

MARCO BERTI

PATOLOGIE
EDILIZIE



CAPPOTTO TERMICO FUNZIONALE E DEGRADO

**DALLA SCELTA DELL'ISOLANTE ALLE PATOLOGIE
VIAGGIO NEL MONDO CONTRADDITTORIO DEI CAPPOTTI TERMICI**



GRAFILL

Marco Berti

CAPPOTTO TERMICO FUNZIONALE E DEGRADO

Ed. I (03-2024)

ISBN 13 978-88-277-0452-3

EAN 9 788827 704523

Collana **PATOLOGIE EDILIZIE**



**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

**CONTATTI
IMMEDIATI**



Pronto GRAFILL
Tel. 091 6823069



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
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.



**PRONTO
GRAFILL**



**CLICCA per maggiori informazioni
... e per te uno SCONTO SPECIALE**

SOMMARIO

INTRODUZIONE	p.	9
PARTE PRIMA		
GRANDEZZE FONDAMENTALI	"	11
1. TRASPORTO E ACCUMULO DI CALORE	"	13
1.1. Conduzione termica	"	13
Esempio 1.1. Scambio termico in una borraccia di acqua fredda	"	13
Esempio 1.2. Scambio termico in un serbatoio di acqua calda	"	14
1.1.1. Equazione della conduzione termica	"	14
Esempio 1.3. Perdite di calore in un container	"	17
1.2. Calore specifico	"	18
Esempio 1.4. Capacità termica per unità di volume	"	19
1.3. Calore latente	"	20
1.4. Capacità termica (o massa termica)	"	20
1.4.1. Inerzia termica	"	21
1.4.2. Edifici termicamente leggeri	"	21
1.4.3. Edifici termicamente pesanti	"	21
1.5. Accumulo termico	"	21
1.5.1. Accumuli di calore sensibile	"	22
1.5.2. Accumuli di calore latente	"	23
Esempio 1.5. Stoccaggio in acqua o paraffina	"	24
Esempio 1.6. Edilizia e stoccaggio sensibile	"	25
Esempio 1.7. Edilizia e stoccaggio latente	"	25
1.6. Materiali a cambiamento di fase	"	26
1.6.1. Proprietà	"	27
1.6.2. Classificazione	"	27
Esempio 1.8. Scheda tecnica di un PCM (paraffina)	"	29
Esempio 1.9. Accumulo di calore nell'EPS	"	31
1.7. Conduttività termica	"	32
1.7.1. Variabilità della conduttività termica	"	34
1.8. Diffusività termica	"	35

1.9.	Convezione termica	p.	36
1.9.1.	Coefficiente di scambio termico convettivo.....	"	37
1.10.	Irraggiamento termico	"	38
1.10.1.	Irraggiamento termico	"	39
1.10.2.	Materiali e modalità di trasmissione.....	"	42
1.10.3.	Individuo radiante	"	43
1.10.4.	Individuo radiante e convettivo	"	44
1.10.5.	Irraggiamento e convezione.....	"	45
1.10.6.	Passaggio di calore in un pannello sandwich	"	46
2.	TRASMITTANZA TERMICA	"	49
2.1.	Premessa.....	"	49
2.2.	Resistenza (e conduttanza) termica	"	50
2.3.	Resistenza termica superficiale	"	51
2.3.1.	Coefficiente di scambio termico combinato.....	"	52
2.3.2.	Resistenza termica superficiale	"	53
2.3.3.	Resistenza termica di contatto	"	54
2.4.	Resistenza termica totale	"	54
2.5.	Trasmittanza termica stazionaria.....	"	55
	PARTE SECONDA		
	COMPORAMENTO TERMICO DI UN CAPPOTTO	"	57
3.	COMPORAMENTO TERMICO DI UN CAPPOTTO	"	59
3.1.	Parete calda (cappotto esterno)	"	59
3.1.1.	Resistenze, trasmittanza e flusso termico.....	"	59
3.1.2.	Andamento della temperatura	"	61
3.2.	Parete fredda (cappotto interno)	"	63
3.2.1.	Resistenze, trasmittanza e flusso termico.....	"	63
3.2.2.	Andamento della temperatura	"	65
3.4.1.	Resistenze, trasmittanza e flusso termico.....	"	67
3.4.2.	Andamento della temperatura	"	68
4.	PRESSIONE DI SATURAZIONE	"	70
4.1.	Il fenomeno della saturazione del vapore	"	70
4.2.	Relazione temperatura-pressione di saturazione	"	72
	Esempio 4.1. <i>Calcolo della pressione di saturazione</i>	"	73
	Esempio 4.2. <i>Interpolazione lineare</i>	"	74
4.3.	Saturazione nella parete calda (cappotto esterno)	"	75
4.4.	Saturazione nella parete fredda (cappotto interno).....	"	76
4.5.	Confronto parete calda e parete fredda.....	"	76
4.5.1.	Disfunzionalità della parete fredda	"	77

4.5.2.	Funzionalità della parete calda	p.	78
4.6.	Saturazione nella parete isolata in mezzeria	"	78
5.	PRESSIONE PARZIALE DEL VAPORE	"	80
5.1.	Aria secca e vapore d'acqua	"	80
5.1.1.	Calcolare il peso dell'aria in un ambiente abitato	"	81
5.2.	Umidità assoluta	"	82
5.3.	Umidità relativa	"	82
5.4.	Permeabilità al vapore	"	83
5.5.	Coefficiente di resistenza al vapore	"	84
5.6.	Spessore di diffusione del vapore	"	86
5.7.	Permeabilità DVA	"	87
5.8.	Schermi e membrane traspiranti.....	"	87
5.8.1.	Schede tecniche dei produttori	"	88
5.9.	Resistenza di uno strato	"	89
5.10.	Resistenza di una stratificazione.....	"	90
5.11.	Permeanza di una stratificazione	"	90
5.12.	Flusso di vapore.....	"	92
5.13.	Pressioni parziali del vapore	"	93
5.14.	Diffusione del vapore nella parete calda	"	93
5.14.1.	Saturazione e pressioni parziali	"	96
5.15.	Diffusione del vapore nella parete fredda	"	97
5.15.1.	Saturazione e pressioni parziali	"	99
5.16.	Parete fredda e freno vapore	"	100
5.16.1.	Saturazione e pressioni parziali con freno vapore	"	103
5.17.	Parete fredda e barriera vapore	"	104
5.17.1.	Saturazione e pressioni parziali con barriera vapore.....	"	107
5.18.	Condensazione superficiale.....	"	108
Esempio 5.1.	Condensazione superficiale.....	"	108
Esempio 5.2.	Temperatura critica della superficie interna	"	110
5.18.1.	Stress igrometrico standard.....	"	112
PARTE TERZA			
	CAPPOTTO TERMICO E MATERIALI ISOLANTI	"	113
6.	CAPPOTTO TERMICO ESTERNO	"	115
6.1.	Protocollo normativo	"	115
6.2.	Montaggio di un cappotto esterno	"	117
6.3.	Cappotto termico: basamento interrato	"	119
6.4.	Cappotto termico: lana di roccia (MW)	"	121
6.5.	Cappotto termico: EPS grafitato a bassa densità.....	"	123
6.6.	Cappotto termico: EPS grafitato ad alta densità	"	124

