



MARCO BERTI

# L'ISOLAMENTO TERMICO IN ARCHITETTURA

## MANUALE TEORICO-PRATICO

CON UN METODO ORIGINALE PER LA VALUTAZIONE  
DELLA PRESTAZIONE TERMICA IN REGIME PERIODICO

(OVVERO COME ISOLARE ANCHE DAL CALDO ESTIVO)



**WEBAPP INCLUSA**  
CON AGGIORNAMENTO AUTOMATICO

**GRAFILL**

Marco Berti

## L'ISOLAMENTO TERMICO IN ARCHITETTURA

Ed. I (02-2022)

ISBN 13 978-88-277-0293-2

EAN 9 788827 7 02932

Collana **MANUALI** (272)



**Licenza d'uso da leggere attentamente  
prima di attivare la WebApp o il Software incluso**

Usa un QR Code Reader  
oppure collegati al link <https://grafill.it/licenza>

**Per assistenza tecnica sui prodotti Grafill** aprire un ticket su <https://www.supporto.grafill.it>

L'assistenza è gratuita per 365 giorni dall'acquisto ed è limitata all'installazione e all'avvio del prodotto, a condizione che la configurazione hardware dell'utente rispetti i requisiti richiesti.

© **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](mailto:grafill@grafill.it)

**CONTATTI  
IMMEDIATI**



**Pronto GRAFILL**  
Tel. 091 6823069



**Chiamami**  
[chiamami.grafill.it](http://chiamami.grafill.it)



**Whatsapp**  
[grafill.it/whatsapp](http://grafill.it/whatsapp)



**Messenger**  
[grafill.it/messenger](http://grafill.it/messenger)



**Telegram**  
[grafill.it/telegram](http://grafill.it/telegram)

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. - Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

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.

# SOMMARIO

<b>INTRODUZIONE</b> .....	p.	9
<i>Obiettivo e metodo</i> .....	"	9
<i>Argomenti trattati</i> .....	"	9
<i>Conclusione</i> .....	"	10
<b>1. CONCETTI DI BASE</b> .....	"	11
<b>1.1. Architettura passiva</b> .....	"	11
<b>1.1.1. Edilizia solare passiva</b> .....	"	11
<b>1.1.2. Edilizia passiva</b> .....	"	12
<b>1.1.3. Sistemi passivi</b> .....	"	13
<b>1.2. Frammenti di sostenibilità</b> .....	"	15
<b>1.2.1. Protocolli di valutazione</b> .....	"	16
<b>1.2.2. Il processo di combustione</b> .....	"	17
<b>1.3. La sostenibilità in numeri</b> .....	"	18
<b>1.3.1. Il riscaldamento globale</b> .....	"	19
<b>1.3.2. Impronta di carbonio</b> .....	"	20
<b>1.3.3. Energia assorbita (o incorporata)</b> .....	"	21
<b>1.3.4. Calcolo impronta di carbonio ed energia incorporata</b> .....	"	23
<b>1.3.5. Valutazione della sostenibilità di un cappotto termico</b> .....	"	25
<b>2. EDILIZIA A CARBONIO ZERO</b> .....	"	29
<b>2.1. Una casa a energia positiva</b> .....	"	29
<b>2.2. Il sistema involucro</b> .....	"	30
<b>2.2.1. Tecnologia SIPs</b> .....	"	30
<b>2.2.2. Tecnologia OSB</b> .....	"	31
<b>2.2.3. Tecnologia TSC</b> .....	"	31
<b>2.3. Il sistema impianti</b> .....	"	32
<b>2.3.1. Sistema solare fotovoltaico</b> .....	"	34

2.3.2.	Accumulatori di energia elettrica .....	p.	37
2.3.3.	Il sistema di ventilazione .....	"	39
2.3.4.	La pompa di calore e l'accumulo termico .....	"	40
2.4.	Schema generale .....	"	43
2.5.	Una digressione sugli edifici nZEB.....	"	44
2.6.	Appunti sulla sostenibilità .....	"	45
2.6.1.	Crediti di sostenibilità.....	"	46
2.6.2.	Sostenibilità dell'involucro .....	"	46
2.6.3.	Sostenibilità dei sistemi fotovoltaici .....	"	47
2.6.4.	Sostenibilità di sistema .....	"	48
<b>3.</b>	<b>BENESSERE TERMICO</b> .....	"	49
3.1.	Il benessere termico .....	"	49
3.1.1.	Temperature e <i>comfort</i> .....	"	50
3.1.2.	Il movimento dell'aria <i>indoor</i> .....	"	51
3.1.3.	Umidità relativa dell'aria <i>indoor</i> ed evaporazione .....	"	51
3.2.	Il bilancio termico di una persona .....	"	52
3.2.1.	Generare calore (il metabolismo) .....	"	52
3.2.2.	Dal calore al lavoro (o attività) .....	"	52
3.2.3.	La superficie di scambio termico .....	"	53
3.2.4.	Lo smaltimento del calore .....	"	54
3.3.	Irraggiamento termico .....	"	55
3.4.	Conduzione termica .....	"	57
3.5.	Convezione termica .....	"	59
3.5.1.	Convezione e irraggiamento.....	"	60
3.5.2.	Modalità combinate di scambio termico .....	"	61
3.6.	Evaporazione (e condensazione) .....	"	61
3.7.	Gli scambi termici del corpo umano.....	"	62
3.8.	Il valore energetico delle attività.....	"	64
3.9.	La resistenza termica dei vestiti .....	"	65
3.10.	La temperatura operante .....	"	67
3.11.	Le condizioni di <i>comfort</i> .....	"	69
3.11.1.	Modello della temperatura dell'aria.....	"	69
3.11.2.	Modello della temperatura operante .....	"	69
3.12.	Le curve <i>isocomfort</i> .....	"	70
3.12.1.	Esempio di utilizzazione delle curve <i>isocomfort</i> .....	"	71
3.13.	Statistica sulle sensazioni termiche .....	"	72
3.14.	Scambi termici di una persona in un ambiente <i>indoor</i> .....	"	73
3.14.1.	Caso A: temperature uguali .....	"	74
3.14.2.	Caso B: temperature diverse .....	"	75

<b>3.14.3.</b>	Disagio termico da irraggiamento .....	p.	76
<b>3.14.4.</b>	Risoluzione contro il disagio termico da irraggiamento.....	"	77
<b>4.</b>	<b>TRASPORTO DI CALORE</b> .....	"	78
<b>4.1.</b>	Conduttività, resistenza e conduttanza .....	"	78
<b>4.1.1.</b>	Conduttività termica.....	"	79
<b>4.1.2.</b>	Resistenza termica.....	"	81
<b>4.1.3.</b>	Conduttanza termica.....	"	83
<b>4.2.</b>	Resistenza termica superficiale (o adduttanza) .....	"	83
<b>4.2.1.</b>	Valori convenzionali della resistenza termica superficiale (o adduttanza) .....	"	83
<b>4.3.</b>	Resistenza termica delle intercapedini .....	"	85
<b>4.4.</b>	Resistenza termica di contatto .....	"	86
<b>4.5.</b>	Resistenza termica totale.....	"	86
<b>4.5.1.</b>	Resistenza termica totale dell'involucro opaco di una casa passiva .....	"	87
<b>4.5.2.</b>	Formule per il calcolo della resistenza termica dell'involucro trasparente .....	"	87
<b>4.6.</b>	Trasmittanza termica stazionaria .....	"	88
<b>4.7.</b>	Esempi pratici di calcolo della trasmittanza termica .....	"	90
<b>4.7.1.</b>	Chiusura perimetrale multistrato .....	"	90
<b>4.7.2.</b>	Vetrature dei serramenti.....	"	93
<b>4.8.</b>	Trasmittanza termica dei serramenti.....	"	97
<b>4.8.1.</b>	Calcolo della trasmittanza di un serramento .....	"	98
<b>4.9.</b>	Flusso termico nello spessore dell'involucro.....	"	99
<b>4.9.1.</b>	Esempio sulla struttura A: il flusso termico .....	"	100
<b>4.10.</b>	Temperatura nello spessore dell'involucro.....	"	101
<b>4.10.1.</b>	Esempio sulla struttura A: la distribuzione della temperatura.....	"	102
<b>5.</b>	<b>PONTI TERMICI</b> .....	"	103
<b>5.1.</b>	Isoterme e linee di flusso .....	"	105
<b>5.2.</b>	Le trasmittanze termiche .....	"	107
<b>5.3.</b>	Stratigrafie e ponti termici.....	"	108
<b>5.4.</b>	Effetto termico .....	"	109
<b>5.5.</b>	Tipologia e posizione dei nodi termici.....	"	109
<b>5.6.</b>	Aspetti quantitativi.....	"	110
<b>5.7.</b>	Atlante dei ponti termici .....	"	112
<b>5.7.1.</b>	Alcuni atlanti di riferimento .....	"	112
<b>5.8.</b>	Esempio di calcolo dei ponti termici .....	"	113

