

10 - Concetti di base: fisica delle pareti



Sommario

<i>10.1</i>	<i>La trasmittanza termica di elementi opachi.....</i>	<i>283</i>
10.1.1	Il calcolo della trasmittanza termica.....	283
10.1.2	La conduttività termica (materiali ed elementi omogenei).....	284
10.1.3	La conduttanza termica (materiali ed elementi non omogenei).....	287
10.1.4	Le resistenze termiche superficiali.....	288
10.1.5	La resistenza termica di intercapedini.....	289
10.1.6	La trasmittanza di elementi opachi: Esempi di calcolo.....	292
<i>10.2</i>	<i>La trasmittanza degli elementi trasparenti.....</i>	<i>295</i>
10.2.1	Il vetro.....	296
10.2.2	Il telaio.....	299
10.2.3	Il distanziatore.....	300
10.2.4	Calcolo trasmittanza termica del serramento: esempio di calcolo.....	302
10.2.5	La trasmittanza degli elementi trasparenti: casi particolari, serramenti doppi.....	303
10.2.6	Resistenza termica aggiuntiva dovuta a chiusure oscuranti.....	304
10.2.7	Caratteristiche ottiche del vetro.....	305
<i>10.3</i>	<i>Lo scambio termico con il terreno.....</i>	<i>308</i>
10.3.1	I parametri principali.....	308
10.3.2	Commenti e caso studio.....	310
10.3.3	Esempio di calcolo (fonte UNI EN ISO 13370).....	311
<i>10.4</i>	<i>I ponti termici.....</i>	<i>313</i>
10.4.1	Incremento percentuale delle dispersioni.....	315
10.4.2	Utilizzo di abachi di riferimento e metodi semplificati.....	316
10.4.3	Utilizzo di abachi di riferimento e metodi semplificati: Esempio di calcolo.....	319
10.4.4	Calcolo dei ponti termici agli elementi finiti.....	320
10.4.5	Calcolo dei ponti termici agli elementi finiti: esempio di calcolo.....	321
<i>10.5</i>	<i>Capacità termica.....</i>	<i>323</i>



10.1 La trasmittanza termica di elementi opachi

Gli elementi che costituiscono l'involucro edilizio sono interessati da un flusso di calore che concorre a determinare le perdite per trasmissione del bilancio energetico invernale dell'edificio. Questa voce può assumere notevole influenza soprattutto nel caso di edifici con estese superfici disperdenti rapportate al volume (lordo) riscaldato (vedi Capitolo 11).

Il parametro principale per determinare le dispersioni termiche è la trasmittanza termica (indicata con U), che rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad 1°C. La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica è la UNI EN ISO 6946:2008 (vedi approfondimento capitolo 7).

La trasmissione del calore attraverso un corpo sottoposto ad una differenza di temperatura è un fenomeno assai complesso nella sua generalità. Esso si basa su tre meccanismi di scambio fondamentali: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento. Se si ipotizza che il flusso di calore sia stazionario, che l'elemento abbia una forma geometrica semplice piana, che sia realizzata da una sequenza di strati omogenei ed isotropi e che le superfici esterne alla parete siano isoterme, la trasmittanza termica risulta essere un parametro di utilizzo comune.

La trasmittanza termica di una generica parete rappresenta la capacità della stessa di permettere il passaggio del flusso termico per unità di area in funzione della forzante termica applicata.

Viceversa, per stimare quantitativamente il flusso di calore che attraversa l'elemento considerato, in condizioni stazionarie, è sufficiente moltiplicare il valore della trasmittanza di quest'ultimo per la sua estensione e per la differenza di temperatura tra ambiente esterno ed interno.

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta\theta \quad (10.1)$$

in cui $\Delta\theta = \theta_i - \theta_e$ è la differenza tra la temperatura interna e la temperatura esterna.

Per come è definito, Q è positivo quando il calore è ceduto all'ambiente esterno e negativo in caso di guadagno di calore.

10.1.1 Il calcolo della trasmittanza termica

Il valore di trasmittanza termica corrisponde al reciproco della sommatoria dei vari contributi di resistenza termica che intervengono nel calcolo.

Per un elemento di costruzione a più strati, la resistenza di tutti gli strati deve, infatti, essere sommata.



$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \frac{S_i}{\lambda_i} + \frac{S_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + R_{se}} \quad (10.2)$$

dove:

R_{si} è la resistenza liminare della superficie interna della struttura, [m² K/W];

$\frac{s}{\lambda}$ è la resistenza termica di uno o più strati di materiale omogeneo, [m² K/W];

$R_n = \frac{1}{C}$ è la resistenza termica di strati di materiale non omogeneo, [m² K/W];

R_a è la resistenza termica di eventuali intercapedini, [m² K/W];

R_{se} è la resistenza liminare della superficie esterna della struttura, [m² K/W].

10.1.2 La conduttività termica (materiali ed elementi omogenei)

La resistenza di uno strato omogeneo corrisponde al rapporto tra lo spessore, in metri, e la conduttività termica di progetto, in W/mK, del materiale di cui è costituito, calcolata in conformità alla UNI EN ISO 10456:2008 oppure ricavata da valori tabulati.

La conduttività termica (indicata con λ) è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore. Tale grandezza è il rapporto, in condizioni stazionarie, fra il flusso di calore e il gradiente di temperatura che provoca il passaggio del calore. La conduttività dipende solo dalla natura del materiale e non dalla sua forma. I valori di riferimento di conduttività termica, per i comuni materiali da costruzione, sono contenuti nelle seguenti norme:

- UNI 10351:1994;
- UNI EN ISO 10456:2008.

La norma UNI 10351 fornisce, per le principali tipologie di materiale "omogeneo" da costruzione, i dati relativi a:

- massa volumica (materiale secco);
- permeabilità al vapore (campo asciutto e campo umido);
- conduttività di riferimento λ_m ;
- maggiorazione percentuale m da applicare per passare alla conduttività utile di calcolo λ , per condizioni d'uso standard.



Materiale	ρ [kg/m ³]	$\delta_a \cdot 10^{12}$ [kg/(msPa)]	$\delta_u \cdot 10^{12}$ [kg/(msPa)]	λ_m [W/(mK)]	m %	λ [W/(mK)]
- polistirene (contenuto di umidità in pareti interne ³) da 1 a 2%; per applicazioni contro il terreno ⁴) sino al 20%; per i prodotti estrusi i valori di umidità indicati devono essere circa dimezzati. La conduttività aumenta da 0,1 a 0,5% per ogni % di umidità):						
- espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi (conforme a UNI 7891, le masse volumiche sono quelle nominali indicate nella norma; conduttività di riferimento ricalcolate a 293 K e per 10 cm di spessore)	15	3,6 a 9	3,6 a 9	0,041	10	0,045
	20	} 2,5 a 6	2,5 a 6	0,037	10	0,041
	25			0,036	10	0,040
	30	1,8 a 4,5	1,8 a 4,5	0,036	10	0,040
- espanso sinterizzato, in lastre ricavate da blocchi	10	3,6 a 9	3,6 a 9	0,051	10	0,056
	15	2,5 a 6	2,5 a 6	0,043	10	0,047
	20	} 1,8 a 4,5	1,8 a 4,5	0,040	10	0,044
	25			0,039	10	0,042
	30			0,038	10	0,042

Figura 10.1: Esempio di dati contenuti nella norma UNI 10351. Il valore di conduttività da utilizzare per il calcolo della trasmittanza termica è quello utile di calcolo (λ), riportato nell'ultima colonna della tabella.

L'utilizzo della maggiorazione percentuale è un metodo approssimato ragionevole, che tiene conto del fatto che il materiale, rispetto alle condizioni di prova in laboratorio, è soggetto ad alcune variabilità:

- variabilità del prodotto;
- variabilità della conduttività al variare della temperatura;
- variabilità della conduttività al variare del contenuto di umidità;
- variabilità nel tempo (invecchiamento).

La norma UNI 10351:1994 (ancora valida nonostante la UNI EN ISO 10456:2008) fornisce valori "standard", da prendere come riferimento nei calcoli se il produttore cui ci si affida non svolge un adeguato controllo statistico sulla produzione.

La norma propone, quindi, un valore di m coefficiente correttivo $[1+m/100]$ che tiene conto dell'utilizzo "edilizio" standard del materiale considerato.

Sarebbe, comunque, compito del progettista decidere quale valore di m adottare.



La norma ISO 10456 definisce una serie di regole per la determinazione dei valori dichiarati (declared values) e dei valori di progetto (design values), valutando l'influenza della temperatura e del contenuto di umidità sulle caratteristiche termiche dei materiali, nonché per la conversione di valori ottenuti in determinate condizioni (ad esempio, di prova) in valori validi per altri set di condizioni (ad esempio, in opera).

L'intenzione della normativa è quella di esprimere tali variabilità in termini di una serie di coefficienti.

Per effettuare valutazioni di progetto adeguate e coerenti la norma UNI EN ISO 10456 definisce una regolamentazione delle caratteristiche termiche dei materiali e componenti.

Il produttore sarà obbligato a fornire i valori di riferimento per la prestazione di un determinato prodotto. Successivamente sarà compito del progettista modificarli a seconda della previsione delle condizioni al contorno con cui il materiale entrerà in contatto una volta posto in opera.

L'applicazione normativa prevede che il valore misurato di conducibilità di un determinato materiale in condizioni standard possa modificarsi in opera a seconda delle condizioni di temperatura e umidità presenti nell'ambiente di applicazione, nonché del fatto che il materiale tenderà naturalmente a peggiorare le proprie prestazioni a causa dell'invecchiamento.

È possibile stimare l'effetto di queste variabilità tramite un metodo fattoriale espresso dalla seguente relazione:

$$\lambda_d = \lambda_D \cdot F_T \cdot F_m \cdot F_a \quad (10.3)$$

dove:

λ_d è il valore di conducibilità termica da utilizzare, [mK/W];

λ_D è la conducibilità termica misurata in condizioni standard e dichiarata dal produttore, [mK/W];

F_T è il fattore di conversione che tiene conto della temperatura;

F_m è il fattore di conversione che tiene conto della presenza di umidità;

F_a è il fattore di conversione che tiene conto dell'invecchiamento del materiale.

Ognuno dei fattori proposti è espresso tramite una funzione esponenziale che valuta il contributo del singolo fattore in relazione alla differenza tra le condizioni standard e le condizioni specifiche di progetto.

Si sottolinea come i valori dichiarati siano quelli che corrispondono a misurazioni effettuate sotto precise condizioni di riferimento di temperatura e umidità, provenienti da uno specifico controllo statistico e corrispondenti ad una ragionevole vita di servizio attesa in normali condizioni d'uso. Un prodotto può avere, dunque, più di un valore di progetto, a fronte di differenti applicazioni o diverse condizioni al contorno.



Il certificatore energetico, il termotecnico e il progettista fanno riferimento, nella maggior parte dei casi pratici, alla norma UNI 10351. Quest'ultima, seppur datata, non risulta particolarmente obsoleta ed è di facile interpretazione. Un'applicazione estesa della norma UNI EN ISO 14506 si ritiene, comunque, auspicabile. In assenza di specifiche informazioni, anche la norma UNI EN ISO 14506 fornisce una serie di dati tabellati di progetto per i materiali di comune utilizzo in edilizia, anche se specifica come, laddove disponibili, i dati del produttore siano da considerarsi preferibili.

La conduttività citata in molti "depliant" può non essere completamente esaustiva. Frequentemente, infatti, si tende a fornire i valori migliori misurati in laboratorio. Si deve, dunque, prestare estrema attenzione ai valori riportati sulle schede tecniche, cercando innanzitutto di capire se tali valori si riferiscono alle condizioni di progetto o a quelle di laboratorio (e in quest'ultimo caso, capire quali esse siano).

10.1.3 La conduttanza termica (materiali ed elementi non omogenei)

Per un elemento non omogeneo, ovvero caratterizzato da proprietà termiche non uniformi (è il caso degli strati che presentano al loro interno delle cavità d'aria, quali ad esempio i solai in laterocemento, o giunti) si deve fare riferimento alla conduttanza, C , dello strato, espressa in $W/(m^2K)$. Tale grandezza rappresenta il flusso di calore scambiato unicamente per via conduttiva all'interno del solido in esame.

I valori di conduttanza sono riportati nelle apposite norme di riferimento [UNI 10355:1994] o ricavabili dai certificati di prova forniti direttamente dai produttori, solitamente mediante prove di laboratorio (o in opera) o simulazioni numeriche ad elementi finiti. Si deve prestare, inoltre, attenzione a non confondere la conduttanza termica con la trasmittanza termica. Sebbene abbiano entrambe la stessa unità di misura, la trasmittanza termica comprende anche i contributi di scambio termico convettivo e radiativo. Spesso, ad esempio, il risultato della misura in opera della trasmittanza termica è espresso in termini di conduttanza.

Si sottolinea come la determinazione delle dispersioni termiche in una chiusura costituita da mattoni pieni in laterizio non possa essere ricondotta alla semplice determinazione della conduttività e dello spessore della muratura, in quanto deve essere considerata la presenza dei giunti di malta che ne interrompe la continuità. In questo caso, dunque, è corretto parlare di conduttanza termica, considerando il tipo di foratura (eventuale), lo spessore, il tipo di giunto (in termini di materiale, spessore e disposizione), la massa volumica e la massa superficiale dell'elemento.

Nel caso le condizioni riscontrate non siano contemplate nella normativa di riferimento, a rigore si deve procedere alla determinazione della resistenza termica attraverso modellazioni ad elementi finiti, prove in opera (se pertinente) o al calcolo analitico della resistenza termica totale di un componente edilizio costituito da strati omogenei ed eterogenei [Paragrafo 6.2 della UNI EN ISO 6946] e riportato di seguito nel testo.



10.1.4 Le resistenze termiche superficiali

Le resistenze termiche superficiali (liminari) tengono conto degli scambi di calore per convezione e per irraggiamento che avvengono tra la superficie e l'aria interna (R_{si}) e tra la superficie e l'aria esterna (R_{se}). Esse dipendono essenzialmente dal grado di esposizione e dalla finitura superficiale delle superfici. Il coefficiente di scambio termico convettivo e radiativo, infatti, dipendono rispettivamente dalla velocità dell'aria, l'uno, e dall'emissività emisferica della superficie e dal coefficiente di irraggiamento del corpo nero, l'altro. Il coefficiente di irraggiamento del corpo nero, a sua volta, risulta funzione della temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe.

