

**Laboratorio di
PROGETTAZIONE 3M**

Modulo di Fisica Tecnica

RICHIAMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

Università degli Studi di Roma Tre

Facoltà d Architettura

A.A. 2009- 2010

I carichi termici e frigoriferi

Per carichi termici si intendono le quantità di calore da fornire/sottrarre, attraverso gli impianti di climatizzazione all'ambiente, per realizzare le condizioni termoigrometriche volute allo scopo di garantire il benessere interno.

La loro determinazione è pertanto il primo passo per poter progettare l'impianto stesso.

Il fatto che attraverso le pareti avvengano degli scambi di calore (“disperso” verso l'esterno in inverno, ed entrante in ambiente in estate), richiede una corretta e mirata progettazione dell'involucro, al fine di ridurre l'entità, ed eventualmente l'inserimento di impianti di climatizzazione.

Flusso di calore attraverso una parete

Nel caso più frequente non si conoscono le temperature delle superfici delle pareti ma quelle dei due fluidi (esterno e interno) che la parete separa.

Il processo consta di tre fasi: il calore si trasmette dal mezzo esterno alla superficie della parete esterna; dalla superficie della parete esterna a quella interna e finalmente, dalla superficie della parete interna all'aria interna. Nella prima e nell'ultima fase non si ha trasmissione del calore per conduzione; infatti, essendo le superfici di tamponamento in contatto con l'aria, avremo convezione e scambio per irraggiamento con i corpi circostanti. Dalla superficie esterna a quella interna, e viceversa, la trasmissione avviene per conduzione.

Scambio termico globale attraverso una parete

Per valutare lo scambio termico globale attraverso una parete si tiene conto dell'insieme dei fenomeni di conduzione, convezione ed irraggiamento attraverso una resistenza complessiva R_{tot} .

Scambio termico globale attraverso una parete

La potenza termica globalmente scambiata attraverso una parete (che separa due ambienti, per es. esterno ed interno, a temp. T_{est} e T_{int}) si calcola con la seguente espressione:

$$Q = \frac{S(T_{est} - T_{int})}{R_{tot}} \quad [\text{W}] \quad \text{ovvero} \quad Q = HA(T_{est} - T_{int})$$

Il coefficiente H è detto
trasmittanza termica
della parete $[\text{W}/\text{m}^2\text{°C}]$

$$R_{tot} = \frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{est}}$$

$$H = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{est}}}$$

INVOLUCRO – TRASMITTANZA PARETI OPACHE

Roma si trova nella zona climatica D

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2010 U (W/m ² K)
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

INVOLUCRO – TRASMITTANZA VETRI E FINESTRE

Valori di trasmittanza massima delle finestre (infissi più vetro W/m²K)			
Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006	Dal 1 gennaio 2008	Dal 1 gennaio 2010
A	5,5	5,0	4,6
B	4,0	3,6	3,0
C	3,3	3,0	2,6
D	3,1	2,8	2,4
E	2,8	2,4	2,2
F	2,4	2,2	2,0

Valori di trasmittanza massima dei vetri W/m²K			
Zona climatica	Dal 1 gennaio 2006	Dal 1 luglio 2008	Dal 1 gennaio 2011
A	5,0	4,5	3,7
B	4,0	3,4	2,7
C	3,0	2,3	2,1
D	2,6	2,1	1,9
E	2,4	1,9	1,7
F	2,1	1,7	1,3

Trasmissione del calore

Le modalità di propagazione del calore sono tre:

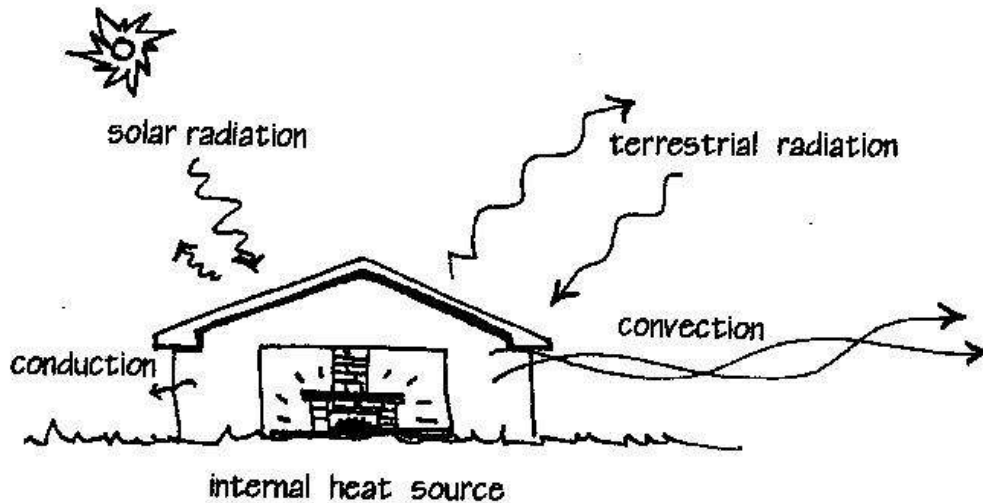
-Conduzione

-Convezione

-Irraggiamento

Trasmissione del calore

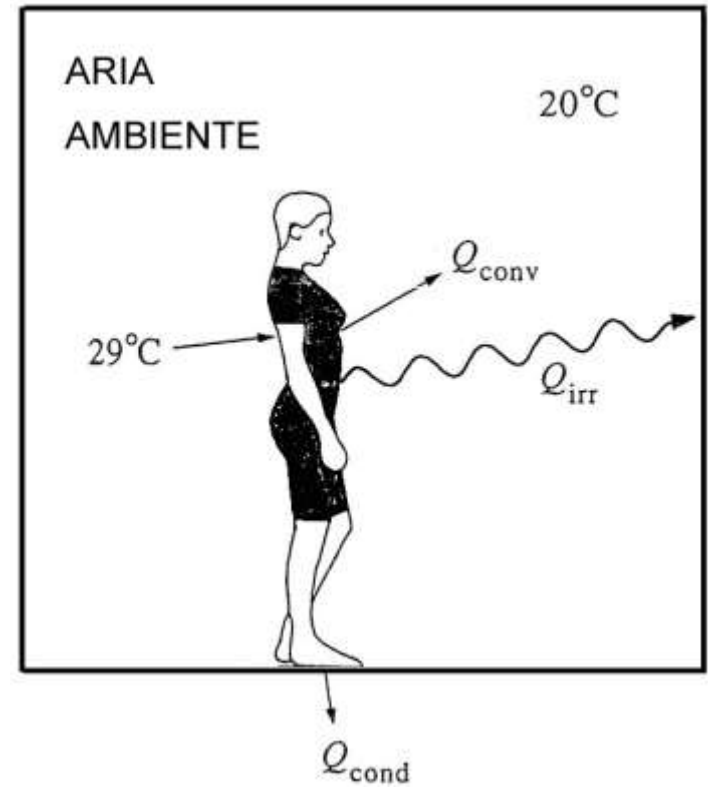
CONDUZIONE: si verifica tra corpi in contatto diretto o all'interno di un mezzo solido, liquido o aeriforme, fra elementi contigui che mantengono inalterata la loro posizione, aventi differente temperatura.



CONVEZIONE : Si verifica quando un corpo solido confina con un fluido, a temperatura diversa (per es. parete-aria); lo scambio termico è associato ad un trasferimento di materia.

IRRAGGIAMENTO: Lo scambio di calore avviene attraverso la radiazione elettromagnetica emessa da un corpo in virtù del fatto che si trova ad una certa temperatura diversa dallo zero assoluto.

Due corpi a temperatura diversa, posti in presenza l'uno dell'altro, scambiano calore per irraggiamento.



