

Seconda parte

Questa è la seconda delle tre parti in cui è suddivisa la trattazione.

Nella prima parte sono stati analizzati gli aspetti teorici dei "ponti termici" ed è stata presentata una procedura basata sull'applicazione di metodi numerici; tale procedura viene qui applicata ad alcuni dei casi indicati nella Norma UNI 7357-F.A. 3 [2].

Massimo Colombari,
Gian Andrea Cesaratto, Roberto Zecchin

PONTI TERMICI NELLE STRUTTURE EDILIZIE

Alcune osservazioni sui coefficienti lineici e valutazione delle temperature superficiali minime

5 ANALISI DEI CASI TRATTI DALLA NORMA UNI 7357 FA-3

Si analizzano ora alcuni dei casi considerati dalla norma UNI 7357 FA-3 [2]⁽¹⁾. Lo scopo di questa analisi è duplice: da un lato vengono confrontati i valori dei coefficienti lineici k di trasmissione del calore ottenuti dall'analisi numerica (codice di calcolo *Heat2* [12]) con quelli ottenibili applicando le indicazioni fornite dalla norma, al fine di verificare le indicazioni da essa

⁽¹⁾ Il foglio aggiuntivo FA 3 (1989) è contenuto nel volume M10 "Norme riguardanti il riscaldamento, la ventilazione e il condizionamento dell'aria - Progettazione impiantistica", edito dall'UNI.



suggerite; dall'altro vengono raccolti i valori minimi dei fattori di temperatura in un archivio utilizzabile per valutare il pericolo di condensazione superficiale. Tutti i casi trattati, che coinvolgono esclusivamente pareti verticali, sono schematizzati con modelli bidimensionali, le cui dimensioni sono state scelte rispettando le indicazioni suggerite a tal proposito dalla norma EN ISO 10211-1 [4] (in particolare è stata assunta pari ad un metro la distanza che separa le superfici adiabatiche, cioè le zone a flusso termico monodimensionale, dall'elemento centrale); anche per quanto riguarda la scelta del reticolo, come descritto nel precedente paragrafo 4 (parte I della presente trattazione), si sono adottati, per i diversi modelli, degli schemi che rispettano le prescrizioni della stessa norma.

Sono state indagate diverse combinazioni di conduttività termica dei materiali costituenti le strutture e di spessori delle medesime. È ovvio che la casistica possibile è pressochè infinita: ulteriori casi potranno essere oggetto di una successiva fase di analisi.

5.1 Spigolo costituito da due pareti esterne

In questo paragrafo viene preso in considerazione il caso di uno spigolo costituito da due pareti esterne; a seconda delle caratteristiche delle due pareti e di come esse si collegano, per il calcolo dei coefficienti

lineici la norma suggerisce delle formule differenti (a tal riguardo si veda il punto A.3.3. della UNI 7357 FA-3 [2]). Di seguito vengono analizzati quattro differenti tipologie di spigolo (tutte riconducibili al punto A.3.3.1 della suddetta norma).

5.1.1 Spigolo tra pareti uguali

In questo caso le due pareti costituenti lo spigolo sono caratterizzate dagli stessi valori della trasmittanza termica K e dello spessore s (fig. 7).

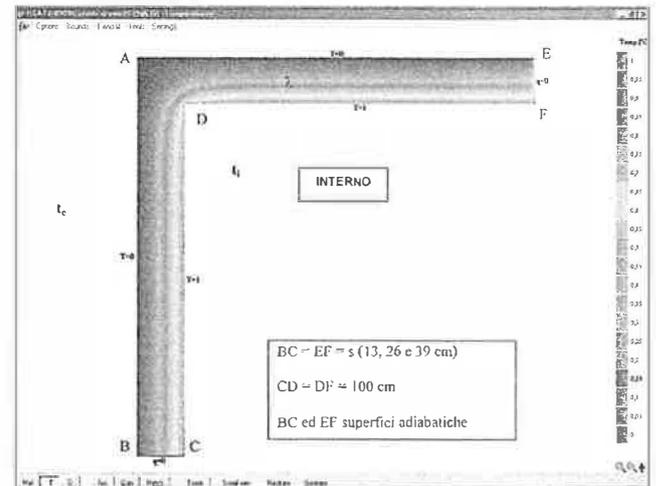


Figura 7 - Caratteristiche termiche e geometriche delle pareti costituenti lo spigolo

Tabella 2 - Spigolo tra due pareti uguali omogenee - spessore: 13 cm

λ [W/mK]	K [W/m ² K]	k [W/(m K)]	k_n [W/(m K)]	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,22	0,036	0,032	0,59	0,53	0,44
0,4	2,03	0,053	0,053	0,45	0,39	0,30
0,6	2,61	0,065	0,068	0,37	0,32	0,24
0,8	3,04	0,072	0,079	0,32	0,27	0,20
1,0	3,37	0,078	0,088	0,29	0,24	0,18
1,2	3,64	0,082	0,095	0,27	0,22	0,16
1,4	3,86	0,085	0,100	0,25	0,20	0,14
1,6	4,04	0,089	0,105	0,23	0,19	0,13

Tabella 3 - Spigolo tra due pareti uguali omogenee - spessore: 26 cm

λ [W/mK]	K [W/m ² K]	k [W/(m K)]	k_n [W/(m K)]	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	0,68	0,044	0,035	0,71	0,66	0,58
0,4	1,23	0,073	0,064	0,58	0,53	0,44
0,6	1,67	0,093	0,087	0,50	0,44	0,35
0,8	2,04	0,109	0,106	0,45	0,39	0,30
1,0	2,35	0,121	0,122	0,40	0,35	0,27
1,2	2,61	0,131	0,136	0,37	0,31	0,24
1,4	2,84	0,139	0,148	0,34	0,29	0,22
1,6	3,04	0,145	0,158	0,32	0,27	0,20

Tabella 4 - Spigolo tra due pareti uguali omogenee - spessore: 39 cm

λ [W/mK]	K [W/m ² K]	k [W/(m K)]	k_n [W/(m K)]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,47	0,047	0,037	0,77	0,73	0,65
0,4	0,88	0,082	0,068	0,66	0,60	0,52
0,6	1,23	0,110	0,096	0,58	0,52	0,43
0,8	1,53	0,131	0,119	0,53	0,47	0,38
1,0	1,80	0,148	0,140	0,48	0,42	0,33
1,2	2,04	0,163	0,159	0,45	0,39	0,30
1,4	2,25	0,176	0,175	0,42	0,36	0,28
1,6	2,44	0,186	0,190	0,39	0,33	0,25

Si è voluto studiare il comportamento termico dello spigolo al variare della sua conduttività termica λ , per tre differenti valori dello spessore s delle pareti che lo costituiscono (13, 26 e 39 cm).