5.8.1.	Quote interne .....	p.	115
5.8.2.	Quote esterne .....	"	117
5.9.	Modello semplificato per la risoluzione dei ponti termici.....	"	118
<b>6.</b>	<b>MASSA E DIFFUSIVITÀ DELL'INVOLUCRO .....</b>	"	121
6.1.	Caratteristiche del sistema involucro .....	"	121
6.1.1.	Esempio sulla valutazione del coefficiente di dispersione termica dell'involucro .....	"	126
6.1.2.	Esempio sulla valutazione della dispersione termica stagionale.....	"	127
6.1.3.	La reazione al fuoco .....	"	128
6.2.	La massa termica.....	"	129
6.3.	Grandezze termiche fondamentali .....	"	132
6.3.1.	Esempio sulla struttura A: il cappotto esterno .....	"	133
6.3.2.	Esempio sulla struttura B: il cappotto interno.....	"	135
6.4.	La diffusività termica.....	"	138
6.4.1.	Esempio sulla struttura A: la diffusività termica.....	"	139
<b>7.</b>	<b>TRASPORTO DI MASSA .....</b>	"	141
7.1.	La formazione dell'umidità.....	"	145
7.1.1.	La condensazione superficiale .....	"	145
7.1.2.	La condensazione nella massa (o interstiziale).....	"	146
7.2.	La diffusione del vapore .....	"	147
7.2.1.	Permeabilità e resistenza al vapore.....	"	150
7.2.2.	Esempio sulla struttura A: la parete d'aria equivalente .....	"	152
7.2.3.	Esempio sulla struttura A-modificata: la condensazione superficiale .....	"	154
7.2.4.	Esempio sulle strutture A e B: la condensazione interstiziale (o nella massa).....	"	156
7.2.5.	Esempio sulla struttura B: barriera al vapore.....	"	162
<b>8.</b>	<b>PRESTAZIONI TERMICHE E MATERIALI .....</b>	"	169
8.1.	Caratteristiche di un materiale isolante.....	"	169
8.2.	Classificazione dei materiali isolanti .....	"	173
8.3.	Fibra di canapa.....	"	176
8.3.1.	Pannelli in fibra di canapa per cappotto.....	"	177
8.4.	Fibra di cellulosa.....	"	177
8.4.1.	Fiocchi di cellulosa per riempire le cavità .....	"	179
8.5.	Fibra di legno (WF) .....	"	180

8.5.1.	Pannelli in fibra di legno ( <i>WF</i> ) per cappotto .....	p. 181
8.6.	Lana di legno mineralizzata ( <i>WW</i> ) .....	" 182
8.6.1.	Pannelli in lana di legno mineralizzata ( <i>WW</i> ) per cappotto .....	" 183
8.6.2.	Confronto tra fibra di legno e lana di legno mineralizzata .....	" 184
8.6.3.	Esempio di calcolo degli spessori equivalenti .....	" 185
8.7.	Sughero espanso ( <i>EC</i> ) .....	" 186
8.7.1.	Granulato in sughero espanso .....	" 186
8.8.	Lana di pecora .....	" 188
8.8.1.	Materassino in lana di pecora .....	" 188
8.9.	Perlite espansa ( <i>EPB</i> ) .....	" 189
8.9.1.	Pannelli di perlite espansa .....	" 190
8.10.	Lana minerale ( <i>MW</i> ) .....	" 191
8.10.1.	Pannello in lana di roccia per cappotto .....	" 192
8.10.2.	Feltro in lana di vetro .....	" 193
8.10.3.	Feltro in lana di vetro con freno vapore .....	" 194
8.10.4.	Lana di vetro per insufflaggio .....	" 195
8.11.	Vetro cellulare ( <i>CG</i> ) .....	" 196
8.11.1.	Lastre di vetro cellulare ( <i>CG</i> ) .....	" 197
8.11.2.	Granulato in vetro cellulare ( <i>CG</i> ) .....	" 197
8.12.	Silicato di calcio espanso .....	" 198
8.13.	Polistirene espanso sinterizzato ( <i>EPS</i> ) .....	" 199
8.13.1.	Pannello in <i>EPS</i> grigio per cappotto .....	" 200
8.14.	Polistirene espanso estruso ( <i>XPS</i> ) .....	" 201
8.14.1.	Pannello di polistirene espanso estruso ( <i>XPS</i> ) .....	" 202
8.15.	Conclusioni .....	" 203
<b>9.</b>	<b>CALCOLI PRATICI IN REGIME PERIODICO</b> .....	" 204
9.1.	I fattori del regime periodico .....	" 205
9.2.	Un modello semplificato .....	" 207
9.2.1.	Materiali isolanti e diffusività termica .....	" 207
9.2.2.	Trasmittanza periodica, smorzamento e sfasamento .....	" 210
9.2.3.	Cappotto termico in regime periodico e sfasamento temporale .....	" 212
9.2.4.	Materiali isolanti e sfasamento unitario .....	" 215
9.3.	Sistema a cappotto termico .....	" 221
9.3.1.	Cappotto e sostenibilità .....	" 223
9.3.2.	La messa in opera di un sistema a cappotto .....	" 224
9.4.	Un materiale isolante con prestazioni estreme .....	" 227

9.4.1.	Pannello composito in <i>aerogel</i> , polipropilene e fibra di vetro .....	p. 227
9.4.2.	Confronto del pannello in <i>aerogel</i> con gli isolanti $\lambda=0,04$ .....	" 228
9.4.3.	Diffusività termica e sfasamento unitario del pannello in <i>aerogel</i> .....	" 229
9.4.4.	Isolamento dal freddo e dal caldo: sughero espanso contro <i>aerogel</i> .....	" 230
9.4.5.	Isolamento dal freddo e dal caldo: lana minerale contro <i>aerogel</i> .....	" 231
9.5.	Materiali per un cappotto termico .....	" 232
9.5.1.	Stratigrafia del cappotto .....	" 232
9.5.2.	Basamento in vetro cellulare (struttura termoisolante "contro terra") .....	" 233
9.5.3.	Cappotto termico in lana di roccia (struttura termoisolante "contro aria") .....	" 234
9.5.4.	Alternative per contrastare il calore estivo .....	" 235
9.5.5.	Perché dobbiamo evitare (per quanto possibile) il polistirene .....	" 236
9.5.6.	E se usassimo la lana di legno mineralizzata? .....	" 237
9.5.7.	Analisi dell'andamento delle resistenze .....	" 239
9.5.8.	Cappotti sostenibili e poco sostenibili .....	" 241
10.	<b>CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP</b> .....	" 243
10.1.	Contenuti della WebApp .....	" 243
10.2.	Requisiti hardware e software .....	" 243
10.3.	Attivazione della WebApp .....	" 243
	<b>BIBLIOGRAFIE E SITOGRAFIA</b> .....	" 244
	<i>Bibliografia</i> .....	" 244
	<i>Sitografia</i> .....	" 244



# INTRODUZIONE

## Obiettivo e metodo

Questo manualetto ha per obiettivo il racconto dell'architettura sostenibile. Fatto da un punto di vista particolare, e al contempo fondamentale: quello della pratica dell'isolamento termico (e non solo). Il tutto presentato facendo un ampio ricorso a dati, tabelle e fattori tratti soprattutto dal mercato dei materiali isolanti. Con tanti esempi numerici, completamente svolti nei loro dettagli (senza l'uso di complicate equazioni) e con lo scopo di far comprendere quei modelli operativi (e quelle tecnologie) che danno corpo all'architettura passiva a quasi zero energia, e quasi zero carbonio.