Trasmissione del calore

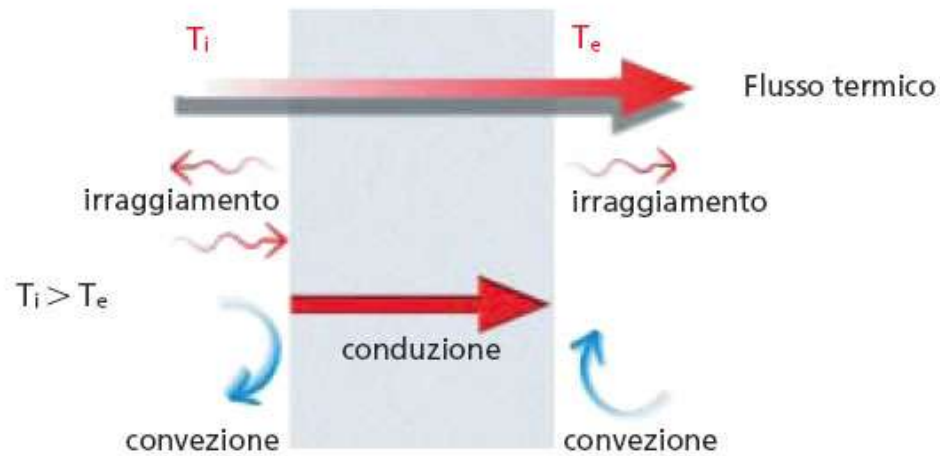
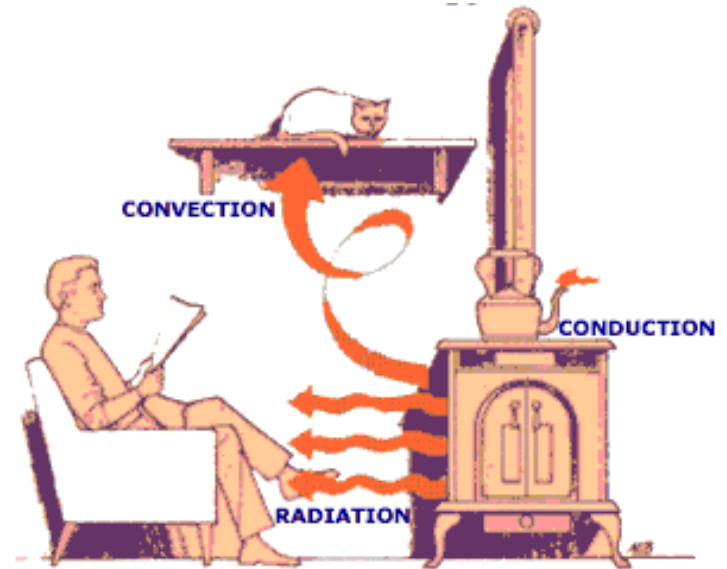


Fig. 1 Trasmissione del calore attraverso una parete per conduzione, convezione e irraggiamento



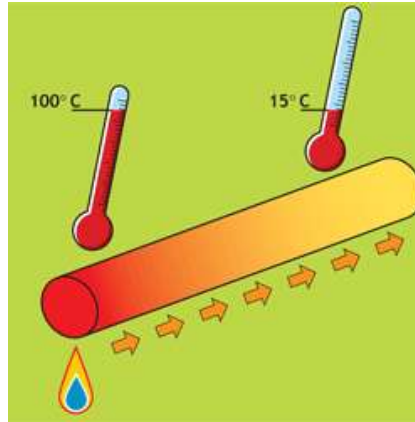
Trasmissione di calore per conduzione

La trasmissione del calore per conduzione si verifica tra corpi in contatto diretto o all'interno di un mezzo solido, liquido o aeriforme, fra elementi contigui che mantengono **inalterata la loro posizione**, aventi **differente temperatura**.

Che all'interno del corpo, o tra i corpi in contatto, la temperatura non sia uniforme è condizione necessaria e sufficiente perché ci sia trasmissione di calore per conduzione.

Non c'è trasporto di materia, lo scambio termico avviene per contatto.

Trasmissione di calore per conduzione



La grandezza che caratterizza un corpo dal punto di vista della trasmissione del calore per conduzione è la

conducibilità termica λ [W/mK].

Tale parametro è un indice della capacità del corpo di trasmettere calore per conduzione.

Trasmissione di calore per conduzione

Metalli - fortemente conduttori – λ alta - dell'ordine delle decine o centinaia di W/mK

Materiali da costruzione (es. mattoni, calcestruzzo, gesso) - mediamente conduttori – λ dell'ordine delle unità di W/mK

Materiali isolanti (lana di vetro, polistirolo, ecc.) - λ dell'ordine dei centesimi di W/mK

In regime stazionario la conducibilità è l'unico parametro che influenza la trasmissione del calore all'interno dei corpi.

In regime variabile nel corpo avvengono variazioni di temperatura nel tempo, con accumulo di calore, la cui entità dipende dal calore specifico e dalla densità del materiale.

Trasmissione di calore per conduzione

Densità e Conduttività dei Materiali Isolanti.

Materiale	Tipo	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]
Lana di vetro	feltri	19	0,050
		22	0,046
	pannelli	55	0,041
		22	0,046
		60	0,040
Lana di roccia	coppelle	60	0,039
		80	0,047
	pannelli	120	0,044
		60	0,044
		190	0,041

Polietilene PEF	tubi	30	0,040
Poliuretano PUR espanso rigido	coppelle	15	0,040
		20	0,039
		40	0,038
Poliuretano PUR espanso flessibile	coppelle	15	0,040
		30	0,039
Poliuretano PUR espanso in situ		30	0,045
Esastomeri espansi FEF		55	0,040
		70	0,040
Resine fenoliche FF espanse	coppelle	30	0,038
Polistirene PSE espanso	coppelle	20	0,045
		30	0,045
Sughero		100	0,065
Vetro cellulare CG		130	0,060
Cotone			0,080
Calcio silicato CS		250	0,065

Valori di conducibilità e densità di alcuni materiali da costruzione

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Laterizi; mattoni pieni, forati, leggeri	600	18-36	0,25
	800		0,30
	1.000		0,36
	1.200		0,43
	1.400		0,50
	1.600		0,59
	1.800		0,72
	2.000		0,90
Legno di abete	450	4,5	0,12
Legno di pino	550	4,5	0,15
Legno di acero	715	4,5	0,18
Legno di quercia	850	4,5	0,22
Mastici per tenute	1.000-1.650	-	0,04
Asfalto	2.100	0	0,70
Asfalto con sabbia	2.300	-	1,15
Bitumi	1.200	0	0,17
Bitumi con sabbia	1.300	0	0,26
Cartone catramato	1.600	-	0,50
Fogli di materiale sintetico	1.100	0,01-0,14	0,23
Argille espanse in granuli da 3 a 25 mm	280	-	0,09
	330	-	0,10
	450	-	0,12
Fibre di cellulosa	32	-	0,058
Perliti espanse in granuli da 0,1 a 2,3 mm	100	-	0,066
Polistiroli espani in granuli	15	-	0,054
Pomici naturali	400	-	0,08
Scorie espanse	600	-	0,13
Vermiculiti espanse in granuli da 0,1 a 12 mm	80	-	0,077
	120	-	0,082
Ciottoli e pietre frantumate	1.500	-	0,7
Ghiaia grossa senza argilla	1.700	-	1,20
Sabbia secca	1.700	-	0,6
Cloruro di polivinile espanso rigido in lastre	30	0,5-1	0,039
	40		0,041
Polietilene espanso non reticolato	30	0,5-1	0,050
	50		0,060
Polietilene espanso reticolato	33	0,5-1	0,048
	50		0,058
Polistirene espanso sinterizzato	10	3,6-9	0,056
	15	2,5-6	0,047
	20	1,8-4,5	0,044
	25	1,8-4,5	0,042
Polistirene espanso per termocompressione	20	-	0,040
	25	-	0,039
	30	-	0,039
	35	-	0,035