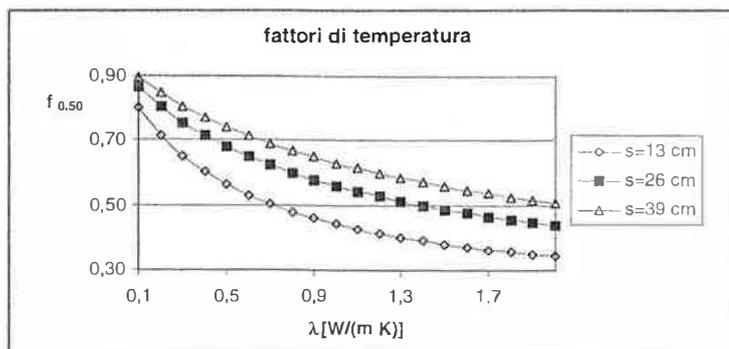
Per questa tipologia di ponte termico la norma indica un coefficiente lineico k pari a:

$$k_n = 0,2 \cdot K \cdot s \quad (7)$$

dove K ed s sono, rispettivamente, trasmittanza unitaria e spessore comuni alle due pareti.

Ricordando che nella simulazione le superfici di traccia BC ed EF sono state assunte adiabatiche, sono stati calcolati i seguenti parametri:

1. Trasmittanza termica globale K ;
2. Coefficiente lineico k_n indicato dalla formula (21) della [2];
3. Coefficiente lineico k ottenuto mediante elaborazione con Heat2;



4. Fattori di temperatura $f_{0,25}$, $f_{0,35}$ e $f_{0,50}$ con resistenza liminare interna rispettivamente pari a: $R_{si}=0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$, $0,35 \text{ m}^2\text{K/W}$, $0,50 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Per quanto riguarda i fattori di temperatura, le tabelle ne quantificano, per un fissato spessore s , il prevedibile andamento decrescente al crescere della conduttività termica λ , come si può osservare qualitativamente in figura 8.

Figura 9 - Confronto tra i coefficienti lineici k_n e k al variare di λ , per $s = 26 \text{ cm}$

Per quanto riguarda i coefficienti lineici, confrontando i valori di k , ottenuti in questa sede, con i valori di k_n , indicati dalla norma [2], si nota come vi sia un sostanziale accordo tra i due e come le differenze si mantengano percentualmente contenute.

A titolo di esempio in figura 9 è rappresentato graficamente il caso di $s = 26 \text{ cm}$.

5.1.2 Pareti aventi stessa conduttività termica e differente spessore

In questo caso le due pareti che formano lo spigolo, pur avendo la stessa conduttività termica λ , presentano spessori s_1 ed s_2 diversi (fig. 10).

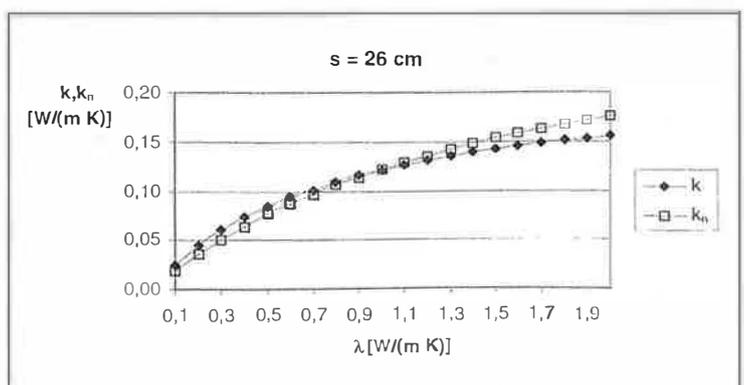
Anche in questo caso il coefficiente lineico k indicato dalla norma è pari a:

$$k_n = 0,2 \cdot K \cdot s \quad (7)$$

dove K ed s sono, rispettivamente, trasmittanza unitaria e spessore medio tra le due pareti. Si è studiato il comportamento termico dello spigolo al variare della sua conduttività termica λ , per tre differenti combinazioni dei valori degli spessori s_1 ed s_2 delle pareti che lo costituiscono (si veda la tabella 5).

Ricordando che nella simulazione le superfici di traccia BC ed EF sono state assunte come adiabatiche, per il calcolo dei coefficienti lineici si sono seguite le stesse procedure del caso pre-

Figura 8 - Fattori di temperatura al variare di s e λ



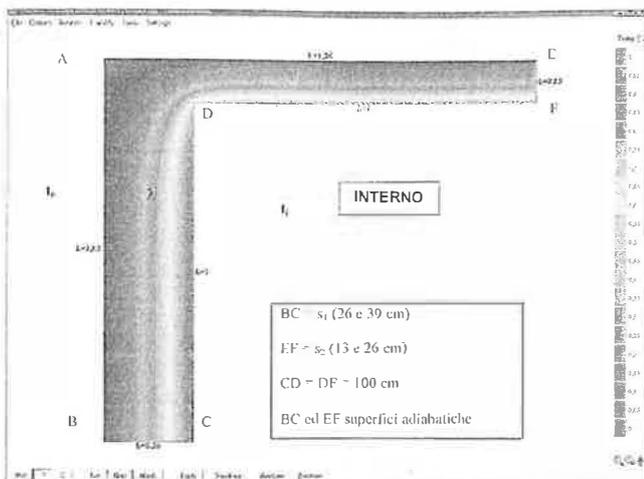


Figura 10 - Caratteristiche termiche e geometriche delle pareti costituenti lo spigolo

cedente. I risultati ottenuti sono raccolti nelle tabelle 6, 7, 8. Il grafico di fig. 11 evidenzia l'andamento decrescente dei fattori di temperatura al crescere della conduttività termica λ , a parità di geometria dello spigolo. Confrontando l'andamento di k

CASO	s_1 [cm]	s_2 [cm]	Tabella
A	26	13	6
B	39	13	7
C	39	26	8

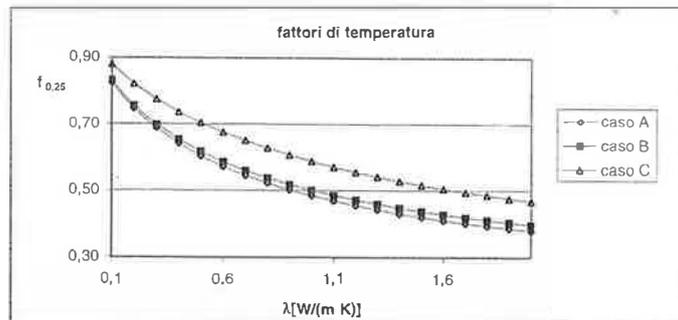


Figura 11 - Fattori di temperatura al variare di s_{medio} e λ

rispetto a quello di k_n , si notano due comportamenti distinti: nei casi A e C la situazione è analoga a quella del paragrafo precedente, ovvero k_n approssima k dapprima per difetto, poi per eccesso, mantenendo comunque gli scostamenti percentualmente contenuti.

