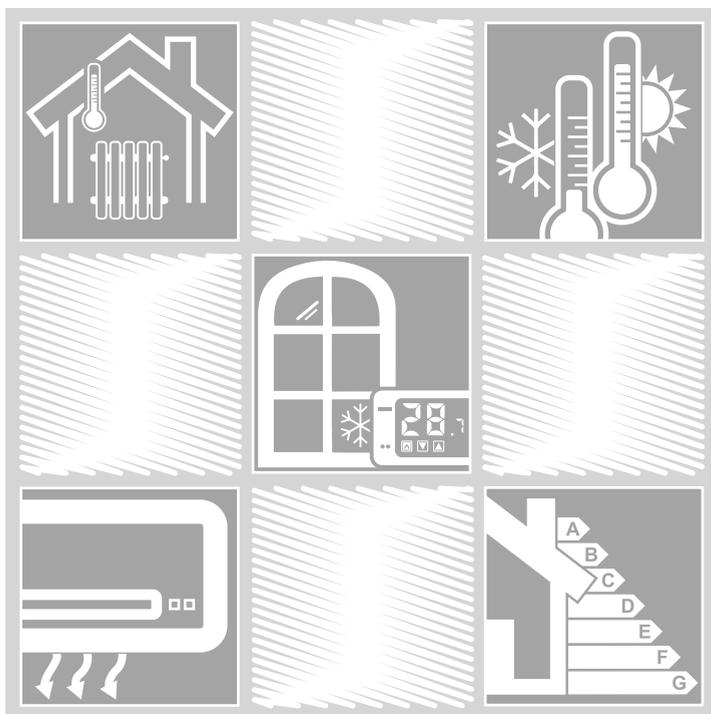


Marco Berti

PONTI TERMICI IN EDILIZIA

TIPOLOGIE, MISURA, CALCOLO E CORREZIONE



Marco Berti

PONTI TERMICI IN EDILIZIA

ISBN 13 978-88-8207-785-3

EAN 9 788882 077853

Manuali, 184

Prima edizione, settembre 2015

Berti, Marco <1952->

Ponti termici in edilizia / Marco Berti. – Palermo : Grafill, 2015.

(Manuali ; 184)

ISBN 978-88-8207-785-3

1. Strutture edilizie – Conducibilità termica.

624.171 CDD-22

SBN Pal0282986

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è disponibile anche in versione eBook (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader.**

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal.

Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di settembre 2015

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*Questo libro è dedicato a Gabriele:
per l'impegno che ha profuso nel lavoro e negli studi,
e per il suo futuro.*

M.B.

INDICE

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

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

INTRODUZIONE

1.

Questo volume, che si presenta come una raccolta sintetica di informazioni relative ai nodi (o giunti tecnologici) denominati ponti termici, è di fatto un piccolo compendio sulla materia, un vademecum, un quadernetto (concreto) che si propone di dare – quantomeno – i punti essenziali per il calcolo, la verifica e la correzione dei medesimi.

2.

Un ponte termico rappresenta una parte (o zona) d’involucro dove la **resistenza termica** tende a valori prossimi allo zero – ovvero dove il calore si perde in abbondanza verso l’esterno – e dove la **temperatura superficiale interna dell’involucro è talvolta minore della temperatura di formazione della rugiada**.

Un ponte termico – inteso come struttura indesiderata – genera condizioni di **instabilità funzionale della parete**, infatti, oltre all’incremento delle perdite d’energia per trasmissione, determina la formazione di rugiada (o condensa) la quale:

- 1) imbibisce progressivamente la parete;
- 2) genera la formazione di muffe, distacchi d’intonaco, disgregazione di elementi strutturali ecc.;
- 3) riduce ulteriormente la resistenza termica ed avvia un successivo ciclo di peggioramento delle anomalie ora enumerate.

Un ponte termico – che è funzione dei materiali usati e delle geometrie d’involucro – è pertanto una “patologia” che, pur essendo talvolta inevitabile, deve essere sempre e comunque corretta.

Nel testo daremo delle indicazioni di massima – ovvero degli schemi di principio – per il controllo e la correzione dei ponti termici mediante l’impiego di opportuni strati isolanti.

3.

Il volume si compone di cinque capitoli.