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conduttività λ [W/mK]
Calcestruzzi a struttura aperta di argilla espansa	500	18-36	0,16
	600		0,18
	700		0,21
	800		0,24
	900		0,27
	1.000		0,31
Calcestruzzi cellulare da autoclave	400	18-36	0,15
	500		0,17
	600		0,19
	700		0,22
Calcestruzzi di inerti espani di origine vulcanica	800	18-36	0,25
	1.000		0,38
Calcestruzzi di perlite o vermiculite	1.200	18-36	0,47
	1.400		0,58
	250		0,13
Carta e cartone	400	18-36	0,15
Carta e cartone	1.000	1-2	0,16
Cartone bitumato	1.100	0,06-0,09	0,23
Cartongesso in lastre	900	23	0,21
Cartone ondulato	100	-	0,065
Fibre di vetro, pannelli rigidi	100	150	0,038
Fibre minerali, feltri resinati	30	150	0,045
Fibre minerali, pannelli semi rigidi	35	150	0,044
	40		0,042
	55		0,040
Fibre minerali, pannelli rigidi	80	150	0,039
	100		0,038
	125		0,038
Fibre minerali, pannelli a fibre orientate Fibre minerali, feltri trapuntati	100	150	0,048
	60		0,044
	80		0,044
	100		0,045
Fibre minerali, feltri da loppe di altoforno	40	150	0,054
Fibre minerali, pannelli da loppe di altoforno	40	150	0,054
	60		0,048
	80		0,046
	100		0,046
	150		0,048
Malte di gesso per intonaci	600	18	0,29
	750		0,35
	900		0,41
	1.000		0,47
Intonaci di gesso puro	1.200	18	0,58
	1.400		0,70
Intonaci di calce e gesso	1.800	5-12	0,90
	2.000		1,40
Malte di calce o di calce e cemento	1.800	5-12	0,90
Malte di cemento	2.000	5-12	1,40

Densità e conduttività dei materiali da costruzione (segue)

Lab3M - Modulo di Fisica Tecnica

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conducibilità λ [W/mK]
Polistirene espanso estruso senza pelle	30	0,5-2,2	0,041
	50		0,034
Poliuretani in lastre da blocchi	25	1-2	0,034
	32		0,032
	40		0,032
	50		0,032
Polisocianurati in lastre da blocchi	32	1-2	0,032
	40		0,032
Poliuretani espansi in situ	37	1,8-6	0,035
Resine fenoliche in lastre	35	3,6-6	0,041
	60		0,044
	80		0,046
Resine ureiche espanso in situ	8	30-140	0,057
	12		0,054
	15		0,051
	30		0,048
Piastrelle di porcellana	2.300	-	1,0
Vetro cellulare espanso	130	0	0,055
	150		0,060
	180		0,066
Vetro da finestre	2.500	0	1,0
Celluloide	1.350	-	0,35
Policarbonato PC	1.150	-	0,23
Politetrafluoroetilene PTFE	2.200	-	0,24
Polietilene PE	950	-	0,35
Policloruro di vinile PVC	1.400	-	0,16
Polistirene PS	1.100	-	0,17
Resine epossidiche	1.200	-	0,20
Resine poliestere	2.000	-	0,50
Acciaio	7.800	-	52
Acciaio inox	8.000	-	17
Argento	10.500	-	420
Alluminio	2.700	-	220
Leghe di alluminio	2.800	-	160
Bronzo	8.700	-	65
Ferro	7.870	-	80
Ghisa	7.200	-	50
Nichel	8.800	-	65
Ottone	8.400	-	110
Piombo	11.300	-	35
Rame	8.900	-	380
Zinco	7.100	-	110
Pannelli a base di perlite espansa	190	26	0,071
Pannelli di fibre di legno	800	2,8	0,14
	900		0,15
	1.000		0,18

Materiale	Densità ρ [kg/m ³]	Permeabilità $\delta \cdot 10^{12}$ [kg/msPa]	Conducibilità λ [W/mK]	
Pannelli di lana di legno	300	36-90	0,085	
	400		0,097	
	500		0,11	
Pannelli di spaccato di legno	400	-	0,12	
	500		0,14	
	600		0,16	
Pannelli di trucioli di legno pressati	500	1,8-3,6	0,10	
	700		0,15	
Pannelli di trucioli di legno estrusi	700	9	0,17	
Pannelli di sughero espanso puro	130	6,7-10	0,045	
Pannelli di sughero espanso con leganti	90	6,7-10	0,043	
	130		4-21	0,045
	200		4-21	0,052
Ardesia	2.700	-	2,0	
Basalto	2.800	-	3,5	
Calcere	2.100	-	1,6	
	2.700		2,9	
	2.800		3,5	
Dolomite	2.700	-	1,8	
Granito	2.500	-	3,2	
	3.000	-	4,1	
Lava	2.200	-	2,9	
Marmo	2.700	-	3,0	
Porfido	2.200	-	2,9	
Tufo	1.500	-	0,63	
	2.300		1,7	

! La conducibilità dell'aria è pari a circa 0,025 W/m °C

Densità e conducibilità dei materiali da costruzione (segue)

Trasmissione di calore per conduzione

Conduzione termica in regime stazionario

Si consideri una parete piana, costituita di materiale omogeneo ed isotropo, di conducibilità λ , spessore assegnato s , infinitamente estesa, le cui superfici siano a temperatura uniforme e costante nel tempo. Siano T_1 e $T_2 < T_1$ le temperature delle facce.

Si ha che il flusso termico q per unità di superficie (q.tà di calore che attraversa la parete per u. di superficie nell'unità di tempo) risulta:

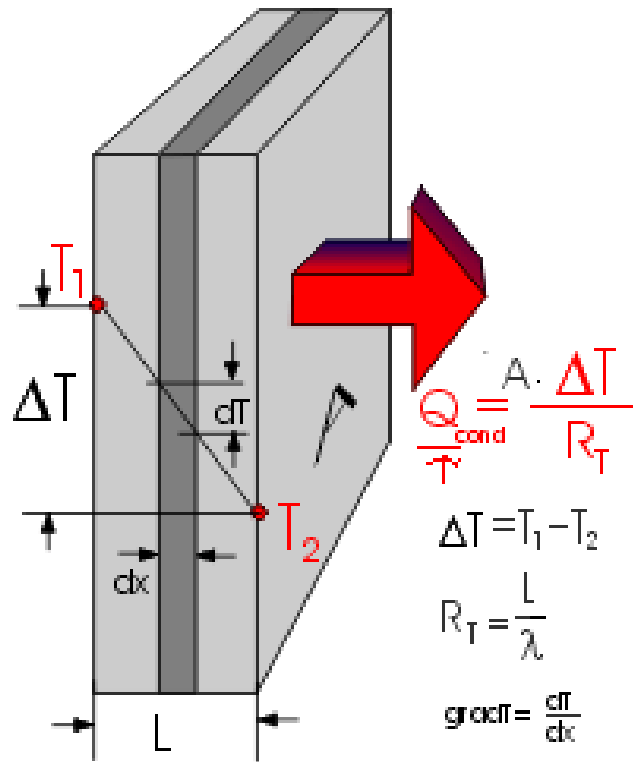
$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \quad [\text{W/m}^2]$$

Per una parete di superficie S :

$$Q = \frac{\lambda}{s} S (T_1 - T_2) = \frac{S(T_1 - T_2)}{\frac{s}{\lambda}} \quad [\text{W}] \quad \underline{\underline{s/\lambda \text{ è la resistenza termica}}}$$

Trasmissione di calore per conduzione

Nel regime stazionario l'andamento della temperatura è lineare: è una linea retta tra due temperature T_1 e T_2 .



Trasmissione di calore per conduzione

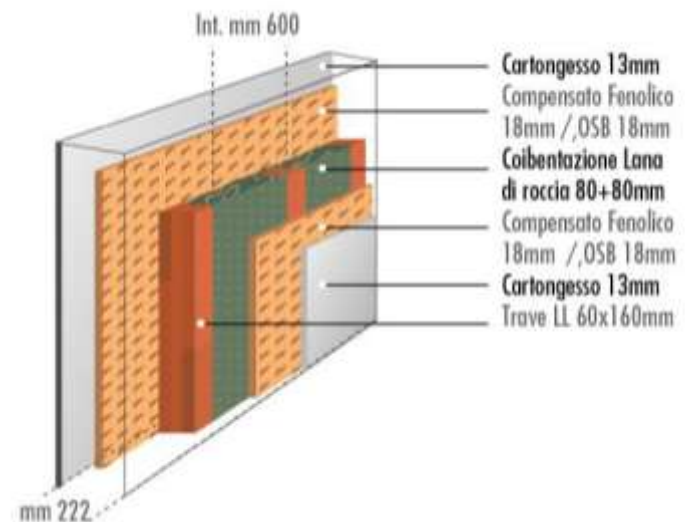
Il flusso termico [W] può essere espresso in termini di resistenza termica della parete:

$$Q = \frac{\lambda}{s} S(T_1 - T_2) = \frac{S(T_1 - T_2)}{\frac{s}{\lambda}} = \frac{S(T_1 - T_2)}{R}$$