Nel caso B invece, in cui la differenza tra gli spessori delle due pareti a contatto è doppia rispetto agli altri due casi considerati, k_n approssima per difetto k in tutto l'intervallo di λ studiato, con errori percentualmente sempre superiori al 5%.

5.1.3 Pareti aventi differente conduttività termica e differente spessore

In questo caso le due pareti, oltre a presentare spessori differenti, presentano anche conduttività termi-

Tabella 6 - Spigolo tra due pareti omogenee con spessori differenti:
Caso A: $s_1 = 26$ cm, $s_2 = 13$ cm, $s_{medio} = 19,5$ cm

λ [W/mK]	K_{medio} [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	0,95	0,046	0,037	0,63	0,57	0,49
0,4	1,63	0,073	0,064	0,50	0,44	0,35
0,6	2,14	0,091	0,083	0,42	0,36	0,28
0,8	2,54	0,104	0,099	0,37	0,31	0,24
1,0	2,86	0,114	0,112	0,33	0,28	0,21
1,2	3,13	0,121	0,122	0,30	0,25	0,19
1,4	3,35	0,127	0,131	0,28	0,23	0,17
1,6	3,54	0,131	0,138	0,26	0,22	0,16

Tabella 7 - Spigolo tra due pareti omogenee con spessori differenti:
Caso B: $s_1 = 39$ cm, $s_2 = 13$ cm, $s_{medio} = 26$ cm

λ [W/mK]	K_{medio} [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	0,85	0,058	0,044	0,64	0,59	0,50
0,4	1,46	0,094	0,076	0,51	0,45	0,37
0,6	1,92	0,120	0,100	0,44	0,38	0,30
0,8	2,29	0,139	0,119	0,39	0,33	0,25
1,0	2,59	0,153	0,135	0,35	0,30	0,22
1,2	2,84	0,165	0,148	0,32	0,27	0,20
1,4	3,06	0,174	0,159	0,30	0,25	0,18
1,6	3,24	0,182	0,169	0,28	0,23	0,17

Tabella 8 - Spigolo tra due pareti omogenee con spessori differenti:

Caso C: $s_1 = 39$ cm, $s_2 = 26$ cm, $s_{\text{medio}} = 32,5$ cm

λ [W/mK]	K_{medio} [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	0,58	0,048	0,038	0,73	0,69	0,61
0,4	1,05	0,082	0,068	0,61	0,56	0,47
0,6	1,45	0,107	0,094	0,54	0,48	0,39
0,8	1,78	0,127	0,116	0,48	0,42	0,33
1,0	2,07	0,142	0,135	0,44	0,38	0,29
1,2	2,33	0,155	0,151	0,40	0,34	0,26
1,4	2,55	0,166	0,165	0,37	0,32	0,24
1,6	2,74	0,174	0,178	0,35	0,30	0,22

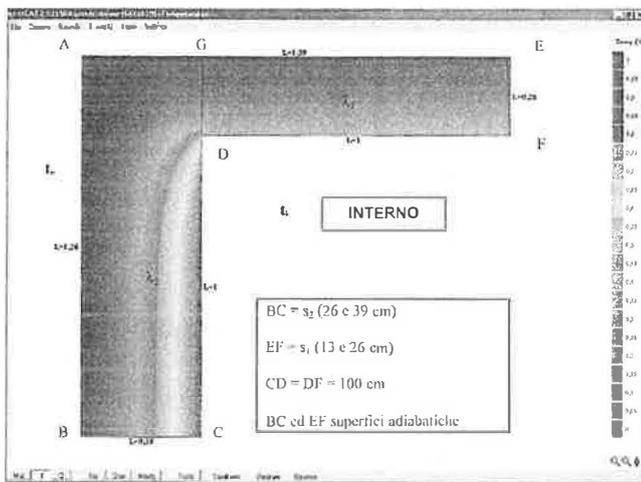


Figura 12 - Caratteristiche termiche e geometriche delle pareti che formano lo spigolo

che diverse (si veda la figura 12, in cui si è indicata col riferimento 2 la parete che forma lo spigolo).

In questo caso la trasmittanza lineare, secondo [2], è data da:

$$k_n = 0,2 s / (0,2 + R_2 s_1/s_2) \quad (8)$$

dove:

R_2 è la resistenza termica della parete che forma lo spigolo (riferimento 2 in figura);

s_1 ed s_2 sono, rispettivamente, gli spessori delle pareti 1 e 2;

s la media aritmetica di s_1 ed s_2 .

CASO	s_1 [cm]	s_2 [cm]	Tabella
A	26	13	10,11,12,13,14
B	39	13	15,16,17,18,19
C	39	26	20,21,22,23,24

Questo caso risulta più articolato poichè, per ciascuna delle tre differenti combinazioni dei valori degli spessori s_1 ed s_2 delle pareti che costituiscono lo spigolo, è stato studiato il comportamento termico al variare delle conduttività termiche λ_1 e λ_2 . I casi studiati sono riassunti nella Tabella 9. Le ipotesi assunte e

le procedure di calcolo seguite sono le medesime dei casi precedenti. I risultati ottenuti sono stati raccolti nelle tabelle 10÷24 alle pagine seguenti. In questo caso la conduttività termica λ_1 è stata fatta variare tra