I valori di resistenza termica superficiale interna R_{si} ed esterna R_{se} sono normati nella UNI EN ISO 6946 a seconda della direzione del flusso di calore: la Tabella 10.1 riporta i valori tipici, rappresentativi di superfici con emissività pari a 0,9 e valori del coefficiente di irraggiamento del corpo nero valutato a 20°C per la resistenza superficiale interna e 10°C per la resistenza superficiale esterna, e con velocità dell'aria pari a 4 m/s.

Tabella 10.1: Resistenze superficiali convenzionali, da UNI EN ISO 6946:2008

Resistenza superficiale m^2K/W	Direzione del flusso termico		
	ascendente	orizzontale	discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

I valori riportati in Tabella 10.1 valgono per superfici piane in assenza di specifiche condizioni al contorno.

I valori riportati per il caso di flusso con direzione "orizzontale" si applicano a flussi termici con inclinazione fino a $\pm 30^\circ$ rispetto al piano orizzontale.

Nel caso di solai interpiani, utilizzare 0,13 m^2K/W su entrambe le facce.

Per superfici che non sono piane o per particolari condizioni al contorno, è possibile utilizzare specifiche procedure riportate nell'appendice A della norma.

In particolare, al diminuire dell'emissività superficiale la resistenza superficiale termica aumenta in maniera significativa per la superficie interna, mentre all'aumentare della velocità del vento la resistenza termica superficiale esterna diminuisce.

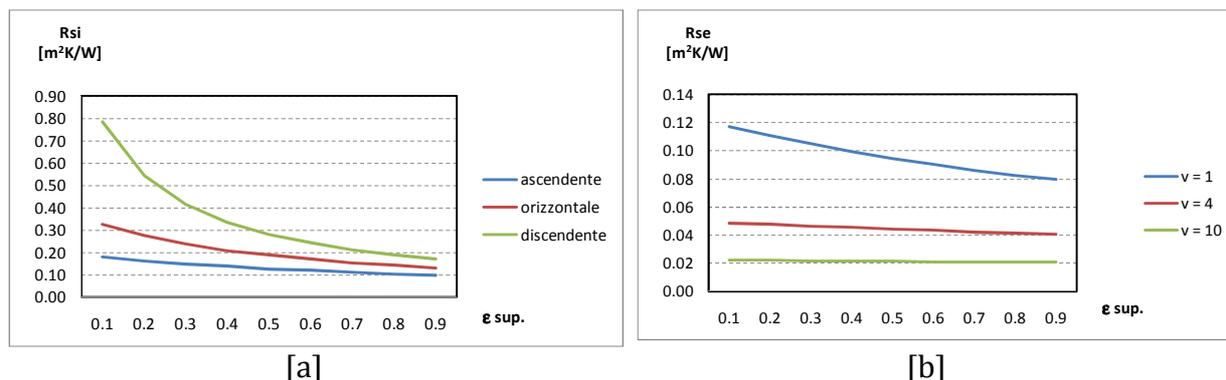


Figura 10.2: Andamento delle resistenze superficiali in funzione dell'emissività della superficie con diversi scambi termici convettivi per l'interno [grafico a] e con diverse velocità del vento per le superfici esterne [grafico b]

Si segnala come il valore di emissività pari a 0,9 è solitamente appropriato, poiché la maggior parte dei materiali in edilizia è caratterizzata da tali valori. Qualora si utilizzassero altri valori, questi dovrebbero considerare anche gli effetti legati al trascorrere del tempo, quali il deterioramento e l'accumulo di polvere.

10.1.5 La resistenza termica di intercapedini

Ciascuna cavità o intercapedine contribuisce con una propria resistenza. All'interno dell'intercapedine avvengono scambi di tipo convettivo e radiativo. Le intercapedini normalmente presenti in edilizia hanno, tipicamente, una resistenza termica pari a 0,16 m²K/W nel caso di solai di copertura (flusso termico ascendente) e 0,18 m²K/W nel caso di pareti (flusso termico orizzontale).

La resistenza termica relativa a strati d'aria risulta essere fortemente influenzata dalla velocità dell'aria stessa. In generale, si può dire che laddove l'aria è ferma essa presenta il massimo valore di resistenza: la componente convettiva della resistenza termica dell'intercapedine diminuisce all'aumentare della velocità dell'aria.

Un'intercapedine d'aria non separata dall'ambiente esterno da uno strato isolante, ma provvista di piccole aperture verso l'ambiente esterno, deve essere considerata come intercapedine d'aria non ventilata, se queste aperture sono disposte in modo da non permettere un flusso d'aria attraverso l'intercapedine e se presentano una superficie massima delle aperture pari a 500 mm². In quest'ottica, le aperture di drenaggio (feritoie di scolo) conformate come giunti verticali aperti sulla parete esterna di un muro di laterizio a blocchi cavi, rispettano i vincoli sopra riportati, e quindi non sono considerate come aperture di ventilazione.

La resistenza termica totale di un componente per edilizia, contenente un'intercapedine d'aria fortemente ventilata, ovvero che presenta una superficie delle aperture superiore a 1500 mm², si ottiene trascurando la resistenza termica dell'intercapedine d'aria e di tutti gli altri strati che separano detta intercapedine dall'ambiente esterno. L'aria in un'intercapedine fortemente ventilata si trova, infatti, alla stessa temperatura dell'aria esterna. Il calcolo si completa includendo una resistenza termica superficiale esterna corrispondente all'aria immobile, ovvero



uguale alla resistenza termica superficiale interna del medesimo componente, poiché il rivestimento costituisce un riparo dal vento.

Per le intercapedini debolmente ventilate, ovvero che presentano una superficie delle aperture compresa tra 500 e 1500 mm², l'effetto della ventilazione dipende dalla dimensione e dalla disposizione delle aperture di ventilazione. In prima approssimazione, si può affermare che la resistenza termica si collochi a metà fra la condizione di intercapedine non ventilata e intercapedine ventilata, in funzione delle dimensioni geometriche delle aperture verso l'esterno.

Tabella 10.2: Resistenza termica di intercapedini convenzionali (intercapedine non ventilata e superfici ad alta emissività), da UNI EN ISO 6946:2008. I valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

Spessore dell'intercapedine d'aria (mm)	Resistenza termica (m ² K/W) a seconda direzione del flusso di calore		
	ascendente	orizzontale	discendente
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

I valori riportati nella Tabella 10.2 valgono per intercapedini:

- delimitate da due lati effettivamente paralleli e perpendicolari alla direzione del flusso termico e con una emissività non minore di 0,8;
- con spessore (nella direzione del flusso termico) minore di 0,1 volte le altre due dimensioni, e comunque minore di 0,3 m;
- non scambianti aria con l'ambiente interno (la sola ventilazione è dunque quella da o verso l'esterno).

Spessori di intercapedine d'aria superiori a 15-25 mm non comportano apprezzabili incrementi della resistenza termica, in quanto i moti convettivi naturali che si instaurano oltre questo spessore vanificano l'effetto di resistenza termica per conduzione dovuto allo strato d'aria.

Inoltre, se l'intercapedine fosse delimitata da superfici aventi bassi valori di emissività emisferiche, si avrebbe una riduzione dello scambio radiativo e, quindi, un corrispondente incremento della resistenza di intercapedine (dell'ordine di 2-3 volte).

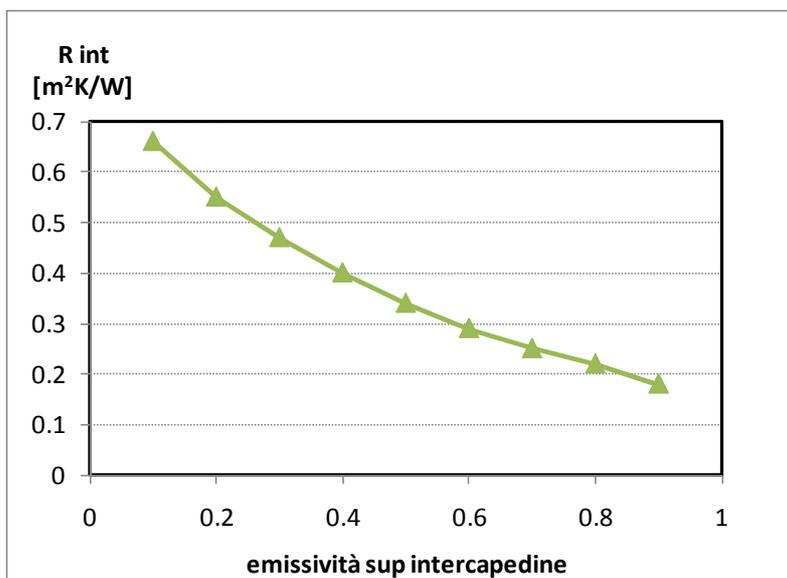
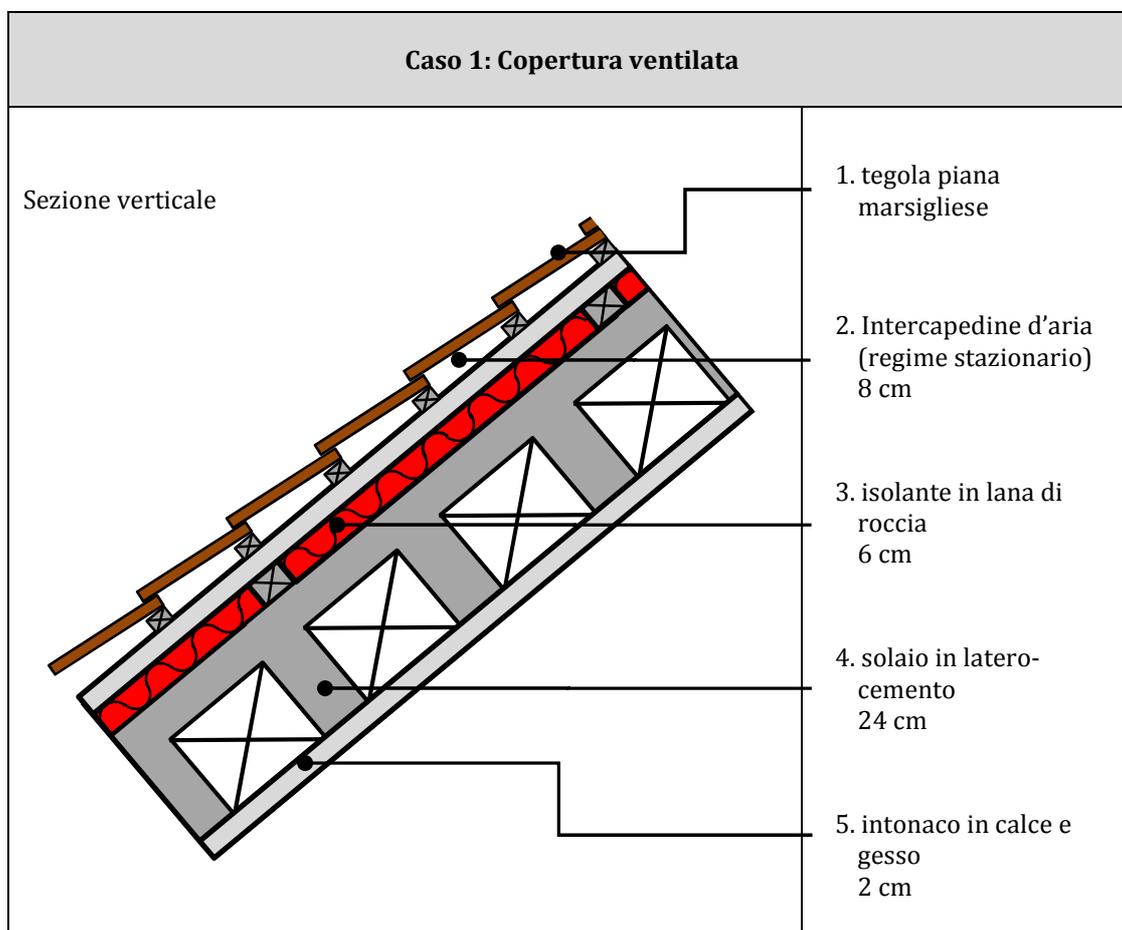


Figura 10.3: Resistenza termica dell'intercapedine d'aria, con spessore 60 mm e flusso termico orizzontale, al variare delle emissività superficiali delle facce dell'intercapedine