Nel **primo** capitolo vengono definite le variabili che rappresentano e controllano il trasporto di calore attraverso l’involucro edilizio: resistenza termica, conduttanza, conduttività, trasmittanza termica unitaria ecc. – nonché vengono analizzati i coefficienti di accoppiamento termico o di scambio termico per trasmissione.

Nel **secondo** capitolo viene data una classificazione e presentazione dei materiali isolanti, con lo scopo di addivenire ad una conoscenza dei prodotti usati nell’isolamento termico in generale e nella correzione dei ponti termici in particolare. Particolare attenzione viene data agli isolanti cosiddetti **sostenibili**: componenti di origine vegetale e animale. Nel capitolo si danno anche dei cenni sui sistemi di isolamento delle chiusure esterne e sulle modalità di misura

dei principali parametri termocinetici dell'involucro edilizio: resistenza e trasmittanza termica mediante il **termoflussimetro**; flusso di calore verso l'esterno mediante la **termocamera a raggi infrarossi**.

Nel **terzo** capitolo viene introdotto in modo analitico il concetto di ponte termico: nodo lineare, nodo puntuale, isoterme, trasmittanza termica lineica ecc.. Inoltre vengono proposte le modalità di **correzione** dei ponti medesimi con la presentazione di alcuni schemi fondamentali di messa in opera degli inserti isolanti e con l'indicazione dei modelli semplificati di calcolo.

Nel **quarto** capitolo viene ampiamente discussa e presentata la trasmittanza termica lineica (o lineare), che è la variabile "centrale" degli abachi o atlanti dei ponti termici lineari. In particolare vengono analizzate le tipologie fondamentali e viene proposto un atlante semplificato dei nodi termici lineari.

Nel **quinto** capitolo viene proposto un esempio tratto dalla storia dell'architettura contemporanea: il modulo abitativo in *Weissenhof* (Stoccarda) progettato nel 1927 dall'Architetto Walter Gropius. L'esempio consiste nella selezione dei ponti termici lineari e nel loro calcolo attraverso l'uso dell'abaco semplificato introdotto nel precedente capitolo 4. Di fatto per l'edificio – dopo alcune ipotesi sulle tecnologie d'involucro – vengono calcolate le variabili fondamentali:

- a) accoppiamento termico dell'involucro al **netto** dei nodi termici;
- b) contributo alla perdita di calore dei ponti termici lineari;
- c) accoppiamento termico dell'involucro al **lordo** dei nodi termici.

In ogni caso l'obiettivo dei capitoli dell'intero volume rimane la definizione, l'analisi e il calcolo – mediante abachi, atlanti ecc. – della variabile denominata trasmittanza termica lineare (o lineica) e la valutazione dell'incidenza dei ponti termici sulle perdite d'involucro.

Mi si consenta questa ulteriore digressione: il *Vademecum* (o *Compendio*) è stato concepito per tecnici di "cantiere", ovvero per progettisti "svelti" e orientati al mercato, i quali, nel risolvere i problemi inerenti il benessere interno e le perdite di energia, devono coniugare il tempo d'intervento (dal progetto alla messa in opera) con la qualità della prestazione. Per far ciò i consigli del testo sono proposti in modo pratico, facilmente comprensibile e senza tanti richiami a modelli di matematica avanzata, a calcoli numerici che, quando necessari, dovranno esser fatti con opportuni strumenti di elaborazione dei dati. In altre parole – come ho detto in un precedente volume, il *Breviario di energetica edile* – pur nella completezza della trattazione, oppure, pur nella incompletezza, ho sempre cercato di presentare gli argomenti secondo un rigore temperato con l'obiettivo, ossia secondo il modello di chi, in cantiere, debba scegliere in tutta fretta lo spessore di un certo materiale isolante.

Il testo, per quanto detto, è quindi corredato da **numerosi esempi numerici**, i quali avranno come principale scopo quello di far comprendere al meglio la parte pratica e teorica dei ponti termici.

Il volume, infine, si propone con un approccio di tipo "sperimentale". In altre parole, è un piccolo compendio da guardare in modo critico, dove i concetti esposti sono ordinati come gli attrezzi di una piccola e provvisoria officina da cantiere: pronti ad esser "ribaltati", e quindi, fuor di metafora, pronti ad esser rivisti e corretti, sempre alla ricerca di una migliore soluzione. Con lo scopo finale di migliorare la nostra conoscenza, e, non ultimo, il cammino di questo piccolo *Compendio sui ponti termici*.