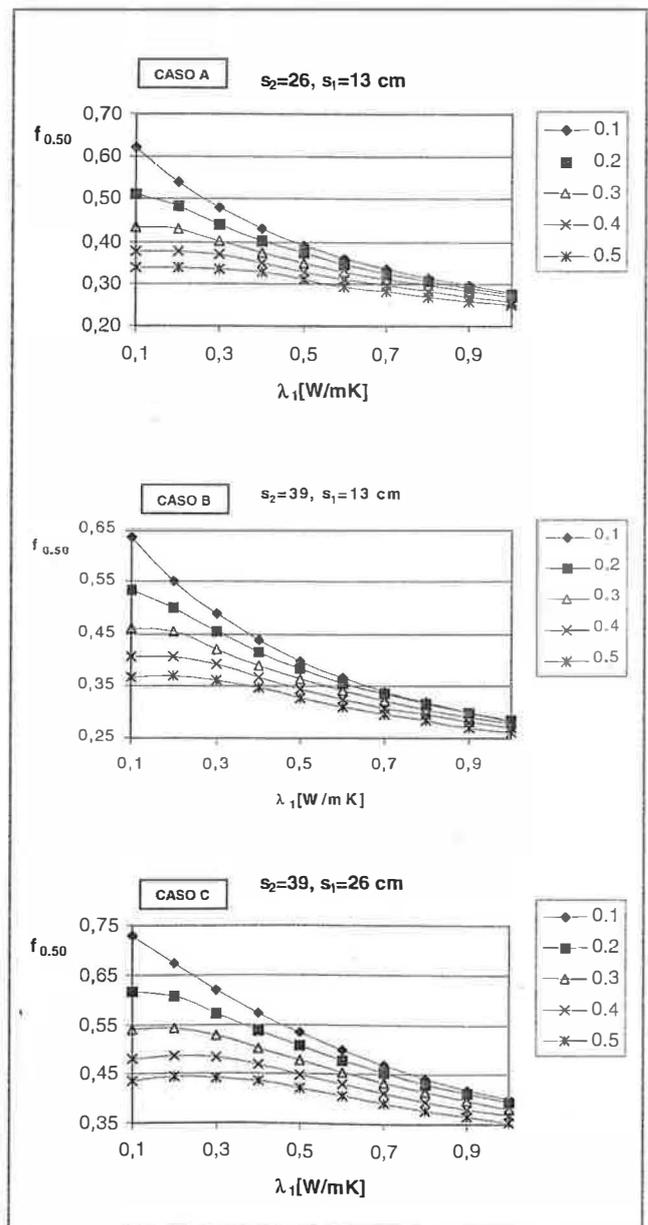


Figura 13 - Fattori di temperatura al variare di s_1 , s_2 , λ_1 e λ_2

CASO A: $s_1=13\text{cm}$, $s_2=26\text{ cm}$, $s_{\text{medio}}=19,5\text{ cm}$

**Tabella 10 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso A1: $\lambda_2=0,1\text{ W/mK}$, $K_2=0,36\text{ W/m}^2\text{K}$, $R_2=2,60\text{ m}^2\text{K/W}$**

$\lambda_1[\text{W/mK}]$	$K_1[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,23	0,026	0,026	0,68	0,63	0,54
0,4	2,04	0,025	0,026	0,58	0,52	0,43
0,6	2,61	0,025	0,026	0,51	0,45	0,36
0,8	3,04	0,024	0,026	0,46	0,40	0,31
1,0	3,38	0,025	0,026	0,42	0,36	0,28

**Tabella 11 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso A2: $\lambda_2=0,2\text{ W/mK}$, $K_2=0,68\text{ W/m}^2\text{K}$, $R_2=1,30\text{ m}^2\text{K/W}$**

$\lambda_1[\text{W/mK}]$	$K_1[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,23	0,046	0,046	0,63	0,57	0,49
0,4	2,04	0,045	0,046	0,55	0,49	0,40
0,6	2,61	0,044	0,046	0,49	0,43	0,35
0,8	3,04	0,043	0,046	0,45	0,39	0,31
1,0	3,38	0,043	0,046	0,41	0,36	0,28

**Tabella 12 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso A3: $\lambda_2=0,3\text{ W/mK}$, $K_2=0,97\text{ W/m}^2\text{K}$, $R_2=0,87\text{ m}^2\text{K/W}$**

$\lambda_1[\text{W/mK}]$	$K_1[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,23	0,062	0,062	0,57	0,52	0,43
0,4	2,04	0,061	0,062	0,52	0,46	0,37
0,6	2,61	0,059	0,062	0,47	0,41	0,33
0,8	3,04	0,058	0,062	0,44	0,38	0,29
1,0	3,38	0,058	0,062	0,40	0,35	0,27

**Tabella 13 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso A4: $\lambda_2=0,4\text{ W/mK}$, $K_2=1,23\text{ W/m}^2\text{K}$, $R_2=0,65\text{ m}^2\text{K/W}$**

$\lambda_1[\text{W/mK}]$	$K_1[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,23	0,075	0,074	0,52	0,46	0,38
0,4	2,04	0,073	0,074	0,50	0,44	0,35
0,6	2,61	0,072	0,074	0,45	0,39	0,31
0,8	3,04	0,071	0,074	0,42	0,36	0,28
1,0	3,38	0,070	0,074	0,39	0,34	0,26

**Tabella 14 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso A5: $\lambda_2=0,5\text{ W/mK}$, $K_2=1,46\text{ W/m}^2\text{K}$, $R_2=0,52\text{ m}^2\text{K/W}$**

$\lambda_1[\text{W/mK}]$	$K_1[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0.25}$	$f_{0.35}$	$f_{0.50}$
0,2	1,23	0,086	0,085	0,48	0,42	0,34
0,4	2,04	0,084	0,085	0,47	0,41	0,33
0,6	2,61	0,082	0,085	0,44	0,38	0,29
0,8	3,04	0,081	0,085	0,41	0,35	0,27
1,0	3,38	0,080	0,085	0,38	0,32	0,25

CASO B: $s_2=39$, $s_1=13$, $s_{\text{medio}}=26$ cm

**Tabella 15 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso B1: $\lambda_2=0,1$ W/mK, $K_2=0,25$ W/m²K, $R_2=3,90$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	1,23	0,032	0,035	0,69	0,64	0,55
0,4	2,04	0,031	0,035	0,59	0,53	0,44
0,6	2,61	0,031	0,035	0,52	0,45	0,37
0,8	3,04	0,031	0,035	0,46	0,40	0,32
1,0	3,38	0,031	0,035	0,42	0,36	0,28

**Tabella 16 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso B2: $\lambda_2=0,2$ W/mK, $K_2=0,47$ W/m²K, $R_2=1,95$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	1,23	0,057	0,061	0,64	0,59	0,50
0,4	2,04	0,056	0,061	0,56	0,50	0,42
0,6	2,61	0,055	0,061	0,50	0,44	0,36
0,8	3,04	0,055	0,061	0,46	0,40	0,31
1,0	3,38	0,055	0,061	0,42	0,36	0,28

**Tabella 17 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso B3: $\lambda_2=0,3$ W/mK, $K_2=0,68$ W/m²K, $R_2=1,30$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	1,23	0,079	0,082	0,59	0,54	0,45
0,4	2,04	0,077	0,082	0,54	0,48	0,39
0,6	2,61	0,075	0,082	0,49	0,43	0,34
0,8	3,04	0,075	0,082	0,45	0,39	0,31
1,0	3,38	0,074	0,082	0,41	0,36	0,28