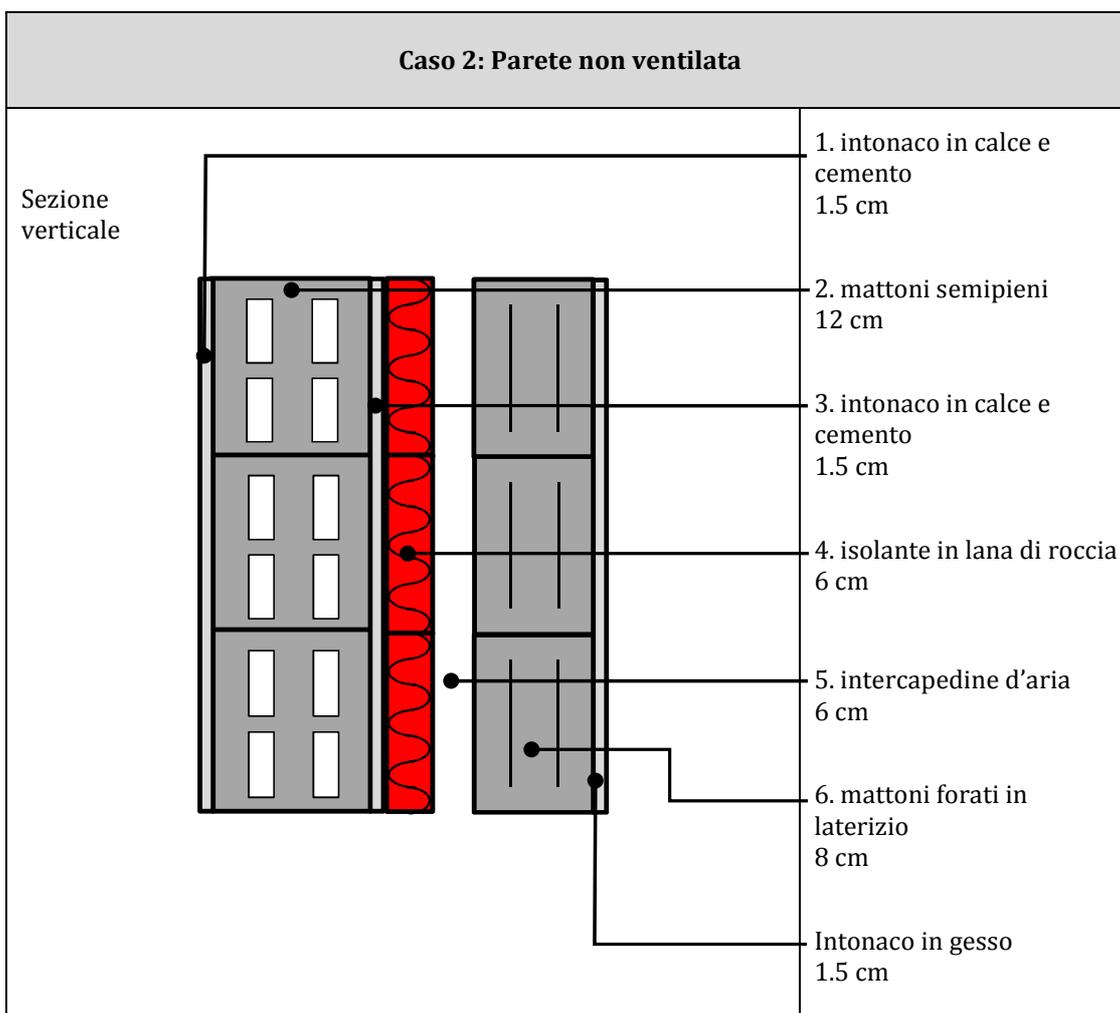
Per componenti contenenti intercapedini d'aria di spessore maggiore di 0,3 m, non è possibile calcolare una singola trasmittanza termica. In tale caso, i flussi termici dovrebbero pertanto essere determinati preferibilmente con un bilancio termico (vedere ISO 13789).



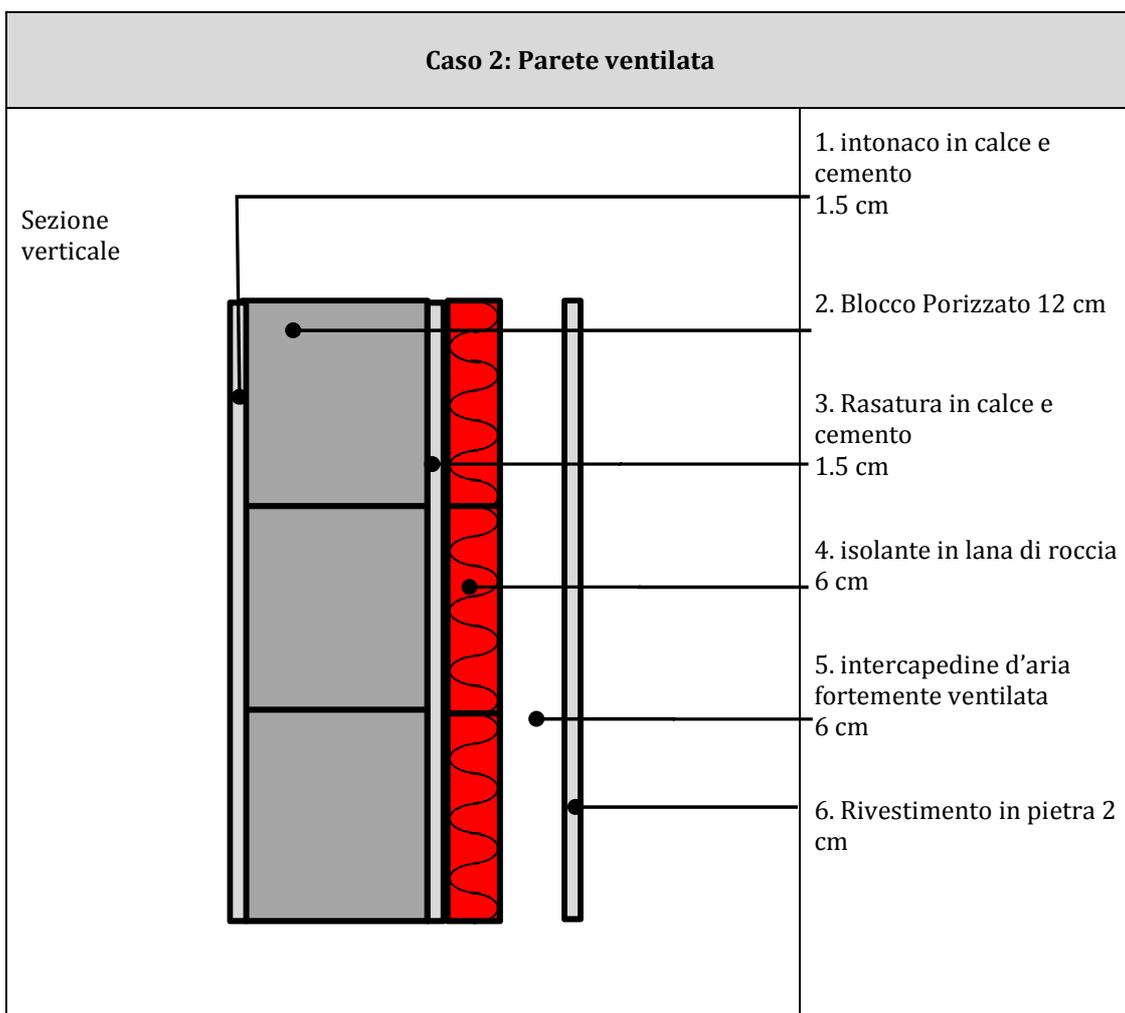
10.1.6 La trasmittanza di elementi opachi: Esempi di calcolo



Strati	s [m]	λ [W/(mK)]	C [W/(m ² K)]	R [m ² K/W]
h_e	-	-	-	0,100
1. tegola piana marsigliese	-	-	-	-
2. intercapedine d'aria (fortemente ventilata)	0,080	-	-	0,000
3. isolante in lana di roccia	0,060	0,040	0,666	1,500
4. solaio in latero-cemento	0,240	-	2,941	0,340
5. intonaco in calce e gesso	0,020	0,700	35,000	0,029
h_i	-	-	-	0,100
resistenza termica totale		R	(m²K)/W	2,069
trasmittanza termica		U	W/(m²K)	0,483



Strati	s [m]	λ [W/(mK)]	C [W/(m ² K)]	R [m ² K/W]
h_e	-	-	-	0,040
1. intonaco in calce e cemento	0,015	0,700	-	0,021
2. mattoni semipieni	0,120	0,387	-	0,310
3. intonaco in calce e cemento	0,015	0,700	-	0,021
4. isolante in lana di roccia	0,060	0,039	-	1,538
5. intercapedine d'aria	0,060	-	-	0,180
6. mattoni forati in laterizio	0,080	0,400	-	0,200
7. intonaco in gesso	0,015	0,350	-	0,043
h_i	-	-	-	0,130
resistenza termica totale		R	(m²K)/W	2,483
trasmissione termica		U	W/(m²K)	0,403



Strati	s [m]	λ [W/(mK)]	C [W/(m ² K)]	R [m ² K/W]
h_i	-	-	-	0,130
1. intonaco in calce e cemento	0,015	0,700	-	0,021
2. blocco porizzato	0,120	0,387	-	0,535
3. rasatura in calce e cemento	0,015	0,700	-	0,021
4. isolante in lana di roccia	0,060	0,039	-	1,538
5. intercapedine d'aria fortemente ventilata	0,060	-	-	-
6. rivestimento in pietra	0,020	-	-	-
h_e	-	-	-	0,130
resistenza termica totale		R	(m²K)/W	2,375
trasmissione termica		U	W/(m²K)	0,421



10.2 La trasmittanza degli elementi trasparenti

Le superfici dell'involucro edilizio sono normalmente costituite da elementi opachi e trasparenti che si succedono tra di loro senza soluzione di continuità. Nel paragrafo precedente è stato mostrato come calcolare la trasmittanza termica degli elementi opachi, rimandando al presente capitolo il calcolo degli elementi trasparenti o dei serramenti in genere.

Le variabili che influenzano il calcolo della trasmittanza termica di una chiusura trasparente sono:

- la tipologia di vetro;
- la tipologia di telaio;
- la tipologia di un eventuale distanziatore.

Per il calcolo si procede, infatti, combinando in parallelo la trasmittanza degli elementi che costituiscono la chiusura, pesandoli rispetto all'area e aggiungendo a questo contributo l'effetto del ponte termico determinato dall'interfaccia vetro-telaio e localizzato in corrispondenza del distanziatore. L'effetto del distanziatore viene contabilizzato in presenza di vetri doppi o tripli.

La trasmittanza delle chiusure trasparenti U_w viene calcolata secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 10077-1: 2007 ed in particolare:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_t U_t + l_g \Psi_g}{A_w} \quad (10.4)$$

dove:

U_w è la trasmittanza termica del serramento, [W/(m²K)];

A_w è l'area del serramento o dimensione del vano finestra considerata esternamente, [m²];

A_g è l'area del vetro, [m²];

U_g è la trasmittanza termica del vetro, [W/(m²K)];

A_t è l'area del serramento (telaio), [m²];

U_t è la trasmittanza termica del telaio, [W/(m²K)];

l_g è il perimetro del vetro, [m];

Ψ_g è la trasmittanza termica lineare del distanziatore, [W/(mK)].

Una stessa famiglia di serramenti di un edificio, malgrado possieda la stessa tipologia di telaio e la stessa tipologia di vetro, può non presentare per ognuno dei serramenti che la compongono



uno stesso valore di trasmittanza termica, vista la diretta dipendenza con le dimensioni del serramento stesso, sia in termini di aree, sia di perimetro del vetro.

La formula precedentemente illustrata si adatta al calcolo della trasmittanza termica dei serramenti per edifici di nuova costruzione. È necessario ricavare dalla normativa di riferimento o dai dati forniti dai produttori le proprietà termiche dei materiali utilizzati e misurare geometricamente le superfici e le lunghezze coinvolte nel calcolo.

In presenza di edifici esistenti, se non si dispone di informazioni adeguate sulla natura dei serramenti, è possibile utilizzare, in accordo alla UNI TS/11300-1 e al d.d.g. n. 5796, i valori di trasmittanza termica piana del vetro e del telaio riportati in Tabella 10.5 e in Tabella 10.6 e i valori di trasmittanza termica lineica del distanziatore dalla Tabella 10.7.

È da notare come, per le strutture trasparenti presenti nel d.d.g. n. 5796, la suddivisione delle aree delle superfici disperdenti per tipo venga fatta in automatico dal software. In particolare, indipendentemente dalla reale geometria del serramento, l'area del telaio viene assunta pari al 20% dell'area dell'intero serramento, di conseguenza l'area del vetro risulta pari all'80% dell'area dell'intero serramento.

10.2.1 Il vetro

Il calcolo della trasmittanza termica delle chiusure trasparenti è notevolmente influenzato dalla dimensione e soprattutto dalla tipologia del vetro utilizzato per comporre il serramento.

In termini di prestazioni termiche crescenti è, infatti, possibile parlare di vetro singolo, doppio o triplo a seconda della modalità di realizzazione.

Le caratteristiche del vetro dipendono dal numero di lastre utilizzate per la sua creazione, ma anche dalla tipologia di intercapedine.

La resistenza termica dell'intercapedine di un serramento dipende da:

- dimensione;
- tipologia di trattamento superficiale;
- tipologia di superfici che la delimitano;
- tipologia di gas in esso contenuta.

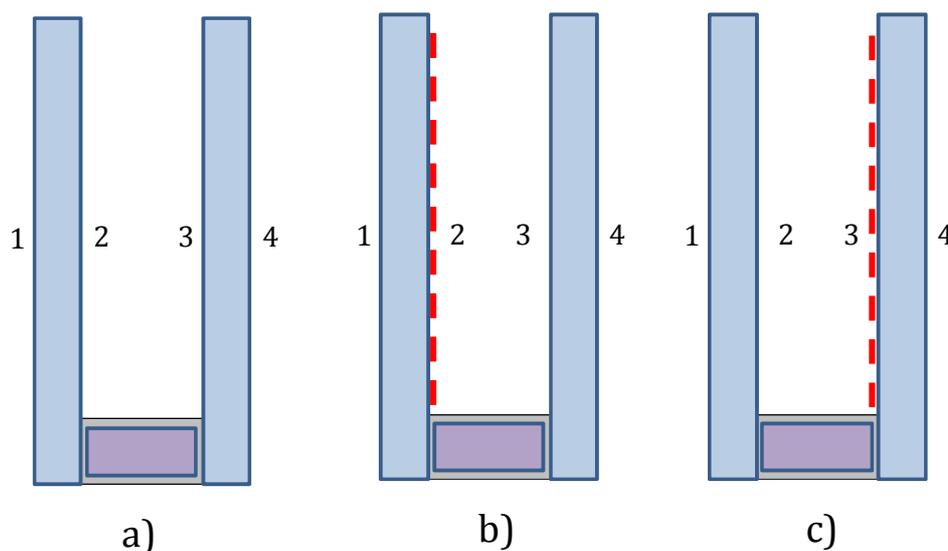


Figura 10.4: Schematizzazione di un vetrocamera

In Figura 10.4 si apprezza la tipica sezione di un vetrocamera, costituito da due strati monolitici di vetro separati da un distanziatore. Ogni faccia (superficie) a partire dal lato esposto verso l'ambiente esterno viene nominata progressivamente da 1 a 4 (si arriva a 6 nel caso di tripli vetri).

Le facce 2 e 3 sono le facce del vetrocamera su cui generalmente viene effettuato il trattamento superficiale basso emissivo, che permette di migliorare la prestazione termica dell'intercapedine.

La posizione del trattamento basso emissivo all'interno dell'intercapedine è funzionale all'utilizzo che verrà fatto in opera. In un clima molto caldo e con picchi di radiazione consistenti, il trattamento basso emissivo verrà posto in faccia 2, mentre in un clima freddo tale trattamento verrà previsto in faccia 3.

Nella tabella seguente, estratta dal prospetto C.1 della UNI EN ISO 10077-1:2007 e riportata nel d.d.g. n. 5796, è possibile notare come la resistenza dell'intercapedine aumenti:

- al crescere dello spessore dell'intercapedine;
- al ridursi del valore di emissività di almeno una delle superfici delimitanti l'intercapedine: a parità di spessore dell'intercapedine stessa, il valore di resistenza termica tende a migliorare.

Tabella 10.3: Resistenza termica di intercapedini (m^2K/W) (Fonte: UNI EN ISO 10077-1:2007)

Spessore dell'intercapedine d'aria [mm]	Una sola superficie trattata con emissività normale di				Entrambe le superfici non trattate - R_s
	0,1	0,2	0,4	0,8	
6	0,211	0,191	0,163	0,132	0,127
9	0,299	0,259	0,211	0,162	0,154
12	0,377	0,316	0,247	0,182	0,173
15	0,447	0,364	0,276	0,197	0,186
50	0,406	0,336	0,260	0,189	0,179



A partire da queste considerazioni è possibile ricondursi alla tabella semplificata fornita dalla UNI EN ISO 10077-1, per avere delle indicazioni di massima sulle prestazioni di generiche categorie di vetro. Si noti come l'introduzione di un gas inerte, in sostituzione dell'aria all'interno dell'intercapedine, contribuisca a migliorare ulteriormente la prestazione energetica.

Tabella 10.4: Trasmittanza termica di doppi e tripli vetri riempiti con differenti gas (Fonte: UNI EN ISO 10077-1:2008)

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas ≥ 90%)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni [mm]	Aria	Argon	Krypton	SF ₆	Xenon
Vetrata doppia	Vetro normale	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4	2,6	2,3	1,8	2,2	1,5
			4-8-4	2,3	2,0	1,6	2,3	1,4
			4-12-4	1,9	1,6	1,5	2,3	1,5
			4-16-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
			4-20-4	1,7	1,5	1,5	3,4	1,5
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
			4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
			4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2	
		4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1	
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2	
		4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2	
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2	
Vetrata tripla	Vetro normale	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4-6-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7	
		4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5	
		4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5	



In assenza di specifiche informazioni è possibile riferirsi ad un'ulteriore tabella proposta dalla UNI/TS 11300-1:2008, che riporta i valori di trasmittanza medi delle più comuni tipologie realizzative italiane. Tale tabella è stata attualmente inserita all'interno del d.d.g. n. 5796 (Tabella 10.5).

Tabella 10.5: Valori di trasmittanza termica U_g per alcuni tipi di vetro (Fonte: UNI TS 11300-1:2008)

Tipo di vetro	U_g [W/(m ² K)]
Vetro singolo	5,7
Vetro singolo selettivo	3,2
Doppio vetro normale	3,3
Doppio vetro con rivestimento selettivo	2,0
Triplo vetro normale	1,8
Triplo vetro con rivestimento selettivo	1,4

Nel caso di caratteristiche dimensionali o materiche specifiche è sempre buona norma riferirsi, quando disponibile, alla scheda tecnica del prodotto. Tale documento dovrebbe contenere tutte le informazioni necessarie al progettista e successivamente al certificatore energetico.

10.2.2 Il telaio

Nel calcolo delle prestazioni termiche del serramento, il contributo del telaio risulta essere in genere meno significativo di quello fornito dal vetro.

Il telaio di un serramento è normalmente costituito da due parti:

- telaio fisso, ancorato al vano finestra;
- telaio mobile che, costituito da ante incernierate al telaio fisso, permette l'apertura e la chiusura del vano.

La prestazione termica del serramento non può essere espressa solo attraverso il controllo delle dispersioni per trasmissione attraverso vetro e telaio. È importante sottolineare come un elevato contributo alle dispersioni potrebbe nascere dai contributi positivi e negativi, derivanti da infiltrazioni localizzate in corrispondenza delle interfacce tra telaio fisso/parete e telaio fisso/telaio mobile.

Mentre il vetro risulta essere impermeabile al passaggio di aria, la qualità di un buon telaio si può apprezzare attraverso la sua capacità di evitare il rischio di infiltrazioni grazie a guarnizioni di battuta in grado di sigillare tra loro elementi fissi e mobili, così come conformazioni particolari di struttura studiate ad hoc.

È buona norma abbinare ad un vetro dalle prestazioni elevate, un telaio che rispetti mediamente la stessa categoria prestazionale in termini di trasmittanza e che al tempo stesso permetta di ridurre o annullare il contributo dovuto alle infiltrazioni d'aria.

Maggiore è la superficie di telaio, ovvero la sua impronta frontale, minore sarà la superficie trasparente disponibile per gli apporti solari. Si stima che mediamente un telaio generico incida tra il 20% e il 30% rispetto alla superficie complessiva del serramento.



Il d.d.g. n. 5796, al prospetto VII fornisce dei valori di riferimento per differenti tipologie di telaio a seconda di quelle che sono le più comuni macroclassi di prodotti.

Si tratta di valori indicativi, pesati sulla media della produzione italiana.

Tabella 10.6: Valori di trasmittanza termica U_t per alcuni tipi di telaio (Fonte: UNI TS 11300-1:2008)

Materiale	Tipo	Trasmittanza Termica U_t [W/(m ² K)]
Poliuretano	Con anima di metallo e spessore di PUR ≥ 5	2,8
PVC Profilo vuoto	Con due camere cave	2,2
	Con tre camere cave	2,0
Legno duro	Spessore 70 mm	2,1
Legno tenero	Spessore 70 mm	1,8
Metallo	-	5,5
Metallo con Taglio termico	Distanza minima di 20 mm tra sezioni opposte di metallo	2,4

10.2.3 Il distanziatore

Il distanziatore è l'elemento che serve a garantire la resistenza meccanica della vetratura doppia o tripla e può essere realizzato in alluminio, metallo o polimeri rinforzati.

Come mostrato in Figura 10.5, esso è vincolato alle lastre di vetro tramite:

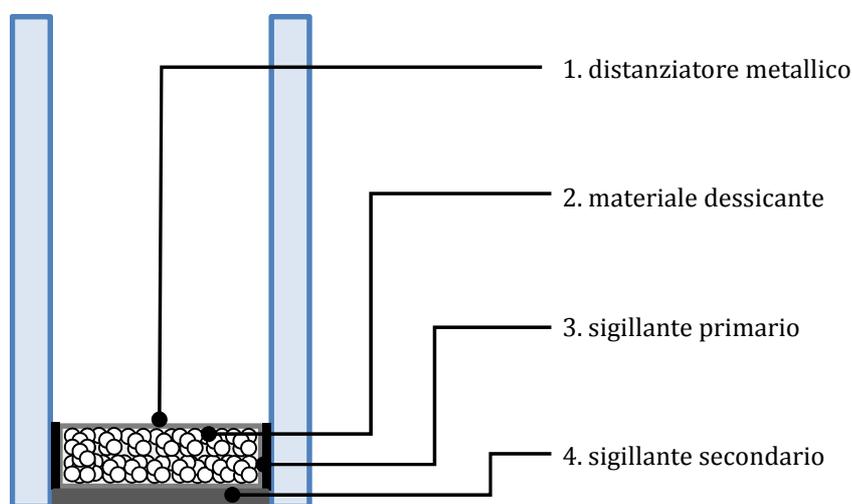


Figura 10.5: Esempio di distanziatore metallico

- un sigillante primario in polisobutilene che garantisce l'adesione tra le lastre di vetro e la tenuta dell'intercapedine;
- un sigillante secondario in polisolfuro che migliora il comportamento meccanico e la resistenza del pacchetto.



All'interno del distanziatore vengono alloggiati dei sali igroscopici che permettono di assorbire un eventuale eccesso di vapore acqueo presente all'interno dell'intercapedine per evitarne il deposito, a seconda dei campi di temperatura, sotto forma di condensa sulla superficie interna del vetrocamera.

Il distanziatore è un elemento che per sua natura contribuisce a ridurre la prestazione energetica del generico vetrocamera e per questo motivo è molto importante conoscerne il contributo. In corrispondenza del perimetro del vetro si manifesta per semplice conduzione una dispersione termica localizzata tra ambiente interno ed ambiente esterno. L'effetto di tale contributo è maggiormente significativo al crescere del grado di isolamento termico della vetratura, misurato al centro della stessa. Per rimediare parzialmente a questo inconveniente è possibile sostituire i distanziatori in metallo, altamente conduttivi, con quelli in materiale plastico.

La combinazione di differenti telai e vetrazioni porta ai valori di trasmittanza termica lineare Ψ riportati in Tabella 10.7.

Tabella 10.7: Valori della trasmittanza termica lineare Ψ per distanziatori in metallo (sopra) e in PVC (sotto)
(Fonte: UNI EN ISO 10077-1:2007)

Materiali del telaio	Vetrata doppia o tripla non rivestita, intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]	Vetrata doppia con bassa emissività, vetrata tripla con due rivestimenti a bassa emissività intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]
Telaio in legno o telaio in PVC	0,06	0,08
Telaio in alluminio con taglio termico	0,08	0,11
Telaio in metallo senza taglio termico	0,02	0,05

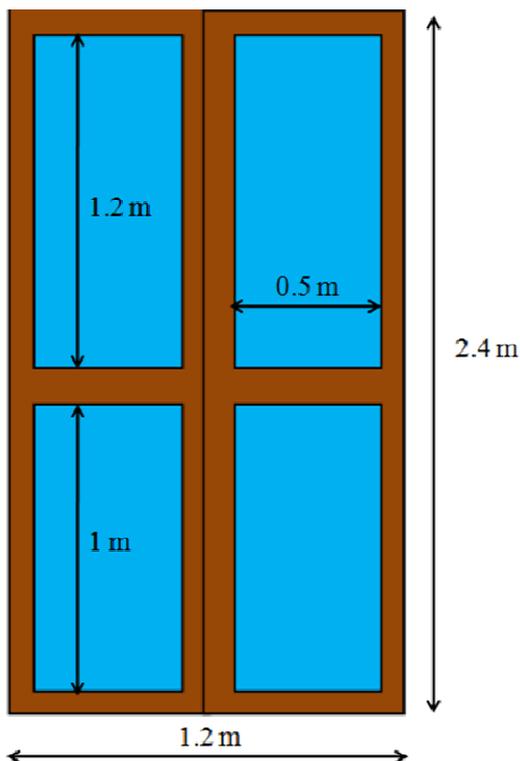
Materiali del telaio	Vetrata doppia o tripla non rivestita, intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]	Vetrata doppia con bassa emissività, vetrata tripla con due rivestimenti a bassa emissività intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]
Telaio in legno o telaio in PVC	0,05	0,06
Telaio in alluminio con taglio termico	0,06	0,08
Telaio in metallo senza taglio termico	0,01	0,04



10.2.4 Calcolo trasmittanza termica del serramento: esempio di calcolo

Si voglia calcolare la trasmittanza termica del seguente serramento in legno, dotato di vetrata doppia e distanziatore metallico.

Prima di tutto è importante raccogliere i dati geometrici del modello e successivamente ottenere le caratteristiche dei materiali utilizzati per calcolare la trasmittanza termica del serramento.



Dati Geometrici:

$$A_w = (1,2 \times 2,4) = 2,88 \text{ m}^2$$

$$A_g = (1,2 \times 0,5) \times 2 + (1,0 \times 0,5) \times 2 = 2,2 \text{ m}^2$$

$$A_t = (A_w - A_g) = 0,68 \text{ m}^2$$

$$l_g = (1,2 \times 4) + (0,5 \times 8) + (1,0 \times 4) = 12,8 \text{ m}$$

Caratteristiche dei materiali:

Doppiovetro basso-emissivo

$$U_g = 1,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Telaio in legno tenero

$$U_t = 1,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Distanziatore metallico

$$\psi_g = 0,06 \text{ W/m K}$$

Trasmittanza termica

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_t U_t + l_g \psi_g}{A_w} = 1,914 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$



10.2.5 La trasmittanza degli elementi trasparenti: casi particolari, serramenti doppi

Nel caso di serramenti composti da due telai separati si parla di doppio serramento. Con riferimento alla figura, la trasmittanza si calcola mediante la relazione che segue:

$$U_W = \left(\frac{1}{U_{w1}} - R_{si} + R_s - R_{se} + \frac{1}{U_{w2}} \right)^{-1} \quad (10.5)$$

dove:

- U_{w1} è la trasmittanza termica del componente interno calcolata o fornita dal costruttore, [W/m²K];
- U_{w2} la trasmittanza termica del componente esterno calcolata o fornita dal costruttore, [W/m²K];
- R_{si} la resistenza termica superficiale interna della finestra esterna quando applicata da sola (ai fini del calcolo si assume pari a 0,13 m²K/W);
- R_s la resistenza termica dell'intercapedine racchiusa tra le vetrate delle due finestre (Prospetto X del d.d.g. n. 5796), [m²K/W];
- R_{se} la resistenza termica superficiale esterna della finestra interna quando applicata da sola (ai fini del calcolo si assume pari a 0,04 m²K/W).