6.6.1.	Prestazione invernale	p.	125
6.6.2.	Prestazione estiva	"	125
6.7.	EPS contro lana di roccia	"	126
6.8.	Cappotto termico: fibra di legno (FW)	"	127
6.8.1.	Prestazione invernale	"	128
6.9.	Cappotto termico: sughero espanso (EC)	"	128
6.9.1.	Prestazione invernale	"	129
6.9.2.	Prestazione estiva	"	129
6.10.	Confronto tra materiali isolanti	"	129
6.11.	La lana di legno mineralizzata	"	131
6.11.1.	Prestazione invernale	"	132
6.11.2.	Prestazione estiva	"	132
7.	MATERIALI ISOLANTI	"	134
7.1.	Grandezze prestazionali	"	134
7.2.	Classificazione dei materiali isolanti	"	144
7.3.	Polistirene espanso sinterizzato (EPS bianco)	"	145
7.4.	Polistirene espanso sinterizzato con grafite (EPS grigio)	"	146
7.5.	Polistirene espanso estruso (XPS)	"	147
7.6.	Poliuretano espanso rigido (PUR/PIR)	"	148
7.7.	Lana di roccia (MW)	"	150
7.8.	Lana di vetro (MW)	"	151
7.9.	Lana di legno mineralizzata (WW)	"	152
7.10.	Sughero espanso (EC)	"	154
7.11.	Fibra di legno (WF)	"	155
7.12.	Vetro cellulare (CG)	"	156
7.13.	Silicato di calcio idrato	"	157
7.14.	Silicato di calcio (CS)	"	159
7.15.	Calcestruzzo aerato autoclavato (AAC)	"	160
PARTE QUARTA			
	PATOLOGIE E STRUMENTI DI DIAGNOSI	"	163
8.	TERMOGRAFIA	"	165
8.1.	Premessa	"	165
8.2.	Elementi di teoria	"	165
8.2.1.	Emissività e riflessività	"	167
8.2.2.	Distanza e spot di misurazione	"	171
8.3.	Elementi di pratica	"	173
9.	STRUMENTI DI MISURA PER LA DIAGNOSI	"	179
9.1.	Diagnosi termografica	"	179

9.2.	Misura della trasmittanza: il termoflussimetro	p.	182
9.3.	Qualità e difetti in un cappotto termico.....	"	183
9.3.1.	Qualità dell'isolamento termico	"	184
9.3.2.	Criticità in un cappotto termico	"	187
9.3.3.	Ponti termici.....	"	189
9.3.4.	Il <i>Blower Door Test</i>	"	194
10.	CAPPOTTO TERMICO: CRITICITÀ E PATOLOGIE	"	200
10.1.	Proprietà di un isolante per un cappotto esterno.....	"	200
10.1.1.	Alta resistenza termica	"	200
10.1.2.	Alta permeabilità	"	202
10.1.3.	Alto calore specifico.....	"	203
10.1.4.	Incombustibilità	"	203
10.2.	Confronto tra isolanti per un cappotto esterno.....	"	204
10.2.1.	Valutazione della massima resistenza termica.....	"	204
10.2.2.	Valutazione della massima permeabilità.....	"	207
10.3.	Il degrado di un cappotto termico.....	"	216
10.3.1.	Degrado superficiale e scolorimenti	"	216
10.3.2.	Muffa e alghe	"	217
10.3.3.	Fessurazioni, cricche e microfratture.....	"	218
10.3.4.	Distacchi e infiltrazioni.....	"	219
10.3.5.	Sintesi delle sollecitazioni di degrado	"	220
10.4.	Dilatazione differenziata del cappotto termico	"	221
10.4.1.	Esempio sulla dilatazione termica di un cappotto.....	"	223
10.4.2.	Dalla deformazione al distacco	"	224
10.5.	Trasmittanza termica lineare e ponti termici	"	225
BIBLIOGRAFIA	"	230
LA WEBAPP INCLUSA	"	231
Contenuti della WebApp.....	"	231	
Requisiti hardware e software	"	231	
Attivazione della WebApp	"	231	

INTRODUZIONE

In questo manuale vengono descritte le patologie più frequenti di un involucro edilizio in generale e di un cappotto termico in particolare. In effetti, sono state rappresentate tutte quelle patologie che rappresentano le maggiori cause del degrado nel tempo di un cappotto e di un involucro edilizio.

Nel testo è data particolare attenzione a quei calcoli (sempre elementari) che rendono una visione concreta dei processi termici e igrometrici che interessano un cappotto termico e i materiali che lo compongono. Inoltre, il manuale, sempre attraverso semplici e numerosi esempi numerici dà forma e sostanza a quelle grandezze che costituiscono gli strumenti fondamentali per operare, progettare, o semplicemente scegliere i materiali all'interno del mercato dell'edilizia.

Il testo è diviso in quattro parti.

La **prima parte** ha la funzione di introdurre tutte le grandezze fondamentali che rappresentano il comportamento termico e igrometrico di un materiale da costruzione in generale e di un materiale isolante in particolare. In generale, vengono introdotti gli argomenti fondamentali di trasmissione del calore e i relativi fattori di controllo, come ad esempio:

- conduttività e diffusività termica;
- calore specifico, latente e sensibile;
- massa e inerzia termica;
- **materiali a cambiamento di fase**;
- resistenza termica, conduttanza e trasmittanza.

Questa parte, se può essere saltata da coloro che hanno una buona conoscenza di trasmissione del calore, è invece fondamentale per tutti gli altri (ossia per coloro che hanno in parte o del tutto dimenticato le grandezze del trasporto termico).

La **seconda parte** analizza il comportamento termico e igrometrico di un materiale isolante applicato in differenti posizioni dell'involucro: all'interno (come cappotto termico interno), in mezzzeria (come isolante nell'intercapedine) e all'esterno (come cappotto termico esterno). Allo scopo vengono introdotti i principali fattori **igrometrici**:

- umidità assoluta e relativa;
- permeabilità al vapore, permeabilità DVA e permeanza;
- fattore di resistenza al passaggio del vapore e spessore di diffusione.

Questa parte si sviluppa attraverso un esempio numerico dove al variare della posizione dell'isolante viene calcolata la risposta dell'involucro valutando i seguenti termini:

- andamento della temperatura;
- andamento della pressione di **saturazione** del vapore;
- andamento della pressione del vapore;
- calcolo del flusso termico attraverso la parete;
- calcolo del flusso di umidità attraverso la parete.

Infine, è stato dato ampio spazio alla valutazione di **una delle patologie più frequenti e più dannose** dell'involucro edilizio: **la formazione della condensa** (superficiale e interstiziale) che dà luogo ai ponti termici, all'incremento delle perdite di calore e alla formazione di muffa che degrada le strutture e riduce fortemente la salubrità dell'ambiente abitato. Il tutto completato con l'analisi dei possibili provvedimenti che ne danno soluzione.

La **terza parte** analizza il comportamento di un cappotto termico esterno al variare del materiale isolante utilizzato; e svolge la presentazione – mediante le schede tecniche dei produttori – dei materiali isolanti più diffusi nella costruzione dei cappotti termici esterni.