**Tabella 18 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso B4: $\lambda_2=0,4$ W/mK, $K_2=0,88$ W/m²K, $R_2=0,98$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	1,23	0,096	0,099	0,54	0,49	0,41
0,4	2,04	0,094	0,099	0,51	0,45	0,37
0,6	2,61	0,093	0,099	0,47	0,41	0,33
0,8	3,04	0,091	0,099	0,43	0,38	0,29
1,0	3,38	0,092	0,099	0,40	0,35	0,27

**Tabella 19 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso B5: $\lambda_2=0,5$ W/mK, $K_2=1,06$ W/m²K, $R_2=0,78$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	1,23	0,111	0,113	0,50	0,45	0,37
0,4	2,04	0,109	0,113	0,49	0,43	0,35
0,6	2,61	0,108	0,113	0,45	0,39	0,31
0,8	3,04	0,106	0,113	0,42	0,36	0,28
1,0	3,38	0,106	0,113	0,39	0,34	0,26

CASO C: $s_2=39$, $s_1=26$, $s_{\text{medio}}=32,5$ cm

**Tabella 20 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso C1: $\lambda_2=0,1$ W/mK, $K_2=0,25$ W/m²K, $R_2=3,90$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,027	0,023	0,78	0,74	0,67
0,4	1,23	0,026	0,023	0,71	0,66	0,57
0,6	1,67	0,025	0,023	0,65	0,59	0,50
0,8	2,04	0,025	0,023	0,60	0,54	0,44
1,0	2,35	0,025	0,023	0,55	0,49	0,40

**Tabella 21 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso C2: $\lambda_2=0,2$ W/mK, $K_2=0,47$ W/m²K, $R_2=1,95$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,048	0,043	0,73	0,69	0,61
0,4	1,23	0,047	0,043	0,68	0,62	0,54
0,6	1,67	0,046	0,043	0,63	0,57	0,48
0,8	2,04	0,045	0,043	0,58	0,52	0,43
1,0	2,35	0,045	0,043	0,55	0,48	0,39

**Tabella 22 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso C3: $\lambda_2=0,3$ W/mK, $K_2=0,68$ W/m²K, $R_2=1,30$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,066	0,061	0,67	0,62	0,54
0,4	1,23	0,066	0,061	0,64	0,59	0,50
0,6	1,67	0,064	0,061	0,60	0,54	0,45
0,8	2,04	0,062	0,061	0,57	0,51	0,41
1,0	2,35	0,062	0,061	0,53	0,47	0,38

**Tabella 23 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso C4: $\lambda_2=0,4$ W/mK, $K_2=0,88$ W/m²K, $R_2=0,98$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,082	0,076	0,62	0,57	0,49
0,4	1,23	0,082	0,076	0,61	0,56	0,47
0,6	1,67	0,080	0,076	0,58	0,52	0,43
0,8	2,04	0,079	0,076	0,55	0,49	0,40
1,0	2,35	0,078	0,076	0,52	0,46	0,37

**Tabella 24 Spigolo tra due pareti omogenee con spessori e conduttività differenti:
Caso C5: $\lambda_2=0,5$ W/mK, $K_2=1,06$ W/m²K, $R_2=0,78$ m²K/W**

λ_1 [W/mK]	K_1 [W/m ² K]	k [W/mK]	k_n [W/mK]	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,096	0,090	0,58	0,53	0,44
0,4	1,23	0,096	0,090	0,58	0,52	0,44
0,6	1,67	0,094	0,090	0,56	0,50	0,41
0,8	2,04	0,093	0,090	0,53	0,47	0,38
1,0	2,35	0,092	0,090	0,50	0,44	0,35

0,2 W/(m K) e 1,0 W/(m K), mentre λ_2 tra 0,1 W/(m K) e 0,5 W/(m K). Per quanto riguarda i fattori di temperatura, in tutti e tre i casi trattati in questo paragrafo, i risultati, riportati in figura 13, evidenziano, fissata λ_2 , un andamento generalmente decrescente al crescere di λ_1 . Relativamente alle differenze percentuali tra k e k_n , si può osservare che esse sono molte contenute.

5.1.4 Spigolo formato da un pilastro di calcestruzzo
Si analizza ora il caso di una giunzione tra pareti uguali in cui lo spigolo sia formato da un pilastro di calcestruzzo (fig. 14).

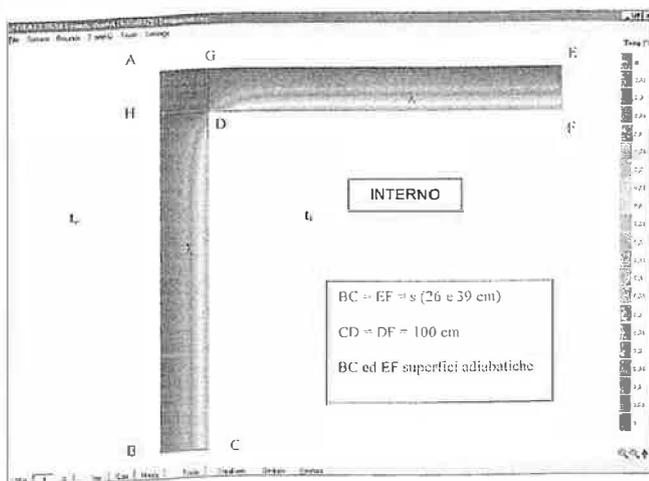


Figura 14 - Caratteristiche termiche e geometriche di uno spigolo formato da un pilastro di calcestruzzo

La norma [2] in questo caso indica (par. A.3.3.1), per il coefficiente lineico:

$$k_n = 0,45 s \quad (9)$$

dove s è la media aritmetica degli spessori delle due pareti.

Si è studiato il comportamento termico dello spigolo al variare delle conduttività termiche λ_p e λ , per due differenti valori dello spessore s delle pareti che lo costituiscono:

I risultati ottenuti sono stati raccolti nelle tabelle 26-35 alle pagine seguenti. In questi casi la conduttività termica λ della parte corrente è stata fatta variare tra 0,2 W/(m K) e 1,0 W/(m K), mentre la conduttività termica del pilastro λ_p tra 1,2 W/(mK) e 2,0 W/(m K). Si possono osservare i relativi andamenti nei grafici di figura 15.