Nel caso in cui la parete sia composta da più strati, la quantità di calore globalmente scambiata attraverso una parete si calcola tenendo conto di una resistenza complessiva R_{tot} , con la seguente espressione:

$$Q = \frac{S(T_1 - T_2)}{R_{tot}}$$

$$R_{tot} = \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k}$$

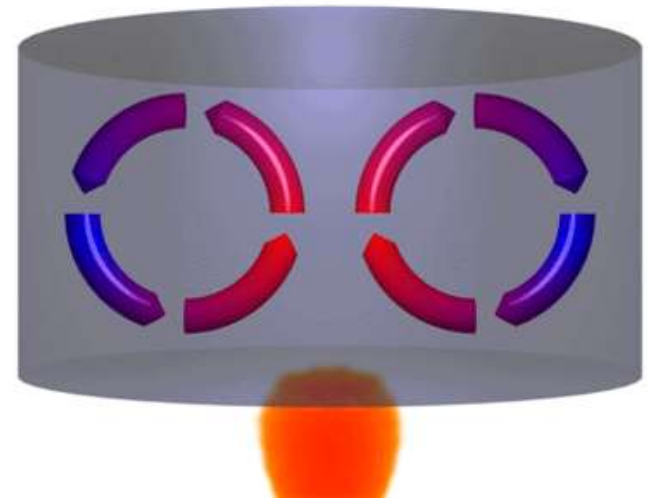


Trasmissione di calore per convezione

Si verifica quando un corpo solido confina con un fluido, a temperatura diversa (per es. parete-aria); lo scambio termico è associato ad un trasferimento di materia.

La convezione è una forma di trasmissione del calore caratteristica dei fluidi, tipica dei gas e dei liquidi.

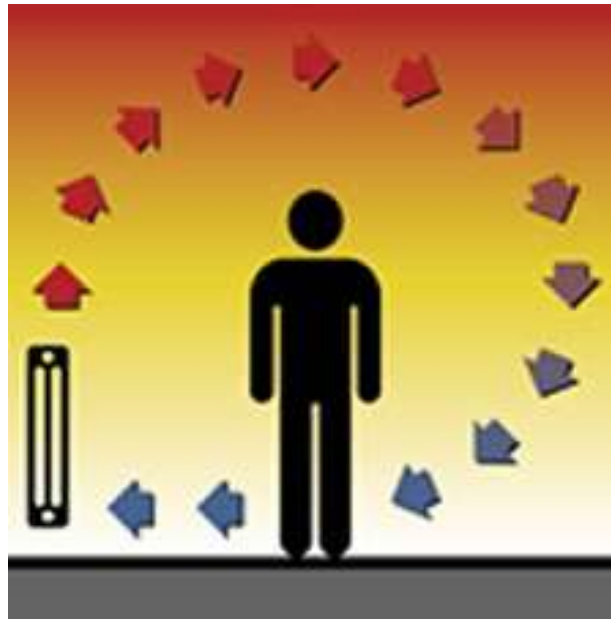
Dato che le variazioni della temperatura sono accompagnate da dilatazioni e contrazioni (variazioni di densità) vi saranno dei movimenti, all'interno della massa fluida.



Trasmissione di calore per convezione

Le particelle di fluido, scaldandosi e raffreddandosi, cambiano la loro densità (diventano meno dense o più dense), e si muovono lasciando il posto alle altre particelle.

Le particelle fluide sono il mezzo di trasmissione del calore.



Trasmissione di calore per convezione

L'esperienza dimostra che la trasmissione del calore per convezione dipende dalla temperatura del fluido e del corpo con cui questo è in contatto, dalla natura del fluido, dalla forma e posizione del corpo.

La grandezza che caratterizza l'entità dello scambio termico di calore per convezione prende il nome di coefficiente di convezione, h_c , [W/m²K].

Considerando una parete a temperatura T_p ed essendo T_A la temperatura del fluido indisturbato (per es. aria), la quantità di calore trasmessa dalla parete di superficie S al fluido risulta:

$$Q = h_c S (T_p - T_A)$$

Il coefficiente di convezione h_c dipende dalle proprietà termofisiche del fluido, dalle condizioni di moto, dalla geometria del sistema.

Trasmissione di calore per convezione

h_{conv} dipende dai seguenti parametri:

$$h_{\text{conv}} = h(\lambda, \alpha, \rho, \mu, c, \theta, u, l)$$

λ	Conducibilità termica
α	Coefficiente di dilatazione cubica
ρ	Densità
μ	Viscosità dinamica
c	Calore specifico
θ	<i>diff. di temp. ($T_P - T_A$)</i>
U	velocità
l	Dimensione caratteristica

Trasmissione di calore per convezione

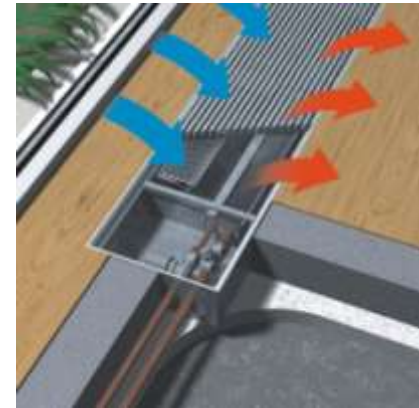
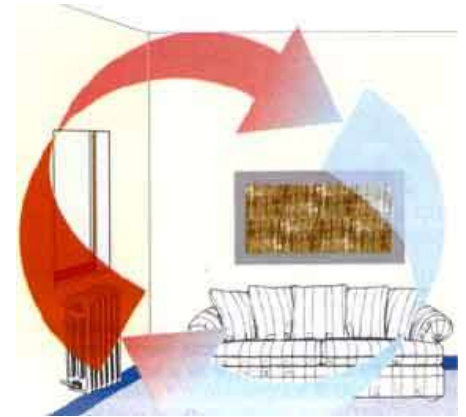
Convezione naturale:

Il fluido si muove soltanto in conseguenza della differenza di temperatura tra corpo/parete e fluido.

In questo caso, se viene meno la differenza di temperatura tra parete e fluido, il fluido raggiunge uno stato di quiete.

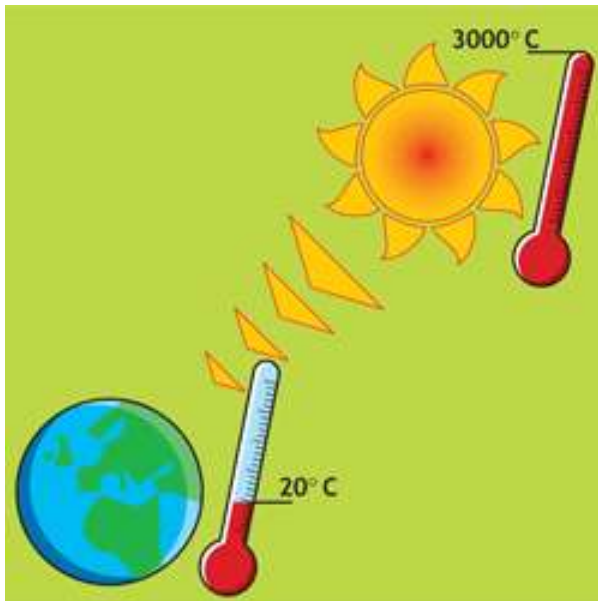
Convezione forzata:

Il movimento del fluido è originato dall'azione di un mezzo meccanico, come un ventilatore o una pompa, o da una azione naturale ma indipendente dal fenomeno della trasmissione di calore (per es. vento)



Trasmissione di calore per irraggiamento

Ogni corpo emette e assorbe energia sotto forma di onde elettromagnetiche: lo scambio di calore avviene attraverso la radiazione elettromagnetica emessa da un corpo in virtù del fatto che si trova ad una certa temperatura diversa dallo zero assoluto.



Trasmissione di calore per irraggiamento

In assenza di altri fenomeni, all'emissione di energia radiante del corpo, corrisponde un suo abbassamento di temperatura, come se il corpo avesse ceduto calore.

Se il fascio di energia radiante emessa incide su un altro corpo, in questo si verifica un incremento di temperatura.

Due corpi a temperatura diversa, posti in presenza l'uno dell'altro, scambiano calore per irraggiamento.



Trasmissione di calore per irraggiamento

Questa forma di trasmissione di energia non ha bisogno del mezzo di trasmissione come accade negli altri casi.

La velocità di trasmissione dell'energia radiante nel vuoto è circa 300.000 Km/sec.

Trasmissione di calore per irraggiamento

Ogni corpo emette delle radiazioni con diversa lunghezza d'onda che possono o meno risultare visibili all'uomo.

L'intervallo di lunghezze d'onda nel quale un corpo emette radiazioni, è detto spettro di radiazione del corpo stesso.

Tale intervallo dipende dalla natura del corpo, e dalla sua temperatura.

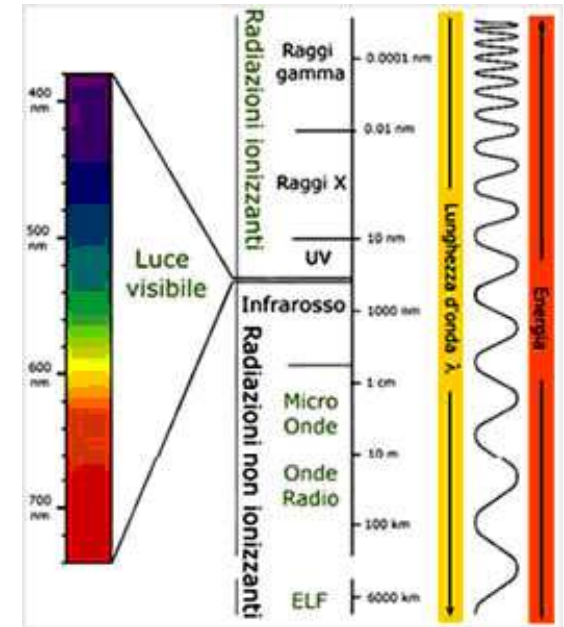


Figura 41.7. Spettro continuo.



Figura 41.8. Spettro di righe. Righe di emissione dell'idrogeno atomico contenuto in un tubo di vetro entro cui si fa passare una scarica elettrica.

Trasmissione di calore per irraggiamento

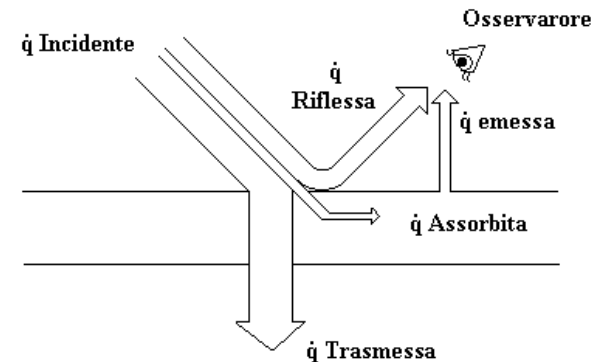
Quando la radiazione emessa, attraversando un mezzo sufficientemente trasparente, incide su un altro corpo, può venire in parte rinvia, in parte assorbita ed in parte trasmessa all'interno.

Ogni corpo è capace di assorbire, riflettere o trasmettere la radiazione incidente. Le proprietà dei corpi che indicano il loro comportamento nei confronti dell'energia raggiante incidente si definiscono:

a = coefficiente di assorbimento

r = coefficiente di riflessione

t = coefficiente di trasmissione



Trasmissione di calore per irraggiamento

Se I è l'energia raggiante incidente, vale:

$$I = I_a + I_r + I_t$$

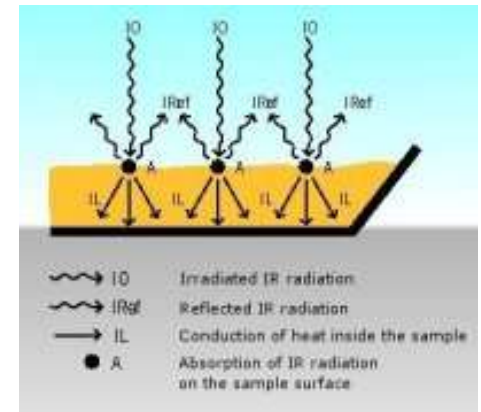
quindi

$$a + r + t = 1$$

a , r , t sono funzione della lung. d'onda della radiazione incidente, della temperatura del corpo e dalla sua natura.

Questo si esprime dicendo che i corpi hanno un comportamento selettivo.

Se a è uguale a 1, in tutto lo spettro, si chiama corpo nero o radiatore integrale.



Trasmissione di calore per irraggiamento

La potenza emessa da un corpo reale per radiazione dipende dalla sua temperatura (alla quarta potenza) e da una proprietà che si chiama emissività.

L'emissività di un corpo è generalmente diversa alle varie lunghezze d'onda (e temperature del corpo).

Ad ogni lunghezza d'onda, il valore numerico dell'emissività coincide con quello del coefficiente di assorbimento (principio di Kirchoff).

Irraggiamento

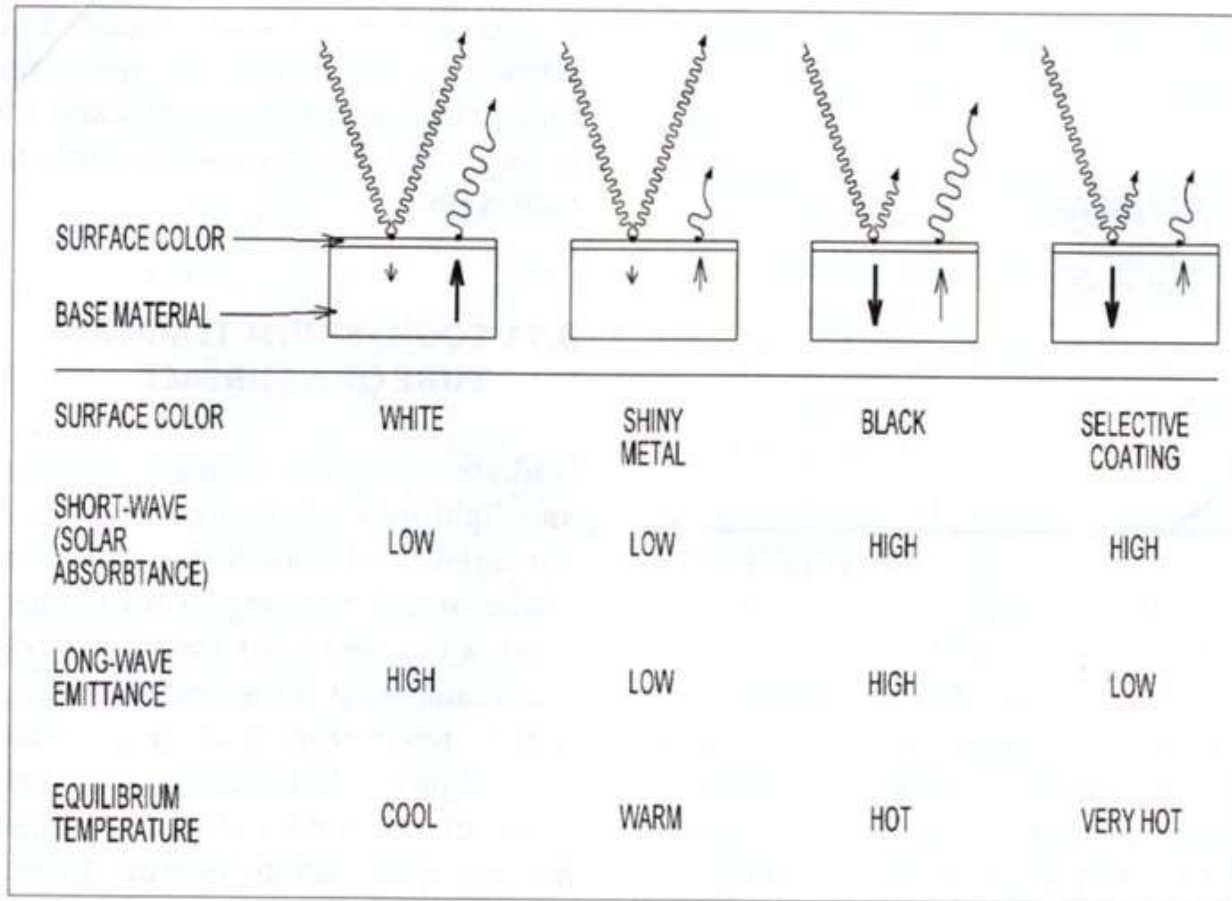


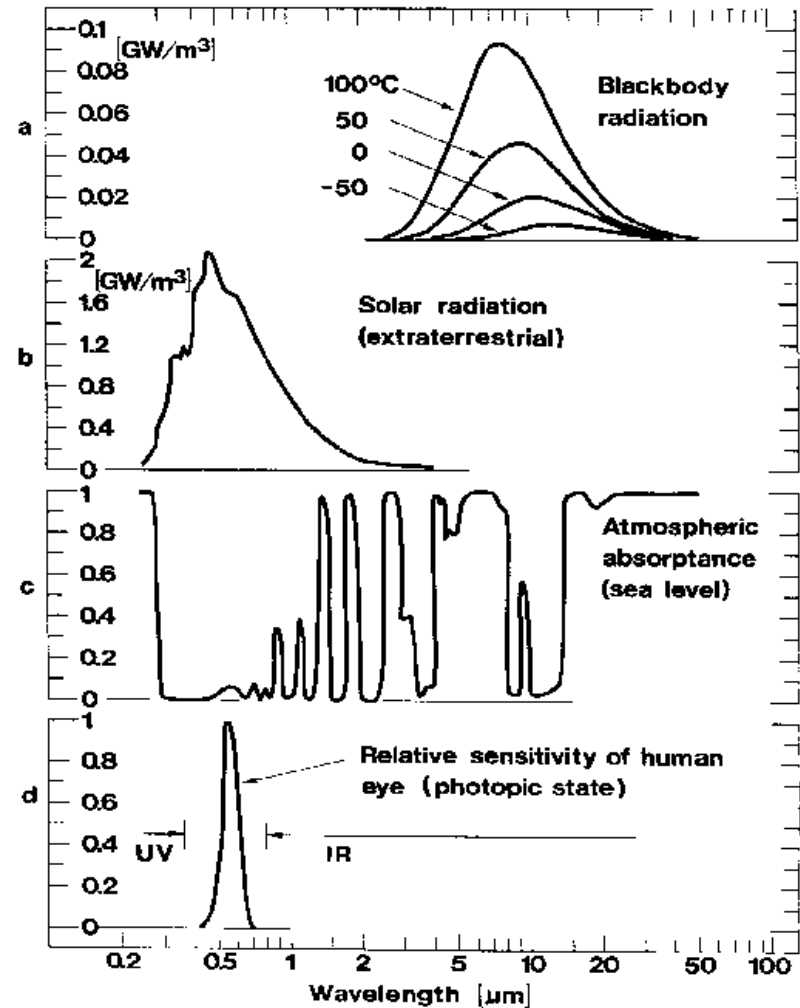
Figure 3.11 The equilibrium temperature is a consequence of both the absorptance and the emittance characteristics of a material.

Irraggiamento

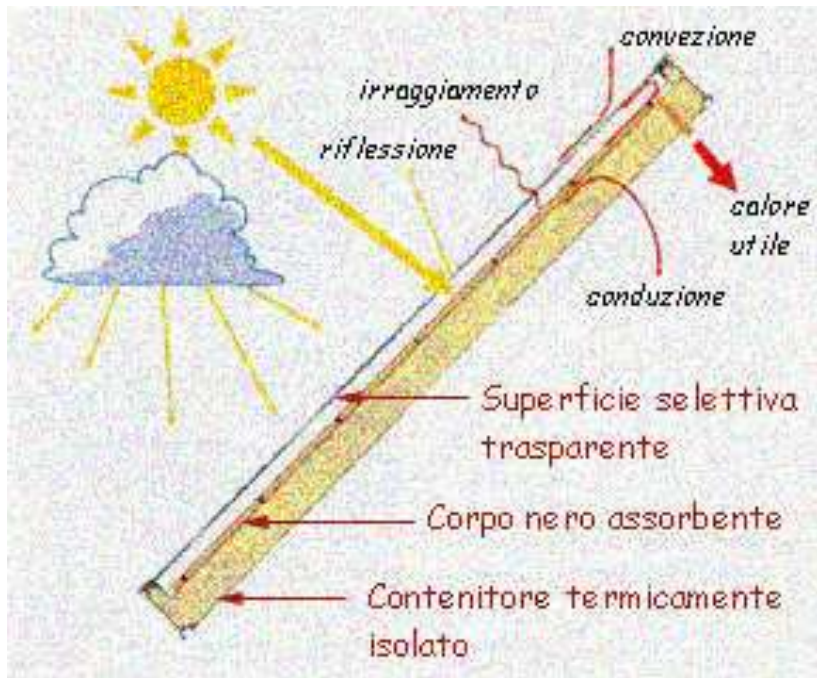
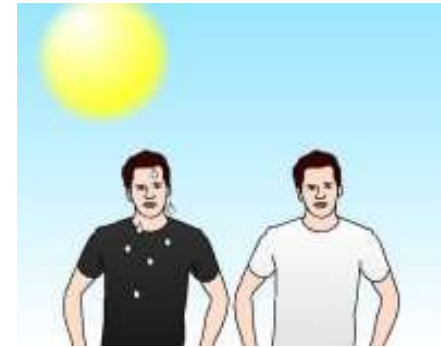
Materiale	Coeff. di assorbim. solare α_s	Emissività ϵ a 300 K
Alluminio		
Lucido	0.09	0.03
Anodizzato	0.14	0.84
Rivestito al quarzo	0.11	0.37
In foglio	0.15	0.05
Mattone, rosso	0.63	0.93
Calcestruzzo	0.60	0.88
Foglio di metallo galvanizzato		
Pulito, nuovo	0.65	0.13
Ossidato, atmosferico	0.80	0.28
Vetro, spessore 3.2 mm		
In polvere o temprato		
A basso tenore di ferro		
Marmo, leggermente non bianco (non riflettivo)	0.40	0.88
Metallo, piastra		
Solfuro nero	0.92	0.10
Ossido di cobalto nero	0.93	0.30
Ossido di nichel nero	0.92	0.08
Cromo nero	0.87	0.09
Vernici		
Nera	0.98	0.98
Bianca, acrilica	0.26	0.90
Bianca, ossido di zinco	0.16	0.93
Carta bianca	0.27	0.83
Plexiglas, spessore 3.2 mm		
Tegole di porcellana, bianche	0.26	0.85
Tegole per tetto, rosso vivo		
Superficie secca	0.65	0.85
Superficie umida	0.88	0.91
Sabbia, secca		
Bianco brillante	0.52	0.82
Rosso opaco	0.73	0.86
Neve		
In particelle fini, fresca	0.13	0.82
Granuli di ghiaccio	0.33	0.89
Acciaio		
Finito a specchio	0.41	0.05
Molto arrugginito	0.89	0.92
Pietra (leggermente rosa)	0.65	0.87
Legno	0.59	0.90

Trasmissione di calore per irraggiamento

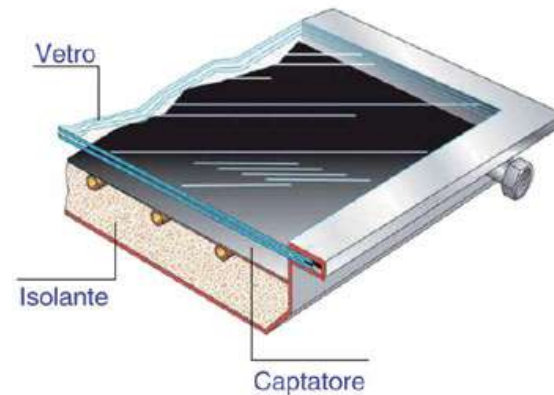
- a) Spettri di emissione del corpo nero a varie temperature da -50°C a 100°C
- b) Spettro di emissione del sole
- c) Spettro di assorbimento dell'atmosfera
- d) Andamento del coefficiente di Visibilità dell'occhio umano



Trasmissione di calore per irraggiamento



COLLETTORE SOLARE PIANO



Trasmissione del calore per irraggiamento

Quando due o più corpi si trovano in presenza l'uno degli altri, oltre che la valutazione della potenza emessa da ciascuno, interessa capire gli scambi termici tra loro.

La quantità di calore che viene scambiata tra i corpi dipende dalla geometria del sistema, dalle superfici dei corpi, dalle proprietà e dalla natura dei corpi (assorbimento, emissività), e dalla differenza tra le quarte potenze delle temperature dei corpi.

Tale studio è piuttosto complesso, esistono tuttavia situazioni in cui si possono introdurre delle semplificazioni.

Trasmissione del calore per irraggiamento

In particolare interessa la ipotesi che il valore della temperatura di ciascuno dei corpi interessati allo scambio termico sia sufficientemente contenuta (intorno ai 300K), e che le temperature dei corpi interessati allo scambio termico siano abbastanza vicine tra loro.

Tali ipotesi sono generalmente verificate nei fenomeni di scambio termico per radiazione che interessano gli edifici (involucro-altri corpi esterni e interni)

Trasmissione del calore per irraggiamento

In particolare, in tali condizioni si può adottare una approssimazione lineare, e la quantità di calore e il flusso termico scambiati si possono esprimere con una espressione simile a quella dello scambio per conduzione e convezione, in cui Q è proporzionale alla differenza tra le temperature, del tipo:

$$Q_{12} = h_R S (T_1 - T_2) \quad [\text{W}]$$

$$\frac{Q_{12}}{S} = q_{12} = h_R (T_1 - T_2) \quad [\text{W/mq}]$$

Dove si è introdotto il coefficiente di irraggiamento:

$$h_R \cong \sigma_0 K T_M^3 \quad [\text{W/mq K}]$$

Trasmissione di calore per irraggiamento

Nel caso di una parete, si può schematizzare l'insieme delle temperature dei corpi dell'ambiente circostante la parete stessa mediante la temperatura media radiante T_{MR} (temperatura di un ambiente fittizio termicamente uniforme che scambierebbe con la parete la stessa potenza termica radiante scambiata nell'ambiente reale)

$$T_{MR} = \sqrt[4]{\sum_i F_i T_i^4}$$
$$q = h_R (T_P - T_{MR})$$

Se la T_{MR} approssima quella dell'aria, si può scrivere

$$q = h_R (T_P - T_A)$$

Pareti

In sintesi, nel caso di una parete monostrato, omogenea ed isotropa, e trascurando gli effetti di bordo, la potenza termica (quantità di calore per unità di tempo) scambiata dovuta ai vari effetti risulta:

Conduzione:

$$Q = S \frac{\lambda}{s} \Delta T$$

$$Q = S \frac{\Delta T}{R_{cond}}$$

$$R_{cond} = \frac{s}{\lambda}$$

λ Conducibilità termica

s spessore

S Area

Convezione:

$$Q = h_C S (T_P - T_A)$$

$$Q = \frac{S(T_P - T_A)}{R_{conv}}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_C}$$

Irraggiamento:

$$Q = h_R S (T_P - T_A)$$

$$Q = \frac{S(T_P - T_A)}{R_{irr}}$$

$$R_{irr} = \frac{1}{h_R}$$

Adduzione = Convezione + irraggiamento

Nello studio delle pareti si considerano insieme convezione e irraggiamento, attraverso un unico coefficiente di proporzionalità h di “adduzione”, $h=h_C+h_R$, diverso per le superfici esterna ed interna della parete.

Quindi:

$$Q = Sh_I (T_{\text{int}} - T_{P\text{int}}) = Sh_E (T_{P\text{est}} - T_{\text{est}})$$

Con:

inverno (UNI 10344)

$$h_I = 7,7W / m^2 K$$

$$h_E = 25W / m^2 K$$

estate (UNI 10375)

$$h_I = 8,2W / m^2 K$$

$$h_E = 14,5W / m^2 K$$

Per le vetrate i valori esatti tengono conto del valore di alcune proprietà (emissività) del vetro.

Scambio termico globale attraverso una parete

Si arriva così alla espressione dello scambio termico globale

$$Q = \frac{S(T_{est} - T_{int})}{R_{tot}}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{est}}$$

Il coefficiente H:

$$H = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{est}}}$$

è detto Trasmittanza della parete.

Scambio termico globale attraverso una parete

$$R_{tot} = \frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_{est}}$$

Nel caso in cui uno strato non sia omogeneo, e non sia possibile individuare una conducibilità del materiale (es. forati, o intercapedine di spessore variabile), si utilizza una grandezza detta **conduttanza termica**.

La resistenza termica di questi strati vale $R_i = 1/C$.

Tale dato è usualmente tabellato, in funzione dei differenti spessori e tipi di materiale es. mattoni. (Norma UNI10355).

Resistenza termica di intercapedini [m^2C/W]

Quando all'interno di un componente edilizio è presente uno strato costituito da una intercapedine di aria, nel calcolo della trasmittanza del componente stesso si può tenere conto direttamente della resistenza termica dell'intercapedine.

Come si osserva dalle tabelle, tale valore è diverso, anche a parità di spessore dell'intercapedine, se l'intercapedine è verticale (all'interno di una parete) ovvero orizzontale (all'interno di un solaio o di una copertura), e in questo caso, i valori sono diversi anche in base alla direzione del flusso termico.

Interc. Verticale

Spes. strato d'aria mm	Direzione del flusso termico	
	orizzontale	v
0	0,00	
5	0,11	
7	0,13	
10	0,15	
15	0,17	
25	0,18	
50	0,18	
100	0,18	
300	0,18	

Interc. Orizzontale

Spes. strato d'aria mm	micro	
	verso l'alto	verso il basso
0	0,00	0,00
5	0,11	0,11
7	0,13	0,13
10	0,15	0,15
15	0,16	0,17
25	0,16	0,18
50	0,16	0,21
100	0,16	0,22
300	0,16	0,23

Resistenza termica di intercapedini e strati di aria

La resistenza termica dovuta alla presenza di strati d'aria (intercapedine, ma anche l'aria che lambisce le superfici limite delle pareti, solai, ecc.) varia in base alla direzione del flusso termico.

Infatti se il flusso termico è ascendente, e quindi la temperatura decresce dal basso verso l'alto (come ad esempio accade in inverno nei solai di copertura, o in estate nei solai di base, su locali non condizionati (tipo atri, androni, o pilotis), si è in presenza di moti convettivi dell'aria (la massa di aria più fredda, e quindi più pesante, che si trova più in alto, per effetto della gravità tende a muoversi verso il basso), e questo incide sul valore della resistenza termica, che diminuisce al crescere del coeff. di convezione. Questa ultima, a parità di condizioni (spessore dell'intercapedine) sarà pertanto più alta nel caso opposto di flusso termico discendente, in presenza del quale i moti convettivi sono di entità minore oppure assenti.

Nel caso di intercapedini quanto detto vale per spessori superiori ai 15-20mm, poichè per valori inferiori comunque l'aria è praticamente ferma, e quindi la sua resistenza è solo di tipo conduttivo (dipende dalla conducibilità dell'aria, non c'è movimento), ed uguale in tutti i casi.

TRASMITTANZA H

$$H = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_k \frac{s_k}{\lambda_k} + \sum_i R_i + \frac{1}{h_{est}}} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

I ponti termici

Nel calcolo delle dispersioni occorre tenere conto di eventuali dispersioni attraverso discontinuità di forma geometrica e di materiale presenti nell'involucro.

Tali discontinuità creano delle vie preferenziali alla propagazione del calore.

Un calcolo semplificato consente di valutare l'influenza dei ponti termici mediante una maggiorazione % (v. tabella) dei carichi termici calcolati attraverso le superfici interessate.

Prospetto A.9 - Maggiorazioni percentuali relative alla presenza dei ponti termici [%]

Descrizione della struttura	Maggiorazione(°)
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto senza aggetti/balconi)	0
Parete con isolamento dall'esterno (a cappotto con aggetti/balconi)	5
Parete omogenea in mattoni pieni o in pietra	5
Parete a cassa vuota con mattoni forati	10
Struttura isolata	20
Pannello prefabbricato in cls	30

I ponti termici

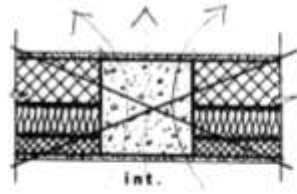


Fig. 11A-1: Pilastro di facciata: ponte termico non corretto.

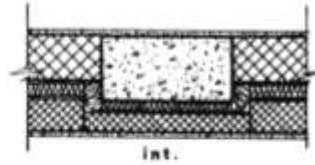


Fig. 11A-2: Pilastro di facciata: ponte termico corretto mediante variazione di forma del pilastro e inserimento di isolante.

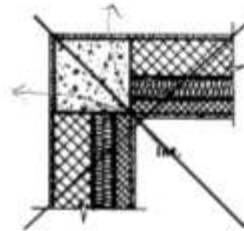


Fig. 10A-1: Pilastro d'angolo: ponte termico non corretto.

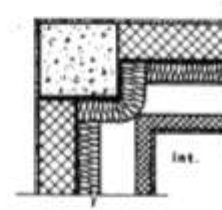


Fig. 10A-2: Pilastro d'angolo: correzione del ponte termico.

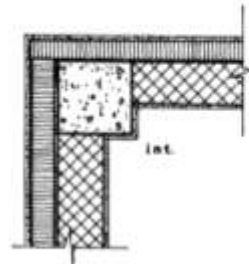


Fig. 10A-3: Pilastro d'angolo: correzione del ponte termico con isolamento dall'esterno in fibre minerali orientate e piccolissimo spazio profitti da lavori in finisci.

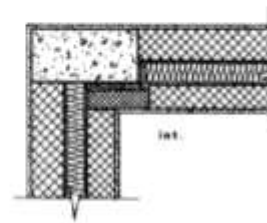


Fig. 10A-4: Pilastro d'angolo: correzione del ponte termico mediante variazione di forma del pilastro e impiego di materiale isolante.

Comportamento delle superfici vetrate

Vetrocamera:

Sono costituiti da due vetri semplici, con interposta una sottile intercapedine di aria o gas. La presenza di più strati riduce, rispetto al caso di vetro semplice, il flusso termico trasmesso (trasmittanza più bassa) essendo ovviamente maggiore la resistenza.

Vetro basso-emissivo:

In un vetro basso emissivo viene notevolmente ridotta la quota parte di flusso termico scambiata per irraggiamento dalla superficie del vetro; infatti, la sua proprietà di bassa emissività fa sì che il coefficiente di irraggiamento sia ridotto (e quindi quello di adduzione), con conseguente riduzione della trasmittanza.

Trasmittanza delle Superfici Vetrate.

				TELAIO									
				legno o legno-Al spessore del telaio			plastica profili PVC			metallo CON taglio termico distanza tra le sezioni di Al			metallo SENZA taglio t.
				130 mm	70 mm	30 mm	3 camere	2 camere	1 camere	14 mm	6 mm	2 mm	
				Uf, W/m ² K									
vetro	tipo	s mm	Ug W/m ² K	1,2	1,7	2,3	1,8	2,0	2,4	2,6	3,2	3,8	7
singolo	chiaro	6	5,7	4,3	4,5	4,6	4,6	4,6	4,7	4,8	5,0	5,2	6,1
doppio	chiaro+aria	4-6-4	3,3	2,7	2,9	3,0	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,6	4,5
		4-12-4	2,9	2,5	2,6	2,8	2,7	2,7	2,8	3,0	3,1	3,3	4,2
	chiaro+argon	4-6-4	3,0	2,6	2,7	2,9	2,8	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	4,3
		4-12-4	2,7	2,3	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2	4,1
	b.e.+aria	4-6-4	2,7	2,4	2,5	2,7	2,6	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	4,1
		4-12-4	2,0	1,9	2,1	2,2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	3,7
	b.e.+argon	4-6-4	2,3	2,1	2,2	2,4	2,3	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9	3,9
		4-12-4	1,7	1,7	1,9	2,0	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	3,5
triplo	chiaro+aria	4-6-4-6-4	2,3	2,1	2,2	2,4	2,3	2,3	2,4	2,6	2,7	2,9	3,8
	chiaro+argon	4-6-4-6-4	2,1	1,9	2,0	2,2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	3,7
	b.e.+aria	4-6-4-6-4	1,8	1,7	1,9	2,0	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,6	3,5
	b.e.+argon	4-6-4-6-4	1,4	1,5	1,6	1,8	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	3,3

Nota: b.e. sta per vetro a bassa emissività, $\epsilon = 0,2$

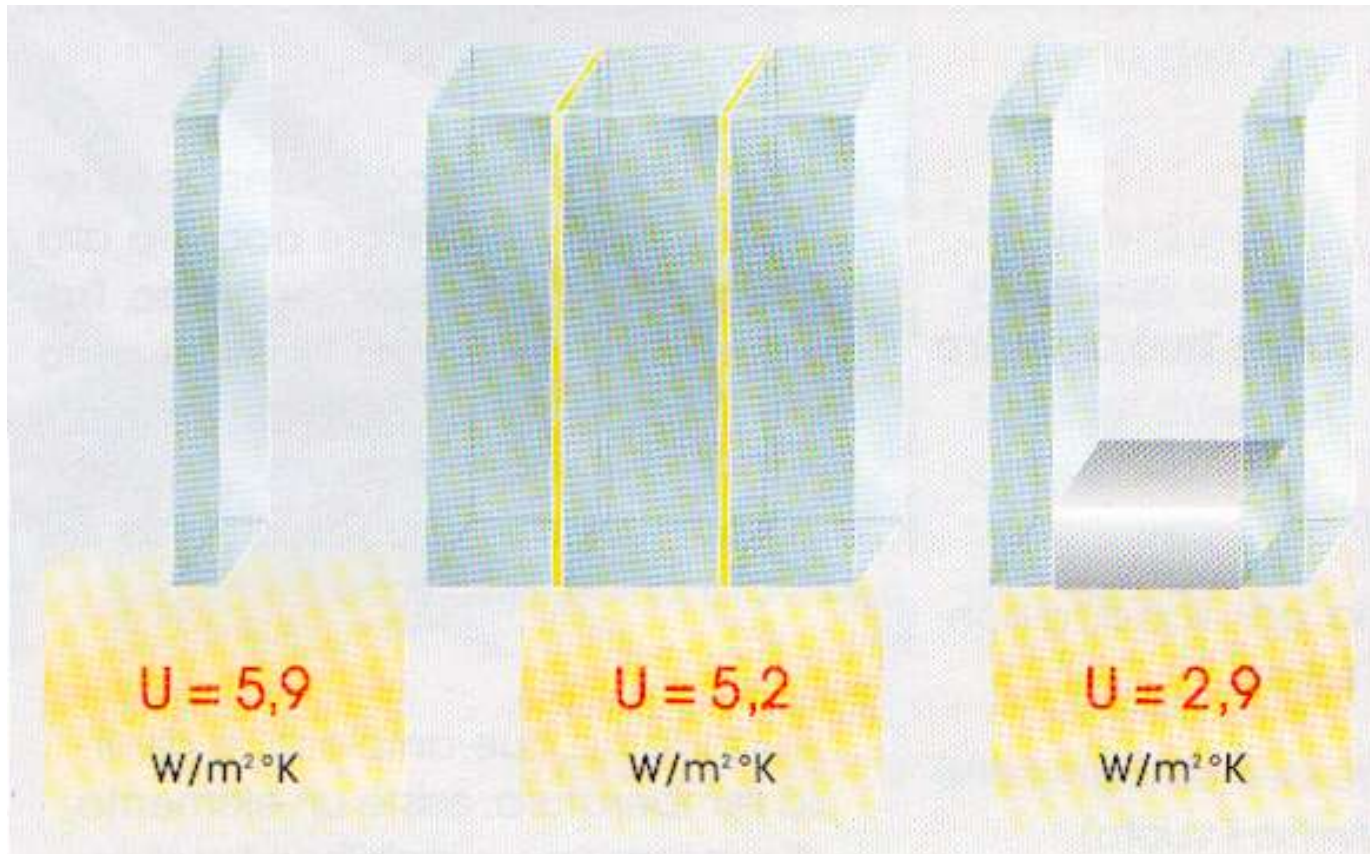
n.b. la tabella fornisce direttamente i valori di H per alcune strutture complesse, senza passare attraverso il contributo dei singoli componenti- questi valori sono superati rispetto a quelli ottenibili con i moderni serramenti e richiesti da legge

Trasmittanza di superfici vetrate – valori indicativi

Vetro semplice

Vetro di sicurezza

Vetrocamera



Isolamento termico delle superfici vetrate



Scambio termico globale attraverso una parete