In concreto abbiamo:

- descrizione tecnologica di un sistema ETICS (cappotto termico esterno), dalla configurazione della zoccolatura alla parte aerea;
- scelta di un materiale isolante in funzione della performance invernale, di quella estiva e di quella **contro l'evento incendio (vale a dire contro la più importante patologia dell'involucro edilizio** in generale e del cappotto termico in particolare).

La **quarta parte** analizza gli strumenti di diagnosi, approfondisce l'evento incendio e presenta le principali patologie che possono avvenire nel corso della vita di un cappotto termico esterno. In particolare, per quanto riguarda la diagnosi abbiamo:

- la termografia;
- il *Blower Door Test*.

Nonché tutta una serie di strumenti elettronici che permettono il controllo puntuale dell'involucro, come ad esempio, il termometro a contatto e a distanza, l'anemometro, il generatore di fumo, l'endoscopio ecc.

Infine, per le principali patologie (e i relativi provvedimenti di prevenzione) abbiamo dato una descrizione della propagazione dell'incendio in facciata e una carrellata sui principali degradi dovuti a difetti di montaggio, formazione di umidità e sollecitazioni termiche e meccaniche. A cui sono stati aggiunti due esempi numerici che riguardano:

- il calcolo e gli effetti della dilatazione termica stagionale di un cappotto termico;
- il calcolo di un ponte termico mediante l'uso dell'Abaco del Politecnico di Milano.

Conclusion

Da quanto detto, dovrebbe risultare evidente che l'organizzazione di questo manuale ha lo scopo di dare le basi per un processo edilizio consapevole finalizzato all'analisi e prevenzione di varie patologie dell'involucro (e soprattutto del cappotto termico).

TRASPORTO E ACCUMULO DI CALORE

Questo capitolo descrive le modalità di trasmissione del calore:

- trasporto per conduzione;
- trasporto per convezione;
- irraggiamento elettromagnetico.

1.1. Conduzione termica

La conduzione termica rappresenta il trasferimento di calore (energia termica) tra le particelle di una sostanza dotate di maggiore mobilità (maggiore energia) verso le particelle dotate di minore mobilità (minore energia).

La conduzione termica può avvenire nei solidi, nei liquidi o nei gas:

- nei fluidi (gas e liquidi) è dovuta alle collisioni tra le molecole durante il loro moto casuale;
- nei solidi è dovuta alle vibrazioni delle molecole del reticolo cristallino e al trasporto da parte degli elettroni liberi.

Il flusso termico in un mezzo materiale (nel verso dalla zona calda a quella fredda) cresce quando si verifica almeno uno dei seguenti eventi:

- aumento dell'attitudine del mezzo alla trasmissione del calore per conduzione;
- aumento della superficie del mezzo finalizzata allo scambio termico;
- aumento della differenza di temperatura tra la zona calda e la zona fredda.

E viceversa.

ESEMPIO 1.1. *Scambio termico in una borraccia di acqua fredda*

Il meccanismo di scambio termico è il seguente:

- l'acqua fredda della borraccia assorbe il calore dall'ambiente esterno. Pertanto, il flusso termico va nella direzione esterno-interno e attraversa lo spessore dell'involucro;
- il trasporto termico avviene per conduzione;
- il trasferimento di calore è dovuto alla differenza di temperatura tra l'acqua e l'aria ambiente.

Il processo di conduzione termica si arresta quando la differenza di temperatura si annulla.

Data la borraccia (e nota la sua superficie laterale che corrisponde alla superficie di scambio termico) e data la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno, la potenza termica trasmessa dipende tanto dalle caratteristiche trasmissive del materiale costituente la borraccia quanto dal suo spessore. Infatti, tanto più il materiale è trasmissivo e tanto più è ridotto il suo spessore, tanto maggiore sarà l'assorbimento del calore. Ad esempio, una borraccia in alluminio ha un assorbimento termico molto maggiore di una borraccia in materiale plastico. Tutto questo perché l'attitudine alla conduzione del calore dell'alluminio è molto maggiore dell'attitudine della plastica.

ESEMPIO 1.2. *Scambio termico in un serbatoio di acqua calda*

Consideriamo un serbatoio di acqua calda rivestito di un materiale isolante (ad esempio lana di roccia); anche in questo caso il trasporto di calore verso l'esterno si realizza per conduzione attraverso il materiale che costituisce lo spessore dell'involucro.

Le differenze con il caso della borraccia sono:

- la direzione del flusso termico. Infatti, nella borraccia l'acqua fredda riceve calore dall'esterno, al contrario, nel serbatoio il calore è ceduto all'esterno. Mentre, la trasmissione termica avviene (in ambedue i casi) per conduzione;
- la borraccia ha un involucro con un solo strato di materiale, diversamente, il serbatoio ha un involucro con due strati sovrapposti: un materiale strutturale e soprattutto un rivestimento di materiale isolante.

Pertanto, lo scambio termico nella borraccia dipende dalle proprietà conduttive di un singolo materiale, mentre lo scambio termico nel serbatoio è funzione soprattutto delle proprietà dello specifico materiale con funzione isolante.

Nel caso del serbatoio il flusso termico si riduce quando si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

- aumenta lo spessore del rivestimento isolante e diminuisce la sua attitudine alla conduzione termica;
- diminuisce l'area della superficie di scambio termico (vale a dire la superficie esterna del serbatoio), ossia viene scelto un serbatoio compatto, con un minimo rapporto di forma ($S/V = \text{superficie/volume}$);
- diminuisce il salto termico tra l'acqua interna e l'aria esterna, vale a dire il serbatoio viene inserito in un ambiente chiuso e protetto dagli sbalzi del clima esterno.

In sintesi – fermi restando la minima superficie di scambio termico e il luogo di ubicazione protetto – l'intervento di riduzione delle perdite consiste nell'applicare un materiale isolante (poco conduttivo) e di grande spessore.

1.1.1. *Equazione della conduzione termica*

Consideriamo una parete perimetrale (ossia un componente d'involucro) come rappresentato in figura 1.1, dove:

- Φ : flusso di calore diretto secondo la freccia, vale a dire dall'ambiente interno all'ambiente esterno [W];

TRASMITTANZA TERMICA

2.1. Premessa

L'involucro di un edificio è la struttura di confine che ne delimita lo spazio interno. Di fatto è costituito:

- dalla superficie interna in contatto con l'aria *indoor*;
- dalla superficie esterna in contatto con l'aria esterna;
- dalla massa muraria dell'involucro, vale a dire dagli strati materiali distribuiti tra le due superfici.

Gli scambi termici dell'edificio con l'ambiente esterno si realizzano sempre attraverso l'involucro. Questo vale tanto per l'energia entrante attraverso la rete (gas, gasolio, energia elettrica ecc.), quanto per le perdite di calore.

LE RESISTENZE TERMICHE

Il flusso di calore è sempre limitato dalla resistenza termica del mezzo attraversato. All'aumentare della resistenza termica diminuisce il flusso termico e viceversa.

Il calore uscente da un edificio deve entrare nella superficie interna dell'involucro (per convezione e irraggiamento), attraversare la massa muraria del medesimo (per conduzione) e uscire dalla superficie esterna (per convezione e irraggiamento). E viceversa – per il calore entrante.

Pertanto, la trasmissione del calore tra l'interno e l'esterno di un edificio (e viceversa), è caratterizzata dalle seguenti resistenze:

- resistenza termica nella massa muraria dell'involucro;
- resistenza termica **superficiale** nelle facce (interna ed esterna) dell'involucro.

Mentre la resistenza termica nella massa è sempre conduttiva, la resistenza termica superficiale può essere convettiva, radiativa o combinata.

RIEPILOGO DELLE FORMULE DI TRASMISSIONE TERMICA

Le leggi fisiche che rappresentano il trasporto del calore sono: la legge di Fourier (per la conduzione) e la legge del raffreddamento di Newton (per la convezione, la radiazione e il trasporto combinato).

Legge della conduzione di **Fourier** (cfr. formula 1.2):

$$\Phi_{cond} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

dove:

- Φ_{cond} : flusso conduttivo [W];
- A : area della superficie di scambio termico [m²];
- $\Delta T/\Delta x$: gradiente termico [K/m];
- λ : conduttività termica [W/m K].

Legge della convezione di **Newton** (cfr. formula 1.6):

$$\Phi_{conv} = h_{conv} A \Delta T$$

dove:

- Φ_{conv} : flusso convettivo [W];
- A : area della superficie solida di scambio convettivo [m²];
- ΔT : differenza tra la temperatura della superficie solida e la temperatura del fluido in moto [K];
- h_{conv} : coefficiente di scambio termico convettivo [W/m²K].

Legge della radiazione di **Newton** (cfr. formula 1.11):

$$\Phi_{rad} = h_{irr} A \Delta T$$

dove:

- Φ_{rad} : flusso radiativo [W];
- A : area della superficie radiante [m²];
- ΔT : differenza tra la temperatura della superficie radiante e la temperatura media delle rimanenti superfici radianti [K];
- h_{irr} : coefficiente di scambio termico radiativo [W/m²K].

La quale, nel trasporto combinato diventa:

$$\Phi_{comb} = h_{conv} A \Delta T + h_{irr} A \Delta T = (h_{conv} + h_{irr}) A \Delta T = h_{comb} A \Delta T$$

dove:

- Φ_{comb} : flusso convettivo e radiativo [W];
- A : area della superficie solida convettiva e radiativa [m²];
- ΔT : differenza tra la temperatura della superficie di scambio termico e la temperatura dell'aria, che è uguale a quella media delle rimanenti superfici radianti [K];
- h_{comb} : coefficiente di scambio termico combinato [W/m²K].

2.2. Resistenza (e conduttanza) termica

RESISTENZA TERMICA

Applichiamo una differenza di temperatura ΔT a una lastra di superficie A , spessore Δx e conduttività λ .

COMPORAMENTO TERMICO DI UN CAPPOTTO

3.1. Parete calda (cappotto esterno)

3.1.1. Resistenze, trasmittanza e flusso termico

DATI DELLA STRUTTURA

Involucro edilizio opaco.

Parete perimetrale a due strati (senza intercapedine).

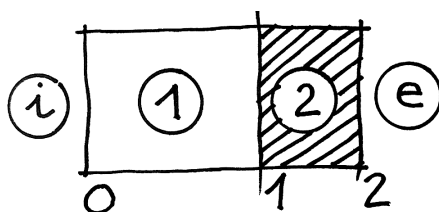


Figura 3.1. Parete con cappotto esterno

La parete ha le seguenti caratteristiche.

Tabella 3.1. Stratigrafia della parete calda

Strato	Materiale	Spessore	Conduttività termica
Strato 1	Mattoni forati	25 cm	0,36 W/mK
Strato 2	Lana di legno mineralizzata	10 cm	0,065 W/mK

Osservazione

In questo esempio e nel seguito, per semplificare, si trascurano le finiture interne ed esterne (gli intonaci), le quali, essendo di piccolo spessore, hanno un ruolo termico trascurabile.

RESISTENZE TERMICHE PARZIALI

Dalle tabelle 3.1 e 2.2 abbiamo le seguenti resistenze parziali.

Tabella 3.2. Resistenze parziali della parete calda

Resistenza superficie interna [m ² K/W]:	$R_{si} = 0,12$
Resistenza strato 1 [m ² K/W]:	$R_1 = d_1/\lambda_1 = 0,25/0,36 = 0,694$
Resistenza strato 2 [m ² K/W]:	$R_2 = d_2/\lambda_2 = 0,10/0,065 = 1,538$
Resistenza superficie esterna [m ² K/W]:	$R_{se} = 0,04$

RESISTENZA TERMICA TOTALE

La resistenza termica totale è la somma delle resistenze parziali:

$$R_{tot} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + R_{se} = 0,12 + 0,694 + 1,538 + 0,04 = 2,392 \text{ m}^2\text{K/W}$$

CONDUTTANZE TERMICHE PARZIALI DEI SINGOLI STRATI

La conduttanza è l'inverso della resistenza, pertanto abbiamo le seguenti conduttanze parziali.

Tabella 3.3. Conduttanze parziali della parete calda

Conduttanza superficie interna [W/m ² K]:	$h_i = 1/R_{si} = 1/0,12 = 8,333$
Conduttanza strato 1 [W/m ² K]:	$G_1 = \lambda_1/d_1 = 0,36/0,25 = 1,44$
Conduttanza strato 2 [W/m ² K]:	$G_2 = \lambda_2/d_2 = 0,065/0,10 = 0,65$
Conduttanza superficie esterna [W/m ² K]:	$h_e = 1/R_{se} = 1/0,04 = 25$

Osservazione

Le resistenze parziali si sommano. Al contrario, **le conduttanze parziali non si sommano**. Pertanto, volendo calcolare la conduttanza parziale di più strati contigui della struttura – si dovrà calcolare la resistenza parziale degli strati e fare l'inverso.

CONDUTTANZA TERMICA PARZIALE DI DUE STRATI CONTIGUI

In primo luogo calcoliamo la resistenza termica parziale dello strato 1 più lo strato 2:

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 0,694 + 1,538 = 2,232 \text{ m}^2\text{K/W}$$

La conduttanza termica parziale dei due strati è l'inverso della resistenza termica dei medesimi strati:

$$G_{12} = 1/R_{12} = 1/2,232 = 0,448 \text{ W/m}^2\text{K}$$

CONDUTTANZA TERMICA TOTALE DELLA STRUTTURA

L'inverso della resistenza termica totale (che include le resistenze superficiali) è la conduttanza termica totale che assume la denominazione di **trasmissione termica**.

PRESSIONE DI SATURAZIONE

4.1. Il fenomeno della saturazione del vapore

LO ZUCCHERO, IL VAPORE E LA SATURAZIONE

Per comprendere il fenomeno della saturazione del vapore consideriamo un semplice esempio costituito da una tazzina di caffè zuccherato. Dove il caffè corrisponde all'aria secca e lo zucchero al vapore.

È noto a tutti che la quantità di zucchero miscibile con il caffè ha un limite, oltre il quale lo zucchero si deposita sul fondo della tazzina. Più il caffè è caldo maggiore è la quantità di zucchero che è mescolabile.

In termini matematici si può dire che esiste una relazione di proporzionalità diretta tra la temperatura del caffè e la quantità di zucchero. Ambedue le variabili aumentano o diminuiscono insieme.

Lo stesso fenomeno avviene per l'aria umida, dove la quantità di vapore può aumentare fino allo stato di saturazione, oltre il quale abbiamo la condensazione, vale a dire la formazione di acqua allo stato liquido.

Osservazione

Per avere un'idea sugli ordini di grandezza di questi fenomeni, si può notare che la quantità di vapore contenuta in un metro cubo di aria è pari a circa la massa di una tazzina di caffè.

LA PRESSIONE

La **pressione** è la forza applicata all'unità di superficie.

L'unità di misura della pressione è il pascal [Pa]:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Essendo il pascal molto piccolo, talvolta si usano il chilo-pascal [kPa] e il mega-pascal [MPa].

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

LA PRESSIONE ATMOSFERICA E LA PRESSIONE PARZIALE DEL VAPORE

L'aria atmosferica è una miscela di gas. La pressione totale di una miscela di gas è la somma delle pressioni parziali dei gas componenti.

Dal punto di vista applicativo l'aria atmosferica si considera costituita dai seguenti gas:

- aria secca: gas **non condensabile** composto da ossigeno (23%), azoto (75%), argon (1,3%), diossido di carbonio (0,04%) e altri gas (0,66%);
- vapore d'acqua: gas **condensabile** composto solamente da acqua.

Per quanto detto, la pressione atmosferica è data dalla somma della pressione **parziale** dell'aria secca con la pressione **parziale** del vapore d'acqua. In formula abbiamo:

$$p_{atm} = p_a + p_v$$

dove:

- p_{atm} : pressione atmosferica [Pa];
- p_a : pressione parziale dell'aria secca [Pa];
- p_v : pressione parziale del vapore d'acqua [Pa].

La pressione parziale di un componente gassoso (ad esempio aria secca oppure vapore d'acqua) rappresenta la pressione che avrebbe il componente se occupasse da solo tutto il volume a disposizione della miscela.

Per avere un'idea degli ordini di grandezza abbiamo:

- pressione atmosferica: $p_{atm} = 101325$ Pa (in condizioni **standard**: 0 °C, zero metri di altitudine e 45° di latitudine);
- pressione parziale del vapore (alle temperature ordinarie): da poche centinaia a poche migliaia di pascal.

Nonostante questa differenza, la presenza del vapore in condizione di saturazione ha un effetto negativo tanto sul benessere degli individui quanto sullo stato di conservazione delle strutture.

Osservazione

La pressione parziale del vapore è direttamente proporzionale alla massa di vapore contenuta nell'aria atmosferica. Vale a dire, tanto maggiore è la pressione tanto maggiore è la quantità di vapore e viceversa.

LA SATURAZIONE

L'aria umida (ad una certa temperatura) è **saturo** quando contiene una quantità di vapore pari alla quantità massima contenibile per quella temperatura. La quantità di vapore – in un certo volume di aria – è direttamente proporzionale alla sua pressione parziale. Ovvero, all'aumentare della pressione aumenta la massa di vapore e viceversa.

In sintesi, a ogni pressione parziale corrisponde una definita quantità di vapore. Infine, quando la quantità è massima (per una definita temperatura) la pressione parziale del vapore si chiama **pressione di saturazione**.

PRESSIONE PARZIALE DEL VAPORE

5.1. Aria secca e vapore d'acqua

L'aria secca e il vapore d'acqua si comportano come gas perfetti.

L'equazione di riferimento per un gas perfetto è la seguente:

$$pV = mRT \quad (5.1)$$

dove:

- p : pressione del gas [Pa];
- V : volume occupato dal gas [m^3];
- m : massa del gas [kg];
- T : temperatura del gas [K];
- R : costante del gas [J/kg K].

Per l'aria secca (gas perfetto) abbiamo:

$$R_a = 287 \text{ J/kg K} \quad (5.2)$$

Per il vapore d'acqua (gas perfetto) abbiamo:

$$R_v = 461,5 \text{ J/kg K} \quad (5.3)$$

Dalle relazioni 5.1 e 5.2 si ricava la massa dell'aria secca:

$$m_a = p_a V / 287 T \quad (5.4)$$

dove:

- m_a : massa dell'aria secca [kg_a] (chilogrammi di aria secca);
- p_a : pressione parziale dell'aria secca [Pa].

Dalle relazioni 5.1 e 5.3 si ricava la massa del vapore d'acqua insaturo:

$$m_v = p_v V / 461,5 T \quad (5.5)$$

dove:

- m_v : massa del vapore d'acqua [kg_v] (chilogrammi di vapore d'acqua);
- p_a : pressione parziale del vapore d'acqua (o semplicemente pressione del vapore) [Pa].

Dalle relazioni 5.1 e 5.3 si ricava la massa del vapore d'acqua saturo:

$$m_s = p_s V / 461,5 T \quad (5.6)$$

dove:

- m_s : massa del vapore d'acqua saturo [kg_s] (chilogrammi di vapore d'acqua saturo);
- p_s : pressione parziale del vapore d'acqua saturo (o semplicemente pressione di saturazione) [Pa].

5.1.1. Calcolare il peso dell'aria in un ambiente abitato

DATI D'INGRESSO

Consideriamo un ambiente *indoor* (ad esempio una stanza) con le seguenti dimensioni:

$$4,3 \text{ m} \times 3,9 \text{ m} \times 2,9 \text{ m}$$

Per l'aria interna abbiamo:

$$p_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T = 19 \text{ }^\circ\text{C}$$

IPOTESI OPERATIVA

L'aria interna si comporta come un gas perfetto e vale la formula 5.1.

Dovendo calcolare la massa dell'aria si trascura il livello di umidità (che è una quantità incognita e comunque piccola) e si utilizza la formula 5.4 (aria secca).

TEMPERATURA IN GRADI KELVIN

Nelle formule da 5.1 a 5.6 la temperatura è in gradi **kelvin**¹. Pertanto, dalla relazione 1.1 abbiamo:

$$T = 273,15 + 19 \text{ }^\circ\text{C} = 292,15 \text{ K}$$

VOLUME DELLA STANZA

$$V = 4,3 \times 3,9 \times 2,9 \approx 48,6 \text{ m}^3$$

¹ Poiché non siamo in presenza di una differenza di temperatura si devono usare esclusivamente i gradi kelvin.

CAPPOTTO TERMICO ESTERNO

Il cappotto termico è un sistema tecnologico:

- **Sistema tecnologico:** insieme di elementi tecnici finalizzato a un determinato obiettivo che ha come scopo la forte riduzione del flusso termico verso l'esterno.
- **Sistema cappotto termico:** il sistema cappotto termico può essere un pacchetto certificato oppure un insieme di componenti separatamente certificati. Il pacchetto certificato è un sistema ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*).

6.1. Protocollo normativo

SIGLE DI ENTI E DOCUMENTI

- **EOTA** (*European Organization for Technical Approvals*): organizzazione europea per la valutazione tecnica dei prodotti. Ente sovranazionale con funzione di coordinamento degli Enti nazionali che rilasciano i documenti ETA.
- **TAB** (*Technical Assessment Body*): ente di valutazione tecnica che rilascia i documenti ETA. I vari TAB (che sono organi nazionali) sono coordinati dall'EOTA.
- **ETAG** (*European Technical Approval Guideline*) e **EAD** (*European Assessment Document*): linee guida per la valutazione tecnica dei prodotti.
- **ETAG 004** (*European Technical Approval Guideline 004*): linee guida per la valutazione tecnica di un cappotto termico.
- **ETA** (*European Technical Approval*): documento sulla valutazione delle performance di un prodotto che riporta informazioni sul produttore e sull'analisi della performance del prodotto. Un prodotto accreditato ETA è fornito di DoP e marcatura CE.
- **DoP** (*Declaration of performance*): dichiarazione di performance rilasciata dal produttore. È la carta d'identità prestazionale del prodotto.
- **ETICS** (*External Thermal Insulation Composite System*): sistema isolante a cappotto esterno.

PROTOCOLLO

L'EOTA è l'Ente che redige le linee guida ETAG o EAD:

- ETAG per i prodotti armonizzati a livello europeo;
- EAD per i prodotti armonizzati e non armonizzati.

Le linee guida ETAG (secondo la vecchia direttiva prodotto) vengono progressivamente trasformate in linee guida EAD. Al momento – in via transitoria – valgono tanto le ETAG quanto le EAD. Per un sistema cappotto termico la norma prodotto è la ETAG 004. Gli Enti nazionali TAB (coordinati dall'EOTA) valutano un cappotto termico secondo la ETAG 004, ed emettono il documento ETA (che rappresenta la validazione del sistema cappotto).

ETAG 004

Nella ETAG 004 il sistema cappotto è definito come un insieme di elementi costruttivi: supporto murario; materiale isolante e componenti per il fissaggio; rasatura armata; primer, finiture e accessori. Nella ETAG 004 vengono anche descritti i metodi di prova per la valutazione delle caratteristiche prestazionali del sistema cappotto.

ETA

Il "Benestare Tecnico Europeo" (ETA) viene concesso esclusivamente al sistema cappotto termico denominato "**sistema ETICS**" e non ai componenti utilizzati separatamente.

Durante il processo costruttivo, la mancata congruenza alle raccomandazioni di sistema comporta la perdita di validità del "Benestare Tecnico Europeo", ossia il produttore non ha più responsabilità sul prodotto e l'utilizzatore perde le relative garanzie.

SISTEMI CERTIFICATI E NON CERTIFICATI

In pratica abbiamo due sistemi:

- il cappotto artigianale che utilizza componenti diversi (isolanti, rasanti, malte adesive ecc.) singolarmente certificati, ma non certificati come sistema;
- il cappotto ETICS certificato come sistema, ossia come kit di montaggio.

In pratica, mentre nel cappotto tradizionale sono garantiti i singoli componenti certificati, ma non è garantita la qualità del sistema complessivo; nel sistema ETICS è garantita la qualità dell'intero sistema costruttivo.

Osservazione

La certificazione ETICS non è comunque scevra da qualche contraddizione, soprattutto per quanto riguarda la sicurezza contro l'incendio. Un kit ETICS è un sistema cappotto che non supera la classe B (prodotto combustibile e **non** infiammabile). Al contrario, gli stessi componenti procurati e applicati separatamente come cappotto artigianale, danno forma a sistemi combustibili e infiammabili.

Come esempio riportiamo il caso del polistirene. Un materiale isolante in classe E (combustibile e infiammabile). Inserito in un sistema ETICS dà forma a cappotti in classe B (non infiammabili). Al contrario, inserito in un cappotto artigianale dà forma a sistemi combustibili e infiammabili.

Tutto questo dovrebbe far riflettere sulla neutralità e validità di certa prassi normativa. E dovrebbe comunque portare all'uso di materiali incombustibili e non infiammabili. Escludendo quei materiali (come il polistirene ecc.) che non danno sufficienti garanzie di sicurezza contro l'evento incendio.

MATERIALI ISOLANTI

7.1. Grandezze prestazionali

Il comportamento di un materiale isolante è rappresentato dai seguenti parametri:

- conduttività termica;
- densità;
- resistenza meccanica;
- coefficiente di resistenza al passaggio del vapore;
- calore specifico;
- capacità termica;
- potere fonoisolante;
- livello del rumore;
- igroscopicità;
- prestazione invernale (resistenza termica);
- prestazione estiva;
- impronta ambientale (o sostenibilità);
- reazione al fuoco.

CONDUTTIVITÀ TERMICA

Simbolo: λ .

Unità di misura: [W/mK].

La conduttività termica è quella indicata dal produttore nelle schede tecniche.

Tanto minore è la conduttività termica, tanto maggiore sarà il contrasto al freddo invernale. E tanto maggiore sarà il livello d'isolamento.

Una stratigrafia perimetrale è funzionale quando la conduttività termica è decrescente verso l'esterno. In tal modo, la parte interna rimane calda d'inverno e fredda d'estate.

DENSITÀ

Simbolo: ρ .

Unità di misura: [kg/m³].

I materiali isolanti sono generalmente leggeri e con scarsa resistenza meccanica. Di solito, all'aumentare della densità aumenta la resistenza meccanica e viceversa.

Un isolante in strutture calpestabili deve possedere un'adeguata resistenza meccanica, ovvero un'adeguata densità.

Un isolante con bassa densità (e scarsa resistenza meccanica) soggetto al calpestio, tende a fessurarsi e a rompersi.

RESISTENZA MECCANICA¹

Simbolo: R_{mec} .

Unità di misura: [kPa].

La resistenza meccanica è principalmente riferita alla resistenza a compressione e alla stabilità di forma. Infatti, i materiali isolanti svolgono la loro funzione coibente per la presenza nella propria massa di aria ferma, la quale, una volta espulsa accidentalmente per compressione, oppure espulsa lentamente per piccole compressioni ripetute, rende il materiale conduttivo.

Pertanto, questa proprietà diventa importante in tutte quelle situazioni dove le sollecitazioni meccaniche sono significative, ovvero durante le operazioni di cantiere quando i pannelli vengono stoccati per impilaggio, oppure in esercizio, nell'isolamento sottopavimento continuamente sottoposto al calpestio ecc.

Ma anche in situazioni meno gravose, come in un cappotto esterno, dove la protezione meccanica è affidata a uno strato sottile di rasatura armata.

FATTORE DI RESISTENZA AL PASSAGGIO DEL VAPORE

Simbolo: μ .

Unità di misura: [1].

È un numero adimensionale che indica quante volte un determinato materiale è più resistente dell'aria al passaggio del vapore.

Ad esempio, se un materiale ha $\mu = 10$, la sua resistenza al vapore è 10 volte maggiore di quella dell'aria. Pertanto, con μ crescente, sarà crescente la resistenza al passaggio del vapore e viceversa.

Con il fattore μ si valuta la **traspirabilità** di un determinato materiale, ad esempio quella di un isolante inserito nell'intercapedine, oppure sul lato esterno di una parete perimetrale, dove è molto probabile la formazione della condensa interstiziale.

CALORE SPECIFICO

Simbolo: c .

Unità di misura: [J/kgK].

Il calore specifico rappresenta il calore necessario per fare variare di un grado la temperatura dell'unità di massa di un corpo materiale.

CAPACITÀ TERMICA (O MASSA TERMICA)

Simbolo: C .

Unità di misura: [J/K].

¹ Di solito nella scheda prodotto viene fornito lo sforzo a compressione [kPa] che determina una deformazione del materiale pari al 10%.

TERMOGRAFIA

8.1. Premessa

Lo scopo di questo capitolo è quello di informare sul tema della termografia. Ma non è quello di formare alla pratica termografica.

Per fare ciò esistono corsi diversi, spesso curati dai costruttori e comunque finalizzati all'accreditamento come operatori termografici di vario livello. Non solo, la pratica si fa sempre su una specifica termocamera, infatti (come nella fotografia) la gran parte dei dispositivi si differenzia tanto nelle impostazioni, quanto nel software ecc.

Infine, lo scopo del capitolo è fare un racconto di massima sulle possibilità d'impiego della termografia come strumento finalizzato alla diagnosi delle patologie dell'involucro.

Per cui, coloro che conoscono il processo termografico possono passare direttamente al capitolo successivo.

8.2. Elementi di teoria

TERMOGRAFIA

La termografia (che significa scrivere con il calore) misura la quantità di radiazione infrarossa emessa da un soggetto.

La termografia produce l'immagine termografica, che rappresenta la distribuzione della temperatura sulla superficie del soggetto; e **non** rappresenta le temperature interne alla massa del medesimo. La termografia è un'indagine non distruttiva (del soggetto). Di fatto è una misura senza contatto con la superficie da valutare.

Questo metodo è utilizzato in diversi settori: edilizia, siderurgia, industria chimica, protezione dell'ambiente, ricerca scientifica, diagnosi medica ecc.

In campo edilizio la termografia può essere utilizzata per rilevare le dispersioni energetiche e lo stato di conservazione dell'involucro.

CORPI RADIANTI

La radiazione infrarossa è una radiazione elettromagnetica compresa tra le microonde e la luce visibile.

In termini di lunghezza d'onda la radiazione infrarossa ha onde più lunghe della luce visibile.

Dal punto di vista numerico abbiamo:

- luce (visibile all'occhio umano): lunghezza d'onda compresa tra $0,7 \mu\text{m}$ e $0,4 \mu\text{m}$;
- radiazione infrarossa (invisibile all'occhio umano): lunghezza d'onda compresa tra $1000 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$.

Ogni corpo con temperatura superiore allo zero assoluto emette spontaneamente raggi infrarossi. Tuttavia, la quantità di raggi infrarossi emessi da un corpo dipende dalla sua temperatura e dalle sue proprietà fisiche.

Temperatura di emissione

La relazione tra la temperatura superficiale di emissione e la potenza termica radiante emessa è data dalla formula di Stefan-Boltzmann (cfr. formula 1.7), dove, all'aumentare della temperatura superficiale del corpo radiante aumenta la potenza dell'irraggiamento infrarosso e viceversa.

TERMOCAMERA

Le termocamere si dividono in due categorie principali:

- radiometriche;
- **non** radiometriche:

Le termocamere radiometriche misurano, calcolano e restituiscono il valore di temperatura assoluto di ogni punto dell'immagine. Al contrario, le termocamere **non** radiometriche forniscono un'immagine termica che mostra le variazioni di temperatura senza darne i valori numerici (né delle temperature, né delle differenze).

L'immagine prodotta da una termocamera radiometrica è costruita su una matrice di un certo numero di pixel per un certo numero di righe. L'elettronica dello strumento rileva rapidamente il valore di energia immagazzinata da ogni singolo pixel che riguarda l'oggetto osservato. Maggiore è il numero di pixel, maggiore è il dettaglio dell'immagine termica prodotta. Le termocamere radiometriche sono in grado di rappresentare la temperatura assoluta rilevata da ciascun pixel. Inoltre, queste termocamere possono essere calibrate per garantire una precisione accurata nelle misurazioni termiche in differenti condizioni di utilizzo.

Struttura di una termocamera

La struttura di una termocamera **radiometrica** è composta dai seguenti elementi:

- obiettivo: utilizzato per la messa a fuoco del soggetto¹;
- sensore: capta l'irraggiamento infrarosso emesso dal soggetto;
- processore di immagini: elabora i dati raccolti dal sensore e configura il termogramma;
- display: visualizza il termogramma.

¹ Nel seguito parleremo tanto di "soggetto" quanto di "oggetto da misurare", intendendo la medesima cosa, ovvero significando il corpo da inquadrare. E parleremo di "operatore" per intendere l'individuo che utilizza la termocamera per fare termogrammi.

STRUMENTI DI MISURA PER LA DIAGNOSI

9.1. Diagnosi termografica

Come detto nel precedente capitolo, la termografia è un processo di misura senza contatto con il soggetto, che si basa sulla valutazione quantitativa dei raggi infrarossi emessi dalla sua superficie. In concreto, è un metodo di misura – non distruttivo – che viene utilizzato in vari ambiti tecnologici e in campo edilizio.

LA TERMOGRAFIA IN EDILIZIA

L'uso della termografia in edilizia è finalizzato all'analisi delle condizioni di funzionamento dell'involucro, dello strato termoisolante, dei ponti termici ecc. In particolare, la termografia mette in evidenza le patologie interne all'involucro. Quelle che nelle fasi iniziali sono invisibili all'esterno. Ed è quindi uno strumento di prevenzione.

La termografia edile dell'involucro viene fatta tanto sulla superficie interna, quanto sulla superficie esterna. Con i seguenti obiettivi:

- controllo dello stato di conservazione della struttura d'involucro finalizzato alla prevenzione del degrado;
- controllo del comportamento energetico dell'involucro finalizzato alla ricerca dei difetti d'isolamento, delle perdite termiche ecc.

In ambito edilizio, alla termografia dell'involucro si deve aggiungere la pratica della termografia del sistema impianti. Che è finalizzata tanto alla verifica della conservazione della performance, quanto alla riqualificazione energetica.

Infine, la modalità di misura dipende dallo scopo, dal tipo di termocamera a disposizione, dalla configurazione dell'edificio e dalle condizioni ambientali.

Osservazione

Come abbiamo visto nel precedente capitolo la termografia misura esclusivamente la temperatura superficiale del soggetto, vale a dire (in ambito edilizio) misura la distribuzione della temperatura superficiale dell'involucro (sia quella esterna che quella interna), che dipende dalle caratteristiche termiche degli strati interni e dalla presenza di eventuali patologie. Infatti, qualunque "disordine" interno all'involucro determina una discontinuità della conduttività e della capacità termica negli strati sottostanti e quindi una disomogeneità nella distribuzione della temperatura superficiale (quella rappresentata nel termogramma).

TERMOGRAFIA ESTERNA

La termografia esterna è in grado di valutare la performance energetica dell'involucro. Vale a dire:

- la termocamera misura la quantità di raggi infrarossi e l'immagine termografica rappresenta la mappatura del flusso termico uscente dall'edificio, ovvero la mappatura delle perdite energetiche, dei difetti di coibentazione, delle discontinuità del materiale isolante, delle infiltrazioni d'aria, dei ponti termici, della presenza o meno di umidità nella massa dell'involucro.

Infine, se si notano delle criticità nelle immagini termografiche esterne (che danno una visione d'insieme), si procede nella produzione di immagini termografiche interne (che danno visioni più puntuali).

Gli obiettivi più frequenti della termografia esterna sono:

- ricerca dei ponti termici;
- ricerca della presenza di umidità e dei relativi danni.

Ricerca dei ponti termici

Un ponte termico è una zona d'involucro che presenta una maggiore dispersione di calore rispetto alle altre parti dell'edificio.

In concreto è una **discontinuità** termica dell'involucro edilizio.

Il metodo di ricerca è regolato dall'esperienza e dalla norma UNI EN 13187 (*Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi – Metodo all'infrarosso*), che fornisce un protocollo per la scoperta e la valutazione dei ponti termici.

Con la termografia si trovano i ponti termici, ossia le discontinuità nascoste nella massa dell'involucro: solette, travi, pilastri in cemento armato ecc.

A differenza di altre rappresentazioni, l'immagine termografica dà un quadro visivo complessivo della presenza dei ponti termici.

Ricerca dell'umidità di risalita

L'umidità di risalita è un fenomeno che può colpire ogni tipo di edificio, dai più datati a quelli di nuova costruzione. Questo fenomeno si verifica quando non è presente (o è danneggiato) lo strato di protezione impermeabile.

L'umidità di risalita attacca e danneggia le strutture in elevazione sfruttando il fenomeno della capillarità.

Con la termografia si possono individuare le zone dove risale l'umidità e danneggia la struttura. Infatti, la presenza di acqua interstiziale aumenta fortemente la conduttività termica e modifica la distribuzione superficiale della temperatura.

Ricerca dell'umidità di condensazione

L'umidità di condensazione si verifica quando il vapore acqueo dell'aria *indoor* viene a contatto con una superficie fredda e condensa, si trasforma in acqua allo stato liquido e bagna la superficie. In questo caso parleremo di condensazione superficiale. Inoltre la superficie è a vista e non è necessario utilizzare l'indagine termografica.

CAPPOTTO TERMICO: CRITICITÀ E PATOLOGIE

10.1. Proprietà di un isolante per un cappotto esterno

Un materiale isolante dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- alta resistenza termica (vale a dire bassa conduttività);
- basso fattore di resistenza alla diffusione del vapore (vale a dire alta permeabilità);
- alto calore specifico (vale a dire alta massa termica);
- incombustibile (oppure combustibile ma non infiammabile).

10.1.1. Alta resistenza termica

Consideriamo una parete a due strati¹:

- strato interno strutturale in muratura;
- strato esterno di materiale isolante (cappotto termico).

Come prima caratteristica il cappotto deve avere una resistenza elevata, vale a dire deve funzionare da schermo finalizzato alla riduzione del flusso termico verso l'esterno.

Per avere una resistenza elevata si agisce su due variabili:

- conduttività termica (che dipende dal materiale);
- spessore (tanto maggiore è lo spessore tanto maggiore sarà la resistenza termica).

In conclusione, la stratificazione costituita dalla muratura (strato interno) e dall'isolante (strato esterno) avrà una resistenza termica crescente verso l'esterno.

Questa resistenza crescente implica una temperatura debolmente decrescente nella muratura e fortemente decrescente nel materiale isolante.

In modo schematico abbiamo il seguente andamento della temperatura all'interno della stratigrafia.

Osservazione

Nella figura 10.1 vediamo l'andamento della temperatura nella parete a due strati. Nella muratura (che si trova dalla parte dell'ambiente *indoor*) la temperatura cala **lentamente** e la struttura rimane essenzialmente calda.

¹ La stratigrafia con soli due strati non è un limite della nostra analisi, ma è semplicemente una semplificazione razionale del problema. Infatti, qualunque stratigrafia con n strati - dotata di un cappotto termico esterno (o interno) - è sempre schematizzabile (per gli scopi di questo testo) come uno strato che rappresenta il cappotto e un altro strato che rappresenta i rimanenti strati della struttura.

Mentre nel cappotto esterno la temperatura cala **bruscamente** e l'isolante rimane essenzialmente freddo, con una temperatura che diventa (verso l'esterno) molto prossima a quella esterna.

Pertanto, il cappotto termico (nei piani verso l'esterno) lavora a basse temperature²; e il vapore che lo attraversa può condensare imbibendo d'umidità il materiale isolante.

Se l'umidità diventa permanente il cappotto termico perde le proprietà isolanti, aumenta fortemente la sua conduttività termica e si forma un ponte termico.

In questo caso la parete si raffredda progressivamente in profondità, l'umidità si propaga verso l'interno e inizia un processo di degrado con formazione di muffa, efflorescenze ecc. Con tutte le negatività, tanto per la struttura quanto per le persone che vivono nell'ambiente *indoor*.

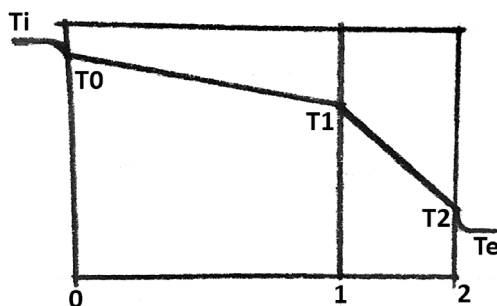


Figura 10.1. Andamento della temperatura nella stratigrafia

LE MUFFE

L'umidità in facciata (prescindendo dall'origine) può determinare delle macchie sulla tinteggiatura che mettono in evidenza l'inizio di un processo di formazione di muffa.

La muffa danneggia il materiale isolante, diminuisce la resistenza termica della parete e si propaga dalla superficie esterna verso l'interno. I funghi che costituiscono la muffa (che sono microrganismi) penetrano nella massa della parete, si nutrono dell'intonaco, lo erodono e creano rigonfiamenti e distacchi.

La muffa si riproduce con le proprie spore che vengono rilasciate in sospensione nell'aria *indoor* e rendono l'ambiente insalubre per le persone.

Gli ambienti interni più sensibili alle muffe sono quelli più freddi, vale a dire quelli meno soleggiati ed esposti a Nord. Inoltre, altre zone critiche sono quelle dove la produzione del vapore è superiore alla media: cucine, bagni, lavanderie ecc.

² È bene ripetere che la migliore soluzione per evitare quanto più possibile la condensazione è il cappotto esterno. Infatti, questa tecnologia attiva eventualmente la condensazione in un punto visibile della superficie esterna. Mentre, il cappotto interno, dove è molto più probabile la condensazione, attiva l'accumulo di umidità in un punto nascosto, ovvero in un punto dell'interfaccia tra l'isolante e la muratura.

LA WEBAPP INCLUSA

Contenuti della WebApp

La **WebApp inclusa** comprende lo *Speciale Testo Unico Edilizia*, una banca dati normativa sempre aggiornata che contiene le seguenti utilità:

- Norme nazionali e regionali;
- Giurisprudenza TAR;
- Giurisprudenza Consiglio di Stato;
- Giurisprudenza Corte di Cassazione;
- Giurisprudenza Corte Costituzionale;
- Documenti ANAC.

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 gestire documenti PDF e Office.

Attivazione della WebApp

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0452_3.php

- 2) Inserire i codici **[A]** e **[B]** riportati nell'ultima pagina del libro e cliccare **[Continua]**;
- 3) Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su www.grafill.it;
- 4) Cliccare sul pulsante **[G-CLOUD]**;
- 5) Cliccare sul pulsante **[Vai alla WebApp]** a fianco del prodotto acquistato;
- 6) Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**;
- 7) Cliccare sulla copertina del libro, presente nello scaffale **Le mie App**, per accedere ai contenuti della WebApp.