Pertanto, l'autore si mette a completa disposizione di ognuno di voi, di ogni lettore, per commenti, consigli, critiche e note, che diano luogo ad una "costruzione" più stabile e duratura.

INVOLUCRO EDILIZIO E TRASMISSIONE DEL CALORE

1.1. Premessa

1.

Per involucro – in senso generale – si intende il rivestimento di un volume, per lo più con funzioni protettive.

In edilizia l'involucro è la struttura di confine, di separazione tra l'ambiente interno e il mondo esterno.

Dal punto di vista energetico l'involucro svolge un ruolo di termoregolazione. L'involucro è un sistema complesso, ed è un sistema aperto: scambia continuamente massa ed energia con il mondo esterno (o ambiente). Dove per massa si intende l'aria (umida) che passa dall'interno all'esterno, e per energia il calore circolante nella medesima direzione.

Il calore viene trasferito all'esterno mediante i processi di ventilazione e trasmissione attraverso l'involucro.

La perdita di calore per ventilazione è collegata ai ricambi d'aria: volontari (attraverso la manovra dei serramenti) e involontari attraverso la permeabilità dei materiali che costituiscono i componenti d'involucro. In sintesi – definito l'involucro come l'insieme dei componenti d'interazione tra l'interno e l'esterno (strutture opache e strutture trasparenti) – abbiamo le seguenti modalità di trasporto/perdita del calore:

- **Ventilazione:** l'aria calda passa dall'interno (sorgente di calore) all'esterno (pozzo di calore), trasferendo parte dell'energia termica all'ambiente. La ventilazione volontaria (apertura/chiusura dei serramenti) dipende dal comportamento utente. La ventilazione “involontaria” dipende dalla permeabilità dei materiali d'involucro ed è “comandata” dalla differenza della pressione tra l'interno e l'esterno.
- **Trasmissione:** il calore passa dall'ambiente interno all'ambiente esterno defluendo attraverso le strutture d'involucro. La trasmissione dipende dalla **resistenza termica** dei materiali attraversati ed è “comandata” dalla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

Di regola – nel patrimonio edilizio esistente e per involucri di classe energetica medio/bassa – la perdita per ventilazione è di circa il 20÷30% della perdita complessiva, mentre la perdita per trasmissione vale circa il 70÷80%.

Le “patologie” d'involucro (i cosiddetti ponti termici) **incrementano le sole perdite per trasmissione.**

2.

Per chiarire ulteriormente notiamo quanto segue:

- l'involucro è la superficie di separazione tra l'interno e l'esterno, ed è caratterizzato da una resistenza termica;

- un ponte termico – di cui daremo diverse e più rigorose definizioni nel seguito – è una zona d’involucro dove **la resistenza termica (altrove uniforme) diminuisce in modo significativo**, ovvero dove aumentano (e si concentrano) le perdite di calore per trasmissione;
- le perdite di calore per trasmissione (attraverso l’involucro) sono “comandate” dal salto termico: differenza di temperatura tra l’interno e l’esterno. Il flusso di calore ha la direzione dalla temperatura maggiore (quella interna) alla temperatura minore (quella esterna);
- la variabile di controllo del flusso di calore è la resistenza termica d’involucro. L’obiettivo di una progettazione a regola d’arte è la ricerca di una resistenza termica tendenzialmente costante con lo scopo dell’eliminazione (correzione) dei punti critici (i ponti termici).

1.2. Involucro e grandezze di controllo

1.

Definizione:

- **Involucro edilizio (o sistema d’involucro)**: è un insieme di componenti che svolgono prestazioni diverse finalizzate al fondamentale obiettivo della protezione e della stabilità della forma. Dal punto di vista energetico, nello specifico studio dei ponti termici e della trasmissione del calore, l’obiettivo fondamentale è la riduzione della complessiva perdita di energia.

L’involucro è costituito da **elementi opachi** (chiusure verticali, orizzontali, ecc.) ed **elementi trasparenti** (finestre, luci, ecc.).