## Argomenti trattati

- Il primo capitolo tratta i concetti di base, che vanno dall'architettura passiva a quella sostenibile, dall'energia incorporata all'impronta di carbonio, ai protocolli di valutazione del processo edilizio ecc.
- Il secondo capitolo espone l'edilizia a quasi zero carbonio, e analizza il caso della *Solcer House (Cardiff University, Wales)*: un edificio-laboratorio a energia positiva, con quasi zero emissioni di carbonio e un costo economico contenuto. E descrive le sue tecnologie passive (o quasi passive), come il sistema solare fotovoltaico, i **collettori solari ad aria traspirata**, l'impianto di ventilazione meccanica controllata, la pompa di calore e lo stoccaggio di energia che dà inerzia termica al sistema edilizio.
- Il terzo capitolo definisce il comfort termico e presenta il bilancio energetico di un individuo in funzione della sua attività, del suo abbigliamento e degli scambi di calore con l'ambiente circostante. Inoltre fa cenno, con qualche semplice esempio, all'utilizzo della temperatura operante e delle curve *isocomfort* di *Fanger*, che danno l'intervallo di benessere di una persona in un ambiente *indoor*.
- Il quarto capitolo svolge il tema del trasporto di calore e definisce i fattori che lo rappresentano: la conduttività, la resistenza, l'adduttanza, ecc.. E fa numerosi esempi di calcolo della **trasmissione termica stazionaria** per differenti stratigrafie (pareti, vetrate, serramenti, ecc.), e valuta l'andamento della temperatura nello spessore dell'involucro.

- Il quinto capitolo tratta i ponti termici, e propone un esempio di calcolo semplificato per la determinazione delle perdite di calore.
- Il sesto capitolo analizza la risposta termica dell'involucro. In particolare fa alcuni esempi di calcolo della massa termica, della diffusività e dello stoccaggio di calore nelle chiusure dell'edificio.
- Il settimo capitolo tratta la diffusione dell'umidità attraverso le chiusure perimetrali. Propone differenti soluzioni per l'isolamento termico (cappotto esterno, cappotto interno e cappotto con barriera al vapore) e analizza la probabilità dell'evento condensazione. Studia l'andamento delle pressioni e visualizza il diagramma di *Glaser*.
- L'ottavo capitolo presenta i principali materiali isolanti. Classifica le performance e fornisce alcuni dati pratici, presi dalle schede tecniche dei produttori, con lo scopo di valutarne l'adeguatezza e la sostenibilità in esercizio.
- Il nono e ultimo capitolo introduce il regime periodico e il calcolo (in modo semplificato) della **trasmissione termica periodica**. E presenta un materiale sperimentale, a base di *aerogel* (un nano materiale super-leggero e super-isolante), per il montaggio di un cappotto sottile (e innovativo). Infine, con diversi esempi propone il calcolo dello sfasamento temporale (e della diffusività termica) per differenti strutture e materiali, con lo scopo di valutare la risposta termica complessiva contro il freddo invernale e contro il caldo estivo.

### Conclusione

Da quanto detto risulta evidente la struttura di questo volumetto, e i temi svolti, che, se da un lato sono molto pratici, dall'altro sono talvolta innovativi e originali (come il calcolo semplificato dello sfasamento temporale dei materiali, con lo scopo della determinazione del loro comportamento contro il calore estivo).

Per quanto detto, e per i suoi contenuti, il volumetto rimane un lavoro in *progress*, e, di preferenza, un campo di sperimentazione per architetti, tecnici della progettazione e di cantiere, studenti universitari e cultori della materia.

## CONCETTI DI BASE

Non è semplice una classificazione dei sistemi passivi, tante sono le variabili tecnologiche, culturali e storiche. Ad esempio, volendo fare un accenno solo linguistico, abbiamo: edilizia bioclimatica, bioarchitettura, edifici a energia quasi zero, architettura a bassa (o nulla) impronta di carbonio, ecc.. Tutte classificazioni/denominazioni che – pur rispondendo a valenze culturali distinte, approcci tecnologici differenti – rappresentano modelli architettonici che hanno uno scopo in comune: un consumo quasi nullo di energia (non rinnovabile) e una bassa emissione di carbonio.

In modo sintetico, i modelli architettonici elencati (e in generale tutti quelli a basso consumo energetico e ridotte emissioni), rientrano nell'edilizia passiva o solare passiva. Che, pur avendo approcci differenti – sono strettamente correlate – e rientrano nel modello unitario dell'architettura sostenibile.

### 1.1. Architettura passiva

La definizione del concetto di architettura passiva non è univoca. Esistono differenti modi di rappresentare il concetto di edilizia passiva. Ed esistono svariate applicazioni che – in modo più o meno rigoroso – richiamano questa tecnologia. In realtà, se si prescindono dalle "case solari" degli anni '70 (quelle costruite nei deserti americani o quelle sperimentali sui Pirenei) – la gran parte delle costruzioni successive (incluse quelle secondo il protocollo *Passivhaus*) presentano componenti costruttivi di tipo attivo (finalizzati al comfort abitativo). Ad esempio, i ventilatori elettrici di un sistema di ventilazione meccanica, ecc..

#### 1.1.1. Edilizia solare passiva

L'obiettivo dell'architettura solare passiva è la gestione/ottimizzazione dell'uso della luce e del calore che sono resi disponibili dall'ambiente. Ossia che derivano dall'irraggiamento solare e dall'irraggiamento termico degli oggetti circostanti.

L'obiettivo si persegue ponendo particolare attenzione all'ubicazione e all'orientamento dell'edificio. Con lo scopo di catturare e trattenere l'energia termica (all'interno dell'involucro edilizio) durante il periodo freddo (quello invernale), e di impedire la penetrazione del calore durante il periodo caldo (quello estivo).

Ne consegue che il punto nodale dell'architettura solare passiva è da un lato l'orientamento rispetto al sole – finalizzato alla cattura di luce e calore (nel periodo invernale) – e dall'altro l'ubicazione verso oggetti che danno ombra durante il periodo estivo.

Pertanto, se l'irraggiamento luminoso e termico (invernale) deriva dal sole, l'ombreggiamento (estivo) è dato dagli schermi solari, dagli oggetti costruiti sull'involucro, dagli alberi a foglie caduche (trasparenti ai raggi solari d'inverno e schermanti d'estate), dagli oggetti esterni, dagli edifici posti nelle vicinanze, ecc..

### **Osservazione**

L'architettura solare passiva è sempre derivata dal "libero pensiero" dell'architetto progettista. Non ha dato luogo alla formazione di protocolli, standard, certificazioni, ecc. – ed è soprattutto un'architettura sperimentale.

Un limite operativo dell'architettura solare passiva è insito nel proprio obiettivo, infatti, la ricerca dell'ottimizzazione dell'orientamento rende il modello poco applicabile nei contesti urbani dove la disposizione degli edifici risponde a istanze di tipo socio-economico che sfuggono al controllo del singolo intervento, ma rientrano nell'ambito della pianificazione urbana. E anche poco applicabile agli edifici esistenti quando presentano errori d'orientamento. In sintesi, il modello solare passivo è soprattutto applicabile ai nuovi edifici, alle case o fabbriche singole, quando sono inserite in contesti territoriali ampi dove è possibile il controllo del soleggiamento e dell'ombreggiamento.

### **1.1.2. Edilizia passiva**

L'obiettivo dell'architettura passiva è la gestione/ottimizzazione dei guadagni e delle perdite di energia termica, indipendentemente dalla loro fonte o causa, in modo che sia necessaria una quantità minima o quasi nulla di energia (non rinnovabile) per riscaldare o raffrescare l'ambiente interno.

L'obiettivo si persegue con l'incremento del livello d'isolamento, con la riduzione del numero orario dei ricambi d'aria (con l'eventuale impiego di un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore) e con la correzione dei ponti termici – che sono causa di rilevanti perdite d'energia, di formazione della muffa, ecc.. L'architettura passiva – pur derivando in gran parte dal "libero pensiero" dell'architetto progettista – ha dato luogo alla formazione di protocolli, standard e certificazioni di valenza internazionale, diventando nel tempo (e con svariate denominazioni) un'architettura piuttosto codificata.

Il protocollo più conosciuto è quello europeo indicato con la parola tedesca *Passivhaus* – in inglese *Passive house*. Ovvero "casa passiva".

L'architettura passiva è applicabile ovunque, nei contesti urbani e negli edifici isolati, nei manufatti nuovi e in quelli esistenti, infatti, l'intervento fondamentale consiste essenzialmente nell'incremento del livello d'isolamento dell'involucro edilizio.

## EDILIZIA A CARBONIO ZERO

In lingua inglese: "*low to negative carbon buildings*".

È l'ultima frontiera degli edifici passivi. In questo caso la sostenibilità è controllata sia in termini energetici che in termini di emissioni di carbonio.

In realtà questo modello architettonico è soprattutto diffuso nei paesi anglosassoni dove si svolge una consistente attività sperimentale.

### 2.1. Una casa a energia positiva

La *SOLCER*<sup>1</sup> *House*, è stata progettata utilizzando un approccio sistemico che integra la parte termica con la parte elettrica ed è finalizzata alla realizzazione di un edificio produttore di energia elettrica da fonte rinnovabile.

L'obiettivo è stato quello di costruire una casa a energia positiva e quasi zero emissioni di carbonio. Capace, su base annua, di generare una quantità di energia maggiore di quella consumata.

La *SOLCER House* – edificio sperimentale progettato dalla *Welsh School of Architecture* dell'Università di Cardiff – è ubicata nel sito dell'azienda *Cenin Renewables Ltd* a Pyle, vicino a Bridgend, nel Galles meridionale, Regno Unito.

La casa è stata costruita in sedici settimane e si è conclusa nel marzo del 2015.

L'edificio si rivolge al mercato dell'edilizia sociale. È stato costruito con tecnologie reperibili localmente (a "chilometri zero") con un costo finale di circa 1420 €/m<sup>2</sup>. In linea con i costi dell'edilizia sociale e con i costi dell'edilizia privata a energia quasi zero.

Le tecnologie usate sono state integrate e finalizzate ai seguenti obiettivi:

- un ridotto consumo;
- la generazione di energia rinnovabile;
- lo stoccaggio dei temporanei surplus energetici.

<sup>1</sup> *SOLCER* è l'acronimo di "*Smart Operation for a Low Carbon Energy Region*" – operazione intelligente per una regione a basse emissioni di carbonio.

Il progetto *SOLCER* – realizzato da varie università gallesi in contatto con aziende private e governo – fa parte del più ampio programma "*Low Carbon Research Institute (LCRI)*" – istituto di ricerca per le basse emissioni di carbonio – finalizzato a un futuro sempre più sostenibile.

## 2.2. Il sistema involucro

In questo sistema d'involucro l'obiettivo principale è usare un complesso di materiali con un ciclo di vita a emissione quasi nulla.

La *SOLCER House* – con un ridotto consumo energetico – è costruita con alti livelli d'isolamento termico e con bassi livelli di perdite d'aria. Le fondazioni sono state realizzate con cemento a basso tenore di carbonio prodotto localmente.

L'involucro opaco (muri perimetrali) è stato montato a secco con pannelli strutturali in legno coibentati con polistirene espanso (*EPS*) o estruso (*XPS*) – tecnologia *SIPs*.

La parete perimetrale esposta a Sud – in corrispondenza del primo piano – ospita un collettore solare ad aria traspirata (*TSC*) di 17 m<sup>2</sup>. Formato da una doppia pelle metallica con una cavità interna mantenuta in depressione da un ventilatore (quello del sistema di ventilazione meccanica, *MVHR*<sup>2</sup>). La pelle interna è fissata sul muro perimetrale termicamente isolato. La pelle esterna – che funziona da assorbitore dell'irraggiamento solare – è micro-forata. Da questi piccoli fori entra l'aria esterna e raggiunge la cavità a depressione, sottrae il calore dall'assorbitore e viene distribuita (sempre per l'azione del ventilatore) agli ambienti interni abitati.

I serramenti della *SOLCER House* sono ad alte prestazioni. Sono fatti con un telaio in legno rivestito in alluminio e con doppi vetri basso emissivi. L'intonaco esterno di finitura è isolante.

La copertura è suddivisa in due sezioni:

- 1) Quella esposta a Sud. Che ospita un sistema di pannelli fotovoltaici di 34 m<sup>2</sup> e potenza di picco di 4,3 kWp – integrati all'interno di vetrate che danno la luce naturale al sottotetto. I pannelli svolgono la funzione elettrica e quella di manto di copertura parzialmente trasparente alla luce solare. I pannelli integrati riducono il costo della messa in opera rispetto alla soluzione tradizionale di fissaggio meccanico sul manto del tetto.
- 2) Quella esposta a Nord – di circa 20 m<sup>2</sup> – che ospita, nel relativo sottotetto, sei batterie agli ioni di litio con una capacità totale di 6,9 kWh.

### 2.2.1. Tecnologia *SIPs*

La tecnologia *SIPs* (*Structural Insulated Panels* – pannelli coibentati strutturali) è un sistema brevettato finalizzato alla costruzione di case con involucro in legno. Non è un sistema costruttivo prefabbricato, in quanto i componenti realizzati in fabbrica (i "mattoni") vengono interamente assemblati in cantiere. Il sistema costruttivo prevede la formazione delle chiusure perimetrali mediante pannelli *SIPs*. Che sono costituiti da due lastre di legno *OSB* (*Oriented Strand Boards* – pannelli a scaglie orientate) con interposto uno strato di *EPS* (polistirene espanso) o *XPS* (polistirene estruso), rinforzate nei bordi mediante listelli (o liste) perimetrali strutturali in legno. Il pannello viene eventualmente integrato con un cappotto esterno e una contro-parete (o finitura) interna.

## BENESSERE TERMICO

La casa – comunque costruita – ha il seguente principale obiettivo: proteggere gli abitanti dalle avversità del mondo esterno. Sia essa una tenda per nomadi, una baracca di cantiere o un edificio multipiano. Deve sempre riparare dall'esterno, dando alle persone un senso di benessere.

In termini più rigorosi si potrebbe dire che l'involucro del sistema edilizio è finalizzato alla formazione del *comfort* negli ambienti interni.

Pertanto, l'involucro diventa (per l'individuo utente dell'edificio) il mediatore dello scambio energetico e di materia: una sorta di terza pelle, che si somma alla cute (la prima pelle) e al vestiario (la seconda).

### IL COMFORT (O BENESSERE)

Il benessere negli ambienti interni è definibile come la condizione psicologica di una persona che esprime soddisfazione per la propria presenza nell'ambiente stesso.

### 3.1. Il benessere termico

Le variabili termiche dell'ambiente interno (ambiente *indoor*) sono:

- temperatura dell'aria e temperatura radiante media delle superfici interne;
- velocità dell'aria;
- umidità relativa.

A cui si aggiungono i comportamenti degli individui:

- livello energetico dell'attività (o lavoro) che si svolge nell'ambiente *indoor*;
- resistenza termica dei vestiti indossati.

#### Osservazione

La misura della temperatura di un certo ambiente – quando la verifica è finalizzata alla valutazione del *comfort* – non corrisponde alla sola temperatura dell'aria (quella controllata nel centro della stanza) ma include anche la temperatura delle superfici radianti che racchiudono l'ambiente e delle superfici radianti che costituiscono il contorno degli oggetti contenuti nell'ambiente stesso.

### 3.1.1. Temperature e *comfort*

Il *comfort* è il risultato dell'azione di differenti temperature. Ad esempio, in una stanza, è il risultato dell'azione della temperatura dell'aria interna e delle differenti temperature radianti delle superfici che scambiano calore con le persone presenti nell'ambiente (come il soffitto, il pavimento, le pareti, le vetrate dei serramenti e le superfici degli oggetti).

In sintesi, il *comfort* interno è dato dalle differenti temperature che danno luogo a differenti modalità di scambio termico:

- *Temperatura dell'aria interna*: dà luogo allo scambio termico per convezione (e in piccola parte per conduzione) tra le persone e l'aria *indoor*.
- *Temperature radianti* (del soffitto, del pavimento, delle pareti, delle vetrate dei serramenti e delle superfici degli oggetti): danno luogo agli scambi termici per irraggiamento tra le persone e le superfici dell'ambiente *indoor*.

#### Osservazione sulla temperatura radiante

Per semplificare (nella stagione estiva) quando le varie temperature radianti sono piuttosto prossime, si considera una sola temperatura radiante media.

Diversamente (nella stagione invernale), quando le temperature radianti delle superfici opache sono molto diverse da quella delle superfici trasparenti, diventa opportuno considerare sia la temperatura radiante media delle pareti, del soffitto ecc., che la temperatura radiante media di tutte le superfici vetrate delle finestre che si affacciano all'esterno.

#### TEMPERATURA DELL'ARIA

Nel passato recente si misurava con un semplice termometro a bulbo, a colonna d'alcool (o di mercurio) la cui dilatazione (allungamento nel capillare) rappresentava vividamente la temperatura dell'aria. Attualmente (per praticità) si misura con termometri elettronici, spesso equipaggiati con *data logger*<sup>1</sup>.

La temperatura dell'aria viene misurata in prossimità del centro della stanza. Ed è la temperatura obiettivo dell'impianto di climatizzazione.

#### TEMPERATURA RADIANTE MEDIA

Una temperatura radiante è la temperatura superficiale di un corpo che emette radiazioni termiche verso le superfici dell'ambiente circostante.

In altre parole, un qualunque corpo materiale emette onde termiche in funzione della propria temperatura superficiale. All'aumentare della temperatura superficiale aumenta la quantità di calore radiante emesso.

<sup>1</sup> Nel linguaggio pratico di cantiere si usa sovente la locuzione inglese: "*Data logger*" – Registratore di dati. In altre parole, quando esiste la necessità di analizzare l'andamento della temperatura nel tempo, il *data logger* registra la temperatura per intervalli regolari e successivamente permette il loro scaricamento in un computer.



## TRASPORTO DI CALORE

Alcuni aspetti fondamentali nella costruzione degli edifici passivi (e di quelli a carbonio zero) sono la scelta dei materiali isolanti e la valutazione quantitativa dei flussi di calore attraverso l'involucro: dall'ambiente esterno all'ambiente interno e viceversa.

Pertanto, il controllo del processo costruttivo dei sistemi passivi – dal punto di vista della sostenibilità energetica – si realizza anche attraverso la valutazione delle grandezze che rappresentano il comportamento termico degli elementi e delle strutture dell'edificio.

### 4.1. Conduttività, resistenza e conduttanza

La conduzione è il processo di trasporto del calore senza trasporto di massa. Si realizza in un mezzo solido, oppure in un mezzo fluido in quiete.

La quantità di calore trasmessa per conduzione attraverso una lastra di materiale omogeneo (con il flusso termico perpendicolare alla superficie della lastra) è direttamente proporzionale all'area della superficie, alla durata del fenomeno, alla differenza di temperatura tra le due superfici e inversamente proporzionale allo spessore della lastra.

La grandezza di controllo del processo conduttivo, che rappresenta una proprietà del mezzo materiale in cui avviene il passaggio del calore, è la conduttività termica.

#### Osservazione sulla conduttività nei sistemi passivi

Gli edifici passivi (e quelli a zero carbonio) hanno un forte isolamento termico e sono molto ermetici<sup>1</sup>. Con ciò mantengono inalterate le condizioni di benessere interno e riducono (talvolta riescono ad annullare) il fabbisogno di energia – spesso non rinnovabile – degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento dell'aria *indoor*.

L'involucro dell'edificio passivo viene isolato con un cappotto termico posto all'esterno. Ossia, viene avvolto con un materiale isolante a bassa (proprio ridotta) conduttività termica.

<sup>1</sup> Il comfort si ottiene aggiungendo l'impianto di ventilazione meccanica che controlla in generale la qualità dell'aria *indoor* e in particolare il livello dell'umidità ambientale.

### 4.1.1. Conduttività termica

La conduttività termica (o conducibilità termica) di un materiale, è di solito indicata con  $\lambda$ , e rappresenta la capacità di un mezzo materiale di trasportare il calore per conduzione attraverso la propria massa. Quindi, tanto maggiore sarà la conduttività del materiale tanto maggiore sarà il calore trasmesso.

Consideriamo una struttura (ad esempio una parte d'involucro) di area  $A$ , spessore  $d$ , sottoposta a un gradiente termico<sup>2</sup>  $\Delta T$ .

La struttura è costituita da un **materiale omogeneo**.

La conduttività termica del **materiale** costituente la struttura (per un flusso termico normale alla medesima) rappresenta la quantità di calore passante nell'unità di tempo, nell'unità di superficie, attraverso lo spessore unitario della struttura sottoposta a un gradiente termico unitario. In formula:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta T} \quad (W/mK) \quad (4.1)$$

dove:

- $\lambda$ : conduttività termica del materiale ( $W/mK$ );
- $Q/\Delta t$ : flusso di calore normale alla struttura passante nell'unità di tempo ( $W$ );
- $d$ : spessore della struttura ( $m$ );
- $A$ : area della struttura ( $m^2$ );
- $\Delta T$ : gradiente termico ( $K$  o  $^{\circ}C$ ).

Come si evince dalla formula 4.1, la conduttività termica  $\lambda$  (nel sistema internazionale) ha la seguente unità di misura:  $W/mK$ .

Nella tabella 4.2 riportiamo la conduttività termica di alcuni materiali d'impiego corrente in edilizia.

**Tabella 4.1.** Conduttività termica e peso specifico

Materiale	Peso specifico ( $kg/m^3$ )	Conduttività termica ( $W/mK$ )
Aria (in quiete)	1,29	0,023
Acqua (in quiete)	1.000	0,6
<b>Materiali metallici:</b>		
Mercurio	13.590	7,6
Piombo	11.340	35
Rame	8.900	380

[segue]

<sup>2</sup> "Gradiente termico", in questo contesto, significa semplicemente "differenza di temperatura".

<sup>3</sup> Spesso si usa l'unità di misura ( $W/m^{\circ}C$ ) del tutto equivalente a ( $W/mK$ ). Infatti, quando si considerano differenze di temperatura si può usare indifferentemente l'unità assoluta ( $K$ ) o quella celsius ( $^{\circ}C$ ).

## PONTI TERMICI

Un ponte termico<sup>1</sup> rappresenta una discontinuità costruttiva (e prestazionale) dell'involucro edilizio. In altri termini, nelle chiusure verticali e orizzontali abbiamo una **resistenza termica**, che assume – nelle zone che fanno da ponte termico – un valore molto basso. Ovvero, in inverno, il ponte è internamente freddo ed esternamente caldo. E viceversa in estate.

Dal punto di vista prestazionale, la zona ponte termico ha una forte probabilità di formazione della condensa superficiale e soprattutto interstiziale<sup>2</sup>.

Un ponte termico, caldo sulla faccia esterna, si visualizza mediante termografia.

Dal punto di vista quantitativo le perdite di calore nei ponti termici possono raggiungere circa il 20% delle perdite totali.

### UNA PRIMA DEFINIZIONE

Nelle norme<sup>3</sup> il ponte termico è definito come quella parte limitata dell'involucro edilizio dove la resistenza termica (altrove uniforme e costante) cambia in modo significativo a causa della discontinuità nel valore della conduttività termica, oppure a causa della discontinuità nello spessore dell'involucro, o anche per la differenza tra l'area interna e quella esterna di una struttura perimetrale.

Pertanto, le principali tipologie di ponte termico sono date dai casi rappresentati nella seguente figura 5.1.

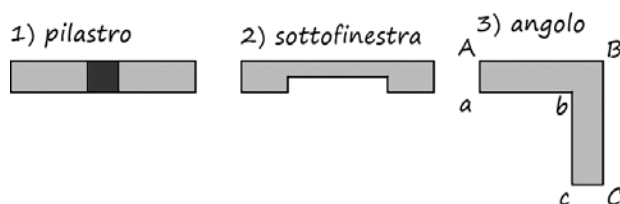


Figura 5.1. Tipologie di nodi (o ponti) termici

<sup>1</sup> Un ponte termico è anche denominato nodo termico

<sup>2</sup> La condensazione superficiale si forma sulle superficie interna della struttura. Quella interstiziale si realizza internamente alla struttura.

<sup>3</sup> Ad esempio UNI EN ISO 10211-1.

Dove:

- Tipo 1: chiusura perimetrale con pilastro in calcestruzzo armato che determina una forte discontinuità della conduttività termica (e della resistenza termica) della struttura.
- Tipo 2: chiusura perimetrale con sotto-finestra che determina una discontinuità dello spessore e una forte discontinuità nella resistenza termica della struttura.
- Tipo 3: angolo di chiusura perimetrale dove la superficie esterna (ABC), maggiore di quella interna (abc), determina una forte riduzione della resistenza termica.

È anche utile osservare che il ponte di tipo 1 è relativo a una discontinuità fisica. Mentre il ponte di tipo 2 e quello di tipo 3 sono relativi a una discontinuità di forma.

#### UNA SECONDA DEFINIZIONE

Una definizione equivalente è la seguente: «*Un ponte termico è una zona limitata dell'involucro dove si verifica una discontinuità del materiale o della geometria della struttura o di ambedue gli aspetti*».

Dal punto di vista termico, qualunque sia la discontinuità, vale a dire la causa del nodo termico, abbiamo il seguente comportamento:

- un forte decremento locale della resistenza termica;
- un forte incremento locale del flusso termico.

#### INSTABILITÀ DEI PONTI TERMICI

Dal punto di vista prestazionale, un ponte termico ha un comportamento instabile perché la resistenza termica diminuisce progressivamente nel tempo. Infatti, il difetto d'isolamento del ponte dà luogo a formazione di condensa che imbibisce la struttura e riduce la sua resistenza termica. Quindi, con la struttura termicamente meno isolata, si forma una nuova condensa e una nuova riduzione della resistenza termica che porta progressivamente al degrado della struttura con il peggioramento delle prestazioni termiche e di resistenza meccanica.

#### CLASSIFICAZIONE

Per quanto detto, la classificazione dei ponti termici include le seguenti tipologie principali:

- *ponti termici di struttura*, dovuti alla discontinuità dei materiali nelle congiunzioni tra strutture diverse;
- *ponti termici di forma*, dovuti alla discontinuità geometrica.

#### PONTI TERMICI DI STRUTTURA

I ponti termici di struttura si trovano nelle congiunzioni di strutture diverse, ad esempio:

- congiunzione tra un pilastro in calcestruzzo armato e la chiusura verticale che lo contiene;

# MASSA E DIFFUSIVITÀ DELL'INVOLUCRO

Per involucro – in senso generale – si intende il rivestimento di una superficie o 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 che scambia continuamente massa ed energia con il mondo esterno (o ambiente). Dove per massa si intende soprattutto il vapore: la parte condensabile dell'aria umida; e per energia il calore.

Il vapore, prodotto all'interno dell'edificio, viene scaricato all'ambiente esterno per diffusione attraverso lo spessore dell'involucro. La stessa cosa vale per il calore<sup>1</sup>: prodotto all'interno e scaricato per trasmissione attraverso la medesima struttura.

Tutto questo intrecciarsi di processi (che sono tipici della stagione invernale) ha come obiettivo il mantenimento del livello prestazionale dell'aria *indoor*, la quale dovrà mantenersi pura, con buona temperatura ed adeguata umidità ambientale.

Per quanto detto, il sistema involucro, che è un insieme di strutture perimetrali, è un corpo integrato che funziona da termoregolatore, ed è il luogo di trasmissione dei flussi di calore, aria umida e vapore.

## 6.1. Caratteristiche del sistema involucro

Il comportamento termico dell'involucro è caratterizzato dalle seguenti prestazioni.

### FLUSSO TERMICO

Nell'edificio la temperatura interna (di comfort) si dovrà mantenere costante. A tale scopo, il consumo di energia (per la climatizzazione dell'ambiente *indoor*) sarà in equilibrio con il flusso di calore perduto (in inverno) o guadagnato (in estate) attraverso lo spessore d'involucro. Vale a dire, tanto minore sarà il flusso termico scambiato attraverso l'involucro, tanto minore sarà l'energia consumata.

<sup>1</sup> Nel periodo estivo saranno le frigoriferie prodotte dal climatizzatore interno ad essere scaricate all'esterno. Tutto ciò, dal punto di vista economico ed energetico, determina sempre una perdita.

Da questa considerazione discende l'importanza – per un funzionamento sostenibile – della prestazione d'involucro rappresentata dalla **resistenza termica** (nel periodo invernale) e dallo **sfasamento temporale** (nel periodo estivo).

Per la resistenza termica *cf.* punto 4.1.2. Per lo sfasamento temporale *cf.* punto 9.2.2. Dal punto di vista delle unità di misura, la resistenza termica vale:  $m^2K/W$ . Mentre lo sfasamento temporale vale:  $h$ .

#### TRASMITTANZA TERMICA

Le strutture d'involucro separano (in inverno) l'aria **calda indoor** dall'aria **fredda** esterna. Viceversa in estate. Pertanto, tra i due fluidi avviene un processo spontaneo di trasporto del calore: dal fluido caldo a quello freddo.

Il processo di trasporto del calore dall'aria *indoor* all'aria esterna (in inverno), si realizza come segue:

- scambio per convezione (e irraggiamento) tra l'aria *indoor* e la faccia interna dell'involucro;
- trasporto per conduzione attraverso lo spessore dell'involucro: dalla faccia interna alla faccia esterna;
- scambio per convezione (e irraggiamento) tra la faccia esterna dell'involucro e l'aria esterna.

E **viceversa** in estate.

Per quanto riguarda l'irraggiamento termico abbiamo:

- la faccia interna dell'involucro ha scambi radiativi con i corpi dell'ambiente interno (ad esempio con la superficie delle persone, degli oggetti, ecc.);
- la faccia esterna dell'involucro ha scambi radiativi con i corpi dell'ambiente esterno: il sole, la volta celeste (nelle notti stellate), la superficie degli oggetti, degli edifici, ecc..

La grandezza di controllo del trasferimento di calore attraverso l'involucro è denominata **trasmissione termica** e indicata con  $U$ .

Dal punto di vista dimensionale abbiamo:  $W/m^2K$ .

#### Osservazione sulle trasmissioni

Nei calcoli vengono utilizzate due differenti trasmissioni termiche: quella stazionaria e quella periodica.

La trasmissione stazionaria (*cf.* paragrafo 4.6) è utilizzata, in inverno, per il calcolo del flusso di calore che viene perduto all'esterno. Al contrario, la trasmissione periodica (*cf.* punto 9.2.2) è utilizzata, in estate, per il calcolo di quanta parte dell'onda di calore esterna entra all'interno, e di quanto tempo impiega per il passaggio attraverso l'involucro.

Quindi, mentre nella trasmissione stazionaria si prescinde dalla variabile tempo e si calcola il calore trasferito, nella trasmissione periodica si calcola sia il calore trasferito che il tempo necessario al trasferimento.

## TRASPORTO DI MASSA

Per trasporto di massa attraverso l'involucro si intende il trasporto dell'aria umida, ovvero dell'aria contenente vapore.

Diamo alcune definizioni.

### PRESSIONE

La **pressione** è la forza applicata all'unità di superficie. L'unità di misura della pressione – nel Sistema Internazionale – è il newton al metro quadrato, denominata pascal ( $Pa$ ):  
 $1 Pa = 1 N/m^2$ .

### PRESSIONE TOTALE E PRESSIONE PARZIALE

La pressione dell'aria umida ( $p_{tot}$ ) è data dalla somma della pressione dell'aria secca ( $p_a$ ) con la pressione del vapore ( $p_v$ ):

$$p_{tot} = p_a + p_v \quad (Pa) \quad (7.1)$$

La pressione dell'aria umida è una pressione totale. Le pressioni dell'aria secca e del vapore sono delle pressioni parziali. La pressione totale di una miscela è sempre la somma di più pressioni parziali.

In sintesi, la pressione totale dell'aria umida – che corrisponde alla pressione atmosferica – è la somma della pressione parziale dell'aria secca con la pressione parziale del vapore. Per semplicità spesso si sottintendono gli aggettivi totale e parziale e si dice che la pressione dell'aria umida è la somma della pressione dell'aria secca con la pressione del vapore.

### LA SATURAZIONE DELL'ARIA UMIDA

L'aria umida è satura (a una certa temperatura) quando contiene un livello di umidità (vapore) pari al livello massimo possibile per quelle condizioni di temperatura.

### QUANTITÀ DI UMIDITÀ E PRESSIONE

La pressione parziale del vapore è una misura indiretta della quantità di umidità: tanto maggiore sarà la pressione tanto maggiore sarà la quantità di vapore contenuto nell'aria.

Nella condizione di saturazione – quando la quantità di umidità è massima per una certa temperatura – la pressione parziale è massima e viene chiamata pressione di saturazione.

#### RELAZIONE TRA TEMPERATURA E PRESSIONE DI SATURAZIONE

Al crescere della temperatura cresce la pressione di saturazione e viceversa. Nella seguente tabella 7.1 rappresentiamo la relazione temperatura-pressione di saturazione.

**Tabella 7.1.** *Relazione tra temperatura e pressione di saturazione*

Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$	Pressione di saturazione $p_{\text{sat}} (\text{Pa})$	Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$	Pressione di saturazione $p_{\text{sat}} (\text{Pa})$
-10	256	21	2.487
-9	307	22	2.645
-8	332	23	2.810
-7	359	24	2.985
-6	388	25	3.169
-5	396	26	3.363
-4	452	27	3.567
-3	487	28	3.782
-2	525	29	4.008
-1	565	30	4.246
0	611	31	4.496
1	657	32	4.759
2	705	33	5.034
3	758	34	5.324
4	813	35	5.628
5	872	36	5.947
6	935	37	6.276
7	1.002	38	6.632
8	1.072	39	6.993
9	1.148	40	7.384
10	1.228	41	7.779
11	1.312	42	8.197
12	1.402	43	8.641
13	1.497	44	9.102
14	1.598	45	9.593
15	1.705	46	10.097
16	1.818	47	10.624
17	1.938	48	11.175
18	2.064	49	11.750
19	2.198	50	12.350
20	2.339	51	12.962



## PRESTAZIONI TERMICHE E MATERIALI

Il sistema involucro è una stratificazione complessa, dove ogni singolo strato svolge una definita funzione.

Gli strati finalizzati all'isolamento termico contrastano il passaggio del calore. Dal punto di vista prestazionale hanno una bassa conduttività termica, ossia un basso valore di lambda ( $\lambda$ ).

Vige la seguente classificazione:

- materiali **termoisolanti**:  $\lambda < 0,090 \text{ W/mK}$ ;
- materiali **termoconduttori**:  $\lambda \geq 0,090 \text{ W/mK}$ .

### 8.1. Caratteristiche di un materiale isolante

Dal punto di vista prestazionale uno strato di materiale isolante deve possedere (in modo rilevante) le seguenti caratteristiche: resistenza termica; permeabilità al vapore; resistenza meccanica; potere fonoisolante; incombustibilità (o scarsa combustibilità).

#### RESISTENZA TERMICA ELEVATA (E BASSA DIFFUSIVITÀ TERMICA)

Un alto livello d'isolamento termico si ottiene con uno strato materiale a bassa conduttività ed elevato spessore. Vale a dire con uno strato isolante ad alta resistenza termica. Il quale – posto all'esterno di un involucro dotato di elevata massa termica – contribuisce alla riduzione della diffusività termica dell'intera struttura e quindi al risparmio energetico nel periodo invernale e in quello estivo.

Infatti, il comportamento dell'involucro (e dello strato isolante che forma il cappotto esterno) varia al variare della stagione, con un funzionamento invernale e un funzionamento estivo. Nel periodo invernale (per limitare le perdite di calore) la prestazione dell'involucro è finalizzata ad attenuare l'onda termica **uscente** e ad accumulare il calore nella massa muraria della struttura. Diversamente, nel periodo estivo (per limitare il surriscaldamento dell'ambiente *indoor*) il funzionamento è finalizzato ad attenuare e ritardare nel tempo l'onda termica **entrante**.

Pertanto, in ambedue le stagioni, il sistema involucro ha bisogno di una bassa conduttività, data dall'isolante posto all'esterno della struttura, e di un'alta massa termica data dalla massa muraria posta all'interno. In ambedue le situazioni, il risparmio energetico –

dovuto all'involucro con bassa diffusività termica – è dato dal minore consumo di energia non rinnovabile per riscaldare l'ambiente *indoor* in inverno e per raffrescarlo in estate.

#### ELEVATA PERMEABILITÀ AL VAPORE

Come sottolineato in precedenza (*cf.* esempio 7.2.4), il sistema involucro **razionale** è una stratificazione con la permeabilità crescente dallo strato interno allo strato esterno. Quindi, visto che il cappotto razionale è all'esterno, il materiale isolante dovrà possedere un'elevata permeabilità. Al contrario, quando il medesimo materiale isolante si dovrà porre all'interno (cappotto interno), la sua elevata permeabilità dovrà esser corretta in bassa permeabilità, con l'uso di una barriera al vapore (praticamente impermeabile) posata a monte<sup>1</sup> dell'isolante.

#### IGROSCOPICITÀ NULLA (O QUASI)

L'igroscopicità è la capacità di un materiale di assorbire l'umidità nel proprio volume. Nel caso delle chiusure (e degli strati isolanti), l'umidità proviene dalla condensazione superficiale, di massa e dal sottosuolo. Un materiale isolante umido<sup>2</sup> perde le proprietà coibenti. Pertanto, è sempre opportuno impiegare isolanti con bassa igroscopicità. Oppure non igroscopici (come ad esempio il vetro cellulare), quando sono posati in prossimità di parti dell'edificio con forte umidità (come nelle strutture in prossimità del terreno).

#### GRANDE RESISTENZA MECCANICA, O COMUNQUE ADEGUATA ALLA FUNZIONE

Soprattutto grande resistenza alla compressione e grande stabilità di forma. In generale, è la capacità di resistere alle sollecitazioni meccaniche applicate nelle operazioni di cantiere (ad esempio, la compressione nel pannello di base di uno stoccaggio per impilaggio), nel processo di posa in opera e durante il ciclo di vita dell'edificio (ad esempio, la sollecitazione di calpestio negli strati isolanti posti sottopavimento). La stabilità di forma – e quindi la resistenza alle azioni soprattutto di compressione – è importante nell'impiego dell'isolante come cappotto esterno, infatti, il materiale, che è posato direttamente sulla superficie della chiusura, è protetto solamente da un sottile strato d'intonaco.

La resistenza alla compressione è di solito misurata in chilopascal. Ovvero:

$$1 \text{ kPa} = 1 \text{ kN/m}^2 \approx 0,01 \text{ kg/cm}^2$$

#### GRANDE POTERE FONOIOLANTE (E FONOASSORBENTE)

Un materiale termoisolante deve anche possedere delle capacità fonoisolanti e fonoassorbenti, contro i rumori che provengono dall'esterno e dall'interno, per via aerea e attraverso le strutture.

<sup>1</sup> A monte rispetto alla direzione del flusso di calore invernale (o flusso di vapore). Vale a dire rivolta verso l'ambiente *indoor*.

<sup>2</sup> Infatti l'acqua ha un'elevata conduttività termica.

## CALCOLI PRATICI IN REGIME PERIODICO

La trasmissione del calore attraverso un involucro si può rappresentare con due differenti modelli: il trasferimento stazionario e il trasferimento periodico.

### MODELLO STAZIONARIO

Rappresenta il passaggio di calore attraverso lo spessore di un involucro ipotizzato con **massa termica nulla**. Ossia incapace di accumulare energia termica. Nel funzionamento stazionario il passaggio di calore è **istantaneo**.

È il modello in uso quando si deve valutare l'isolamento termico dal freddo. Infatti, nel periodo invernale, con il calore uscente, viene valutato il calore perduto, che è importante in termini di sostenibilità (emissioni e consumo di risorse non rinnovabili) e in termini economici. In questo contesto, la grandezza d'interesse è la **trasmissione termica stazionaria** (o semplicemente trasmissione termica), e vale il fatto che tanto minore è la trasmissione tanto maggiore sarà la protezione dal freddo.

### MODELLO PERIODICO

Rappresenta il passaggio di calore attraverso lo spessore di un involucro ipotizzato con **massa termica maggiore di zero**. Ossia in grado di accumulare (e successivamente rilasciare) energia termica. Nel funzionamento periodico (per questa capacità di accumulo) il passaggio di calore non è istantaneo, ma si svolge in un certo intervallo di tempo.

È il modello in uso quando si deve valutare l'isolamento termico dal caldo. Infatti, nel periodo estivo, con il calore entrante, viene valutato il tempo impiegato dal calore per attraversare lo spessore dell'involucro, che è importante in termini di sostenibilità (emissioni, consumo di risorse non rinnovabili e benessere abitativo) e in termini economici.

Ad esempio, in estate, il picco di calore del primo pomeriggio entra nella faccia esterna dell'involucro e passa attraverso il suo spessore, dove in parte viene stoccato e in parte (subendo uno smorzamento) raggiunge l'ambiente *indoor* con un ritardo di tempo (lo sfasamento) che è tanto più auspicabile quanto più si va verso le ore fresche della notte<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Infatti, se in pieno pomeriggio il calore entrante si può smaltire solo con l'impianto di raffrescamento (e quindi con un consumo, delle emissioni e un costo significativo), nelle ore notturne - quando l'aria è fresca - il calore può essere smaltito con un semplice ricambio dell'aria. Ecco perché, diventa fondamentale che il ritardo temporale (lo sfasamento) faccia giungere il calore nell'ambiente interno durante le ore notturne.

In conclusione, se la protezione termica dal freddo invernale è data dal valore della trasmittanza termica stazionaria, la protezione termica dal calore estivo è data dalla **trasmittanza termica periodica** (ovvero dallo smorzamento e dallo **sfasamento temporale** dell'onda termica).

#### **Annotazione**

Per sintesi diciamo che il comportamento stazionario è quantitativamente definito dalla trasmittanza termica stazionaria, in simboli  $U$ . Mentre il comportamento periodico è definito dalla trasmittanza termica periodica, in simboli  $Y_{IE}$ . Ambedue le trasmittanze hanno l'unità di misura espressa in  $W/m^2K$ .

### **9.1. I fattori del regime periodico**

Per quanto detto, la protezione contro l'onda termica estiva (messa in atto dallo strato di materiale isolante in collaborazione con gli altri strati che costituiscono l'intero spessore d'involucro), si realizza mettendo in gioco sia la capacità di resistenza al passaggio del calore, che la capacità di accumulo termico nella massa della struttura.

In altre parole, il flusso di calore entrante nell'involucro, viene sia attenuato (dal basso valore della trasmittanza termica) che accumulato (dall'alto valore della massa termica), per poi essere successivamente rilasciato (sia verso l'ambiente esterno che verso l'ambiente interno). Con il risultato finale che il calore effettivamente passante attraverso lo spessore (ossia che raggiunge l'ambiente *indoor*) è una frazione di quello iniziale (ossia una frazione del picco termico esterno) ed è in ritardo di tempo (rispetto al momento in cui si è presentato all'esterno dell'involucro).

Pertanto, il fenomeno del contrasto dell'onda termica estiva si basa su tre fondamentali grandezze: la trasmittanza termica periodica ( $Y_{IE}$ ), il fattore di smorzamento ( $f_A$ ) e lo sfasamento temporale ( $\Phi$ ).

#### **Osservazione sul surriscaldamento e sullo sfasamento**

Per contrastare il surriscaldamento estivo è importante aumentare il tempo necessario all'onda termica per attraversare lo spessore dell'involucro. Infatti, tenendo presente che il picco di calore estivo si forma all'esterno dell'involucro alle 13 circa del primo pomeriggio, ne deriva che un ritardo nel trasporto del calore all'interno dell'edificio, ad esempio, di tre ore, è insufficiente per evitare il disagio termico e il maggior consumo necessario a raffrescare. Infatti, in questo caso, il calore entra nell'edificio alle ore 16, quando all'esterno il caldo è ancora forte e neanche il ricambio dell'aria offrirebbe una soluzione al calore interno. Se invece il tempo di ritardo fosse, ad esempio, di undici ore, l'onda entrerebbe nell'edificio a mezzanotte, quando l'aria esterna notturna inizia a esser fresca e il ricambio dell'aria darebbe soluzione al surriscaldamento dell'ambiente interno.

## CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP

### 10.1. Contenuti della WebApp

La **WebApp inclusa** consente di accedere ad una banca dati di norme, provvedimenti e documenti utili, sempre aggiornata e consultabile attraverso un motore di ricerca.

### 10.2. Requisiti hardware e software

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per la gestione di documenti Office e PDF.

### 10.3. Attivazione della WebApp

- Collegarsi al seguente indirizzo internet:

**[https://www.grafill.it/pass/0293\\_2.php](https://www.grafill.it/pass/0293_2.php)**

- Inserire i codici **[A]** e **[B]** che sono presenti nell'ultima pagina del volume e cliccare su **[Continua]**;
- Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su **www.grafill.it**;
- Cliccare sul pulsante **[G-CLOUD]**;
- Cliccare sul pulsante **[Vai alla WebApp]** a fianco del prodotto acquistato;
- Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**;
- Accedere alla WebApp abbinata alla presente pubblicazione cliccando sulla relativa immagine di copertina presente nello scaffale **Le mie App**.



La presente pubblicazione si configura come un manuale teorico-pratico che analizza l'architettura sostenibile – e quella passiva – dal punto di vista dell'isolamento termico (e non solo). Il testo, che introduce anche argomenti innovativi (come la valutazione semplificata dello sfasamento temporale dei materiali isolanti contro l'onda termica estiva), si sviluppa con i seguenti argomenti:

- Architettura passiva, sostenibilità, energia incorporata e impronta di carbonio. Cenni sui protocolli di valutazione del processo edilizio, ecc..
- Edilizia a **quasi zero energia e quasi zero carbonio**. Il caso concreto della *Solcer House (Cardiff University)*: un edificio-laboratorio a energia positiva).
- Il benessere termico e il bilancio energetico di una persona con l'ambiente circostante. Lo scambio di calore, la temperatura operante e diversi esempi sull'uso dei diagrammi *isocomfort* di *Fanger*.
- Conduttività, resistenza e trasmittanza termica stazionaria. Andamento della temperatura nell'involucro.
- Valutazione dei ponti termici con un metodo numerico semplificato.
- Massa termica, diffusività del calore e stoccaggio nelle strutture di un edificio.
- Involucro e diffusione del vapore. Analisi di differenti tipologie di un cappotto termico. La condensazione superficiale e interstiziale. Valutazione semplificata con il metodo di *Glaser*. Opportunità e impiego delle barriere al vapore.
- Classificazione dei principali materiali isolanti. Analisi di alcune schede tecniche proposte dal mercato, e di un pannello innovativo a base di *aerogel* (nanomateriale super-isolante) per il montaggio di un **cappotto termico super-sottile**.
- Regime periodico, sistemi a cappotto ETICS e calcolo della **trasmittanza termica periodica** (e dello sfasamento temporale) con un metodo semplificato, messo a punto dall'autore, per la valutazione della capacità d'isolamento di un materiale, una struttura, ecc., contro il calore estivo.

Gli argomenti sono presentati in modo pratico – con dati, tabelle e grandezze tratte dal mercato dei materiali isolanti– e con esempi numerici svolti nei loro dettagli.

Di fatto, è utile soprattutto agli architetti, ai tecnici di progetto e di cantiere, agli studenti e ai cultori della materia. E anche a coloro che sviluppano prodotti innovativi.

La **WebApp inclusa** consente di accedere ad una banca dati di norme, provvedimenti e documenti utili, sempre aggiornata e consultabile attraverso un motore di ricerca.

#### REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE

Qualsiasi dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android; accesso ad internet e browser web con Javascript attivo; software per la gestione di documenti Office e PDF.

**Marco Berti**, ingegnere e architetto, ha svolto attività di ricerca su temi ergonomici in aziende pubbliche e private. Ha ricoperto la funzione di esperto dei sistemi tecnologici e di *Energy manager* nella Regione Piemonte. Attualmente è impegnato nei temi dell'edilizia e della mobilità sostenibile. Tra le opere: il progetto di gestione del patrimonio impiantistico "Global Service Tecnologico" della Regione Piemonte (Torino, 1998). Con la casa editrice Grafill ha già pubblicato: *EQZE. Dal cappotto termico alla ventilazione controllata*, 2021.



WebApp

Assistenza  
tecnica

ISBN 13 978-88-277-0293-2



9 788827 702932 >

Euro ##,00