In questa situazione tra i coefficienti lineici indicati dalla norma e quelli ricavati al computer vi sono notevoli discrepanze, come si può osservare in figura 16. Possiamo infatti osservare le seguenti situazioni:

Tabella 25		
CASO	s [cm]	Tabella
A	26	26,27,28,29,30
B	39	31,32,33,34,35

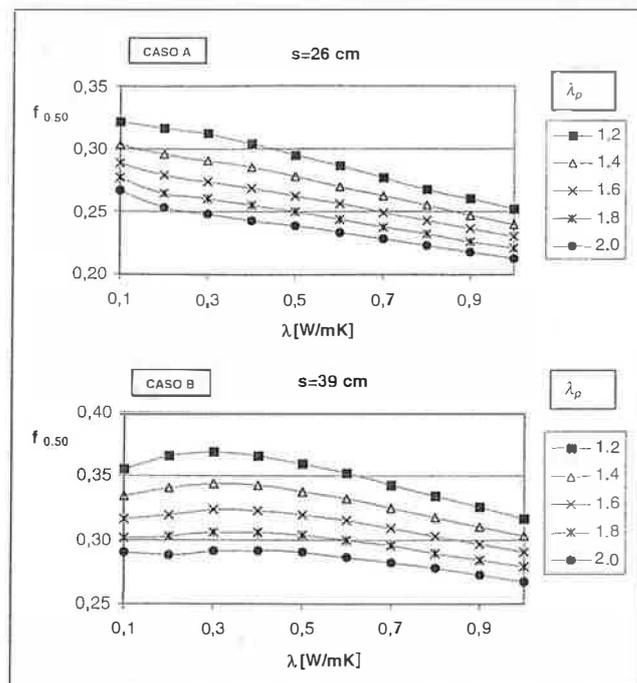


Figura 15 - Fattori di temperatura al variare di s , λ , e λ_p

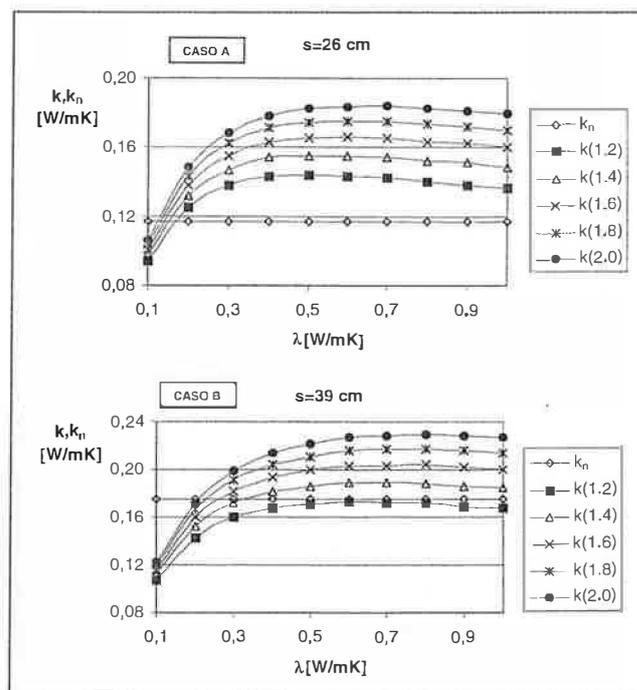


Figura 16 - Coefficienti lineici al variare di s , λ , e λ_p

- CASO A: i valori di k_n risultano inferiori a quelli di k in quasi tutto il campo di λ considerato (praticamente da $\lambda \approx 0,15$ W/mK in poi), con differenze percentuali che si mantengono superiori al 15% a partire da $\lambda = 0,3$ W/mK;
- CASO B: nel caso di $\lambda_p = 1,2$ W/mK, il valore di k_n risulta superiore a quello di k in tutto il campo di λ considerato. Per tutti gli altri valori di λ_p si ha che inizialmente ($\lambda \approx 0,1 \div 0,2$ W/mK) i valori di k_n risultano superiori a quelli di k , con differenze piuttosto elevate (punte del 65%); poi, per $\lambda > 0,3$ W/mK, i valori di k_n risultano inferiori a quelli di k , con sco-

CASO A: s = 26 cm

**Tabella 26 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso A1: $\lambda_p = 1,2 \text{ W/(m K)}$**

$\lambda[\text{W/mK}]$	$K[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,125	0,117	0,43	0,38	0,32
0,4	1,23	0,143	0,117	0,43	0,38	0,30
0,6	1,67	0,143	0,117	0,42	0,36	0,29
0,8	2,04	0,140	0,117	0,40	0,35	0,27
1,0	2,35	0,136	0,117	0,39	0,33	0,25

**Tabella 27 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso A2: $\lambda_p = 1,4 \text{ W/(m K)}$**

$\lambda[\text{W/mK}]$	$K[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,132	0,117	0,41	0,36	0,30
0,4	1,23	0,154	0,117	0,41	0,36	0,29
0,6	1,67	0,155	0,117	0,40	0,35	0,27
0,8	2,04	0,152	0,117	0,39	0,33	0,26
1,0	2,35	0,148	0,117	0,37	0,32	0,24

**Tabella 28 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso A3: $\lambda_p = 1,6 \text{ W/(m K)}$**

$\lambda[\text{W/mK}]$	$K[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,138	0,117	0,39	0,34	0,28
0,4	1,23	0,163	0,117	0,39	0,34	0,27
0,6	1,67	0,166	0,117	0,38	0,33	0,26
0,8	2,04	0,163	0,117	0,37	0,32	0,24
1,0	2,35	0,160	0,117	0,36	0,30	0,23

**Tabella 29 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso A4: $\lambda_p = 1,8 \text{ W/(m K)}$**

$\lambda[\text{W/mK}]$	$K[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,143	0,117	0,37	0,33	0,27
0,4	1,23	0,171	0,117	0,37	0,32	0,26
0,6	1,67	0,175	0,117	0,36	0,31	0,24
0,8	2,04	0,173	0,117	0,35	0,30	0,23
1,0	2,35	0,170	0,117	0,34	0,29	0,22

**Tabella 30 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso A5: $\lambda_p = 2,0 \text{ W/(m K)}$**

$\lambda[\text{W/mK}]$	$K[\text{W/m}^2\text{K}]$	$k[\text{W/mK}]$	$k_n[\text{W/mK}]$	$f_{0,25}$	$f_{0,35}$	$f_{0,50}$
0,2	0,68	0,148	0,117	0,36	0,31	0,25
0,4	1,23	0,178	0,117	0,35	0,31	0,24
0,6	1,67	0,183	0,117	0,35	0,30	0,23
0,8	2,04	0,182	0,117	0,34	0,29	0,22
1,0	2,35	0,179	0,117	0,33	0,28	0,21

CASO B: s = 39 cm

Tabella 31 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso B1: $\lambda_p = 1,2 \text{ W/(m K)}$

λ [W/mK]	K[W/m ² K]	k[W/mK]	k_n [W/mK]	f _{0.25}	f _{0.35}	f _{0.50}
0,2	0,47	0,143	0,176	0,48	0,43	0,37
0,4	0,88	0,168	0,176	0,49	0,44	0,37
0,6	1,23	0,173	0,176	0,49	0,43	0,35
0,8	1,53	0,172	0,176	0,48	0,42	0,33
1,0	1,80	0,168	0,176	0,46	0,40	0,32

Tabella 32 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso B2: $\lambda_p = 1,4 \text{ W/(m K)}$

λ [W/mK]	K[W/m ² K]	k[W/mK]	k_n [W/mK]	f _{0.25}	f _{0.35}	f _{0.50}
0,2	0,47	0,152	0,176	0,45	0,41	0,34
0,4	0,88	0,182	0,176	0,47	0,42	0,34
0,6	1,23	0,189	0,176	0,46	0,41	0,33
0,8	1,53	0,188	0,176	0,46	0,40	0,32
1,0	1,80	0,185	0,176	0,44	0,39	0,30

Tabella 33 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso B3: $\lambda_p = 1,6 \text{ W/(m K)}$

λ [W/mK]	K[W/m ² K]	k[W/mK]	k_n [W/mK]	f _{0.25}	f _{0.35}	f _{0.50}
0,2	0,47	0,160	0,176	0,43	0,38	0,32
0,4	0,88	0,194	0,176	0,44	0,40	0,32
0,6	1,23	0,203	0,176	0,44	0,39	0,32
0,8	1,53	0,204	0,176	0,44	0,38	0,30
1,0	1,80	0,200	0,176	0,43	0,37	0,29

Tabella 34 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso B4: $\lambda_p = 1,8 \text{ W/(m K)}$

λ [W/mK]	K[W/m ² K]	k[W/mK]	k_n [W/mK]	f _{0.25}	f _{0.35}	f _{0.50}
0,2	0,47	0,166	0,176	0,41	0,37	0,30
0,4	0,88	0,204	0,176	0,42	0,38	0,31
0,6	1,23	0,216	0,176	0,43	0,37	0,30
0,8	1,53	0,217	0,176	0,42	0,37	0,29
1,0	1,80	0,214	0,176	0,41	0,36	0,28

Tabella 35 Pilastro di calcestruzzo tra due pareti omogenee uguali:
Caso B5: $\lambda_p = 2,0 \text{ W/(m K)}$

λ [W/mK]	K[W/m ² K]	k[W/mK]	k_n [W/mK]	f _{0.25}	f _{0.35}	f _{0.50}
0,2	0,47	0,172	0,176	0,39	0,35	0,29
0,4	0,88	0,214	0,176	0,41	0,36	0,29
0,6	1,23	0,227	0,176	0,41	0,36	0,29
0,8	1,53	0,229	0,176	0,40	0,35	0,28
1,0	1,80	0,227	0,176	0,40	0,34	0,27

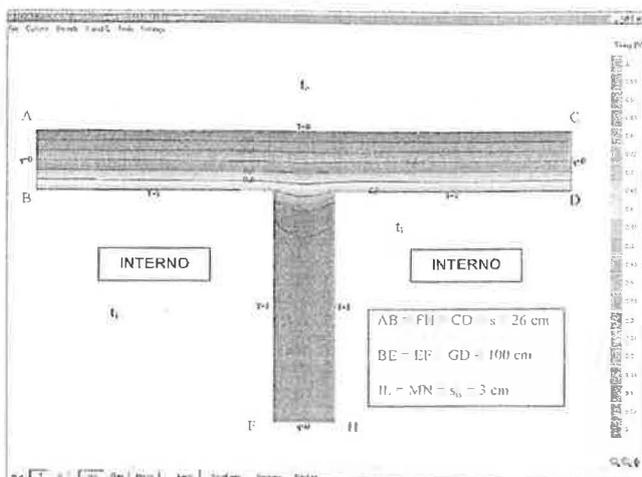


Figura 17 - Caratteristiche termiche e geometriche del giunto a T

stamenti che si mantengono contenuti solo nel caso di $\lambda_p = 1,4 \text{ W/mK}$.

5.2 Giunto a T

In questo paragrafo viene analizzato il caso di un giunto a T tra una parete esterna ed una interna, del quale si è voluto studiare il comportamento termico al variare della conduttività termica λ (fig. 17).

Questo caso, nella norma UNI 7357 FA-3 [2], è trattato al punto A 3.4 "Giunto tra una parete esterna ed una interna"; in particolare il coefficiente lineico è valutato come:

$$k_n = 0,4 K_i s_i (1+h) \quad (10)$$

dove:

K_i è la trasmittanza unitaria di una parete fittizia posta in corrispondenza della parete interna e limitata dai fili interno ed esterno della parete esterna (come mostrato nelle figure 23.2 e 23.4 della norma stessa [2]);

s_i è lo spessore della parete interna;

h è un coefficiente i cui valori sono funzione del tipo e delle caratteristiche della parete esterna (si rimanda direttamente alla [2] per la determinazione dei valori da assumere nei calcoli).

Nel caso considerato $h = 0$.

La trasmittanza unitaria K_i è data da:

$$1/K_i = R + r_s \quad (11)$$

dove:

R è la resistenza termica della parete fittizia definita precedentemente; si noti che R è indipendente dalla eventuale sporgenza della parete interna verso l'esterno;

r_s è una resistenza termica addizionale (si rimanda anche in questo caso alla [2] per i valori da assumere nei calcoli).

Nel caso considerato $r_s = 0,15 \text{ m}^2\text{K/W}$.

In questo caso le superfici di traccia AB, CD ed FH

sono state assunte come adiabatiche. Questa situazione merita una nota aggiuntiva poiché, in realtà, i fattori di temperatura in corrispondenza del giunto (punti G ed E) non sono i minimi; infatti, come anticipato nella prima parte della presente trattazione, in

Tabella 36 - Giunto a T: confronto tra i coefficienti lineici k ottenuti con il codice HEAT2 e k_n indicati dalla normativa

λ [W/(m K)]	K [W/m ² K]	k [W/(m K)]	k_n [W/(m K)]
0,2	0,682	0,075	0,072
0,4	1,225	0,195	0,130
0,6	1,669	0,193	0,178
0,8	2,037	0,243	0,219
1,0	2,347	0,290	0,254

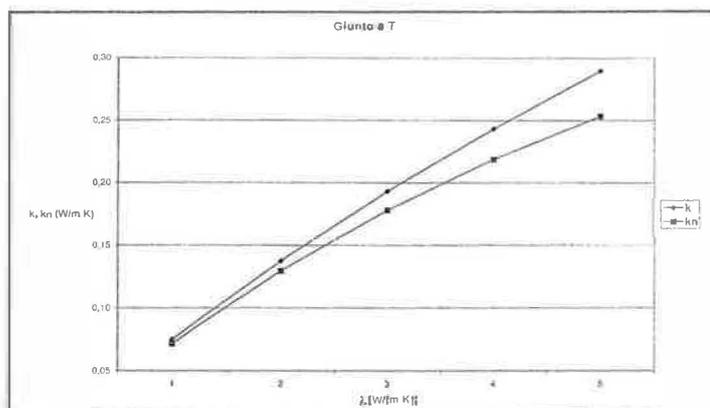


Figura 18 - Coefficienti lineici k e k_n al variare di λ

questo caso il ponte termico si manifesta in termini di incremento del flusso termico, ma non coincide con il raggiungimento delle minime temperature superficiali, che si verificano invece lungo le parti correnti delle pareti.

Si omettono pertanto i relativi fattori di temperatura, non essendo essi significativi. I risultati ottenuti sono stati raccolti nella tabella 36.

Per quanto riguarda i coefficienti lineici k , dai grafici di figura 18 risulta che i valori calcolabili seguendo le prescrizioni della norma sono inferiori a quelli calcolati secondo il modello numerico, e che la differenza esistente tra i due parametri a confronto cresce lievemente al crescere di λ .

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI (Ente Nazionale di Unificazione), Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici, Norma UNI 7357, 1974.
- [2] UNI (Ente Nazionale di Unificazione), Calcolo del fabbisogno termico per il riscaldamento di edifici, Norma UNI 7357, Foglio Aggiuntivo 3, Maggio 1989.
- [3] UNI (Ente Nazionale di Unificazione), "Stima della temperatura superficiale interna per evitare umidità critica superficiale e valutazione del rischio di condensazione interstiziale", Norma UNI 10350, Dicembre 1999.

[4] UNI (Ente Nazionale di Unificazione), *Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Metodi generali di calcolo*, UNI EN ISO 10211-1, Dicembre 1998 (recepimento della norma europea EN ISO 10211-1, edizione Agosto 1995).

[5] CEN - European Committee for Standardization - *Final Draft prEN ISO 10211-2: Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Part 2: Calculation of linear thermal bridges (ISO/DIS 10211-2:Marzo 1999)*.

[6] D.M. 18.12.75 - *Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di edilizia scolastica*.

[7] Circ. Min. n. 3151 - 22.05.1967 - *Criteri di valutazione delle grandezze atte a rappresentare le proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione nelle costruzioni edilizie*.

[8] Document Technique Unifié: "Regles de calcul des caracteristiques thermiques utiles des parois de construction", Centre Scientifique et technique du bâtiment - Paris, Novembre 1977.

[9] L. Bellia, F. Minichiello, D. Palma, "Formazione di condensa negli involucri edilizi in base alla norma italiana UNI 10350", CDA n. 8 Agosto 2000.

[10] CEN - European Committee for Standardization - *Final Draft prEN ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surfaces humidity and interstitial condensation - Calculation method (ISO/FDIS 13788: Aprile 2000)*.

[11] CEN - European Committee for Standardization - *Final Draft prEN ISO 14683: Thermal bridges in building construction - linear thermal transmittance - Simplified methods and default values (ISO/FDIS 14683:Novembre 1998)*.

[12] Thomas Blomberg, HEAT2: A PC-program for heat transfer in two dimensions - *Manual with brief theory and examples*, Lund Group for Computational Building Physics, Ottobre 1999.

[13] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, 1992, *Trasmissione del calore*, CLEUP Editore.

[14] F. P. Incropera, D. P. De Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons Editor, 1990.

[15] G.A. Cesaratto, *Ponti termici nelle strutture edilizie: aspetti fenomenologici e determinazione dei parametri caratteristici*, Tesi di laurea, Dipartimento di Fisica Tecnica - Università di Padova, Giugno 2000.

[16] ISO 7730 (1993): *Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*.

Nella successiva ed ultima parte di questa trattazione verranno presentati i risultati delle elaborazioni relativi ai casi indicati nel prEN 14683 [11]. Verrà inoltre descritto un caso applicativo di studio.

Dott. ing. Massimo Colombari, dott. ing. Gian Andrea Cesaratto, prof. ing. Roberto Zecchin
Dipartimento di Fisica Tecnica, Università di Padova

RIASSUNTO - ABSTRACT

Ponti termici nelle strutture edilizie - Alcune osservazioni sui coefficienti lineari e valutazione delle temperature superficiali minime

Un problema di fondamentale importanza, nella progettazione degli edifici e dei loro impianti di riscaldamento, è la corretta valutazione dei flussi termici effettivi di dispersione verso l'esterno e delle temperature minime sulle superfici interne. La presenza, nell'involucro edilizio, di zone a più elevata conducibilità termica o di singolarità geometriche, denominate ponti termici, causa da un lato un aumento dei flussi termici di dispersione e dall'altro una variazione delle temperature sulle superfici interne, rispetto a una configurazione che ne sia priva. Tra questi due fenomeni, peraltro correlati, l'aspetto delle temperature superficiali sta assumendo un'importanza crescente: la condensazione superficiale è generalmente conseguenza dell'elevata umidità interna, dovuta alla tenuta dei serramenti di attuale produzione. In questo lavoro è stata condotta una dettagliata analisi critica della normativa tecnica esistente, nazionale ed europea, ed è stata evidenziata l'importanza del fattore di temperatura come parametro per la verifica igrometrica in corrispondenza dei ponti termici, rilevandone contestualmente la carenza di trattazione in letteratura. Vengono presentati i valori dei coefficienti lineari di dispersione termica e dei fattori di temperatura relativi ad un'ampia casistica di situazioni costruttive, ricavati con l'ausilio di un modello numerico alle differenze finite. È inoltre trattato un caso applicativo di studio.

Parole chiave: Ponte termico - Involucro edilizio - Condensazione superficiale - Fattore di temperatura - Coefficiente lineare - Differenze finite

Thermal bridges in building envelope - Linear heat loss coefficient and calculation of the minimum surfaces temperatures

Fundamental problems in the design of buildings and of their heating systems are the correct evaluation of energy consumption and the calculation of the minimum temperatures occurring on the internal surfaces. Parts of the building envelope having higher thermal conductivity or geometrical singularities, called "thermal bridges", both increase the thermal consumption and decrease the internal surfaces temperatures. This last aspect is becoming more and more important as it is usually linked to water condensation on the internal surfaces: moisture content is, in fact, very often exalted due to high tightness of the windows nowadays currently produced. In this work a detailed analysis has been carried out on the existing technical, Italian and European, regulations, concerning thermal bridges. The importance of the "temperature factor", as a parameter for the hygrometric control, has been underlined. The values of linear thermal conductivity and the corresponding temperature factors concerning several constructive situations have been calculated by means of a numerical model based on finite differences. Moreover a case of study is shown.

Key Words: Thermal bridges - Building envelope - Surface condensation - Temperature factor - Linear heat loss coefficient - Finite differences