La “patologia” dei ponti termici – quella che deve essere corretta secondo la progettazione e l’intervento a regola d’arte – riguarda esclusivamente gli elementi opachi dell’involucro edilizio, nonché il telaio del sistema serramento/infisso, dove per telaio si intende la parte in contatto con la muratura del vano porta o finestra, ovvero in contatto con il controtelaio “annegato” nella muratura medesima.

Nel funzionamento reale esistono anche i ponti termici del sistema serramento/infisso, i quali sono corretti dal costruttore (il serramentista) del sistema medesimo.

2.

Le grandezze di controllo della prestazione energetica dell’involucro edilizio sono:

- **Calore disperso (Q)**: è la quantità di calore/energia termica che passa attraverso l’involucro. Si misura in (MJ).
- **Flusso di calore (Φ)**: è la quantità di calore/energia termica che passa **nell’unità di tempo** attraverso l’involucro. Si misura in (W).
- **Resistenza termica (R)**: è la difficoltà che un mezzo (solido, liquido o gassoso) oppone al passaggio del flusso di calore. Maggiore è la resistenza termica minore è il flusso di calore e viceversa. La resistenza termica non è una grandezza specifica (ovvero definita per l’unità di volume di un materiale omogeneo) ma è una grandezza aspecifica, ovvero definita per un corpo (o mezzo) comunque costituito (assemblato) e disomogeneo. In edilizia, ad esempio, la resistenza termica è definita per l’involucro, che è disomogeneo e costituito da strati sovrapposti di materiali diversi. Si misura in (m^2K / W).
- **Conduttanza termica (C)**: è l’inverso della resistenza termica.

$$C = \frac{1}{R}$$

Si misura in (W / m^2K).

- **Conduttività (o conducibilità) termica** (λ): è la facilità che un mezzo (solido, liquido o gassoso) offre al passaggio del flusso di calore. Maggiore è la conduttività termica maggiore è il flusso di calore e viceversa. La conduttività termica è una grandezza specifica, ovvero definita per l'unità di volume di un materiale omogeneo. In edilizia, ad esempio, se la stratificazione (strati sovrapposti di materiali diversi) è rappresentata dalla resistenza termica, il singolo strato (un solo materiale omogeneo) è rappresentato dalla conduttività termica. Si misura in ($m K / W$).

Tra conduttività e conduttanza esiste la seguente differenza:

- la **conduttività termica** (ad esempio per l'unità di volume di un mezzo omogeneo) rappresenta il flusso di calore (W) che attraversa l'unità di superficie ($1 m^2$) del mezzo di spessore unitario ($1 m$) quando è sottoposto al salto termico unitario ($1 K = 1 ^\circ C$);
- la **conduttanza termica** (ad esempio per una stratificazione di **spessore qualunque**) rappresenta il flusso di calore (W) che attraversa l'unità di superficie ($1 m^2$) della stratificazione – di spessore qualsiasi – quando è sottoposta al salto termico unitario ($1 K = 1 ^\circ C$).

1.3. Il trasporto del calore (o energia termica)

1.

Il trasporto di energia termica (calore) si realizza con una delle seguenti modalità, o con una combinazione delle medesime:

- **Conduzione**: avviene all'interno di un corpo solido per la presenza di un gradiente di temperatura (ovvero di un salto termico). Il calore scorre dalle zone a temperatura maggiore a quelle a temperatura minore. Dal punto di vista microscopico la conduzione si realizza attraverso il trasferimento di energia cinetica – mediante urti intermolecolari – da una particella all'altra del solido. Per i mezzi solidi è la sola modalità di trasferimento. Per i mezzi fluidi (stato liquido e gassoso) si realizza quando il fluido è privo di correnti, altrimenti si accompagna alla convezione e all'irraggiamento.
- **Convezione**: avviene per mescolamento di due masse fluide a temperatura diversa. La convezione si realizza all'interno dei fluidi (liquidi e gas). Il movimento delle particelle del fluido è determinato dalla differenza di densità che è prodotta dalla differenza di temperatura (convezione naturale), ovvero con mezzi meccanici (convezione forzata).
- **Irraggiamento**: ogni corpo solido, liquido o gassoso, emette – in ogni direzione dello spazio – energia sotto forma di onde elettromagnetiche che incidono sugli altri corpi materiali e vengono in parte riflesse, in parte trasmesse oltre il corpo e nella rimanente parte assorbite e trasformate in calore. Due corpi distanti – a differente temperatura, anche nel vuoto, – si scambiano mutuamente energia radiante: il corpo “caldo” emette più energia di quanta ne assorbe, viceversa avviene per il corpo “freddo”. Il corpo “caldo” funziona da radiatore, il corpo “freddo” da assorbitore.

2.

La conduzione termica nei mezzi solidi è regolata dalla seguente relazione di Fourier:

$$\Phi = -\lambda A \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad (1.1)$$

Dove:

- Φ flusso di calore in (W);
- λ conduttività termica in (W / mK);
- A superficie attraversata normalmente dal flusso di calore in (m^2);
- $\Delta\theta$ salto termico in (K) o in ($^{\circ}C$);
- Δx spessore del mezzo attraversato in (m).

Nella 1.1 il segno meno (–) indica che all’aumentare di x (spazio/spessore percorso dal calore) diminuisce θ ; in altre parole, il segno meno indica che il calore si propaga spontaneamente nel senso delle temperature decrescenti.

La conduttività termica λ varia al variare del materiale. Dipende debolmente dalla temperatura d’esercizio e – in modo significativo – dalle condizioni di umidità del materiale medesimo.

Infatti:

- la conduttività aumenta all’aumentare della temperatura;
- la conduttività è crescente al crescere dell’umidità contenuta nel materiale.

Annotazione

Il fatto che la **conduttività aumenti con l’umidità del materiale** è una criticità nel funzionamento dei ponti termici. Il fenomeno è infatti instabile e rende il ponte termico sempre più critico, ovvero:

- 1) il ponte è una zona fredda dove (con buona probabilità) si accumula condensa;
- 2) il muro umido aumenta la propria conduttività termica;
- 3) il ponte diventa sempre più trasmissivo, ossia più critico;
- 4) il sistema tende a “collassare”, ovvero si crea umidità permanente, muffa, sgretolamento e – in casi estremi – attacco corrosivo alle strutture con funzione portante.

Materiali	Densità $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Conduttività $\left(\frac{W}{mK}\right)$
(a) <i>Metallici</i>		
Mercurio	13.590	7,6
Piombo	11.340	35
Rame	8.900	380
Acciaio	7.800	60
Stagno	7.400	64
Zinco	7.200	110
Alluminio	2.800	200
(b) <i>Da costruzione</i>		

[segue]

Materiali	Densità $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Conduttività $\left(\frac{W}{mK}\right)$
Intonaco in cemento	2.200	1,4
Intonaco in calce-cemento	1.800	1
Intonaco in calce	1.600	0,8
Intonaco di gesso (calce/gesso)	1.500	0,7
Intonaco plastico per cappotto	1.200	0,9
Malta termoisolante (< 800 kg/m ³)	800	0,28
Muratura in pietra naturale	2.600	2,3
Calcestruzzo armato	2.400	2,3
Calcestruzzo	1.800	1,6
Muratura in mattoni pieni	1.600	0,7
Muratura in mattoni forati	1.200	0,36
Calcestruzzo alleggerito con argilla espansa	1.100	0,45
Blocchi con argilla espansa	800	0,18
Blocchi cellulari autoclavati	800	0,24
Blocchi cellulari autoclavati	600	0,16
Blocchi cellulari autoclavati	500	0,14
Blocchi cellulari autoclavati	400	0,11
Vetro	2.500	0,8
Guaine di polietilene, bitume ecc.	1.700	0,26
Vetro acrilico	1.180	0,19
Acqua	1.000	0,6
Legno di latifoglie	800	0,18
Legno di conifere	500	0,13
<i>(c) Isolanti</i>		
Argilla espansa	350	0,09
Paglia	340	0,09
Pannelli porosi in fibra di legno	190	0,045
Pannelli extraporosi in fibra di legno	130	0,04
Trucioli di legno	100	0,05
Vermiculite espansa	90	0,07
Sughero espanso	90	0,04
Fiocchi di cellulosa	50	0,04
Cotone	40	0,04
Polistirene estruso in lastre	35	0,035
Polietilene espanso in lastre	30	0,04
Poliuretano	30	0,03
Lana minerale	30	0,04
Materassino in lino	30	0,04
Canapa	25	0,045

[segue]

Materiali	Densità $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Conduttività $\left(\frac{W}{mK}\right)$
Lana di pecora	25	0,04
Lana di vetro	20	0,04
Polistirene espanso in lastre	20	0,04
Aria	1,29	0,023

Tabella 1.1. *Conduttività termica dei materiali*

3.

Una digressione sui materiali isolanti

Dal punto di vista strutturale i materiali isolanti sono **fibrosi (granulari) o cellulari**. Ovvero sono costituiti da fibre, granuli o piccole cavità (le cellule) che contengono aria o gas. Un mezzo isolante – guardando in tabella 1.1 – è quindi caratterizzato dall’aver una **bassa densità**, ed è costituito da **un miscuglio di molta aria e di poche parti solide**, le quali sono finalizzate a dar forma e stabilità all’isolante stesso. Il motivo della grande quantità d’aria – all’interno dei materiali isolanti – si individua sempre in tabella 1.1, dove l’aria è il mezzo a minore conduttività termica:

$$\lambda_a = 0,023 \frac{W}{mK}$$

Tutto questo non basta:

- se le cellule (o cavità) dell’isolante sono troppo grandi, si attiva un moto convettivo (all’interno delle cavità medesime) che aumenta il trasporto del calore ed anche la conduttività complessiva del corpo isolante.

In conclusione:

- l’aumento della quantità d’aria deve esser fatto con tante **piccole cavità**, con lo scopo di annullare la convezione e di trasportare il calore per **solamente conduzione**, che sarà ulteriormente ridotta per la riduzione al minimo della parte solida.

1.4. Le resistenze (e conduttanze) termiche elementari

Abbiamo definito la resistenza termica come l’opposizione al passaggio del calore: maggiore è la resistenza, minori sono le perdite di calore verso l’esterno.

Il metodo di calcolo della resistenza termica è definito dalla norma UNI EN ISO 6946. In questo testo apporteremo delle semplificazioni con lo scopo di essere “snelli” e comunque rigorosi e coerenti alla pratica della progettazione, della diagnosi e della verifica. Per eventuali ulteriori dettagli si rimanda alla norma medesima.

La resistenza termica è una quantità che definisce il comportamento termocinetico dell’involucro: dato un salto termico, all’aumentare della resistenza termica diminuisce il flusso di calore passante.

L’involucro è una struttura complessa costituita da una sequenza di strati di materiali diversi. Ne consegue:

- 1) ogni singolo strato avrà una propria resistenza;

2) la resistenza dell'intera struttura sarà la somma delle resistenze dei singoli strati.

Pertanto, dal punto di vista del calcolo della resistenza termica di un componente d'involucro – costituito da diversi strati – abbiamo:

- determinazione della resistenza termica per ognuno dei singoli strati omogenei (o approssimativamente omogenei) che costituiscono il componente;
- determinazione della resistenza termica totale del componente come somma delle resistenze dei singoli strati, ivi incluso l'effetto (quando significativo) delle resistenze termiche superficiali (ossia delle resistenze di contatto tra la superficie del componente e l'aria interna ed esterna).

Resistenza termica di uno strato termicamente omogeneo

Definizione:

- uno strato di materiale è termicamente omogeneo quando la sua conduttività termica (λ) è costante in ogni punto dello strato medesimo.

La resistenza termica di uno strato termicamente omogeneo è data dalla seguente formula:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1.2)$$

Dove:

- R resistenza termica in (m^2K / W);
- d spessore dello strato in (m);
- λ conduttività termica in (W / mK).

Il flusso termico si considera normale alla struttura mono-strato. Nel caso di struttura verticale (ad esempio una parete perimetrale) il flusso è orizzontale. Il trasporto di calore nello strato è per conduzione (mezzo solido).

Resistenza termica di n strati termicamente omogenei

Definizione:

- la resistenza termica complessiva (o resistenza somma) di n strati in serie (R_{Σ}) è data dalla somma delle singole resistenze termiche.

Per n strati abbiamo la seguente formula:

$$R_{\Sigma} = \sum R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (1.3)$$

Dove:

- R_i resistenza termica del singolo strato.

Conduttanza termica di n strati termicamente omogenei

Definizione:

- la conduttanza termica di un **singolo strato** (C_i) è l'inverso della resistenza dello strato medesimo (R_i):

$$C_i = \frac{1}{R_i}$$

Definizione:

- la conduttanza termica di ***n* strati in serie** (C_Σ) è l'inverso della resistenza somma degli *n* strati. Per gli *n* strati abbiamo la seguente formula:

$$C_\Sigma = \frac{1}{R_\Sigma} \quad (1.4)$$

Resistenza termica superficiale

1.

Definizione:

- la resistenza termica superficiale è una grandezza che si oppone al passaggio di calore tra un solido e un fluido e viceversa.

In edilizia – ad esempio nella parete perimetrale – la resistenza superficiale al passaggio dell'energia termica riguarda due superfici distinte:

- 1) il passaggio di calore tra l'aria dell'ambiente confinato ed il paramento interno del muro perimetrale;
- 2) il passaggio di calore tra il paramento esterno del muro perimetrale e l'aria esterna.

Nella situazione 1) parleremo di **resistenza termica superficiale interna** (R_{si}). Nella situazione 2) parleremo di **resistenza termica superficiale esterna** (R_{se}).

Nel caso della resistenza superficiale – stante il contatto tra un mezzo fluido con un mezzo solido e viceversa – il trasporto di calore è per **convezione e irraggiamento**.

La resistenza termica superficiale è data dalla seguente tabella 1.2 (cfr. UNI EN ISO 6946):

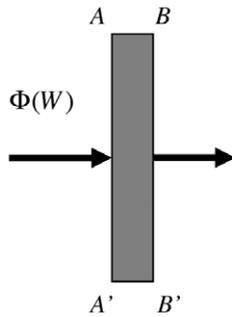
	Direzione del flusso termico		
	<i>Ascendente</i>	<i>Orizzontale</i>	<i>Discendente</i>
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Tabella 1.2. *Resistenze termiche superficiali (m^2K / W)*

2.

I valori di tabella rappresentano le resistenze superficiali per diverse condizioni di flusso termico. In concreto abbiamo:

- flusso **orizzontale**: il calore “scorre” in un piano orizzontale normale al piano della struttura (cfr. fig. 1.1). Le resistenze sono quelle di figura (o tabella 1.2). Gli stessi valori si assumono per un flusso inclinato di $\pm 30^\circ$ rispetto al piano orizzontale;
- flusso **verticale ascendente**: il calore “scorre” in un piano verticale normale al piano della struttura (cfr. fig. 1.2). Le resistenze sono quelle di figura (o tabella 1.2). Gli stessi valori si assumono per un flusso inclinato di $\pm 30^\circ$ rispetto al piano verticale;
- flusso **verticale discendente**: il calore “scorre” in un piano verticale normale al piano della struttura (cfr. fig. 1.3). Le resistenze sono quelle di figura (o tabella 1.2). Gli stessi valori si assumono per un flusso inclinato di $\pm 30^\circ$ rispetto al piano verticale.

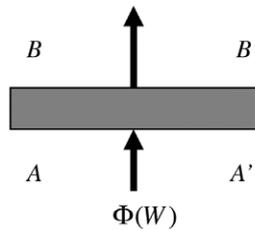


Muro perimetrale:
 (A, A'): paramento/superficie interna
 (B, B'): paramento/superficie esterna
 Φ : flusso di calore

$$R_{si} = 0,13$$

$$R_{se} = 0,04$$

Figura 1.1. Resistenze termiche superficiali a flusso orizzontale

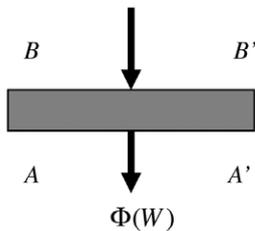


Struttura orizzontale di copertura:
 (A, A'): paramento/superficie interna
 (B, B'): paramento/superficie esterna
 Φ : flusso di calore

$$R_{si} = 0,10$$

$$R_{se} = 0,04$$

Figura 1.2. Resistenze termiche superficiali a flusso verticale ascendente



Struttura orizzontale:
 (A, A'): paramento/superficie interna
 (B, B'): paramento/superficie esterna
 Φ : flusso di calore

$$R_{si} = 0,17$$

$$R_{se} = 0,04$$

Figura 1.3. Resistenze termiche superficiali a flusso verticale discendente

3.

Considerazioni sulla resistenza termica superficiale

La resistenza termica superficiale (R_s) è funzione del trasporto per convezione e per irraggiamento. In formula abbiamo:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r}$$

Dove: