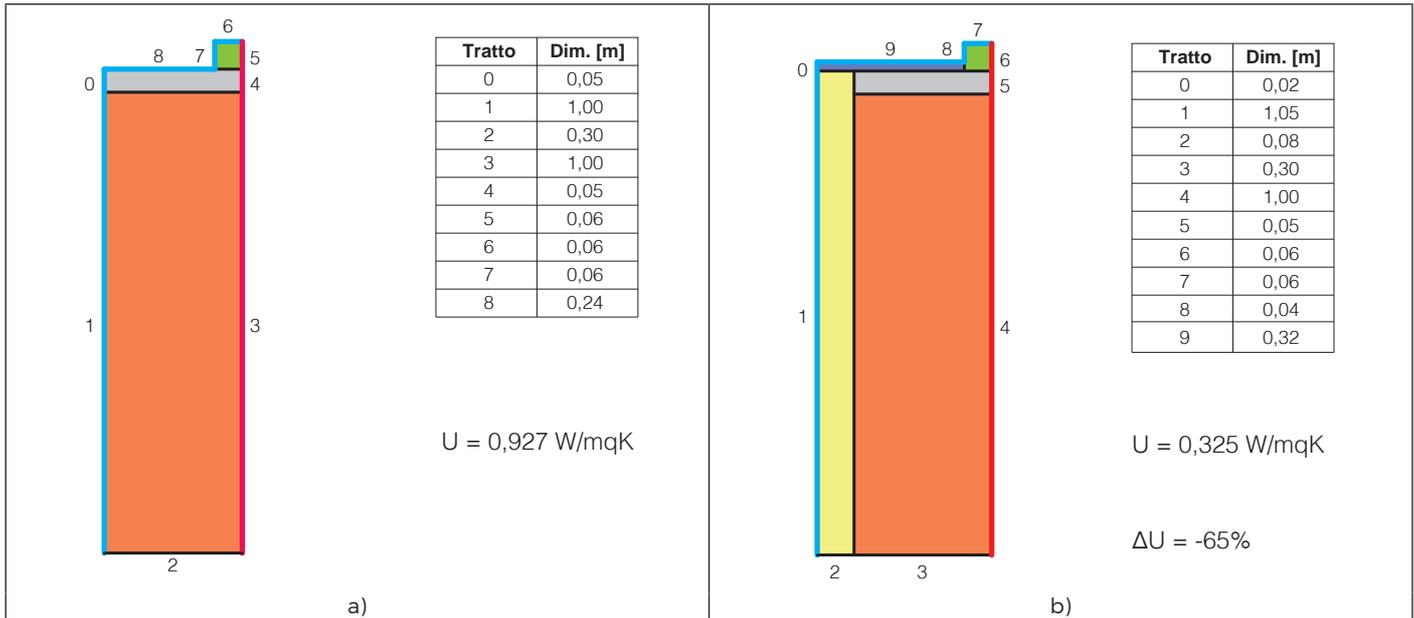


Figura 35 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un bancale su una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un bancale (sopra isolato) su una parete isolata dall'esterno, $U = 0,325 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

del bancale diminuisce del 12% (passando da 0,480 a 0,424 W/mK) come riportato nella Figura 36. Da rilevare come la presenza dell'isolamento termico esterno aumenti la temperatura critica da 12,8 a 15,8 °C.

Si precisa che la presenza dell'isolamento non evita il rischio di muffa e condensa in tale punto

e pertanto è necessario aumentare lo spessore dell'isolamento termico o sostituire i materiali con altri più performanti.

Un metodo per abbassare ulteriormente la trasmittanza termica lineica è quello di "separare" il telaio della finestra dal bancale in modo che non risulti a contatto.

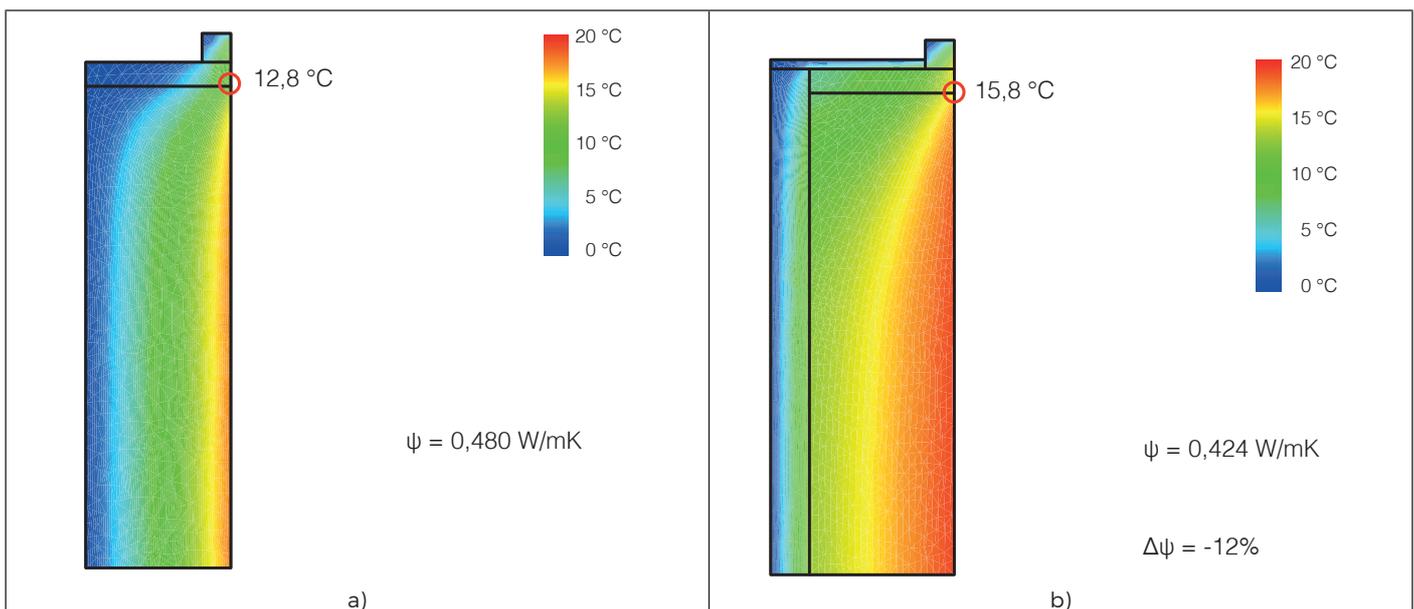


Figura 36 - a) Ponte termico di un bancale su una parete non isolata, $\psi = 0,480 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un bancale (sopra isolato) su una parete isolata dall'esterno, $\psi = 0,424 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

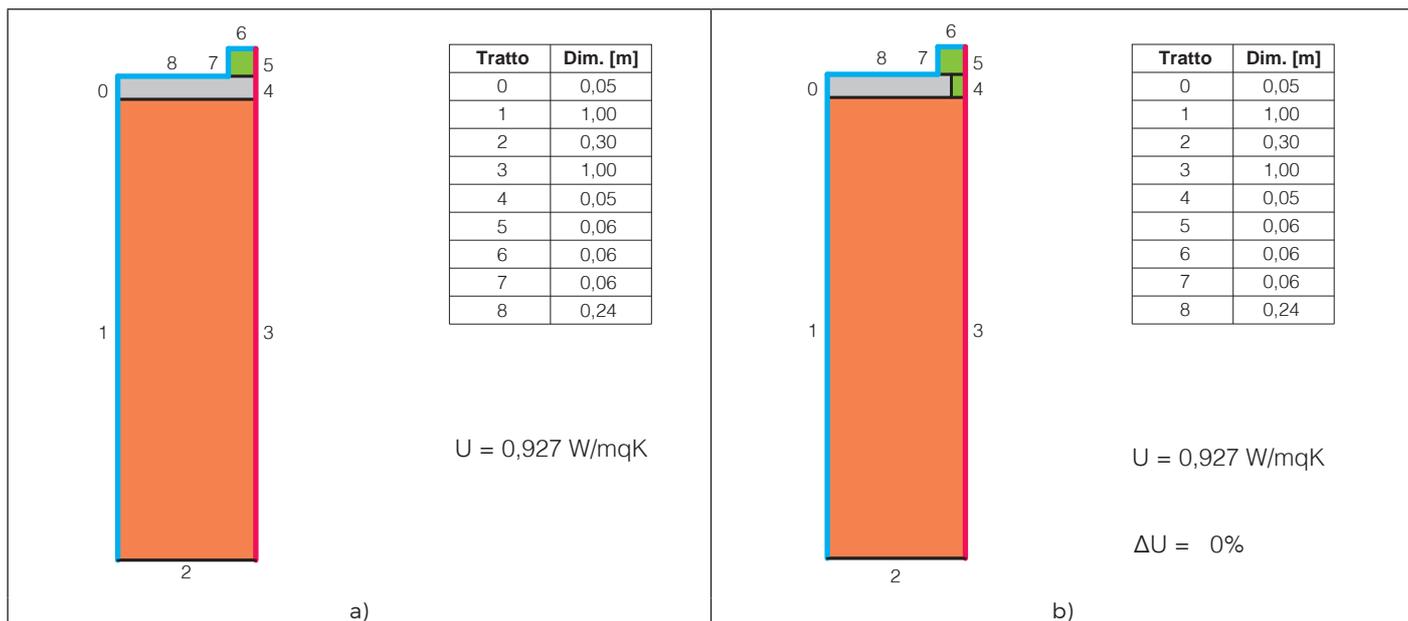


Figura 37 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un bancale su una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un bancale (con infisso separato dal muro) su una parete non isolata, $U = 0,927 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

In Figura 37b è mostrato il caso con l'inserimento di un elemento in legno che interrompe la continuità del bancale separando il telaio dalla parete. In questo caso la trasmittanza termica lineica raggiunge il valore di $0,406 \text{ W/mK}$, più bassa del 15% rispetto alla soluzione priva di isolamento termico (vedi Figura 38b). Si noti che la temperatura superficiale critica in prossimità del ponte termico è sopra i 15°C e risulta non

adeguata per scongiurare i problemi di condensa e muffa in quel punto. Nel caso in cui si utilizzasse la combinazione delle due soluzioni precedenti si otterrebbero i risultati in Figura 39. Si nota come la trasmittanza termica lineica si riduce fino al valore di $0,391 \text{ W/mK}$ (-19%) e la temperatura superficiale in corrispondenza del bancale raggiunge una temperatura che evita la formazione di muffa e condensa.

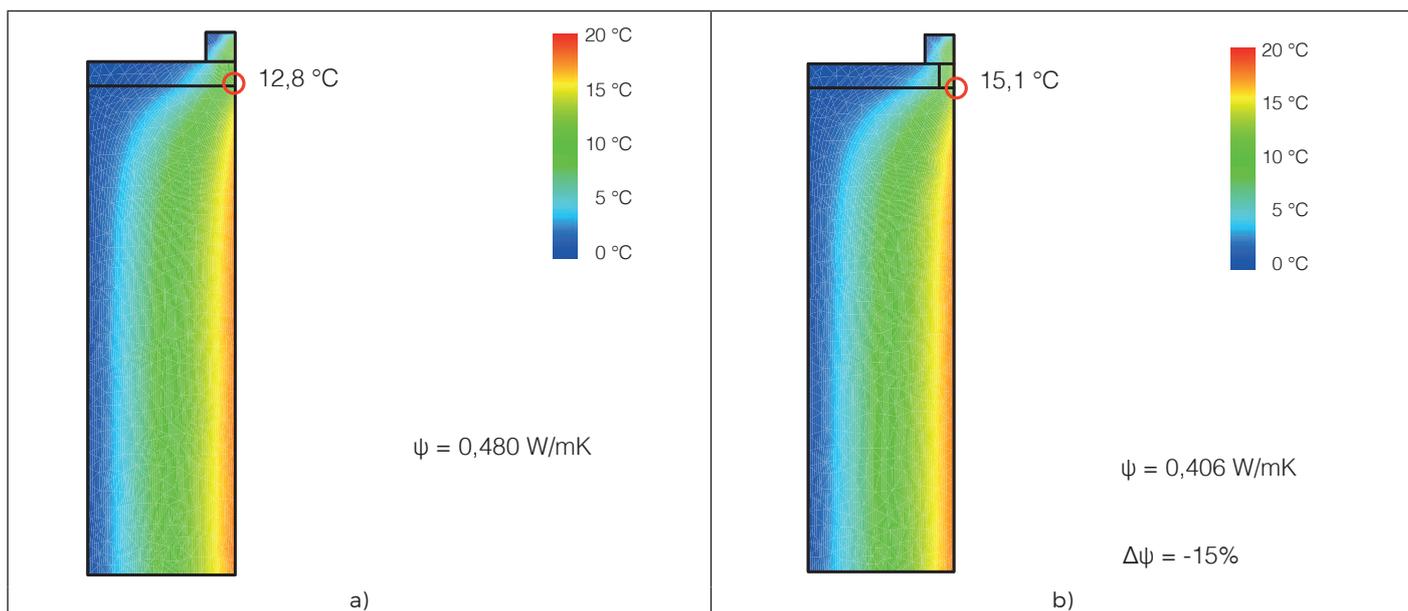


Figura 38 - a) Ponte termico di un bancale su una parete non isolata, $\psi = 0,480 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un bancale (con infisso separato dal muro) su una parete non isolata, $\psi = 0,406 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

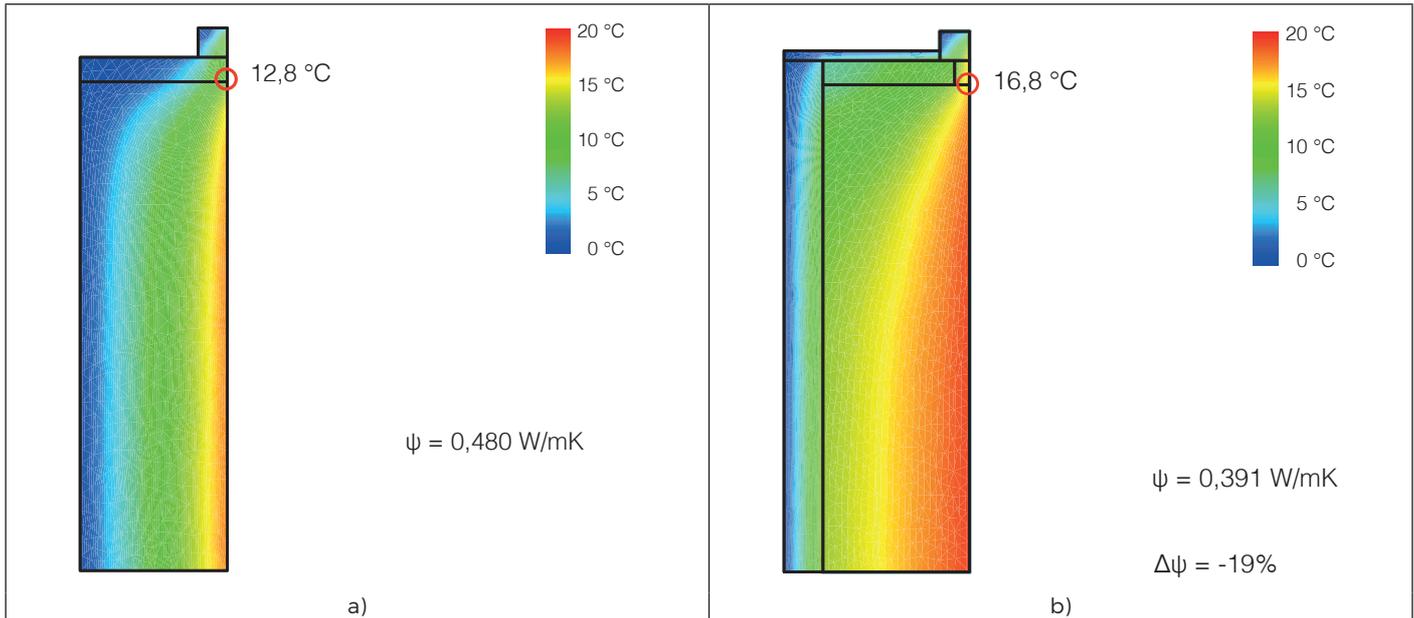


Figura 39 - a) Ponte termico di un bancale su una parete non isolata, $\psi = 0,480 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un bancale (sopra isolato e con infisso separato dal muro) su una parete isolata, $\psi = 0,391 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO DI UN CASSONETTO

Il cassonetto è quell'elemento edilizio che contiene la tapparella della finestra. Esso rappresenta una delle parti più deboli dell'involucro dal punto di vista termico. Le dispersioni legate al cassonetto sono molto elevate soprattutto negli edifici esistenti e non vanno assolutamente trascurate anche se la superficie di dispersione è piccola se

confrontata con quella del resto dell'edificio. Attualmente esistono delle soluzioni "monoblocco" che permettono di montare una finestra con il suo cassonetto molto isolato; tali soluzioni riducono fortemente le dispersioni termiche e risolvono quasi completamente il problema del ponte termico.

In Tabella 9 sono riportate le caratteristiche termofisiche dei materiali usati nelle seguenti simulazioni.

Tabella 9 - Caratteristiche termofisiche dei materiali nel caso di un ponte termico di un cassonetto

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Solaio in latero cemento	0,30	-	0,370
Vetro	0,02	1,000	0,02
Infisso in legno	0,06	0,162	0,370
Parete del cassonetto	0,02	0,162	0,123
Isolamento termico per la muratura	0,08	0,040	2,000
Isolamento termico per il cassonetto	0,02	0,040	0,500
Aria (*)	0,26	-	0,180
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,909
Veletta in cemento	0,10	0,870	0,115

(*) Per l'aria è stata considerata una resistenza termica pari a 0,18 mqK/W.

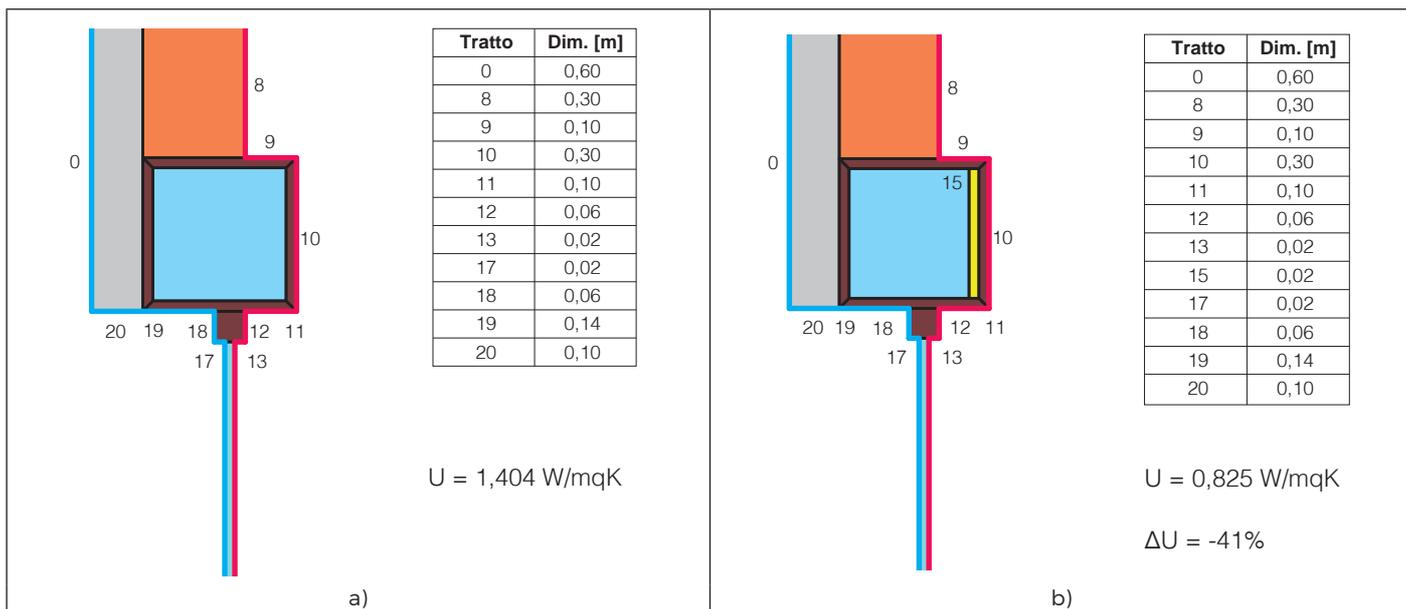


Figura 40 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $U = 1,404 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto isolato sul lato interno verticale su una parete non isolata, $U = 0,825 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Nella Figura 40b è riportato un caso di un cassonetto con uno strato di isolamento termico posto nella parte più interna dell'ambiente (la parte apribile del cassonetto).

I risultati sono confrontati con il caso totalmente privo di isolamento in Figura 40a preso come riferimento.

Si nota come la sola presenza dell'isolamento sulla

parte apribile del cassonetto permette una notevole diminuzione della trasmittanza termica lineica del 25%, passando da 0,483 a 0,362 W/mK come riportato in Figura 41.

Si precisa che le simulazioni sono state eseguite considerando una resistenza termica per l'aria pari a 0,18 W/mK e avente uno scambio termico con i materiali adiacenti di sola conduzione termica.

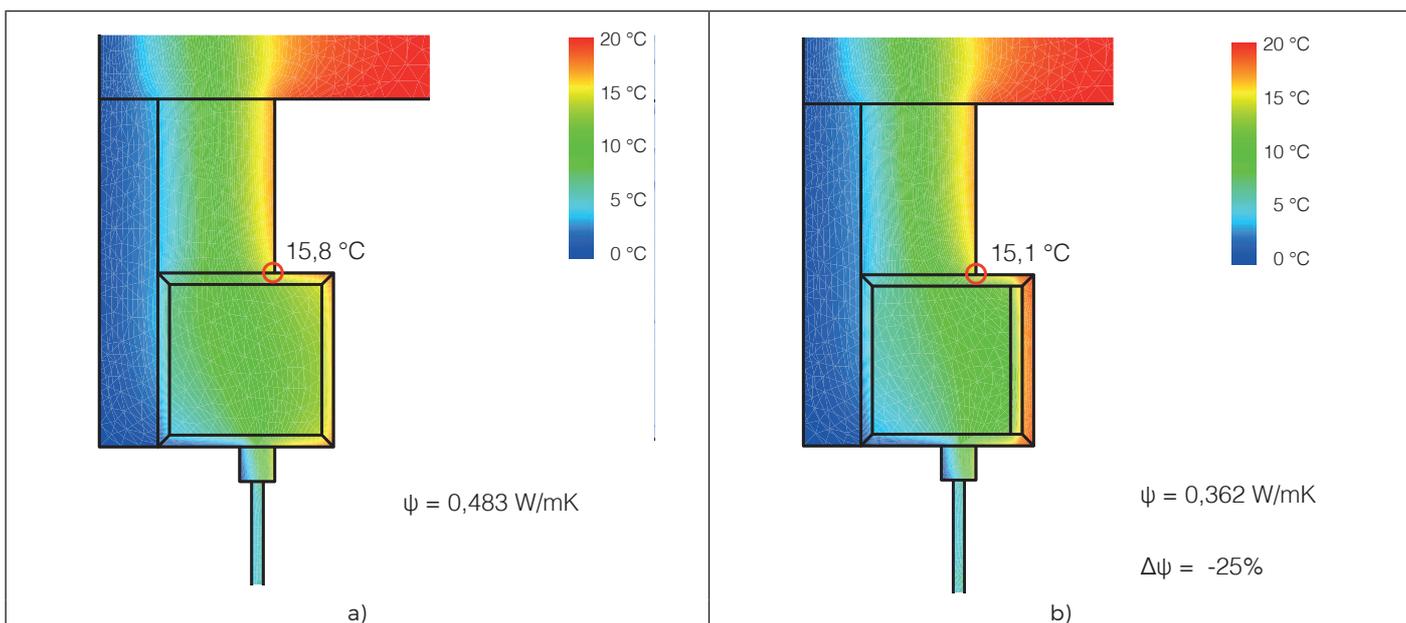


Figura 41 - a) Ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $\psi = 0,483 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) ponte termico di un cassonetto isolato sul lato interno verticale su una parete non isolata, $\psi = 0,362 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

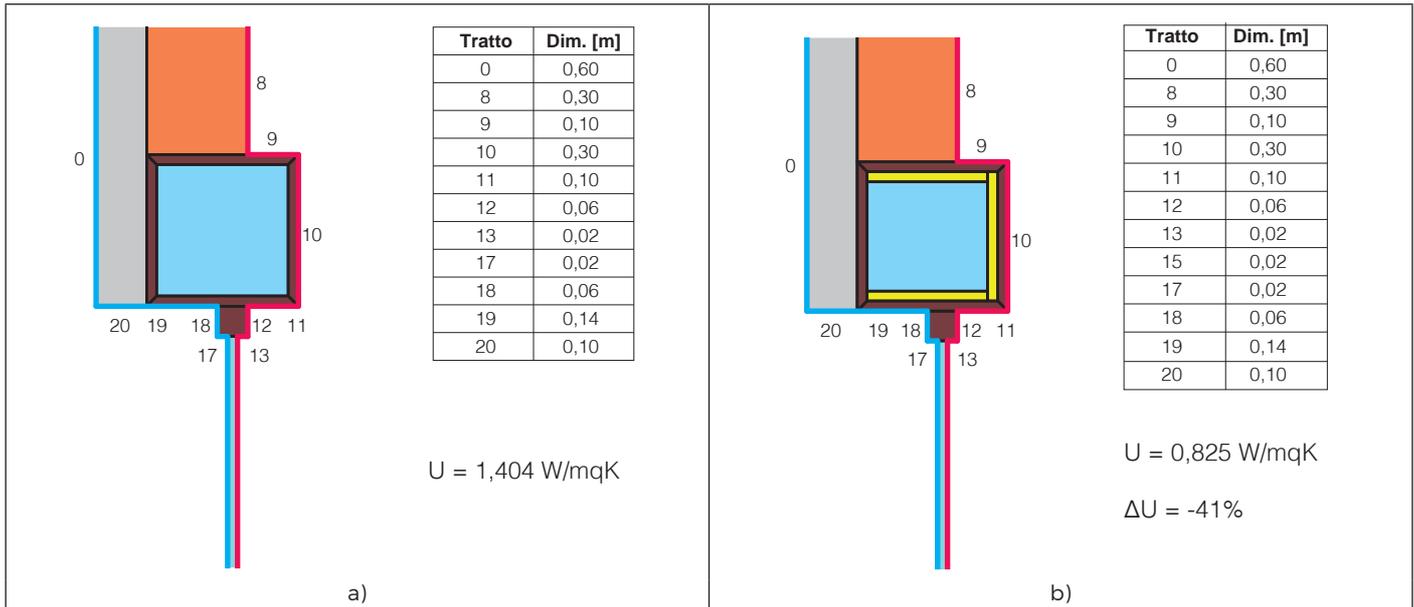


Figura 42 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $U = 1,404 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto isolato nei 3 lati interni su una parete non isolata, $U = 0,825 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Nel caso in cui si volesse ulteriormente ridurre il ponte termico è necessario aumentare la continuità dell'isolamento termico all'interno del cassonetto. In Figura 42b è riportato **il caso di un cassonetto con isolamento rivestito sui 3 lati della parte interna** (la parte del cassonetto verso l'esterno non è isolata); questa soluzione è tipica per gli inter-

venti di ristrutturazione qualora ci fosse lo spazio per la posa interna dell'isolante. In questo caso si nota come la trasmittanza termica lineica diminuisce fino al 60% ($\psi = 0,195 \text{ W/mK}$) e la temperatura superficiale minima in prossimità del ponte termico aumenta sensibilmente (da $15,8$ a $16,3 \text{ °C}$) come si evince dalla Figura 43.

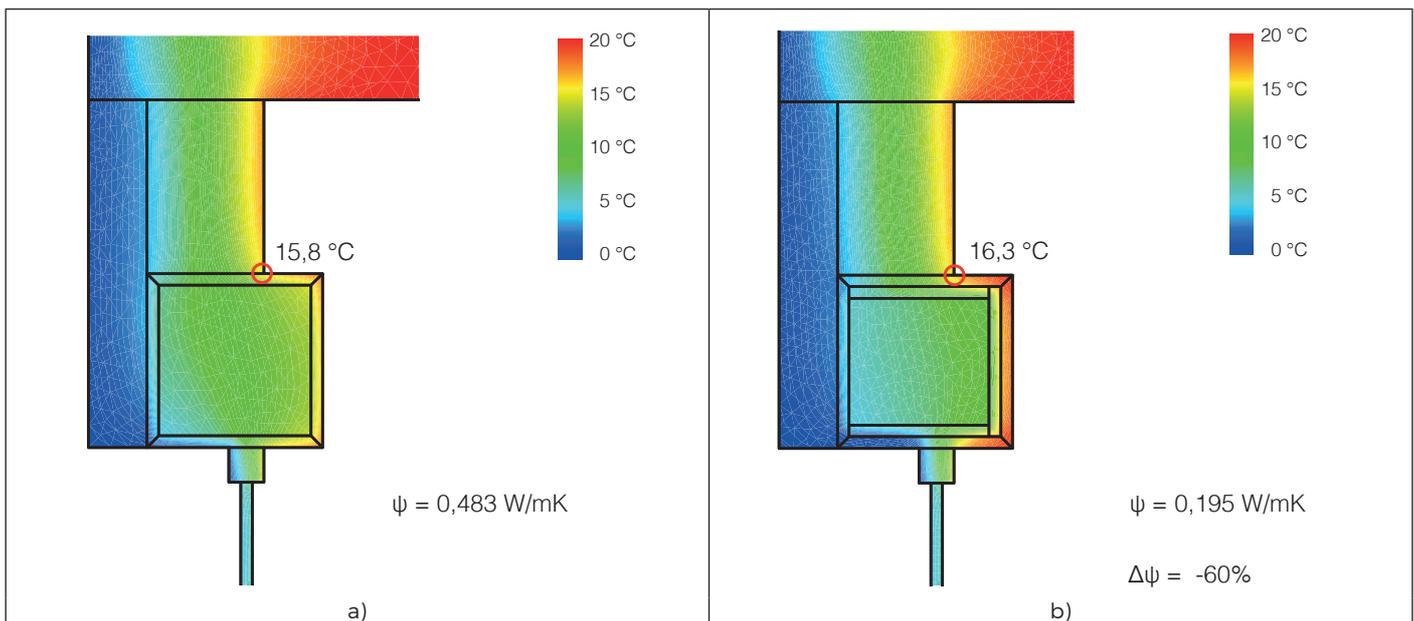


Figura 43 - a) Ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $\psi = 0,483 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un cassonetto isolato nei 3 lati interni su una parete non isolata, $\psi = 0,195 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

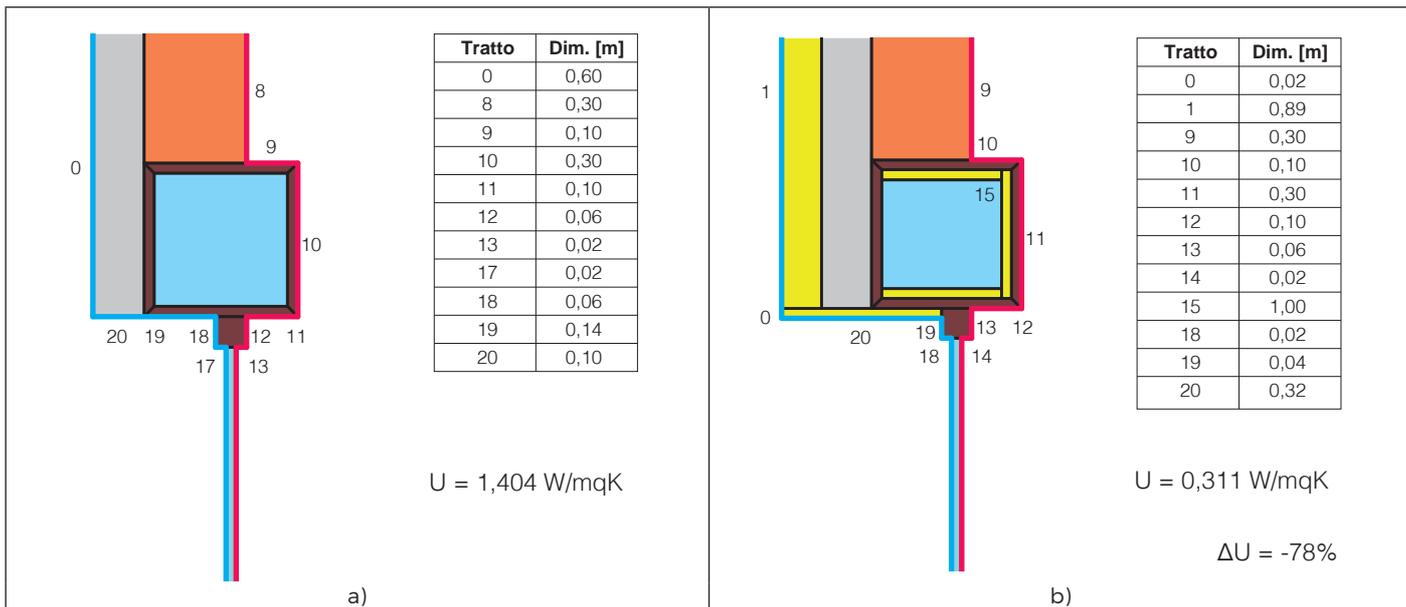


Figura 44 - a) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $U = 1,404 \text{ W/mqK}$ (riferimento). b) Stratigrafia di un ponte termico di un cassonetto isolato nei 3 lati interni su una parete isolata dall'esterno, $U = 0,311 \text{ W/mqK}$ (soluzione modificata).

Una soluzione ottimale potrebbe essere quella in Figura 44b e cioè con un cassonetto isolato internamente e uno strato di isolamento sul lato esterno della parete e sulla parte più esterna (orizzontale) del cassonetto. In questo caso la trasmittanza termica in prossimità del cassonetto

si ridurrebbe del 78%, la trasmittanza termica lineica del 77% ($\psi = 0,112 \text{ W/mK}$) e la temperatura superficiale critica supererebbe i 18°C . Una soluzione di questo tipo potrebbe risolvere quasi completamente il problema del ponte termico del cassonetto (vedi Figura 45).

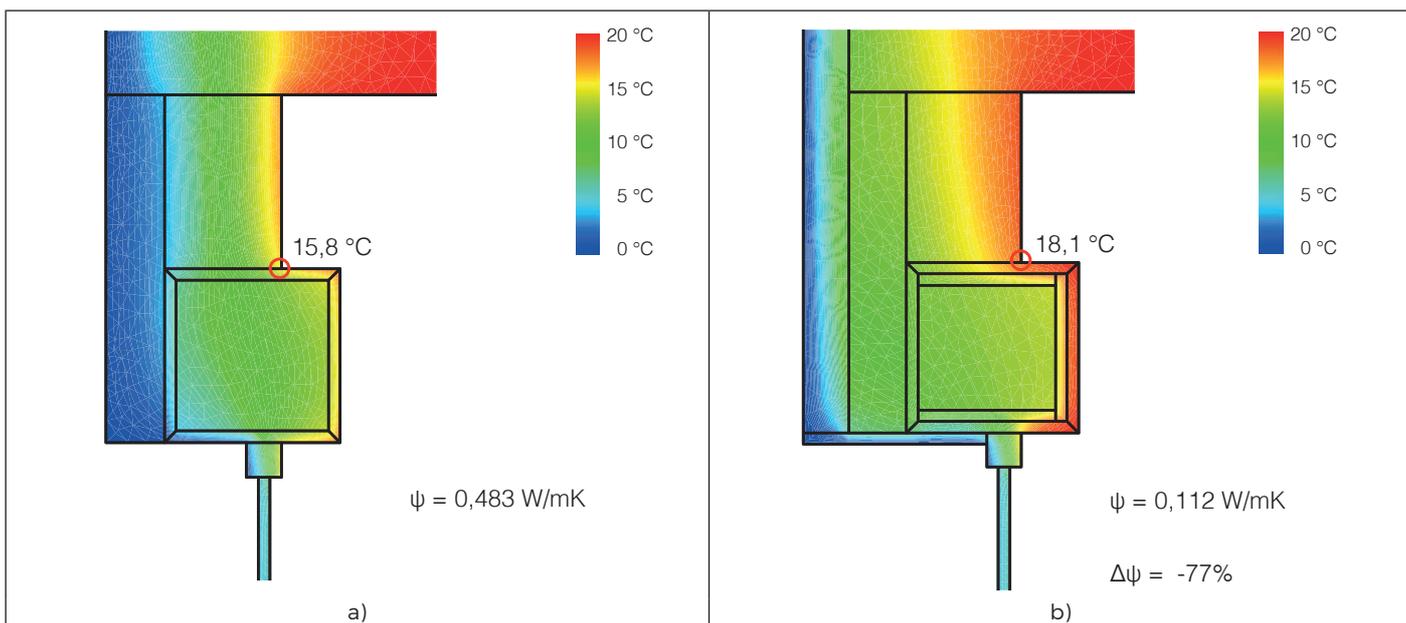


Figura 45 - a) Ponte termico di un cassonetto non isolato su una parete non isolata, $\psi = 0,483 \text{ W/mK}$ (riferimento). b) Ponte termico di un cassonetto isolato nei 3 lati interni su una parete isolata dall'esterno, $\psi = 0,112 \text{ W/mK}$ (soluzione modificata). Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

CASI PARTICOLARI

PONTE TERMICO DI UN BALCONE CON ISOLAMENTO TERMICO CONTINUO

Attualmente, per gli edifici di nuova costruzione la soluzione più diffusa per la riduzione del ponte termico del balcone è quella rappresentata in Figura 46; tale soluzione prevede la posa di un isolamento termico sul lato superiore e inferiore della soletta in cemento armato a sbalzo in modo da

avere una continuità termica con la parete.

La parete esterna è realizzata, partendo dall'interno verso l'esterno da uno strato di intonaco in calce e gesso, una muratura in laterizio alveolato da 30 cm, un rinzaffo per livellare la muratura, una malta cementizia necessaria per l'incollaggio dei pannelli di isolamento, un isolamento termico in polistirene estruso (XPS), una rasatura con rete di rinforzo e un rivestimento minerale in silicato di potassio. Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati che costituiscono la parete sono riportati nella Tabella 10.

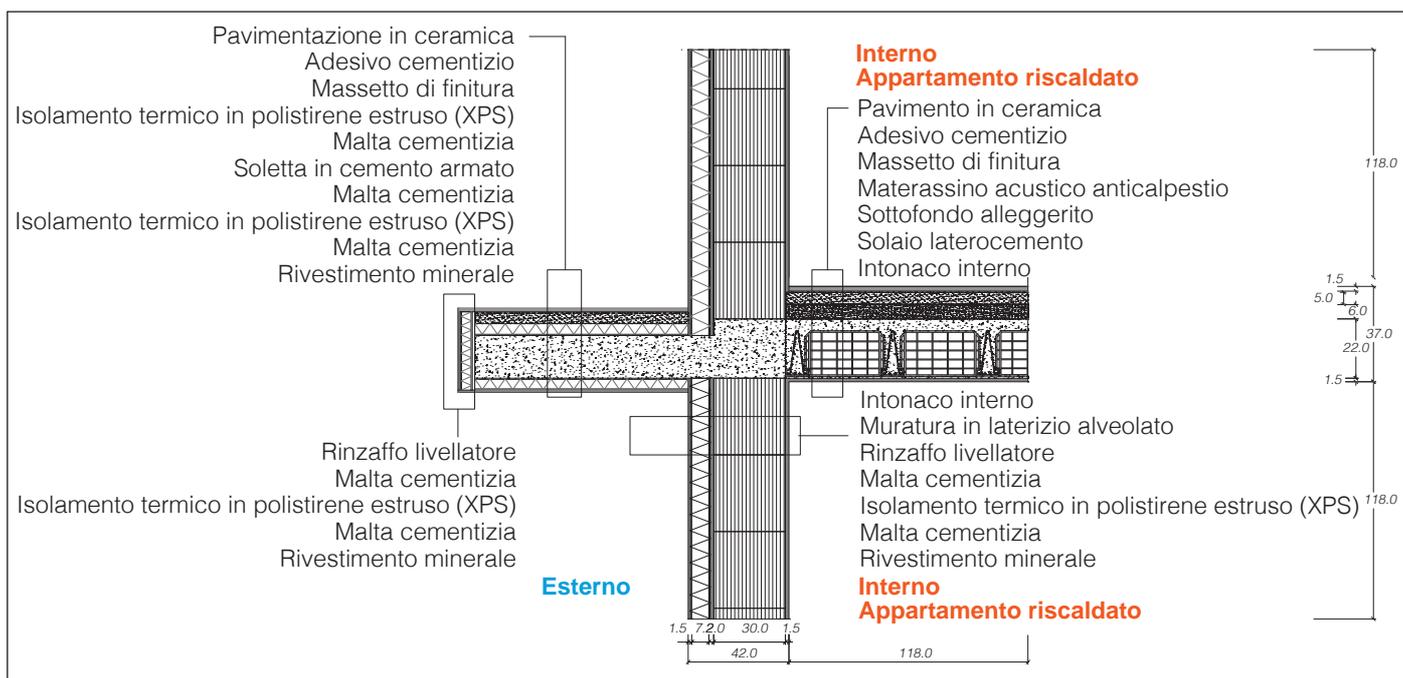


Figura 46 - Stratigrafia (sezione verticale) di un balcone in una parete avente un isolamento continuo, $U = 0,269 \text{ W/m}^2\text{K}$

Tabella 10 - Stratigrafia della parete (dall'interno verso l'esterno)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Intonaco in calce e gesso	0,015	0,900	0,017
Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	0,860
Rinzaffo livellatore di verticalità della muratura	0,010	1,160	0,009
Malta cementizia per l'incollaggio di pannelli termoisolanti	0,005	0,320	0,016
Isolamento termico in polistirene estruso (XPS)	0,080	0,031	2,581
Malta cementizia per la rasatura con rete di rinforzo	0,005	0,320	0,016
Rivestimento minerale base di silicato di potassio	0,001	0,93	0,001

Tabella 11 - Stratigrafia del solaio interpiano (dall'alto verso il basso)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Pavimentazione in ceramica	0,015	1,000	0,015
Adesivo cementizio per pavimentazione ceramica	0,005	1,400	0,004
Massetto di finitura premiscelato a base argilla espansa	0,050	0,269	0,186
Materassino acustico anticalpestio	0,005	0,035	0,143
Sottofondo premiscelato alleggerito a base argilla espansa	0,060	0,144	0,417
Solaio 22 cm in laterocemento	0,220	-	0,330
Intonaco in calce e gesso	0,015	0,900	0,017

Il solaio di calpestio separa due ambienti interni riscaldati (uno superiore e l'altro inferiore) e, partendo dall'alto verso il basso è costituito da un pavimento in ceramica, un adesivo cementizio per l'incollaggio del pavimento, un massetto di finitura premiscelato a base argilla espansa, un materassino acustico anticalpestio, un sottofondo premiscelato alleggerito a base argilla espansa, un solaio in latero-cemento e infine un intonaco in calce e gesso sul lato inferiore del solaio. Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati che costituiscono il solaio di calpestio interno sono riportati nella Tabella 11. Partendo dall'alto verso il basso, il balcone è costituito da un pavimento in ceramica, un adesivo cementizio per l'incollaggio del pavimento, un massetto di finitura premiscelato a base argilla

espansa, un isolamento termico in polistirene estruso (XPS), una malta cementizia necessaria per l'incollaggio dei pannelli di isolamento superiori, una soletta in cemento armato, un ulteriore malta cementizia necessaria per l'incollaggio dei pannelli di isolamento inferiori, un isolamento termico in polistirene estruso (XPS) sul lato inferiore, una rasatura con rete di rinforzo e un rivestimento minerale a base di silicato di potassio.

Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati che costituiscono il solaio di calpestio interno sono riportati nella Tabella 12.

Inoltre è presente un isolamento termico anche sul lato esterno della soletta al fine di creare una continuità termica tra i pannelli isolanti superiori e quelli inferiori della soletta.

Tabella 12 - Stratigrafia del balcone (dall'alto verso il basso)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Pavimentazione in ceramica	0,015	1,000	0,015
Adesivo cementizio per pavimentazione ceramica	0,005	1,400	0,004
Massetto di finitura premiscelato a base argilla espansa	0,035	0,269	0,130
Isolamento termico in polistirene estruso (XPS)	0,040	0,034	1,176
Malta cementizia monocomponente, in polvere, per l'incollaggio di pannelli termoisolanti	0,005	0,320	0,016
Soletta in cemento armato	0,18	1,200	0,150
Malta cementizia monocomponente, in polvere, per l'incollaggio di pannelli termoisolanti	0,005	0,320	0,016
Isolamento termico in polistirene estruso (XPS)	0,040	0,034	1,176
Malta cementizia per la rasatura con rete di rinforzo	0,005	0,320	0,016
Rivestimento minerale base di silicato di potassio	0,001	0,93	0,001

Eseguendo un calcolo agli elementi finiti si ottiene un valore della trasmittanza termica lineica del ponte termico di 0,337 W/mK. Per diminuire sensibilmente (circa il 5-10%) tale valore è necessario aumentare lo spessore dello strato isolante di rivestimento del balcone; tuttavia si ritiene che per avere una riduzione maggiore (circa il 40-50%) della trasmittanza termica lineica è necessario introdurre il dis-connettore termico (vedi pag. 36). In Figura 47 sono riportate le temperature del modello studiato con l'indicazione del punto critico (zona del ponte termico avente una temperatura superficiale interna più bassa di quelle limitrofe); si nota che in tale punto la temperatura superficiale è di 17,8 °C, valore superiore alla temperatura critica (16,7 °C) per le condizioni climatiche interne (temperatura dell'aria di 20 °C e umidità relativa dell'aria del 65 %) ed esterne (città di Bologna) considerate in accordo alla normativa UNI EN ISO 13788:2013. Questa soluzione, per le condizioni climatiche analizzate non presenta rischi di formazione di muffa e condensa in prossimità del ponte termico.

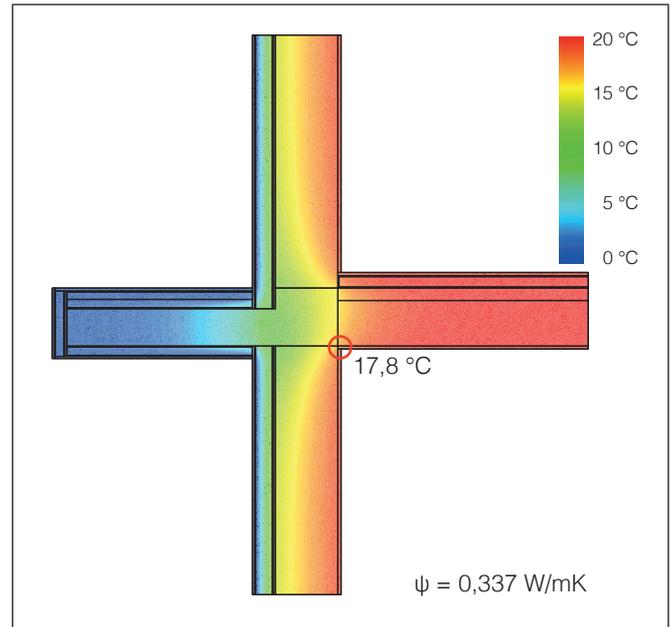


Figura 47 - Ponte termico di un balcone in una parete avente un isolamento continuo, $U = 0,269 \text{ W/mK}$, $\psi = 0,337 \text{ W/mK}$. Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO D'ANGOLO TRA UNA PARETE VERTICALE E UNA COPERTURA INCLINATA IN LEGNO

Il caso seguente è relativo a un incrocio tra un tetto in legno ventilato e una parete verticale. La parete rivolta verso l'esterno è costituita, partendo dall'interno verso l'esterno da un intonaco di gesso, una muratura di blocchi di laterizio, un strato di rinzaffo

livellatore, una malta cementizia per l'incollaggio dei pannelli isolanti, uno strato di isolamento termico in polistirene estruso (XPS), un'intercapedine d'aria non ventilata, un'altra muratura in blocchi di laterizio e un intonaco esterno in calce e cemento. Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati che costituiscono la parete sono riportati nella Tabella 13.

Tabella 13 - Stratigrafia della parete (dall'interno verso l'esterno)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Intonaco interno in gesso	0,015	0,700	0,021
Muratura in blocchi di laterizio (25 cm)	0,250	0,223	1,121
Rinzaffo livellatore di verticalità della muratura	0,010	1,160	0,009
Malta cementizia per l'incollaggio di pannelli termoisolanti	0,005	0,320	0,016
Isolamento termico in polistirene estruso (XPS)	0,080	0,036	2,222
Intercapedine d'aria non ventilata	0,020	-	0,180
Muratura in blocchi di laterizio (8 cm)	0,080	0,200	0,400
Intonaco esterno in calce e cemento	0,025	0,900	0,028

La copertura è costituita dai seguenti materiali partendo dal basso verso l'alto: un assito in abete, una membrana traspirante in poliestere, tre pannelli isolanti in fibra di legno accoppiati, un tavolato in legno di contenimento, una membrana traspirante in poliestere, un'intercapedine d'aria fortemente ventilata (secondo la definizione riportata nella UNI EN ISO 6946:2008), un tavolato di chiusura del pacchetto, una guaina bituminosa e infine le tegole in cotto. Il nodo parete-copertura è costituito da un cordolo in cemento armato e una zambinatura

(riempimento degli spazi interposti tra i travetti) di completamento. Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati che costituiscono la copertura sono riportati nelle Tabelle 14 e 15.

La parete esterna, costituita dagli strati riportati in Tabella 13, possiede una trasmittanza termica di 0,241 W/mqK, mentre quella della copertura in legno (vedi Tabella 14) è di 0,279 W/mqK.

In Figura 48 è riportato lo schema geometrico del ponte termico ottenuto dall'intersezione tra la parete esterna e la copertura in legno.

Tabella 14 - Stratigrafia della copertura in legno (dal basso verso l'alto)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Assito da tetto in abete	0,020	0,180	0,111
Membrana traspirante in poliestere	0,005	0,220	0,023
Pannello isolante in fibra di legno	0,060	0,039	1,538
Pannello isolante in fibra di legno	0,040	0,050	0,800
Pannello isolante in fibra di legno	0,040	0,050	0,800
Legno contenimento isolante	0,020	0,200	0,100
Membrana traspirante in poliestere	0,005	0,220	0,023
Intercapedine d'aria fortemente ventilata (*)	0,06	-	-
Tavolato di chiusura pacchetto (*)	0,025	-	-
Guaina bituminosa (*)	0,005	-	-
Tegole in cotto (*)	-	-	-

(*) La resistenza termica dello strato è stata scelta in accordo al punto 5.3.4 della UNI EN ISO 6489:2008.

Tabella 15 - Stratigrafia del dettaglio del nodo copertura-parete

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Calcestruzzo armato	-	2,500	-
Zambinatura	-	0,350	-

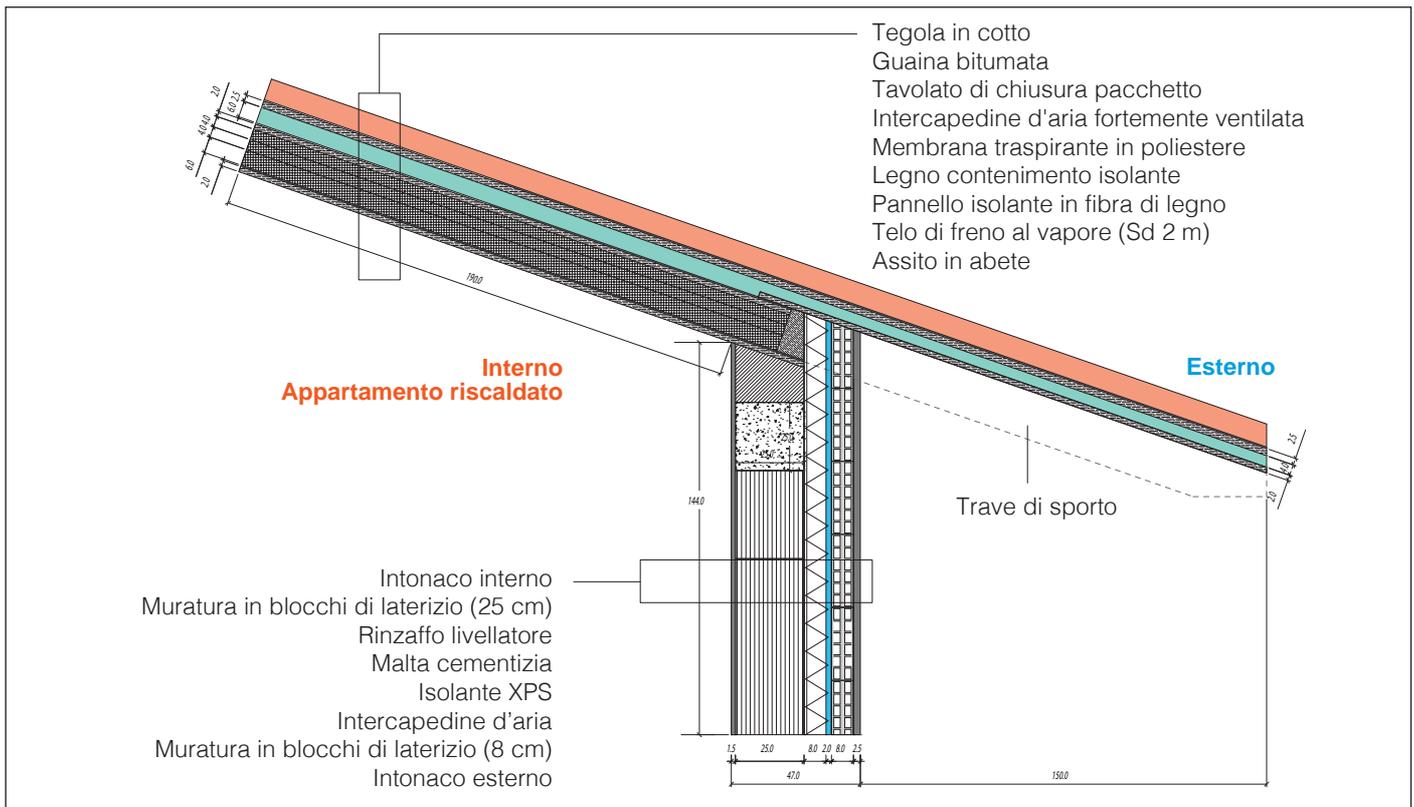


Figura 48 - Stratigrafia (sezione verticale) di un ponte termico d'angolo tra una parete verticale ($U = 0,241 \text{ W/mqK}$) e una copertura inclinata in legno ($U = 0,279 \text{ W/mqK}$)

Ai fini del calcolo della trasmittanza termica lineica del ponte termico, si è tenuto conto del punto 5.3.4 della norma UNI EN ISO 6946:2008 relativamente agli strati indicati con un "*" in Tabella 14 (intercapedine d'aria fortemente ventilata, tavolato di chiusura del pacchetto, guaina bituminosa e tegole in cotto); in particolare "la resistenza termica totale della copertura è stata ottenuta trascurando la resistenza termica dell'intercapedine d'aria e di tutti gli altri strati che separano detta intercapedine d'aria dall'ambiente esterno, e includendo una resistenza superficiale esterna pari al valore di $R_{si} = 0,04 \text{ mqK/W}$ ".

Considerando tale ipotesi si ottiene un valore della trasmittanza termica lineica del ponte termico tra la copertura e la parete di $0,122 \text{ W/mK}$. La temperatura superficiale del punto critico è di $18,6 \text{ °C}$, valore superiore alla temperatura minima per la formazione di muffa e condensa (verifica positiva). I risultati delle simulazioni sono riportati nella Figura 48 nella quale si nota che non è stato modellato lo sporto della copertura, lo strato di ventilazione e gli strati superiori in accordo al suggerimento del punto 5.3.4 della UNI EN ISO 6946:2008.

Per questa soluzione, la zona che necessita di una maggiore attenzione è quella relativa all'interse-

zione tra gli strati di isolamento termico della copertura e quelli della parete esterna; si nota come nel caso specifico ci sia un elemento in legno (vedi Figura 49) che ha la funzione di fornire una continuità dell'isolamento termico.

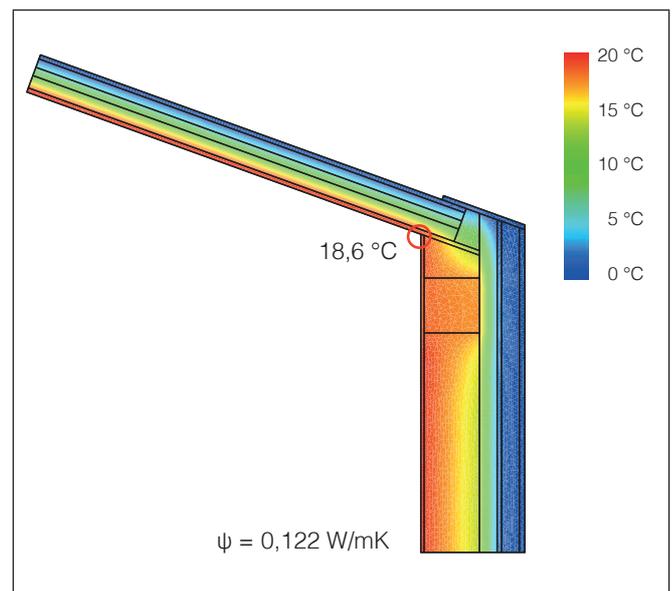


Figura 49 - Ponte termico d'angolo tra una parete verticale ($U = 0,241 \text{ W/mK}$) e un copertura inclinata in legno ($U = 0,279 \text{ W/mK}$), $\psi = 0,122 \text{ W/mK}$. Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

PONTE TERMICO DI UN BANCALE DI UNA FINESTRA

L'ultimo caso particolare analizzato è quello relativo al ponte termico di un bancale con la presenza di isolamento termico. La parete esterna è costituita dai seguenti materiali partendo dall'interno verso l'esterno: un intonaco di gesso, una muratura di blocchi di laterizio, un strato di rinzafo livellatore, una malta cementizia per l'incollaggio dei pannelli isolanti, uno strato di isolamento termico in polistirene XPS, un'intercapedine d'aria non ventilata, un'altra muratura in blocchi di laterizio e un intonaco esterno in calce e cemento.

Gli spessori e le caratteristiche termiche degli strati

che costituiscono la parete sono riportati nella Tabella 16.

Il bancale è costituito da un blocco di marmo poggiato sulla parete; tra la parete e il bancale c'è uno strato di isolamento termico avente uno spessore di 2 cm. Il telaio della finestra poggia in parte sul bancale e in parte su un controtelaio con isolamento termico. La presenza dell'isolamento termico sia sotto il bancale sia nella zona del controtelaio è fondamentale per ridurre le dispersioni legate al ponte termico. In Figura 50 è possibile notare il dettaglio costruttivo e le dimensioni dei materiali, mentre le caratteristiche fisiche degli strati sono riportati in Tabella 17.

Tabella 16 - Stratigrafia della parete (dall'interno verso l'esterno)

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Intonaco interno in gesso	0,015	0,700	0,021
Muratura in blocchi di laterizio (25 cm)	0,250	0,223	1,121
Rinzafo livellatore di verticalità della muratura	0,010	1,160	0,009
Malta cementizia per l'incollaggio di pannelli termoisolanti	0,005	0,320	0,016
Isolamento termico in polistirene estruso (XPS)	0,080	0,036	2,222
Intercapedine aria non ventilata	0,020	-	0,180
Muratura in blocchi di laterizio (8 cm)	0,080	0,200	0,400
Intonaco esterno in calce e cemento	0,025	0,900	0,028

Tabella 17 - Stratigrafia del nodo bancale telaio finestra

Materiale	Spessore [m]	Conducibilità termica [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]
Malta di cemento	-	1,400	-
Isolamento controtelaio	0,04	0,040	1,000
Controtelaio in legno	-	0,200	-
Telaio in abete (finestra)	-	0,120	-
Bancale in marmo	-	2,000	-

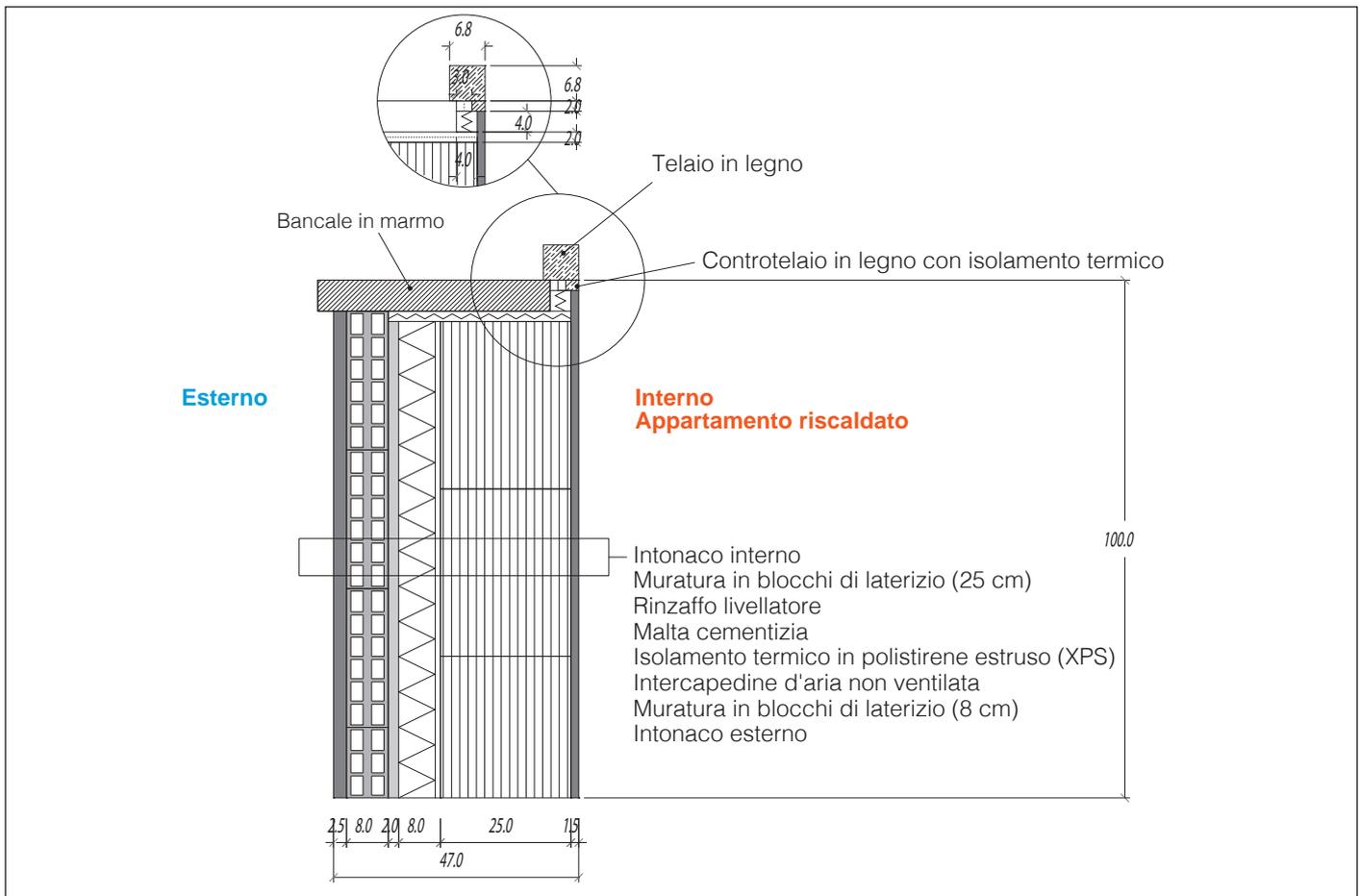


Figura 50 - Stratigrafia (sezione verticale) di un ponte termico di un bancale su una parete isolata ($U = 0,241 \text{ W/mqK}$)

Le simulazioni agli elementi finiti forniscono un risultato della trasmittanza termica del ponte termico del bancale di $0,266 \text{ W/mqK}$. La temperatura superficiale, più bassa in corrispondenza del ponte termico, è di $16,7 \text{ °C}$ ed è al limite per la verifica del rischio di formazione di muffa e condensa (la verifica è positiva). Le temperature ottenute dalla simulazione sono riportate nella Figura 51.

Per questa tipologia di ponte termico, **il punto critico sul quale è necessario prestare particolare attenzione (soprattutto durante la posa in opera), è quello individuato nella zona che comprende il telaio della finestra, il controtelaio e il bancale.** Al fine di ottenere una temperatura superficiale superiore a quella critica è necessario non solo installare uno strato di isolante tra il bancale e il controtelaio, ma prevedere anche un discreto spessore (almeno 3-4 cm di larghezza); per contro invece **non è necessario aumentare lo spessore di isolante installato tra la parete e il bancale (uno spessore di 2 cm è più che sufficiente) poiché la zona non influenza direttamente il ponte termico.**

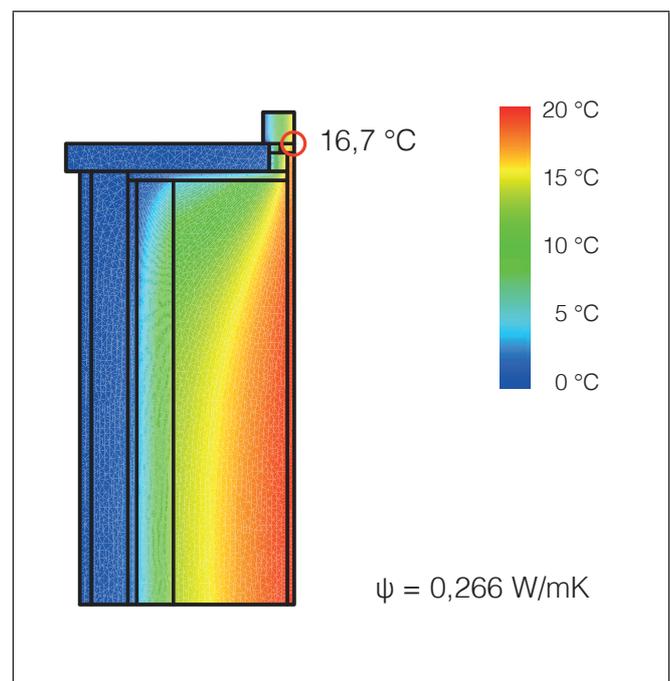


Figura 51 - Ponte termico di un bancale su una parete isolata ($U = 0,241 \text{ W/mqK}$), $\psi = 0,266 \text{ W/mqK}$. Simulazione eseguita con il software TerMus-PT versione 6.00a.

GLOSSARIO

Per rendere più chiara la lettura del testo, si riportano alcune definizioni delle principali grandezze fisiche che interessano il comportamento termo-fisico degli edifici.

Coefficiente di accoppiamento termico o Coefficiente di accoppiamento termico lineico: nel caso bidimensionale, esprime il flusso termico scambiato diviso per la differenza tra le temperature dei due ambienti termici tra i quali si trova l'elemento edilizio.

Coefficiente di perdita del calore per trasmissione, HT o Coefficiente di scambio termico per trasmissione: è espresso in W/K, indica la quantità di flusso termico che attraversa un elemento o componente edilizio, per unità di tempo e di differenza di temperatura tra interno ed esterno. In questo coefficiente sono considerati anche le dispersioni dei ponti termici.

Conduttività termica: misurata in W/mK, è la grandezza fisica che esprime la capacità di un materiale di farsi attraversare dal calore.

Fattore di temperatura in corrispondenza alla superficie interna (f_{Rsi}): è la differenza tra la temperatura della superficie interna e dell'aria esterna, diviso per la differenza tra la temperatura dell'aria interna e dell'aria esterna calcolata con una resistenza superficiale interna R_{si} .

Flusso termico: rappresenta la quantità di calore trasferita da o verso un sistema nell'unità di tempo.

Ponte termico lineare: è la discontinuità individuata dall'intersezione tra due elementi edilizi (per esempio ponte termico d'angolo riferito all'intersezione tra due pareti verticali).

Ponte termico puntuale: è la discontinuità limitata a una zona molto piccola (ad esempio negli spigoli degli ambienti o nei fissaggi meccanici degli isolamenti termici a cappotto).

Resistenza termica: esprime la resistenza al passaggio di calore di un elemento, e può essere relativa a un singolo materiale, oppure all'intera parete (ottenuta come somma delle singole resistenze).

Temperatura di rugiada: è la temperatura alla quale, l'aria (o, più precisamente, la miscela aria-vapore) raggiungerebbe la saturazione se venisse raffreddata senza subire variazioni di pressione o di contenuto di vapore acqueo. Ogni ulteriore raffreddamento determinerebbe la condensazione del vapore acqueo in essa contenuto.

Trasmittanza termica: è espressa in W/mqK ed esprime la quantità di flusso di calore per unità di superficie, unità di tempo e grado di differenza di temperatura che attraversa un elemento edilizio. La trasmittanza termica può essere considerata come l'inverso della resistenza termica comprensiva anche delle resistenze superficiali interne ed esterne. Nel caso di alcuni materiali, come per esempio il vetro o i telai, la resistenza e la trasmittanza termica sono calcolati in accordo alle norme specifiche e fornite direttamente dai produttori.

Trasmittanza termica lineica o Coefficiente di trasmissione lineica: indicato con la lettera ψ e misurato in W/mK, è il parametro che rappresenta le dispersioni termiche di un ponte termico ovvero il flusso termico trasmesso diviso la lunghezza e la differenza di temperatura tra gli ambienti.

Umidità relativa critica in corrispondenza di una superficie: umidità relativa in corrispondenza di una superficie che può causare il deterioramento della superficie stessa, in particolare la crescita di muffe.

Zambinatura: riempimento e/o ammorsatura degli spazi interposti tra i travetti lungo il muro perimetrale al fine di migliorarne l'appoggio utilizzando un getto di conglomerato cementizio, mattoni o altro materiale simile.

BIBLIOGRAFIA

“PONTI TERMICI. LE GUIDE PRATICHE DEL MASTER CASA CLIMA”

a cura di C. Benedetti, Bu, press, 2015.

“THE INFLUENCE OF THERMAL BRIDGES ON THE BUILDING ENERGY PERFORMANCE: A SENSITIVITY ANALYSIS”

a cura di A. Capozzoli, A. Gorrino, V. Corrado, N. Cotrufo, R. Sora; in “Atti del VII Mediterranean Congress of Climatization (Climamed)”, 2013

“TERMODINAMICA E TRASMISSIONE DEL CALORE”

a cura di Y. A. Çengel; McGraw-Hill, 2005.

“I PONTI TERMICI IN EDILIZIA, LEGISLAZIONE TECNICA”

a cura di M. Cudicio; 2013.

“SVILUPPO E VALIDAZIONE DI MODELLI DI CALCOLO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA DELL'EDIFICIO: PONTI TERMICI E COMPONENTI SPECIALI DI INVOLUCRO”

a cura di A. Gorrino; Tesi di dottorato, 2012.

“PONTI TERMICI NEGLI EDIFICI”

a cura di C. Marinosci, K Fabbri; Wolters Kluwer, 2014.

“PRESTAZIONI ENERGETICHE INVERNALI ED ESTIVE: ANALISI E CONFRONTI SU UN EDIFICIO CAMPIONE”

a cura di C. Marinosci, S. Falcioni, G. Semprini; in “Atti del Convegno AICARR - Prestazioni energetiche del sistema edificio-impianto: Software per la diagnosi energetica ed il calcolo in regime invernale”, 2009.

“INDAGINI TERMOGRAFICHE DEI PONTI TERMICI”

a cura di D. Pepe, Legislazione Tecnica, 2016.

© BigMat Italia S.c.p.a.

Via Roma 74, 20060 Cassina de' Pecchi (Milano)

www.bigmat.it

Il Quaderno Tecnico *I Ponti Termici in Edilizia* è stato realizzato dall'Ufficio Tecnico di BigMat con la collaborazione editoriale di Wolters Kluwer.

I contenuti sono a cura di COSIMO MARINOSCI, Ingegnere Edile, Ph.D. in Ingegneria Energetica, EGE, formatore professionale e cultore della materia per le prestazioni, le certificazioni e le simulazioni energetiche dinamiche degli edifici. Ha all'attivo pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali e internazionali.

Si ringraziano Cristiano Preto, Paolo Politi, Luca Garelli e Cristian Guida per la gentile concessione di alcune fotografie e immagini termografiche.

Aggiornamento: luglio 2017

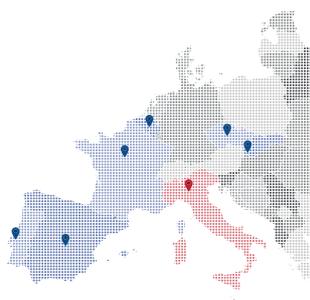
L'elaborazione dei testi, anche se curata con scrupolosa attenzione, non può comportare specifiche responsabilità per eventuali errori o inesattezze.



**PUNTI VENDITA DI MATERIALE PER COSTRUIRE,
RISTRUTTURARE E RINNOVARE.**

Nei Punti Vendita BigMat il nostro personale ti aiuta a individuare le migliori soluzioni e sistemi di prodotti per i tuoi progetti.

Da 36 anni in Europa per i professionisti e per tutti.



**IN EUROPA:
905 PUNTI VENDITA
2 MILIARDI DI EURO
DI FATTURATO**

**IN ITALIA:
195 PUNTI VENDITA
90 SHOWROOM
DI FINITURE**

BigMat
HOME OF BUILDERS

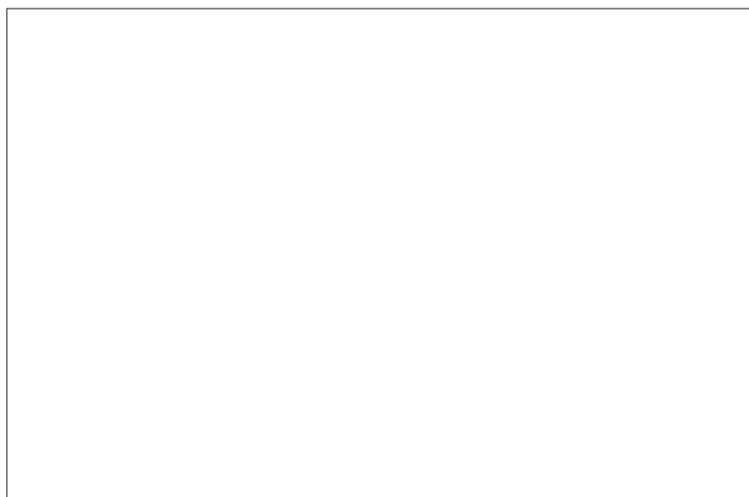


www.bigmat.it

BigMat

HOME OF BUILDERS

195 Punti Vendita in Italia di materiali per costruire, ristrutturare e rinnovare casa.



Spazio riservato per il timbro del Punto Vendita.



www.bigmat.it