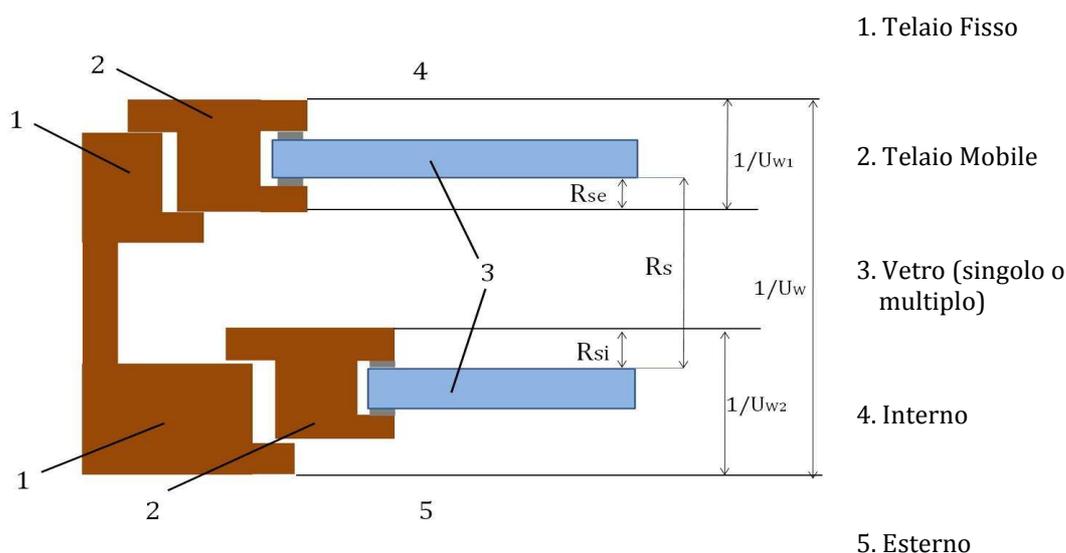


Figura 10.6: Esempio di doppio serramento [Immagine secondo UNI EN ISO 10077-1:2007]



10.2.6 Resistenza termica aggiuntiva dovuta a chiusure oscuranti

Qualora siano presenti sistemi di oscuramento delle chiusure trasparenti quali scuri, persiane e avvolgibili la resistenza termica della chiusura trasparente stessa deve essere corretta e maggiorata per tenere conto della presenza di questa protezione aggiuntiva, dipendente dalla tipologia di schermo considerato e dalle sue effettive ore di attivazione.

Con il sistema di oscuramento in posizione, posto parallelamente al piano della chiusura trasparente, il sistema presenterà una resistenza termica complessiva costituita dalla sommatoria in serie delle resistenze del serramento, del solo elemento di chiusura e dell'intercapedine d'aria non ventilata o mediamente ventilata tra loro formatasi.

Per conoscere i valori medi di resistenza termica aggiuntiva si fa riferimento al prospetto C.4 della UNI/TS 11300-1 e che riporta i seguenti valori.

Tabella 10.8: Resistenza termica addizionale per finestre con chiusure oscuranti [Fonte UNI EN ISO 10077-1:2007]

Tipo di chiusura	Resistenza termica caratteristica della chiusura R_{shut} [m ² K/W]	Resistenze termiche addizionali per una specifica permeabilità all'aria delle chiusure ΔR [m ² K/W]		
		Alta permeabilità all'aria	Media permeabilità all'aria	Bassa permeabilità all'aria
Chiusure avvolgibili in alluminio	0,01	0,09	0,12	0,15
Chiusure avvolgibili in legno e plastica senza riempimento in schiuma	0,10	0,12	0,16	0,22
Chiusure avvolgibili in plastica con riempimento in schiuma	0,15	0,13	0,19	0,26
Chiusura in legno da 25 mm a 30 mm di spessore	0,20	0,14	0,22	0,30

La differenza di permeabilità della chiusura dipende dalla geometria del sistema e dalla continuità tra vano finestra e sistema oscurante.

Calcolato il valore della trasmittanza termica del serramento considerando il contributo dello schermo esterno è possibile combinare tramite la formula seguente i valori ricavati in modo da ottenere la trasmittanza termica ridotta della finestra e della chiusura oscurante:

$$U_{w,corr} = U_{W+shut} \cdot f_{shut} + U_w \cdot (1 - f_{shut}) \quad (10.6)$$

dove:



- $U_{W,corr}$ è la trasmittanza termica ridotta della chiusura trasparente e della chiusura oscurante, [W/m²K];
- U_W è la trasmittanza termica della chiusura trasparente senza chiusura oscurante, [W/m²K];
- U_{W+shut} è la trasmittanza termica della chiusura trasparente e della chiusura oscurante insieme, [W/m²K];
- f_{shut} è la frazione adimensionale della differenza cumulata di temperatura, derivante dal profilo orario di utilizzo della chiusura esterna, [-].

In assenza di informazioni sul profilo di utilizzo della chiusura è sufficiente attribuire a f_{shut} un valore pari a 0,6.

La procedura per il calcolo della trasmittanza termica ridotta della chiusura trasparente non viene contemplata all'interno del d.d.g. n. 5796 di Regione Lombardia.

10.2.7 Caratteristiche ottiche del vetro

Le caratteristiche ottico-energetiche del vetro dipendono dalla tipologia e dalla natura del prodotto che si considera.

Il vetro chiaro, o vetro semplice, è un materiale semitrasparente che genericamente permette il passaggio della radiazione solare su di esso incidente. Esso può essere composto andando a creare un sistema di chiusura a doppio o triplo strato (vetro doppio-vetro triplo) e ognuno degli strati di questi sistemi così costituito può essere trattato superficialmente (trattamenti bassoemissivi) al fine di modificarne il comportamento ottico/energetico.

Il parametro che quantifica la percentuale di radiazione solare globale, che attraversa una determinata tipologia di vetro per raggiungere l'ambiente interno, è il fattore solare g.

Quando la radiazione solare incide su una superficie generica semitrasparente, essa viene scomposta in tre componenti fondamentali e strettamente dipendenti dalla tipologia di vetro considerato.

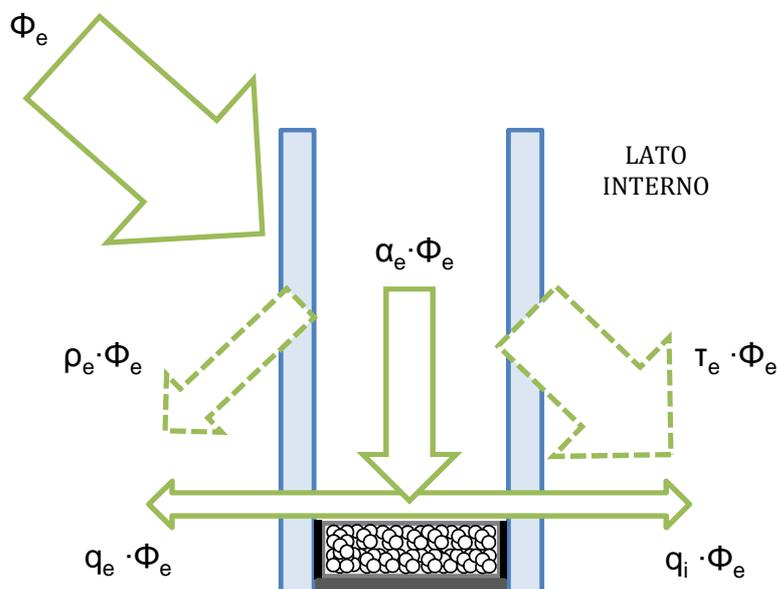


Figura 10.7: Scomposizione della radiazione solare incidente su un vetro

Così come mostrato in Figura 10.7, parte della radiazione solare, Φ_e , risulta composta da:

- radiazione riflessa specularmente dalle superfici dei materiali, $\rho_e \cdot \Phi_e$;
- radiazione assorbita, $\rho_e \cdot \Phi_e$, e ri-emessa verso l'ambiente interno ($q_i \cdot \Phi_e$) ed esterno ($q_e \cdot \Phi_e$) a seconda dell'emissività delle superfici considerate;
- radiazione trasmessa dalla superficie trasparente, $\tau_e \cdot \Phi_e$.

La somma delle tre componenti deve comunque essere pari al 100% della radiazione incidente, ovvero:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (10.7)$$

dove:

- ρ è la radiazione solare riflessa;
- α è la radiazione solare assorbita;
- τ è la radiazione solare trasmessa.

Nello specifico, il fattore solare g è definito come la somma della radiazione trasmessa e della radiazione solare assorbita dalla superficie e ritrasmessa verso l'ambiente interno.

Il dominio di esistenza di tale valore è, quindi, compreso tra 0 e 1, anche se nel caso specifico possiamo ridurre il campo di esistenza tra 0 e 0,87 (fattore solare g del vetro singolo chiaro).

È, comunque, da sottolineare l'importanza di tale parametro nella comprensione e nel calcolo degli apporti solari attraverso le superfici trasparenti dell'edificio.



Nel caso di caratteristiche dimensionali o materiche specifiche è sempre buona norma riferirsi alla scheda tecnica del prodotto. Tale documento dovrebbe contenere tutte le informazioni necessarie al progettista e successivamente al certificatore energetico.

È possibile riferirsi ad un'ulteriore tabella proposta dalla UNI/TS 11300-1 che mostra i valori di fattore solare g_{\perp} medi delle più comuni tipologie realizzative italiane. Tale tabella è stata attualmente inserita all'interno del d.d.g. n. 5796 di Regione Lombardia.

Tabella 10.9: Valori della trasmittanza per energia solare totale, g , per differenti tipi di vetro (Fonte: UNI TS 11300-1:2008)

Tipo di vetro	Fattore solare g_{\perp}
Vetro singolo	0,85
Vetro singolo selettivo	0,66
Doppio vetro normale	0,75
Doppio vetro con rivestimento selettivo	0,63
Triplo vetro normale	0,70
Triplo vetro con rivestimento selettivo	0,54
Doppia finestra	0,75



10.3 Lo scambio termico con il terreno

Gli elementi degli edifici a contatto con il terreno sono interessati da un flusso termico non stazionario, in quanto gli effetti dinamici dovuti alla capacità termica del terreno e alla geometria bi e tri-dimensionale del problema non possono essere trascurati.

Tra questi elementi si annoverano i pavimenti appoggiati sul terreno (controterra), i pavimenti su spazio aerato/intercapedine (ad esempio il vespaio aerato) ed i piani interrati (nelle configurazioni riscaldato – non riscaldato – parzialmente riscaldato).

Il calcolo dell'energia termica scambiata per trasmissione attraverso il terreno avviene tramite una procedura riportata nella norma UNI EN ISO 13370:2008, che permette di calcolare sia la componente stazionaria del flusso termico (valore medio annuale del flusso termico), sia la parte di flusso termico dovuta alle variazioni periodiche annuali della temperatura (variazioni stagionali, ottenute su base mensile, del flusso di calore rispetto al valore medio annuale).

Mentre nel caso di bilanci termici annuali è corretto utilizzare il coefficiente di scambio termico in regime stazionario H_g , ai fini del bilancio termico mensile è necessario considerare anche la componente periodica.

É da segnalare come i coefficienti di accoppiamento termico stazionari dipendano dal rapporto tra lo spessore equivalente e la dimensione caratteristica del pavimento, mentre i coefficienti di accoppiamento termico periodici dipendano dal rapporto tra lo spessore equivalente e la profondità di penetrazione periodica.

La presenza di isolamento perimetrale (verticale o orizzontale) va a migliorare la resistenza termica e deve essere pertanto presa in considerazione.

10.3.1 I parametri principali

I parametri principali che interessano il calcolo dello scambio termico con il terreno sono i seguenti.

- Le proprietà termofisiche del terreno, dati ricavabili dal Prospetto 1 della UNI EN ISO 13370 (in assenza di specifiche informazioni, devono essere considerati i valori relativi alla categoria 2).

Tabella 10.10: Proprietà termofisiche del terreno (da Prospetto 1 della UNI EN ISO 13370:2008)

Categoria	Conduttività termica λ [W/(mK)]	Capacità termica per unità di volume ρ_c [J/(m ³ K)]
1. Argilla o limo	1,5	3,0 x 10 ⁶
2. Sabbia o ghiaia	2,0	2,0 x 10 ⁶
3. Roccia omogenea	3,5	2,0 x 10 ⁶

- La dimensione caratteristica B' del pavimento, definita come il rapporto tra l'area e il semiperimetro del pavimento:



$$B' = \frac{2A}{P} \quad (10.8)$$

dove:

A è l'area del pavimento, considerando le dimensioni interne, [m²];

P è il perimetro disperdente del pavimento, considerando le dimensioni interne, [m].

Nella determinazione del perimetro disperdente P si devono considerare solo le superfici di confine a contatto con il terreno e non verso o in comune con zone termiche adiacenti climatizzate e non.

- Lo spessore equivalente (per pavimenti o per pareti di piani interrati), inteso come lo spessore di terreno (con conduttività termica del terreno in questione) che ha la stessa resistenza termica.
- Lo spessore equivalente per pavimenti, d_t , è calcolato come:

$$d_t = w + \lambda \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (10.9)$$

dove:

w è lo spessore totale delle pareti perimetrali esterne dell'edificio, [m];

R_{si} è la resistenza termica superficiale interna, [m²K/W];

R_f è la resistenza termica del pavimento, [m²K/W];

R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna, [m²K/W].

λ è la conduttività termica del terreno [W/(mK)].

Il valore R_f comprende la resistenza termica di ogni strato uniforme di isolamento sopra, sotto o interno alla soletta del pavimento, e quella di eventuali rivestimenti. La resistenza termica di solette di calcestruzzo pesante e di rivestimenti sottili può essere trascurata. Si assume che il calcestruzzo di sottofondo sotto la soletta abbia la stessa conduttività termica del terreno e la sua resistenza termica non dovrebbe essere considerata.

- La presenza di isolamento di bordo, che si traduce in una trasmittanza termica lineica $\psi_{g,e}$ associata al giunto muro/pavimento. Tale fattore correttivo dipende dall'entità e dal posizionamento di eventuali strati di materiale isolante. Si distinguono tre casi:
 - pavimento non isolato o uniformemente isolato;
 - pavimento con isolamento perimetrale orizzontale;
 - pavimento con isolamento perimetrale verticale.



- Nel caso di pavimento non isolato od uniformemente isolato, $\psi_{g,e}$ è uguale a zero. Negli altri due casi, l'isolamento perimetrale introduce uno spessore equivalente aggiuntivo, d' , dovuto alla resistenza termica addizionale R' :

$$d' = \lambda \cdot R' = \lambda \cdot \left(R_n - \frac{d_n}{\lambda} \right) = \lambda \cdot R_n - d_n \quad (10.10)$$

dove:

R_n è la resistenza termica dall'isolamento perimetrale (verticale o orizzontale), [m²K/W];

d_n è lo spessore dell'isolamento perimetrale, [m];

λ è la conduttività termica del terreno, [W/(mK)].

10.3.2 Commenti e caso studio

Il tasso di dispersione termica attraverso i pavimenti e le pareti di un seminterrato, direttamente o indirettamente a contatto con il terreno, dipende da diversi fattori. Tali fattori comprendono l'area e il perimetro esposto della soletta del pavimento, la profondità del pavimento del seminterrato al di sotto del livello del suolo e le proprietà termiche del terreno.

La Figura 10.8 fornisce, a titolo di esempio, i valori di $U_{equiv,k}$ per la tipologia di solaio controterra, in funzione del valore U della trasmittanza del pavimento (diverse curve del grafico) e del parametro caratteristico B' (sull'asse delle ascisse). In tale figura, si assume che la conduttività termica del terreno sia $\lambda_g = 2,0$ W/(mK) e non si tiene conto degli effetti dell'isolamento perimetrale.

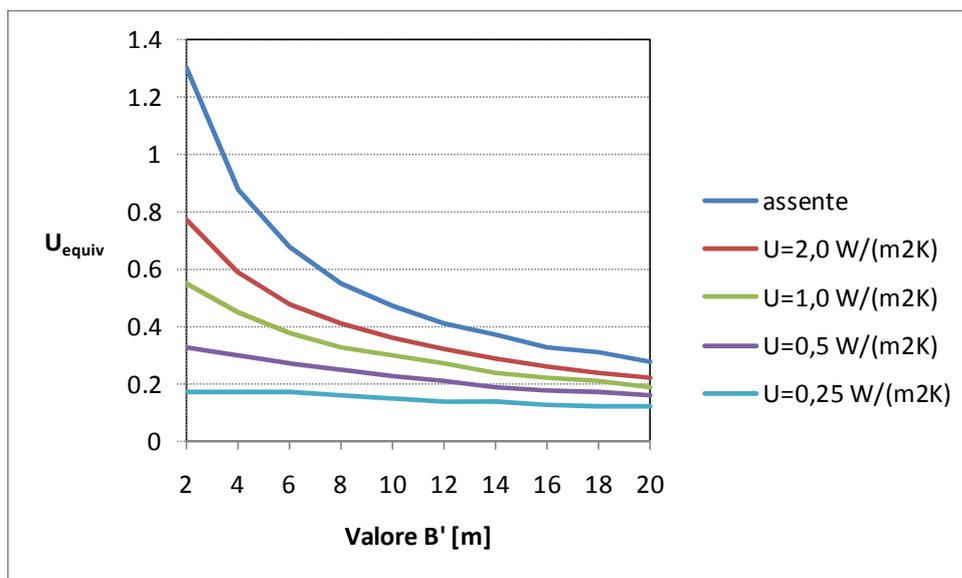


Figura 10.8: Esempio di trasmittanza termica equivalente stazionaria calcolata secondo UNI EN ISO 13370:2008, partendo da diversi valori di trasmittanza termica del pavimento (diverse curve) e per diversi valori del parametro caratteristico B' (sull'asse delle ascisse)

Si può notare l'incidenza del terreno, che porta ad una diminuzione della trasmittanza termica del solo solaio tanto maggiore quanto più marcata è l'impronta del solaio (e, quindi, le dimensioni).

10.3.3 Esempio di calcolo (fonte UNI EN ISO 13370)

Si ipotizza un edificio di dimensioni secondo Figura 10.9, a diretto contatto con il terreno. Si vuole calcolare la trasmittanza del solaio inferiore considerando il contributo del terreno e il coefficiente di dispersione per trasmissione attraverso il terreno (stazionario).

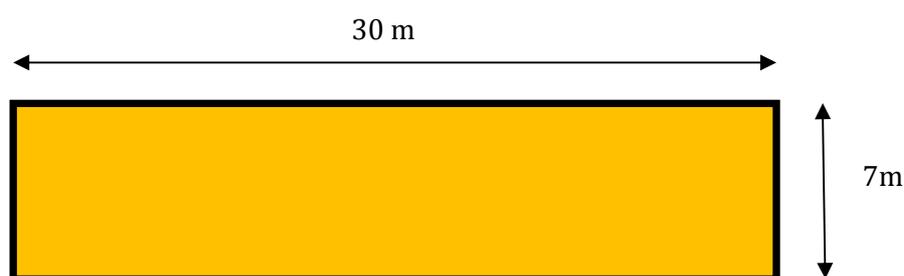


Figura 10.9: Edificio generico con solaio controterra

$$\text{Perimetro} = 30 + 7 + 30 + 7 = 74 \text{ m}$$

$$\text{Area} = 7 \times 30 = 210 \text{ m}^2$$

$$B' = \frac{A}{0,5 \times P} = \frac{210}{0,5 \times 74} = 5,676 \text{ [m]}$$



Si ipotizza una conducibilità del terreno pari a $\lambda=1,5$ W/mK e che il solaio non sia isolato termicamente, per cui $R_f=0$

Considerando che: $d_t = w + \lambda \times (R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,3 + 1,5 \times (0,17 + 0 + 0,04) = 0,615$ [m]

Siccome $d_t < B'$

$$U = \frac{2 \times 1,5}{3,412 \times 5,676 + 0,615} \times \ln \left(\frac{3,142 \times 5,675}{0,615} + 1 \right) = 0,553 \text{ [W / (m}^2\text{K)]}$$

$$H_g = 0,553 \times 210 = 116,1 \text{ [W/K]}$$



10.4 I ponti termici

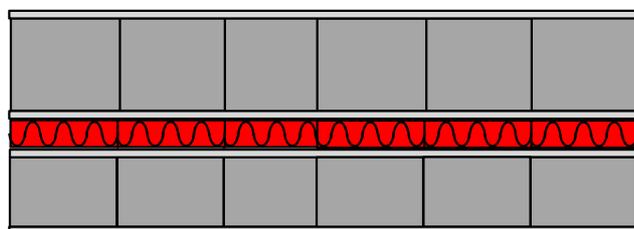
Con il termine *ponte termico* si definiscono i punti singoli dell'involucro edilizio, attraverso i quali si ha una dispersione di calore localizzata superiore a quella delle superfici adiacenti.

Genericamente i ponti termici sono dovuti a:

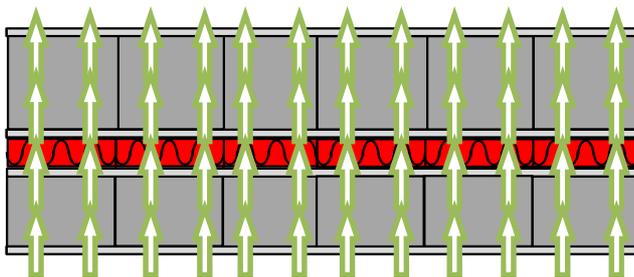
- variazioni della continuità del materiale costituente l'involucro edilizio;
- modifiche della geometria;
- elementi passanti di fissaggio;
- presenza di elementi strutturali o di raccordo.

In corrispondenza di questi punti singoli si rileva un incremento del flusso termico, associato a una distorsione delle linee di flusso e ad una modifica localizzata delle distribuzioni di temperatura. Tale modifica, caratterizzata da una riduzione della temperatura superficiale interna, è associata al rischio di formazione di condensazione superficiale che, protratta nel tempo, porta al degrado dei materiali di finitura e alla formazione di muffe e crescite biologiche.

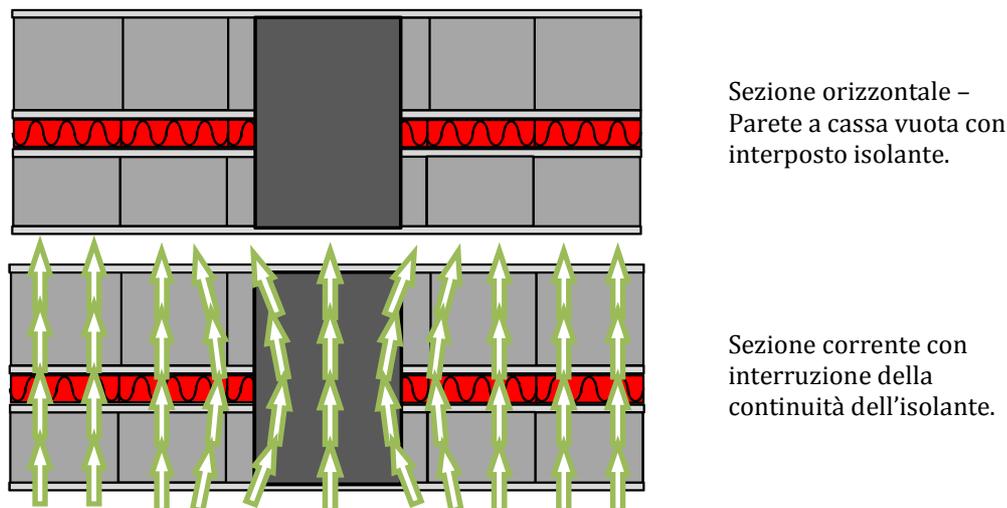
Il fenomeno descritto è apprezzabile nella figura seguente. Ad esempio, quando all'interno di una sezione corrente di parete perimetrale omogenea in laterizio viene inserito un elemento strutturale con conducibilità molto differente, viene creata una perturbazione significativa dei campi di flusso termico che attraversano la sezione.



Sezione orizzontale –
Parete a cassa vuota con
interposto isolante.



Sezione corrente senza
soluzione di continuità.



Sezione orizzontale –
Parete a cassa vuota con
interposto isolante.

Sezione corrente con
interruzione della
continuità dell'isolante.

Figura 10.10: Sezione orizzontale di parete perimetrale omogenea ed eterogenea caratterizzata dalla presenza del pilastro appartenente all'orditura strutturale.

La quantificazione dell'incremento delle dispersioni viene espresso per unità di lunghezza e comunemente denominato trasmittanza termica lineica, ψ [W/mK]. Il valore della trasmittanza termica lineica rientra all'interno del calcolo delle dispersioni per trasmissione dell'edificio o della zona termica considerata e in particolare:

$$H_T = \sum_{i=1}^n A_i \cdot U_i + \sum_{k=1}^m L_k \cdot \psi_k \quad (10.11)$$

dove:

H_T è il coefficiente di dispersione termica per trasmissione, [W/K];

A_i è la superficie disperdente i-esima, [m²];

U_i è la trasmittanza termica della i-esima superficie disperdente, [W/m²K];

L_k è la lunghezza della k-esima interfaccia di ponte termico, [m];

ψ_k è la k-esima trasmittanza termica lineica, [W/mK].

La normativa vigente e la buona pratica costruttiva prevedono il controllo di questi fenomeni e forniscono le metodologie adeguate per la risoluzione, in modo da evitare un incremento delle dispersioni per trasmissione.

Il valore di ψ è influenzato dalla qualità del nodo costruttivo, dalle dimensioni di riferimento con cui viene calcolato (dimensioni interne o esterne) e dal valore di trasmittanza U delle superfici adiacenti al nodo costruttivo.

La quantificazione dell'effetto dei ponti termici sul comportamento globale dell'involucro edilizio può essere effettuata tramite tre metodologie tra loro differenti:



- incremento percentuale forfettario delle dispersioni dell'involucro edilizio (d.d.g. n. 5796 di Regione Lombardia in accordo con UNI/TS 11300-1);
- utilizzo di abachi di riferimento e metodi di calcolo semplificato che presentano le tipologie più comuni di nodo costruttivo (d.d.g. n. 5796 di Regione Lombardia Allegati B e C in accordo con UNI EN ISO 14683);
- calcolo agli elementi finiti dei nodi costruttivi (in accordo con UNI EN ISO 10211:2008).

La prima metodologia, basandosi su indicazioni di massima delle caratteristiche costruttive dell'involucro edilizio, si adatta solamente ad edifici esistenti o di cui non si hanno informazioni in dettaglio dello stato di fatto dei nodi costruttivi.

Le altre due metodologie si adattano obbligatoriamente agli edifici di nuova costruzione e permettono di quantificare il contributo dei ponti termici con maggiore precisione e grado di dettaglio.

Proporzionalmente alla riduzione della trasmittanza termica U della sezione corrente delle superfici dell'involucro edilizio, il contributo alle dispersioni globali dell'edificio, dovuto ai ponti termici, cresce notevolmente.

Ponti termici non controllati possono incidere sul bilancio energetico globale di un edificio ben isolato per valori compresi tra il 50 e l'80%. È quindi necessario ottenere quante più informazioni possibili per valutare correttamente il fenomeno e per scegliere la soluzione adeguata ad ogni singolo caso.

10.4.1 Incremento percentuale delle dispersioni

Nella normale pratica costruttiva gli elementi costruttivi dell'involucro edilizio realizzati in opera non sono privi di difetti, ma sono caratterizzati da irregolarità costruttive, spesso dovute ad esigenze di progetto o caratteristiche del particolare sistema costruttivo. A questo proposito è sufficiente riferirsi, ad esempio, ai comuni tamponamenti in laterizio che, in corrispondenza dei giunti di malta presentano caratteristiche di resistenza termica di molto inferiori rispetto a quanto può essere rilevato in corrispondenza della sezione corrente del laterizio. Tale perturbazione è da considerarsi ripetitiva e presente lungo tutto lo sviluppo della generica parete perimetrale.

Per tenere conto delle variazioni delle dispersioni dell'involucro edilizio è sufficiente prevedere un incremento percentuale della trasmittanza termica U , che tenga conto della differenza tra il comportamento della parete in condizioni di progetto e in condizioni reali (ovvero alla posa in opera).

Tale incremento, che prevede il contributo delle discontinuità tipiche della soluzione costruttiva proposta, ma anche della presenza dei serramenti, è riportato in Prospetto IV del d.d.g. n. 5796. La trasmittanza termica media sarà:

$$U_{c,k} = U_k \cdot (1 + F_{PT}) \quad (10.12)$$



dove:

- $U_{c,k}$ è la trasmittanza termica media della struttura k-esima che separa la zona climatizzata o a temperatura controllata dall'ambiente circostante, [W/m²K];
- U_k è la trasmittanza termica della struttura k-esima che separa la zona climatizzata o a temperatura controllata dall'ambiente circostante, [W/m²K];
- F_{PT} è il fattore correttivo da applicare al valore di trasmittanza termica della struttura opaca così da tenere conto delle maggiorazioni dovute ai ponti termici (Prospetto IV del d.d.g. n. 5796), [-].

Tabella 10.11: Incremento forfettario della trasmittanza termica di parete per tenere conto dell'effetto dei ponti termici

Descrizione della parete	F_{PT}
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) senza aggetti/balconi e con ponti termici corretti	0,05
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto) con aggetti/balconi	0,15
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra (senza isolante)	0,05
Parete a cassa vuota con mattoni forati (senza isolante)	0,10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico corretto)	0,10
Parete a cassa vuota con isolamento nell'intercapedine (ponte termico non corretto)	0,20
Pannello prefabbricato in calcestruzzo con pannello isolante all'interno	0,30

Per l'applicazione di questo metodo è sufficiente scegliere tra le proposte fornite dal Prospetto IV, quella che maggiormente si addice alle caratteristiche costruttive dell'edificio che stiamo considerando. Si ricorda come questi valori siano conservativi e adattabili a tipologie edilizie con trasmittanze medie piuttosto elevate.

Come è facile notare, l'incidenza dei ponti termici non è mai pari a 0. Tale contributo è differentemente apprezzabile a seconda della soluzione costruttiva adottata, ma anche a seconda dell'estensione delle superfici utilizzate per il calcolo delle dispersioni dell'edificio. Tali coefficienti e, di conseguenza, tali incrementi di trasmittanza termica vengono applicati solamente alle superfici di parete. Ad un incremento percentuale di dispersione tramite questi coefficienti, non corrisponde un pari incremento in termini di dispersioni globali dell'edificio. Ai fini del calcolo risulteranno, quindi, significativi i mutui rapporti geometrici e di forma tra le tipologie di superfici disperdenti.

10.4.2 Utilizzo di abachi di riferimento e metodi semplificati

Per ponti termici lineici, possono essere usati metodi semplificati o valori tabulati per ottenere una stima della trasmittanza termica lineica.

Trattasi di stima, perché i valori tabulati di trasmittanza termica riportati nella UNI EN ISO 14683:2008 (o nella Appendice B del d.d.g. n. 5796) devono sottostare a precise condizioni al contorno per essere considerati applicabili ai casi reali.



È importante considerare come tali valori, in quanto presenti all'interno di un abaco, per quanto completi non possono essere considerati esaustivi e rappresentativi di tutte le tipologie realizzabili di nodo costruttivo.

In secondo luogo, affinché i valori riportati possano ritenersi rappresentativi, è necessario che il nodo costruttivo da analizzare possieda delle caratteristiche tali da essere incluse all'interno dei limiti posti dalla UNI EN ISO 14683 e in particolare:

per tutti i dettagli:

- resistenza termica superficiale interna $R_{si}=0,13$ [m^2K/W]
- resistenza termica superficiale esterna $R_{se}=0,04$ [m^2K/W]

per le pareti esterne:

- spessore $d=0,30$ [m]

per le pareti interne:

- spessore $d=0,20$ [m]

per pareti isolate:

- trasmittanza termica $U=0,343$ [m^2K/W]
- resistenza termica dello strato isolante $R=2,50$ [m^2K/W]

per pareti non isolate:

- trasmittanza termica $U=0,375$ [m^2K/W]

per tutte le solette:

- spessore $d=0,20$ [m]
- conducibilità termica $\lambda=2,00$ [W/mK]

per i tetti:

- trasmittanza termica $U=0,365$ [W/m^2K]
- resistenza termica dello strato isolante $R=2,50$ [m^2K/W]

per i telai delle aperture:

- spessore $d=0,06$ [m]

per i pilastri:

- spessore $d=0,30$ [m]
- conducibilità termica $\lambda =2,00$ [W/mK]



per i pavimenti controterra:

- spessore $d=0,20$ [m]
- conducibilità termica $\lambda =2,00$ [W/mK]
- resistenza termica dello strato isolante $R=2,50$ [m²K/W]

Per tutte le tipologie di nodo costruttivo non presenti (per geometria e materiali utilizzati) all'interno dell'abaco, deve essere applicato il calcolo secondo un metodo analitico conforme alla UNI EN ISO 10211:2008 oppure un'ulteriore ricerca all'interno dell' Appendice B del d.d.g. n. 5796.

La metodologia applicativa per il calcolo del contributo dei ponti termici grazie all'abaco delle trasmittanze termiche lineari prevede che vengano individuate tutte le interfacce costituenti un ponte termico e derivate dalla discretizzazione dell'edificio o della zona termica in un modello di calcolo. Come evidenziato in figura, essendo i nostri calcoli basati sulle dimensioni lorde esterne, si procede dalla riduzione del modello solido matematico in un modello costituito dalle sole interfacce tra superfici piane adiacenti, considerando eventuali discontinuità particolari, quali balconi, pilastri e serramenti.

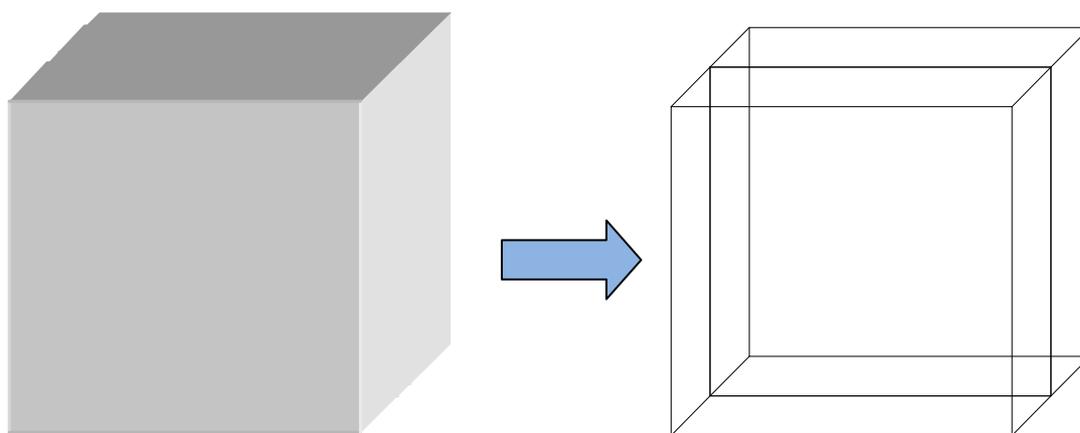


Figura 10.11:Discretizzazione del modello di calcolo. Da solido a Wireframe

Ottenuto questo modello è, quindi, possibile suddividere le singole interfacce per tipo e determinarne la lunghezza. Per ogni tipologia viene cercato all'interno degli abachi di riferimento, o calcolato secondo l'Appendice C del d.d.g. n. 5796 il corrispondente valore di trasmittanza termica lineica che verrà utilizzato per il calcolo.

In casi che esulano dal d.d.g. n. 5796 è possibile procedere considerando le dimensioni interne e scomponendo diversamente il modello di calcolo.

Nel caso in cui il ponte termico si riferisca ad un giunto tra due strutture che coinvolgono due zone termiche differenti, il valore della trasmittanza termica lineare, dedotto dalla UNI EN ISO 14683, deve essere ripartito tra le due zone interessate.



10.4.3 Utilizzo di abachi di riferimento e metodi semplificati: Esempio di calcolo

Il seguente caso applicativo si riferisce a un modello di edificio per cui sono già state definite le tipologie di interfaccia tra elementi costruttivi. Per ogni interfaccia è possibile evidenziare all'interno del catalogo/abaco dei ponti termici una tipologia di nodo e un valore di trasmittanza termica lineica. Si utilizzano per il calcolo le dimensioni esterne.

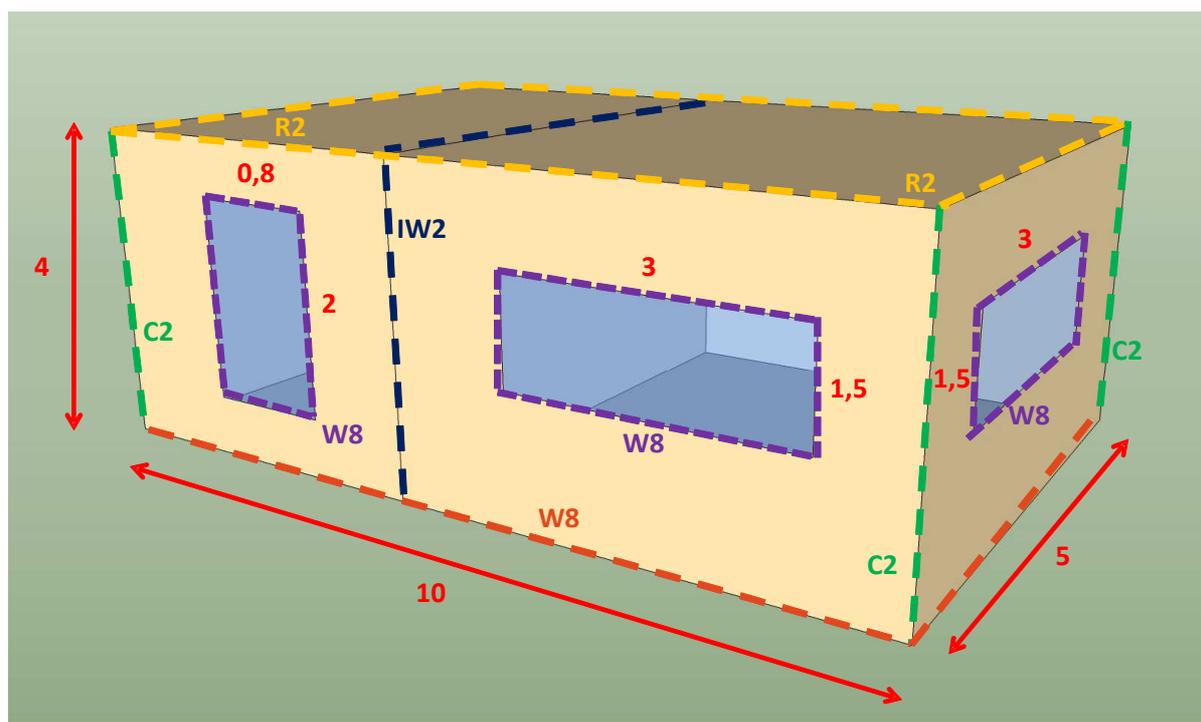


Figura 10.12: Evidenziazione e calcolo dei ponti termici.

Per calcolare le dispersioni attraverso i ponti termici è sufficiente suddividere le interfacce per tipo, stabilirne la lunghezza e il tipo.

Tabella 10.12: Tipologia di ponte termico e coefficienti di dispersione per trasmissione

Ponte termico	Tipologia di ponte termico	Ψ_e [W/mK]	l [m]	$\Psi_e l$ [W/K]
Parete/tetto	R2	0,50	30,00	15,00
Parete/parete	C2	-0,10	16,00	-1,60
Parete/pavimento su terreno	GF6	0,45	30,00	13,50
Partizione/parete	IW2	0,95	8,00	5,70
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,00	0,00
Architrave, soglia, stipite	W8	1,00	23,60	23,60
Totale				56,20



10.4.4 Calcolo dei ponti termici agli elementi finiti

In presenza di un ponte termico ci si scontra con l'impossibilità di stimare le dispersioni attraverso un flusso termico piano stazionario, così come si fa normalmente per tutte le superfici di involucro, a causa dell'eterogeneità e della tridimensionalità dei nodi.

I software che permettono il calcolo agli elementi finiti del nodo costruttivo (secondo UNI EN ISO 10211:2008) suddividono il modello in singoli elementi di calcolo (appartenenti ad una mesh) che permettono, tramite un risolutore basato su metodi numerici, di calcolare la ripartizione delle temperature e dei flussi di energia attraverso ogni elemento del modello di calcolo. Tali software permettono, quindi, di calcolare la ripartizione dei flussi termici all'interno di una generica sezione, indipendentemente dalla sua forma o dalla sua complessità.

È, perciò, necessario ricorrere a logiche di calcolo specifico adeguate alla determinazione del ponte termico. In presenza di un nodo costruttivo si deve calcolare e conoscere le dispersioni attraverso i singoli elementi costruttivi considerati separatamente. Successivamente è necessario determinare le dispersioni supplementari dovute alla combinazione dei due elementi. In altre parole, si calcola il flusso termico che attraversa l'involucro edilizio nella sua complessità e la somma dei flussi termici piani e stazionari che attraversano gli elementi costruttivi presi singolarmente.

Rapportando la differenza di flusso termico alla differenza di temperatura di ogni caso analizzato e alla lunghezza di ogni interfaccia è possibile ottenere il valore di trasmittanza termica lineica, ψ , del ponte termico:

$$\psi = \frac{\Phi_{totale} - \sum_{i=1}^n \Phi_{piano,i}}{\Delta T \times L} \quad (10.13)$$

dove:

Ψ è trasmittanza termica lineica del ponte termico, [W/mK];

Φ_{totale} è il flusso termico (dispersione) calcolato rispetto al nodo costruttivo nella sua interezza, [W];

$\Phi_{piano,i}$ è il flusso termico (dispersione) della *i*-esima superficie piana costituente il nodo costruttivo, [W];

ΔT è la differenza di temperatura tra ambiente interno ed ambiente esterno, [K];

L è lo sviluppo del nodo costruttivo/lunghezza del ponte termico, [m].



Come detto nel capitolo precedente, la contabilizzazione del contributo dei ponti termici prevede che venga attribuito il valore di ponte termico lineico, ψ , alla lunghezza che gli compete all'interno della discrezione del modello di edificio/zona termica.

Nel caso in cui il ponte termico così calcolato si sviluppi tra due zone termiche differenti, è necessario attribuire metà del valore a una zona termica e metà all'altra ovvero considerare solamente metà lunghezza di sviluppo del ponte termico.

10.4.5 Calcolo dei ponti termici agli elementi finiti: esempio di calcolo

Si voglia calcolare il coefficiente di ponte termico lineico ψ in corrispondenza dell'interfaccia tra parete perimetrale e solaio di un nodo costruttivo definito.

Si riportano le stratigrafie dettagliate e i materiali utilizzati per il calcolo delle dispersioni del nodo costruttivo analizzato. Tali valori, in particolare le conducibilità e i valori di resistenza superficiale, hanno costituito gli input del programma di calcolo agli elementi finiti.

Tabella 10.13: Tabella dei materiali e delle conducibilità

Parete perimetrale					
Strati	s [m]	λ [W/(mK)]	R_i [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	R_a [m ² K/W]
h_i	-	-	-	-	0,130
1. intonaco in malta e gesso	0,010	0,700	0,010	-	-
2. laterizio forato spessore 12 cm	0,120	-	-	0,410	-
3. isolamento in lana di roccia	0,080	0,035	2,290	-	-
4. intercapedine d'aria	0,030	-	-	-	0,160
5. laterizio forato spessore 12 cm	0,120	-	-	0,410	-
6. intonaco in malta e gesso	0,010	0,900	0,010	-	-
h_e	-	-	-	-	0,040
trasmissione termica		U	W/(m²K)	0,290	

Solaio					
Strati	s [m]	λ [W/(mK)]	R_i [m ² K/W]	R_n [m ² K/W]	R_a [m ² K/W]
h_i	-	-	-	-	0,130
1. rivestimento in piastrelle	0,020	1,000	0,020	-	-
2. massetto alleggerito	0,080	0,500	0,160	-	-
3. solaio in laterocemento	0,250	-	-	0,350	-
h_e	-	-	-	-	0,040
trasmissione termica		U	W/(m²K)	1,370	



Di seguito si riportano i risultati derivanti dalla simulazione del nodo tramite un programma agli elementi finiti.

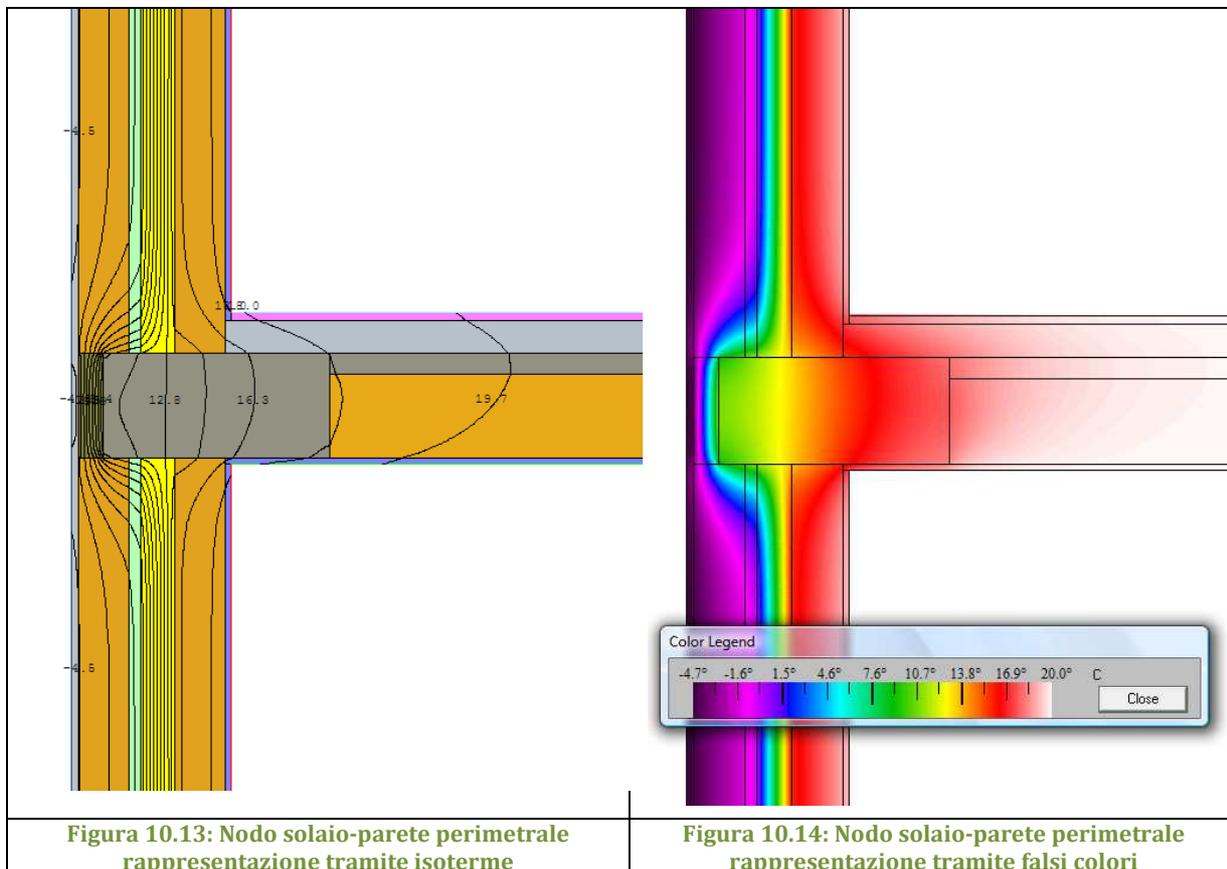


Figura 10.13: Nodo solai-parete perimetrale rappresentazione tramite isoterme

Figura 10.14: Nodo solai-parete perimetrale rappresentazione tramite falsi colori

Risultati di calcolo	
Φ_{totale}	26 [W]
$\Phi_{\text{piano stazionario,i}}$	19 [W]
ΔT	25 [K]
L	2,65 [m]
Ψ	0,281 [W/(mK)]



10.5 Capacità termica

Il fabbisogno energetico dell'edificio è valutato come la differenza tra le dispersioni dell'involucro edilizio per trasmissione e ventilazione e gli apporti gratuiti dovuti alla radiazione solare ed al contributo energetico di persone ed apparecchiature elettriche localizzate all'interno dell'edificio.

Il contributo degli apporti gratuiti alla riduzione del fabbisogno risulta essere intimamente legato al fattore di utilizzazione, ovvero alla capacità dell'edificio di cedere o assorbire calore dall'ambiente che delimita.

Un edificio massivo e con media/elevata inerzia termica presenta fattori di utilizzazione prossimi all'unità, mentre edifici leggeri e con ridotta inerzia termica possono presentare elevate percentuali di utilizzazione degli apporti gratuiti solo nel caso in cui vi siano bassi rapporti fra guadagni e dispersioni.

Il fattore di utilizzazione dipende direttamente dal rapporto tra gli apporti energetici e le dispersioni e dal parametro costante di tempo, τ [h], che a sua volta dipende dalla capacità termica dell'edificio, secondo la relazione:

$$\tau = \frac{C_m / 3600}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}} \quad (10.14)$$

dove:

τ è la costante di tempo, [h];

C_m è la capacità termica interna dell'edificio (o della zona considerata), [J/K];

$H_{tr,adj}$ è il coefficiente di dispersione per trasmissione, [W/K];

$H_{ve,adj}$ è il coefficiente di dispersione per ventilazione, [W/K].

Secondo la UNI EN ISO 7345 la capacità termica è definita come il rapporto tra la variazione infinitesima di quantità di calore o energia termica (dQ) a seconda della variazione infinitesima di temperatura (dT):

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (10.15)$$

Conseguentemente a quanto detto la capacità termica di un corpo esprime l'attitudine di questo ad immagazzinare energia termica. Con il termine capacità termica totale dell'edificio, si identifica la somma delle capacità termiche efficaci dei componenti edilizi che si trovano a contatto con l'aria delle differenti zone termiche dell'edificio.

Si ha quindi che:



$$C_m = \frac{\sum_{j=1}^n (C'A)_j}{1000} \quad (10.16)$$

dove:

- C_m è la capacità termica interna dell'edificio (o della zona considerata), [kJ/K];
- n è il numero delle superfici dei componenti edilizi presenti (pareti esterne, divisori interni e solai inferiori e superiori);
- C' è la capacità termica areica del singolo componente edilizio, [J/(m²K)];
- A è l'area del componente edilizio, [m²].

È possibile determinare il valore della capacità termica areica del componente edilizio tramite l'ausilio della UNI EN ISO 13786. La procedura di calcolo prevede l'utilizzo delle funzioni di trasferimento e della loro risoluzione tramite calcolo matriciale.

In alternativa è possibile sfruttare il calcolo semplificato riportato all'interno dell'Appendice A della suddetta norma, procedimento ripreso e integrato all'interno dell'Appendice D del d.d.g. n. 5796 e in cui la generica capacità termica areica del singolo componente edilizio (considerato come parete multistrato) è espresso dalla relazione:

$$C'_j = m_j \cdot c_j \quad (10.17)$$

dove:

- m è la massa termica areica del componente, [kg/m²];
- c è la capacità termica massica del materiale costituente il componente, [J/kgK].

Questo metodo semplificato può sovrastimare la capacità termica di materiali come legno e calcestruzzi alleggeriti, oltre a presentare una certa variabilità rispetto a quello calcolato con il metodo puntuale.

Secondo quanto riportato all'interno dell'Appendice D del d.d.g. n. 5796 è possibile applicare il metodo suddetto a tre tipologie di chiusura:

- pareti esterne non isolate;
- pareti esterne isolate;
- solai e pareti interne.



A seconda della tipologia considerata è necessario calcolare la capacità termica dello spessore effettivo della parete che contribuisce alla capacità termica totale dell'edificio. Andranno, quindi, considerate le capacità termiche dinamiche solamente degli strati inseriti all'interno di questo spessore.

Per ognuna delle casistiche è previsto un calcolo strettamente dipendente dalle caratteristiche costruttive della chiusura. Lo spessore efficace della chiusura potrà variare a seconda della capacità termica massica dei componenti, del loro spessore e della presenza o meno di isolante. Relativamente a questo ultimo punto si ricorda come in caso di parete isolata, la porzione di chiusura effettivamente partecipante al valore di capacità termica dell'edificio è compresa tra la superficie interna e il primo strato di isolante procedendo verso l'esterno.

Si rimanda ai paragrafi D.1.1.1, D.1.1.2 e D.1.2.3 del d.d.g. n. 5796 per la definizione della metodologia di calcolo per tutte le possibili casistiche.

Successivamente è possibile calcolare il valore di capacità termica per unità di superficie dell'edificio tramite la seguente relazione.

$$C_m = \frac{\sum_{j=1}^n (A \cdot C')_j}{\sum_{j=1}^n (A)_j} \quad (10.18)$$

È, quindi, possibile calcolare il valore della capacità termica, oppure riferirsi ai valori medi per tipologia edilizia riportati in UNI/TS 11300-1 e riportati nel d.d.g. n. 5796, così come di seguito riportato in Tabella 10.14.


Tabella 10.14: Capacità termica per unità di superficie dell'involucro, C_m (Fonte: UNI TS 11300-1:2008)

Caratteristiche costruttive dei componenti edilizi				Numero di piani		
intonaci	Isolamento	Pareti esterne	Pavimenti	1	2	≥3
gesso	interno	qualsiasi	tessile	75	75	85
	interno	qualsiasi	legno	85	95	105
	interno	qualsiasi	piastrelle	95	105	115
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	95	95	95
	assente/esterno	medie/blocchi	tessile	105	95	95
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	115	115	115
	assente/esterno	medie/blocchi	legno	115	125	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	115	125	135
	assente/esterno	medie/blocchi	piastrelle	125	135	135
malta	interno	qualsiasi	tessile	105	105	105
	interno	qualsiasi	legno	115	125	135
	interno	qualsiasi	piastrelle	125	135	135
	assente/esterno	leggere/blocchi	tessile	125	125	115
	assente/esterno	medie	tessile	135	135	125
	assente/esterno	pesanti	tessile	145	135	125
	assente/esterno	leggere/blocchi	legno	145	145	145
	assente/esterno	medie	legno	155	155	155
	assente/esterno	pesanti	legno	165	165	165
	assente/esterno	leggere/blocchi	piastrelle	145	155	155
	assente/esterno	medie	piastrelle	155	165	165
assente/esterno	pesanti	piastrelle	165	165	165	

È possibile ottenere un ulteriore riferimento per il calcolo della capacità termica dell'edificio a seconda della tipologia costruttiva organizzata in macroclassi. I valori contenuti all'interno della Tabella 12 della UNI EN ISO 13790:2008 (riportata in Tabella 10.15) presentano il valore di capacità termica areica a seconda della massa delle pareti perimetrali. Le categorie vanno infatti da molto leggero (costruzione a secco) a molto pesante (muratura piena o in calcestruzzo armato). Per ottenere la capacità termica totale dell'edificio è sufficiente moltiplicare il valore ottenuto dalla tabella per l'area totale di pavimento. Tale metodologia viene presentata al certificatore come ulteriore approfondimento e per stimolare l'analisi critica dei dati in suo possesso. I valori proposti dalla UNI EN ISO 13790:2008 non sono implementati all'interno della procedura del d.d.g. n. 5796.

Tabella 10.15: Valori di default per i parametri dinamici (Fonte: UNI EN ISO 13790:2008)

Classe	Metodo mensile e stagionale	Metodo orario	
	C_m [J/K]	A_m m^2	C_m [J/K]
Molto leggera	$80000 \times A_f$	$2,5 \times A_f$	$80000 \times A_f$
Leggera	$110000 \times A_f$	$2,5 \times A_f$	$110000 \times A_f$
Media	$165000 \times A_f$	$2,5 \times A_f$	$165000 \times A_f$
Pesante	$260000 \times A_f$	$3,0 \times A_f$	$260000 \times A_f$
Molto pesante	$370000 \times A_f$	$3,5 \times A_f$	$370000 \times A_f$



Bibliografia

UNI EN ISO 6946:2008	Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo
UNI 10351:1994	Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore
UNI EN ISO 10456:2008	Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche. Valori tabulati di progetto e procedimenti per la determinazione dei valori termici dichiarati e di progetto
UNI 10355:1994	Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.
UNI/TS 11300-1:2008	Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale
UNI EN ISO 10077-1:2007	Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità
UNI EN ISO 10077-2:2004	Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo numerico per i telai
UNI EN ISO 13790:2008	Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento
UNI EN ISO 14683:2008	Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento
UNI EN ISO 10211:2008	Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati
UNI EN ISO 13370:2008	Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo