Fisica della costruzione

Calore

1. Capacità termica e calore specifico
2. La temperatura
3. La trasmissione del calore
4. Stoccaggio del calore
5. Ponti termici

La casa o più in generale un edificio, in analogia ad un organismo vivente scambia, con l'ambiente che lo circonda enorme quantità di sostanze e di energia. Si pensi all'acqua potabile che entra nelle nostre case, all'acqua di scarico diretta ai depuratori, all'energia elettrica utilizzata ad es. per il funzionamento degli elettrodomestici e per l'illuminazione, all'olio combustibile o al gas naturale per la produzione di calore.

L'importanza del calore era già stata compresa dall'umanità migliaia di anni fa. Basta pensare che dalle età del bronzo e del ferro – all'inizio della storia – fino ai tempi presenti il progresso delle civiltà è stato intimamente legato all'uso sempre più esteso delle sorgenti di calore. Lo sfruttamento dei giacimenti di carbone e le invenzioni come la macchina a vapore hanno portato alla rivoluzione industriale. In seguito la scoperta e l'uso del petrolio e l'invenzione del motore a scoppio e del motore Diesel hanno iniziato una nuova rivoluzione, soprattutto nei trasporti.

Nonostante il tremendo impatto che il calore ha sempre avuto sulla vita umana, la sua natura è rimasta circondata dal mistero fino alla metà del secolo scorso. Fu James Joule (1818-1889) – da cui ha preso il nome l'unità di misura per l'energia nel sistema internazionale (SI) – a dimostrare con una serie di precisi esperimenti che la comparsa o la scomparsa di una certa quantità di calore è sempre accompagnata dalla scomparsa o dalla comparsa di una quantità equivalente di energia meccanica.

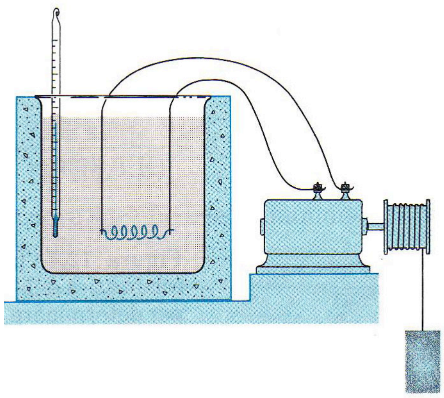


Fig. 1: Mostra un metodo per compiere lavoro su un recipiente contente acqua isolato termicamente. Un generatore elettrico azionato dalla caduta del peso compie lavoro sul sistema.

Gli esperimenti di Joule dimostrarono che né il calore né l'energia meccanica si conservano indipendentemente, ma che l'energia meccanica perduta è sempre uguale al calore prodotto, che non è quindi che un'altra forma di energia: *l'energia termica*.

Negli edifici il calore è sovente una fonte di benessere nei periodi freddi, ma può diventare un fattore non-confort in quelli caldi. Lo scopo principale del capitolo è soprattutto quello di illustrare alcune proprietà del calore in relazione alla costruzione. Imparerete, in particolare, come si può "stoccare" il calore e come si può trasmettere. La conoscenza di queste proprietà e la loro considerazione nella pratica sono una premessa fondamentale per la riduzione dei fabbisogni energetici nelle costruzioni per il riscaldamento e il raffreddamento dei locali.

1. Capacità termica e calore specifico

Se si fornisce del calore (dell'energia termica) ad una determinata sostanza, la sua temperatura generalmente aumenta[1]. La quantità di calore *Q* necessaria per aumentare la temperatura di una sostanza è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura (ΔT) che si vuole ottenere e alla massa (m) della sostanza:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \tag{1}$$

dove c – la costante di proporzionalità – è il **calore specifico** ed è una proprietà caratteristica di ogni materiale[2]. La capacità termica (C) di una sostanza:

$$C = c \cdot m \tag{2}$$

rappresenta la quantità di calore necessaria per aumentare di un grado la temperatura di una sostanza. L'unità di misura storica dell'energia termica – la caloria – fu definita come la quantità di energia termica necessaria per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 g di acqua. La chilocaloria, allora è la quantità di energia termica per aumentare di 1 °C la temperatura di 1 kg di acqua. Poiché l'energia termica è solo un'altra forma di energia, non abbiamo bisogno di unità speciali per il calore, diverse dalle altre unità di misura dell'energia; perciò oggi la caloria viene definita per mezzo dell'unità SI dell'energia, il joule:

$$1\ \text{cal} = 4.184\ \text{J} \tag{3}$$

Sulla base della definizione originaria della caloria possiamo scrivere per il calore specifico dell'acqua:

$$c_{acqua} = 1\ \text{kcal/(kg·°C)} = 4.184\ \text{kJ/(kg·K)} \tag{4}$$

dove abbiamo usato il fatto che il grado Celsius ha la stessa ampiezza del Kelvin (v. capitolo 2).

Il chilowattora (kWh)

Un'unità di energia utilizzata sovente soprattutto in relazione alla corrente elettrica è il chilowattora (kWh). Questa unità mette direttamente in relazione la potenza di un impianto – che si esprime in Watt (1 W = 1 J/s) – al suo consumo energetico moltiplicando con il tempo di utilizzo:

$$1\ \text{kWh} = \frac{1\ \text{kJ}}{1\ \text{s}} \cdot 3600\ \text{s} = 3.6\ \text{MJ}$$

dove 1 MJ = 1000 kJ. Si osservi che 1 kWh è l'energia termica che si ottiene dalla combustione di 1 dl di olio combustibile.

Esempio 1

Quanto calore è necessario per aumentare di 20 °C la temperatura di 1 m^3 di calcestruzzo e di 1 m^3 di aria?

Dalla tabella dell'appendice 2, il calore specifico del calcestruzzo e dell'aria sono di 1080 J/(kg·K) e rispettivamente 1008 J/(kg·K). Applicando l'equazione (1) si ottiene:

$$Q_{calcestruzzo} = c_{calcestruzzo} \cdot \rho_{calcestruzzo} \cdot V \cdot \Delta T = 1080 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1\ \text{m}^3 \cdot 1600\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 20\ \text{K} = 34560\ \text{kJ}$$

$$Q_{aria} = c_{aria} \cdot \rho_{aria} \cdot V \cdot \Delta T = 1080 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1\ \text{m}^3 \cdot 1.23\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 20\ \text{K} = 26.6\ \text{kJ}$$

Si noti che si è tenuto conto del fatto che ΔT = Δυ.

[1] Si ha un'eccezione durante un cambiamento di fase (v. ad es. quando l'acqua solidifica o evapora).

[2] Nell'allegato 2 sono riportati i calori specifici dei principali materiali da costruzione.

Il tema dell'inerzia termica è di capitale importanza per il controllo del clima all'interno degli edifici.

2. La temperatura

La temperatura ci è famigliare come una misura del caldo o del freddo. Una descrizione oggettiva è solo possibile introducendo una nuova grandezza fisica – *la temperatura* – che inserisce "caldo" e "freddo" in una scala termometrica assoluta. Il concetto di temperatura, che nel corso dei secoli non ha mai smesso di evolvere, è tuttavia assai complicato.

Dal capitolo precedente si può capire che la temperatura **non è** una misura del calore contenuto in un corpo. Infatti, per riscaldare di 20 °C un pezzo di calcestruzzo di 6 kg occorre il doppio del calore necessario per riscaldarne uno da 3 kg, ma la temperatura finale dei 2 corpi sarà la stessa.

In realtà la *temperatura è una misura dell'energia cinetica molecolare media* di un corpo. Se pensiamo ad esempio ad un gas contenuto in un recipiente, all'aumentare della temperatura le molecole che lo compongono si muoveranno sempre più velocemente. Anche in un solido avvengono dei microscopici movimenti. Infatti, gli atomi che formano un reticolo non sono perfettamente fermi, ma oscillano attorno a delle posizioni di equilibrio (v. figura 2). All'aumentare della temperatura le oscillazioni aumentano. Si noti che nei conduttori elettrici attorno agli atomi si trovano i cosiddetti elettroni liberi, la cui velocità di movimento (e quindi anche l'energia cinetica) aumenta al crescere della temperatura.

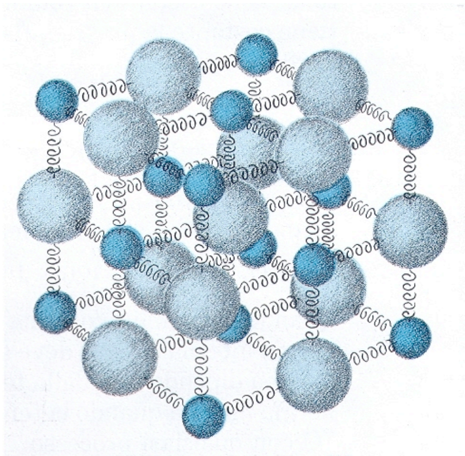


Fig. 2: Modello di un solido costituito da atomi collegati l'uno all'altro da molle.

Il significato della temperatura emerge anche dalle scale termometriche solitamente utilizzate, che sono costruite ordinando a 2 punti fissi prescelti le relative temperature e dividendo la differenza tra questi 2 valori in determinate unità.

La scala di temperatura Celsius

La figura 3 mostra un comune termometro al mercurio, costituito da un bulbo e da un tubo, entrambi di vetro, contenenti una data quantità di mercurio. Se si riscalda il mercurio ponendo il termometro in contatto con un corpo più caldo, il mercurio si dilata più del vetro e la lunghezza della colonna di mercurio aumenta. Le temperature si misurano confrontando l'estremità della colonna di mercurio con le tacche incise sul tubo di vetro.

Fig. 3: Un esempio di un comune termometro al mercurio.

Queste tacche si realizzano come segue. Prima si pone il termometro in una miscela di acqua e ghiaccio in equilibrio alla pressione di 1 atmosfera. Se il termometro era inizialmente in un ambiente più caldo, la lunghezza della colonna di mercurio diminuirà, fino a quando il termometro non sarà in *equilibrio termico* con l'acqua e ghiaccio. Si segna allora sul tubo la posizione della colonna di mercurio: questa è la temperatura del punto di fusione dell'acqua. A partire da questa temperatura le vibrazioni delle molecole diventano talmente grandi che la struttura cristallina si rompe e le molecole di acqua si muovono tenute assieme da deboli forze. Si pone poi il termometro in acqua che bolle alla pressione di 1 atmosfera. Si indica la nuova posizione della colonna di mercurio come temperatura di ebollizione dell'acqua. A questa temperatura il movimento delle molecole d'acqua diventa tale da staccare le molecole le une dall'altra per formare il vapore acqueo.

Equilibrio termico: Due sistemi in contatto termico sono in equilibrio termico quando le loro proprietà termometriche non variano più.

La scala di temperatura Celsius si costruisce attribuendo il valore 0 °C alla temperatura di fusione dell'acqua e 100 °C alla temperatura di ebollizione dell'acqua. Si divide in 100 intervalli uguali – ciascuno dei quali è detto grado Celsius – il tratto compreso tra i 2 punti fissi.

Scala assoluta delle temperature (grado Kelvin)

La figura 4 mostra un grafico della temperatura in funzione della pressione di un gas tenuto a volume costante. Quando la pressione tende a zero, ossia quando le molecole del gas rallentano fino a fermarsi[3], la temperatura tende al valore di -273.15 °C.

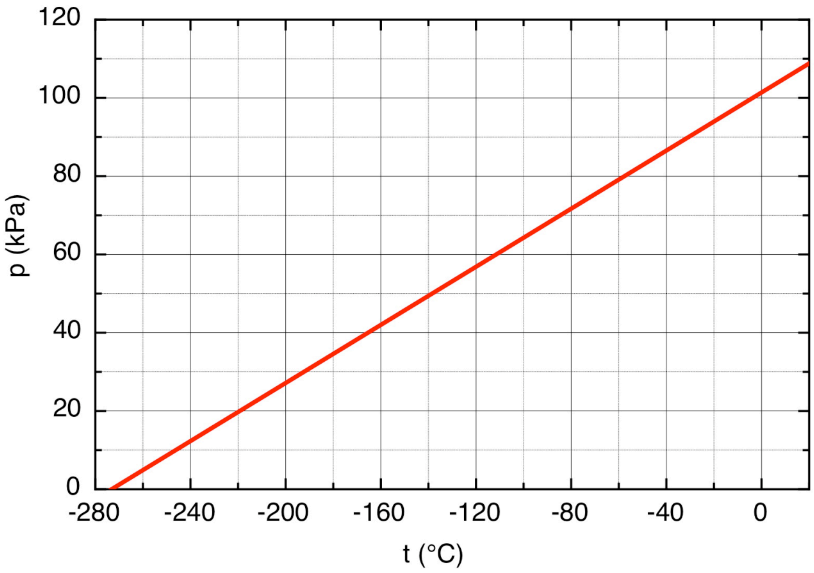


Fig. 4: Grafico della pressione (p) in funzione della temperatura (t) di un gas mantenuto a volume costante. Se si estrapola il gas fino alla pressionezero, esso interseca l'asse delle temperature al valore -273.15 °C, punto chiamato zero assoluto.

[3] La pressione è data dagli urti delle molecole del gas sulle pareti del contenitore.

Per fissare una scala termometrica occorre un altro punto, che sia facilmente riproducibile. Ciò è il caso del punto triplo dell'acqua – uno stato in cui coesistono in equilibrio acqua, vapore acqueo e ghiaccio – che si ottiene mettendo ghiaccio, acqua e vapore acqueo in un recipiente sigillato non contente aria. Il sistema raggiungerà una temperatura e una pressione d'equilibrio alle quali il ghiaccio non fonderà né sublimerà, l'acqua non solidificherà né evaporerà, e il vapore non condenserà né solidificherà. Per l'acqua la pressione del punto di equilibrio è di 4.58 mmHg[4] e la temperatura del punto triplo è 0.01 °C. La scala delle temperature assoluta è definita in modo che la temperatura del punto triplo sia 273.16 K (Kelvin).

Il Kelvin ha quindi la stessa ampiezza del grado Celsius, cioè *una variazione di temperatura di 1 K è uguale a una variazione di temperatura di 1 °C*. La differenza tra la scala assoluta (detta anche scala Kelvin) e la scala Celsius sta solo nella scelta della temperatura zero. Per effettuare una conversione da gradi Celsius a Kelvin è sufficiente aggiungere 273.15. Di solito si arrotonda la temperatura dello zero assoluto con -273 °C e si scrive quindi:

$$T = \vartheta + 273 \text{ K} \tag{5}$$

3. La trasmissione del calore

Il calore si trasmette da un punto a un altro mediante tre processi principali: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento.

La conduzione

Nella conduzione del calore l'energia termica viene trasferita tramite interazioni tra le molecole, *sebbene non vi sia trasporto delle molecole stesse*. Per esempio, se si riscalda un'estremità di una barra piena, gli atomi all'estremità riscaldata vibrano con maggior energia di quelli all'estremità più fredda. A causa dell'interazione degli atomi più energetici con i loro vicini, questa energia viene trasportata lungo la barra. Se il solido è un metallo il trasporto di energia viene aiutato dagli elettroni liberi, che si muovono attraverso il metallo, ricevendo e cedendo energia termica negli urti con gli atomi. In un gas il calore è trasportato mediante urti diretti tra le molecole del gas. Esse perdono parte di questa energia negli urti con le molecole provenienti dalla parte più fredda del gas che hanno energia media minore: queste ultime quindi guadagnano energia.

La figura 5 mostra una barra piena, la cui sezione ha l'area A. Se si tiene un'estremità della barra ad alta temperatura e l'altra a temperatura più bassa, lungo la barra viene trasmesso continuamente calore dall'estremità calda a quella fredda. Nello stato *stazionario*, se la barra è omogenea la temperatura varia uniformemente dall'estremità ad alta temperatura a quella a bassa temperatura. La rapidità con cui la temperatura varia lungo la barra è chiamata *gradiente di temperatura*. Se si considera un piccolo spezzone della barra di spessore Δx alle

[4] 1 mmHg = 133.3 Pa

cui estremità si ha una differenza di temperatura ΔT, il gradiente di temperatura vale:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

e se la barra è omogenea, esso è costante lungo la barra.

Se Q è la quantità di calore di calore trasmessa attraverso questa porzione in un certo tempo Δt, la rapidità con cui il calore viene condotto, $Q/\Delta t$, è *chiamata corrente termica* e si indica con il simbolo $\dot{Q}$. Sperimentalmente si trova che la corrente termica è direttamente proporzionale al gradiente di temperatura e all'area A:

$$\boxed{\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (6)}$$

dove λ è il **coefficiente di conducibilità termica**. Essa è una proprietà caratteristica di ogni materiale[5]. In unità SI la corrente termica si esprime in watt (Joule al secondo) e la conducibilità in watt al metro e al Kelvin:

$$[\lambda] = \frac{W}{m \cdot K} \qquad (7)$$

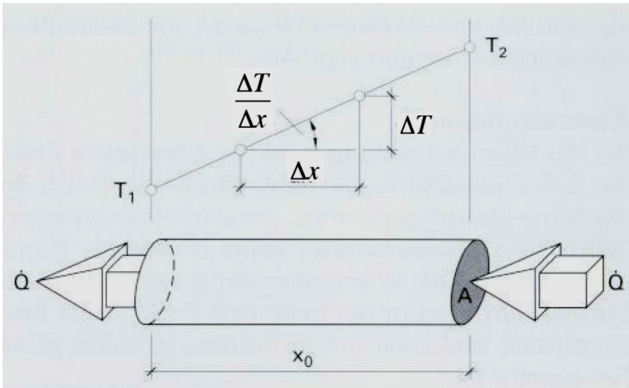


Fig. 5: Barra conduttrice di sezione *A*. Il calore trasmesso nell'unità di tempo attraverso una porzione della barra di lunghezza Δx è direttamente proporzionale all'area *A* della sezione e alla differenza di temperatura ΔT ed è inversamente proporzionale alla lunghezza Δx.

Valori tipici del coefficiente di conducibilità termica incontrati nei materiali da costruzione sono i seguenti:

- materiali isolanti 0.03 … 0.06 W/(m·K)
- mattoni 0.37 … 0.52 W/(m·K)
- pannelli di gesso pieno 0.4 W/(m·K)
- calcestruzzo armato 1.8 W/(m·K)
- legno 0.1 … 0.2 W/(m·K)
- acciaio 60 W/(m·K)

La figura 6 mostra la conducibilità termica di alcuni materiali utilizzati nella costruzione in funzione della loro densità. Si noti come in genere la conducibilità

[5] Nell'allegato 2 é riportata la conducibilità termica dei principali materiali da costruzione.

termica dei materiali da costruzione aumenti al crescere della densità. Oltre che dalla densità del materiale il coefficiente λ è influenzato dai seguenti fattori:

- tipo di materiale della componente solida
- tipo, grandezza e disposizione dei pori
- contenuto di umidità del materiale
- temperatura

Il coeff. di conducibilità termica deve essere determinato con delle *misurazioni di laboratorio* (cfr. norma SIA 279, 1988). I valori misurati sono *aumentati* del 5 – 30 % a secondo del materiale, così da considerare gli influssi che agiscono sul materiale in opera (lavorazione, differenza di densità o umidità, ecc.).

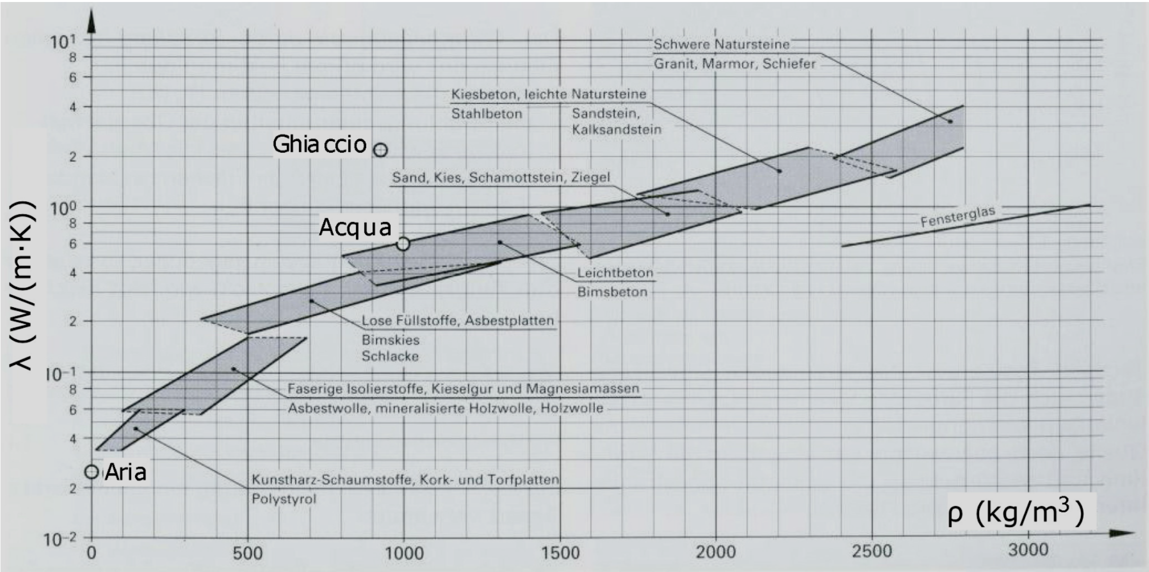


Fig. 6: Conducibilità termica λ di alcuni materiali da costruzione in funzione della rispettiva densità. I pallini indicano – a titolo di paragone – la conducibilità termica di aria, acqua e ghiaccio.

In molti problemi pratici che si riscontrono nelle costruzioni si è interessati al flusso di calore attraverso due o più materiali posti in serie. Per esempio, si potrebbe voler conoscere l'effetto che si ha inserendo un materiale isolante di un certo spessore e di una certa conducibilità termica tra 2 pareti di mattoni. La figura 7 mostra due lastre poste in serie una a contatto con l'altra. Le lastre hanno la stessa area (A) ma sono di materiali diversi e hanno spessori (d_i) diversi.

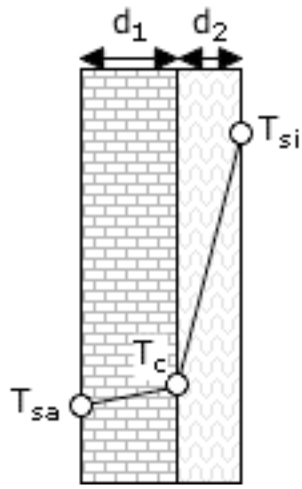


Fig. 7: Due lastre conduttrici (o isolanti) di materiali diversi collegate in serie. Le linee mostrano graficamente l'andamento della temperatura. T_{si} è la temperatura superficiale interna mentre T_{sa} indica la temperatura superficiale esterna e T_c quella sulla superficie di contatto tra i due materiali.

In condizione di flusso di calore stazionario, la corrente termica deve essere la stessa attraverso ciascuna lastra. Infatti, per la conservazione dell'energia il calore che entra deve essere lo stesso a quello che esce. Se λ_1 e λ_2 sono le conducibilità termiche dei 2 materiali, applicando l'equazione (6) si può scrivere:

$$T_c - T_{sa} = \frac{d_1}{\lambda_1} \cdot \frac{\dot{Q}}{A} \quad \text{e} \quad T_{si} - T_c = \frac{d_2}{\lambda_2} \cdot \frac{\dot{Q}}{A}$$

Sommando si ottiene la differenza di temperatura tra la superficie interna e quella esterna:

$$\Delta T = T_{si} - T_{sa} = \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \right) \cdot \dot{q} \tag{8}$$

dove $\dot{q}$ è il *flusso di calore*, ossia la corrente termica per unità di superficie. Nel sistema SI l'unità di misura del flusso di calore è quindi il Watt al metro quadrato (W/m^2). Questa formula si può scrivere in forma compatta come

$$\dot{q} = \Lambda \cdot \Delta T \tag{9}$$

introducendo un *coefficiente di trasmissione termica* (o coefficiente globale di trasferimento di calore) Λ:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} \tag{10}$$

Nel sistema SI il coefficiente Λ ha le unità Watt al metro quadrato al Kelvin ($W/(m^2 \cdot K)$). L'inverso del coefficiente di trasmissione termica – ossia $1/\Lambda$ – aumenta all'aumentare degli spessori d_i delle pareti e al diminuire delle loro conducibilità termiche λ_i. $1/\Lambda$ è noto come resistenza termica (riferita all'unità di area).

Nel caso di una parete formata da più strati (in serie), la **resistenza termica complessiva** (senza considerare le resistenze superficiali) si ottiene sommando le resistenze termiche d_i/λ_i dei singoli strati, ossia in termini matematici:

$$\frac{1}{\Lambda} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} \qquad (11)$$

Esempio 2

Un tetto di 20 m x 6 m è realizzato con tavole di pino (λ = 0.11 W/(m·K)) spesse 2 cm e tegole (λ = 1.0 W/(m·K)) di spessore pari a 3 cm. Trascurando la sovrapposizione delle tegole, calcolare quanto calore viene condotto attraverso il tetto, se la temperatura interna delle tavole di pino è di 20 °C e quella esterna delle tegole è di 5 °C. Di che fattore si riduce la perdita di calore se si aggiungono 5 cm di isolante (λ = 0.05 W/(m·K))?

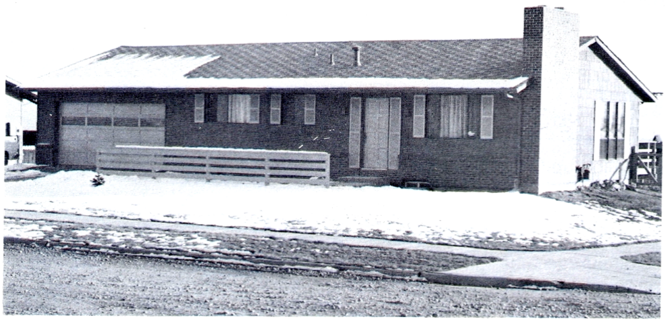


Fig. 8: La sagoma disegnata dalla neve sul tetto di una casa dà un'idea della conduzione – o della mancanza di conduzione – di calore attraverso il tetto. Si noti la neve sul garage non riscaldato.

Dapprima si procede al calcolo della resistenza termica totale, come illustrato nella tabella 1:

Strato	Materiale	d (m)	λ (W/(m·K))	d_i/λ_i (m^2·K/W)
1	Tavole di pino	0.020	0.110	0.182
2	Tegole	0.030	1.000	0.030
			$\frac{1}{\Lambda} = \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} =$	0.212

Tabella 1: Il calcolo della resistenza termica totale (*1/Λ*) può essere eseguito con l'ausilio di un semplice foglio di calcolo excel.

Applicando l'eq. (8) si calcola quindi il flusso di calore:

$$\dot{q} = \Lambda \cdot \Delta T = \frac{1}{0.212\ \mathrm{m^2 \cdot K/W}} \cdot 15\ \mathrm{K} = 70.75\ \mathrm{W/m^2}$$

che moltiplicato per la superficie del tetto (120 m^2) dà il calore disperso nell'ambiente al secondo:

$$\dot{Q} = 70.75\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}} \cdot 120\ \mathrm{m^2} = 8491\ \mathrm{W}$$

Se si aggiungono 5 cm di isolante termico il calcolo della resistenza termica deve essere modificato come nella tabella 2:

Strato	Materiale	d (m)	λ (W/(m·K))	d_i/λ_i (m^2·K/W)
1	Tavole di pino	0.020	0.110	0.182
2	Isolante per tetti	0.050	0.050	1.000
3	Tegole	0.030	1.000	0.030
			$\boxed{\frac{1}{\Lambda}=\sum_i \frac{d_i}{\lambda_i}=}$	1.212

Tabella 2: Per calcolare l'effetto di 5 cm di isolante termico basta aggiungere una riga al foglio di calcolo excel.

Si ottiene quindi la seguente corrente di calore attraverso il tetto:

$$\dot{Q} = \Lambda \cdot \Delta T \cdot A = \frac{1}{1.212\ \text{m}^2 \cdot \text{K/W}} \cdot 15\ \text{K} \cdot 120\ \text{m}^2 = 1485\ \text{W}$$

Ossia 5 cm di isolante per tetti consentono di ridurre le perdite di calore di quasi un fattore 6. È tuttavia importante sottolineare che una simile riduzione è ottimistica. Infatti, nella realtà – come si vedrà più in avanti – il trasferimento del calore dall'aria interna alla superficie interna è pure soggetto ad una resistenza termica, che crea un abbassamento della temperatura superficiale (rispetto a quella dell'aria). La stessa considerazione vale per la parte esterna. Una situazione più reale sarà presentata nell'esempio 4.

Per calcolare la quantità di calore che esce da una stanza per conduzione in un certo tempo, bisogna sapere quanto calore passa attraverso le pareti, le finestre, il pavimento e il soffitto. Questo problema introduce il concetto "**percorsi in parallelo**" per il flusso di calore: le pareti, le finestre, il pavimento e il soffitto rappresentano tutti percorsi indipendenti per la perdita di calore verso l'esterno.

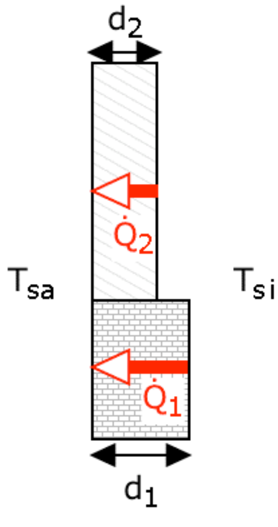


Fig. 9: Rappresentazione schematica di 2 percorsi in parallelo per la perdita di calore. T_{si} è la temperatura superficiale interna mentre T_{sa} indica la temperatura superficiale esterna. $\dot{Q}_1$ e $\dot{Q}_2$ rappresentano la corrente termica attraverso i 2 percorsi.

La differenza di temperatura è la stessa ($\Delta T = T_{si} - T_{sa}$) per ciascun percorso, ma la corrente termica é diversa. La corrente termica totale è la somma delle correnti termiche attraverso ciascuno dei percorsi indipendenti:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \lambda_1 \cdot A_1 \cdot \frac{\Delta T}{d_1} + \lambda_2 \cdot A_2 \cdot \frac{\Delta T}{d_2}$$

Ossia nel caso di percorsi paralleli le conduttanze termiche si sommano secondo la formula generale:

$$\dot{Q} = \left(\sum_i \frac{\lambda_i}{d_i} \cdot A_i \right) \cdot \Delta T \qquad (12)$$

La convezione

La conducibilità termica dell'aria è molto piccola in confronto a quella dei materiali solidi, quindi l'aria può essere considerato un ottimo isolante termico. Tuttavia, l'efficienza di una grande quantità d'aria – come quella racchiusa all'interno di una doppia finestra – è molto ridotta dalla convezione. Infatti, non appena c'è una differenza di temperatura tra diverse regioni dello spazio occupato dall'aria, correnti convettive tendono ad uniformare la temperatura e la conducibilità termica effettiva risulta fortemente aumentata. Lo spessore ottimale di aria – per avere un effetto isolante – è di 1-2 cm. Una doppia finestra con spessore maggiore risulterebbe un cattivo isolante termico. È possibile usare le proprietà isolanti dell'aria se essa può essere intrappolata in piccole sacche separate l'una dall'altra così che non possa esservi convezione. Un esempio è il polistirolo espanso, un materiale cellulare con piccole sacche d'aria separate dalle pareti delle celle, anch'esse cattive conduttrici del calore.

Nonostante **la componente convettiva** del flusso di calore segua leggi piuttosto complesse, in una prima approssimazione essa può essere rappresentata in forma linearizzata in maniera analoga a quanto visto per la conduzione:

$$\dot{q}_K = \alpha_K \cdot \Delta T = \alpha_K \cdot (T_i - T_{Si}) \qquad (13)$$

Il coefficiente α_K di convezione è sempre fornito da relazioni empiriche risultanti da misure sperimentali. Per quanto riguarda la convezione libera su superfici verticali interne vale:

$$\alpha_K = 1.31 \cdot \sqrt[3]{\Delta T} \qquad (14)$$

Più in generale, secondo la norma EN ISO 6946-1, è stato fissato il valore di α_K a 2.5 $W \cdot (m^2 K)^{-1}$.

Le superfici esterne, essendo esposte a correnti d'aria più considerevoli, necessitano di una formula che tenga conto anche della velocità del vento sulla superficie:

$$\alpha_K = 4 \cdot (v + 1) \qquad (15)$$

Dove v è la velocità del vento in m/s.

L'irraggiamento

Il calore può essere trasferito anche sotto forma di onde elettromagnetiche. Per riportare due esempi comuni si possono citare la lampadina e il forno a microonde. L'equazione che descrive l'emissione di onde elettromagnetiche di un corpo (nota come legge di Stefan-Boltzmann) è la seguente:

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \tag{16}$$

dove $\dot{Q}$ è la potenza irraggiata in Watt, A è la superficie del corpo emittente, ε è un coefficiente compreso tra 0 e 1 chiamato *emissività* (o *emettenza*) del corpo e σ è una costante universale chiamata *costante di Stefan*, che vale

$$\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \tag{17}$$

Quando la radiazione colpisce un corpo, parte di essa viene riflessa e parte assorbita[6]. I corpi di colore chiaro riflettono la maggior parte della radiazione visibile, mentre i corpi di colore scuro ne assorbono la maggior parte. Analogamente al'eq. (16) la radiazione assorbita è direttamente proporzionale alla superficie del corpo e alla quarta potenza della temperatura dell'ambiente esterno:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \tag{18}$$

$\dot{Q}$ è la potenza assorbita in Watt, A è la superficie del corpo, α è il *coefficiente di assorbimento*, che, come ε, è un numero compreso tra 0 e 1.

Si consideri ora un corpo posto in un ambiente a temperatura più bassa. Il corpo emette più radiazione di quanta ne assorba e, quindi, si raffredda mentre l'ambiente esterno assorbe radiazione dal corpo e si riscalda. A regime, il corpo e l'ambiente esterno raggiungono la stessa temperatura e sono in equilibrio termico. A questo punto il corpo assorbe tanta energia quanta ne emette. Perciò, il coefficiente di assorbimento α deve essere uguale all'emissività ε.

La potenza totale (o effettiva) irraggiata da un corpo di superficie A, a temperatura T, posto in un ambiente a temperatura T_0, può essere espressa nella forma:

$$\dot{Q}_{tot} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) \tag{19}$$

In generale, per lo scambio di calore tra due corpi 1 e 2, si deve introdurre un fattore geometrico F_{12} e scrivere il flusso di calore nel seguente modo (v. approfondimento 1):

$$\dot{q}_{1\leftrightarrow 2} = F_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \tag{20}$$

[6] Si suppone che il corpo sia completamente opaco e che la quantità di radiazione che passa attraverso esso sia trascurabile.

Per F_{12} = 1, si utilizza sovente la forma linearizzata:

$$\dot{q}_{1\leftrightarrow 2} \approx 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot (T_1 - T_2) \approx \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \tag{21}$$

Un corpo che assorbe tutta la radiazione che incide su di esso è definito *corpo nero*, esso possiede un coefficiente di emissività e assorbimento pari a 1. Materiali come il velluto nero o il nerofumo sono molto vicini a questo tipo di corpi. Una soluzione ideale per ottenere un corpo nero ideale consiste nel praticare un piccolo foro in una cavità (v. figura 10). La radiazione entrante nel foro ha poche probabilità di riuscire ad uscire, verrà quindi riflessa dalle pareti interne fino a venir assorbita completamente.

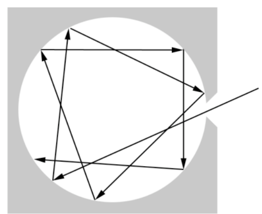


Fig. 10: Una cavità che approssima un corpo nero ideale.

Esempio 3

Calcolare la potenza irraggiata da una persona nuda in una stanza a 20 °C, supponendo che essa sia un corpo nero, che la superficie del suo corpo sia 1.4 m^2 e che la temperatura della sua pelle sia 33 °C.

Applicando l'eq. (17) si ha:

$$\dot{Q}_{tot} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T^4 - T_0^4) = 5.67 \cdot 10^{-8} \ \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot 1.4 \ \ m^2 \cdot (306^4 - 293^4) \ \ K^4 = 111 \ \ W$$

Si tratta di una notevole potenza di irraggiamento. Questo risultato si avvicina di molto alla potenza necessaria per mantenere in vita il nostro corpo umano, che corrisponde a circa 121 W (dato calcolato sulla supposizione di un assorbimento di energia giornaliero di 2500 kcal). Per proteggerci da una simile perdita di energia indossiamo indumenti i quali, grazie alla loro bassa conducibilità termica, hanno una temperatura esterna minore e quindi irraggiano meno calore.

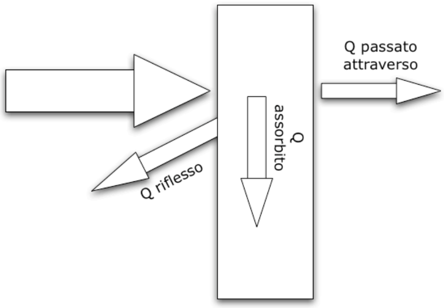
Conclusione

I tre meccanismi di trasmissione del calore si verificano spesso simultaneamente, benché uno di essi possa essere più efficace degli altri. Per esempio un asciugacapelli trasmetterà il calore ai capelli per convezione, mentre il riscaldamento per irraggiamento o per conduzione sarà trascurabile. Un grill ad infrarossi riscalda per irraggiamento emanando radiazione infrarossa ad alta energia. Il caffè in una tazza di ceramica si raffredda per irraggiamento e per conduzione (e per evaporazione), perché la tazza ha un'emissività piuttosto alta, mentre se si usasse una tazza di metallo, il raffreddamento avverrebbe soprattutto per conduzione (dato che i metalli sono buoni conduttori di calore). Studiando un fenomeno occorre quindi valutare quale di questi tre meccanismi è il più efficace ed eventualmente tener conto di tutti e 3.

Approfondimento 1

Scambio di calore per irraggiamento entro due superfici

Nel capitolo precedente è stato accennato che, normalmente, un corpo assorbe solo una parte di calore ricevuto, mentre l'altra parte viene riflessa. Esiste una terza via che il calore può seguire, quella di passare attraverso il corpo (ad esempio una normale finestra trasparente). Il coefficiente di assorbimento, di riflessione e *trasmissione* vengono rispettivamente indicati con α, ρ e τ dove vale:



$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Il problema che vogliamo trattare presenta due superfici piane *grigie* (assorbono e riflettono calore). Si vuole calcolare il flusso di calore scambiato dalle due lastre.

Si procede calcolando il flusso totale di ogni superficie. Il calore irraggiato dalla prima superficie viene in parte riflesso e in parte assorbito dalla seconda superficie come è mostrato in figura 11.

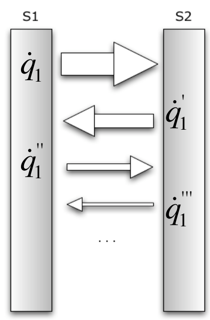


Fig. 11: Scambio di radiazione termica tra 2 pareti.

Per calcolare il flusso di calore totale prodotto da S1 occorre costruire una serie. I primi termini della serie sono:

$$\dot{q}_1 = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$$

$$\dot{q}_1^{'} = \left(1 - \varepsilon_2\right) \cdot \dot{q}_1$$

$$\dot{q}_1^{''} = \left(1 - \varepsilon_1\right) \cdot \left(1 - \varepsilon_2\right) \cdot \dot{q}_1$$

$$\dot{q}_1^{'''} = \left(1 - \varepsilon_1\right) \cdot \left(1 - \varepsilon_2\right)^2 \cdot \dot{q}_1$$

Dunque:

$$\dot{q}_1^{tot} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 \cdot \left[\underbrace{1 - \left(1 - \varepsilon_2\right) + \left(1 - \varepsilon_1\right) \cdot \left(1 - \varepsilon_2\right) - \left(1 - \varepsilon_1\right) \cdot \left(1 - \varepsilon_2\right)^2 + - \ \ldots}_{S} \right]$$

La serie S si lascia scomporre in due sotto serie:

$$S' = 1 + \sum_{k=1}^{n} (1 - \varepsilon_1)^k (1 - \varepsilon_2)^k - (1 - \varepsilon_2)\left[1 + \sum_{k=1}^{n} (1 - \varepsilon_1)^k (1 - \varepsilon_2)^k\right]$$

Ricordando che $\sum_{k=1}^{n} a^k = \frac{a^{n+1}-a}{a-1}$ e che se a<1 e n→∞ allora $\sum_{k=1}^{\infty} a^k = \frac{a}{1-a}$ si ottiene $S' = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1+\varepsilon_2-\varepsilon_1\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1\varepsilon_2(\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1)}$ e quindi:

$$\dot{q}_1^{tot} = \sigma\cdot T_1^4\cdot\frac{1}{(\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1)} \quad \text{Analogamente} \quad \dot{q}_2^{tot} = \sigma\cdot T_2^4\cdot\frac{1}{(\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1)}$$

Se ad esempio $T_2>T_1$ allora si avrà un flusso di calore per unità di superficie pari a $\dot{q}_2^{tot}-\dot{q}_1^{tot}$. In conclusione si ottiene:

$$\dot{q}_{1\leftrightarrow 2}^{tot} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1}\cdot\sigma\cdot(T_2^4-T_1^4)\ [\frac{W}{m^2}]$$

Confrontando con l'eq. (18) si deduce:

$$\boxed{F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1} \qquad (22)}$$

Trasmissione del calore in pareti a più strati

La trasmissione di calore attraverso una parete è caratterizzata da due meccanismi di trasporto:

a) Il passaggio di calore attraverso i diversi materiali che compongono la parete per conduzione.

b) La trasmissione di calore dall'aria alle superfici (e vice-versa) per irraggiamento, convezione e conduzione.

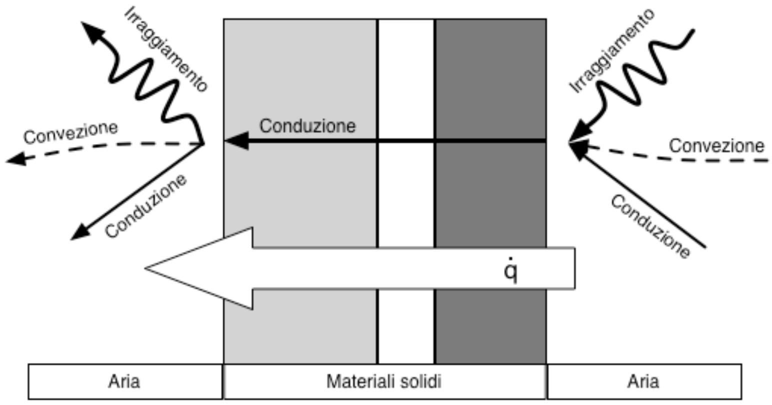


Fig. 12:

Vie di conduzione del calore attraverso una parete. La freccia del flusso di calore indica che esso è uguale in tutti gli strati della parete.

È importante notare che in condizioni stazionarie (vale a dire a temperatura interna ed esterna fisse) il flusso di calore ($\dot{q}$) è costante ed è uguale in tutti gli strati della parete.

Si vuole ora studiare come cambia il flusso di calore attraverso la parete in funzione delle condizioni al contorno e le caratteristiche della parete. In particolare verrà definito un coefficiente U che indicherà la qualità di isolamento della parete.

Per calcolare il trasferimento di calore all'interno delle pareti si utilizzano le equazioni (9) e (11):

$$\dot{q} = \Lambda \cdot (T_{si} - T_{sa}) \qquad (23)$$

Dove T_{si} e T_{sa} sono rispettivamente la temperatura superficiale interna ed esterna della parete.

Per calcolare, invece, il calore trasmesso alla superficie dall'ambiente interno, si deve tener conto dei 3 canali disponibili; ossia l'irraggiamento, la convezione e la conduzione.

$$\dot{q} = \alpha_s \cdot (T_i - T_{si}) + \alpha_k \cdot (T_i - T_{si}) + \alpha_c \cdot (T_i - T_{si}) = (\alpha_s + \alpha_k + \alpha_c) \cdot (T_i - T_{si}) \qquad (24)$$

Dove T_i è la temperatura dell'ambiente interno e α_c descrive il termine dovuto alla conduzione dell'aria (in genere preso in conto con il coefficiente di convezione).

Introducendo un coefficiente di trasmissione superficiale (α_i) del calore per la parete interna

$$\alpha_i = \alpha_s + \alpha_k + \alpha_c \tag{25}$$

il flusso di calore dell'aria interna verso la parete può essere scritto come:

$$\dot{q} = \alpha_i \cdot (T_i - T_{si}) \tag{26}$$

Tale flusso è uguale a quello che lascia la parte esterna della parete, il quale può essere descritto con un coefficiente di trasmissione superficiale esterno (α_s) in maniera del tutto analoga:

$$\dot{q} = \alpha_a \cdot (T_{sa} - T_a) \tag{27}$$

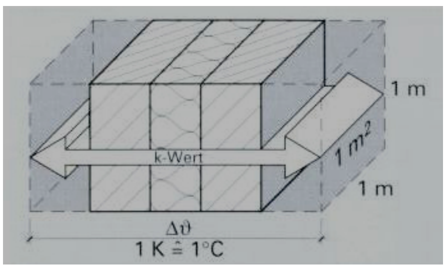
Sommando le espressioni (23), (26) e (27) si ottiene:

$$\frac{\dot{q}}{\alpha_i} = (T_i - T_{si})$$
$$\frac{\dot{q}}{\alpha_a} = (T_{sa} - T_a)$$
$$\frac{\dot{q}}{\Lambda} = (T_{si} - T_{sa})$$
$$\dot{q} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_a}\right)}_{\frac{1}{U}} = (T_i - T_a)$$
$$\dot{q} = U \cdot (T_i - T_a)$$

In conclusione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad \left[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}\right] \tag{23}$$

Il coefficiente U fornisce il flusso di calore che in condizioni stazionarie fluisce attraverso 1 m^2 di parete se tra i due ambienti vi è una differenza di 1 °C. La capacità di isolamento di una parete è migliore quanto più piccolo è il coefficiente U. È possibile classificare la capacità di isolamento di una parete secondo la seguente tabella:



Molto buona	$U < 0.2$ W/(m²·K)
Buona	$0.2 < U < 0.3$ W/(m²·K)
Sufficiente	$0.3 < U < 0.5$ W/(m²·K)
Insufficiente	$U > 0.5$ W/(m²·K)

Tabella 3: Classificazione qualitativa di una parete secondo il valore del coefficiente di trasmissione.

In allegato si trova un foglio di excel che permette di calcolare automaticamente questo coefficiente a partire da semplici dati di input. È importante sottolineare che nel foglio di excel è stata tralasciata la conduzione dell'aria.

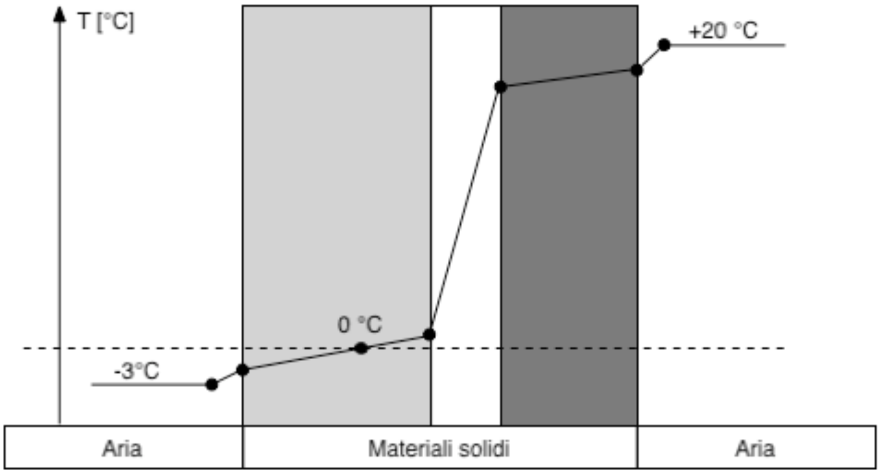


Fig. 13: Profilo della temperatura in una parete costituita da diversi strati.

La figura 13 riporta un diagramma della temperatura. Tale tipo di grafico è utile per osservare in che modo varia la temperatura all'esterno della parete e soprattutto della parete. In particolare è possibile notare gli strati più isolanti (quelli che possiedono delle variazioni ai capi più alte) e quelli più conducenti.

Esempio 4

Lo stesso tetto dell'esempio 2 (20 m x 6 m realizzato con tavole di pino (λ = 0.11 W/(m·K)) spesse 2 cm e tegole (λ = 1.0 W/(m·K)) di spessore pari a 3 cm). Dati α_i = 8 W/(m²·K) e α_a = 23 W/(m²·K) si ricalcoli la dispersione del calore per T_i = 20°C e T_a = 5°C e si determini la temperatura superficiale interna del tetto. Come cambiano il flusso di calore la temperatura superficiale interna se si aggiungono 5 cm di isolante (λ = 0.05 W/(m·K))?

<u>Senza isolamento:</u>

Utilizzando il valore di Λ = 4.7 W/(m²·K) calcolato nell'esercizio 2 con l'equazione (23) si calcola U:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{4.7} + \frac{1}{23}} = 2.6 \text{ W}/\left(\text{m}^2 \cdot \text{K}\right)$$

con il quale si calcola la perdita di calore attraverso la parete:

$$\dot{q} = U \cdot \Delta T = 2.6 \text{ W}/\left(\text{m}^2 \cdot \text{K}\right) \cdot (20 - 5) \text{ K} = 39 \text{ W/m}^2$$

Tale flusso è uguale a quello che passa dall'aria interna alla parete e che può essere calcolato anche applicando l'equazione (26):

$$\dot{q} = 39 \text{ W/m}^2 = \alpha_i \cdot (20 - T_{si})$$

Inserendo il valore di α_i si ottiene:

$$T_{si} = 15.1°C$$

<u>Con isolamento di 5 cm:</u>

Utilizzando il valore di Λ = 0.8 W/(m^2·K) calcolato nell'esercizio 2 con l'equazione (23) si calcola U:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{1}{0.8} + \frac{1}{23}} = 0.72 \text{ W}/\left(\text{m}^2 \cdot \text{K}\right)$$

con il quale si calcola la perdita di calore attraverso la parete:

$$\dot{q} = U \cdot \Delta T = 0.7 \text{ W}/\left(\text{m}^2 \cdot \text{K}\right) \cdot (20 - 5) \text{ K} = 11.9 \text{ W/m}^2$$

Tale flusso è uguale a quello che passa dall'aria interna alla parete e che può essere calcolato anche applicando l'equazione (26):

$$\dot{q} = 11.9 \text{ W/m}^2 = \alpha_i \cdot (20 - T_{si})$$

Inserendo il valore di α_i si ottiene:

$$T_{si} = 18.5°C$$

Le perdite sono ridotte di quasi 4 volte, invece di 6 come calcolato nell'esempio 2. L'esempio mostra come l'ipotesi fatta nell'ambito dell'esempio 2, secondo la quale la temperatura superficiale non cambiava aggiungendo uno strato di isolante alla parete, non era di fatto corretta. Lo strato di isolamento permette di aumentare in modo significativo la temperatura della superficie interna.

Trasmissione del calore attraverso finestre

La funzione essenziale della finestra, grazie alla trasparenza del vetro, è quella di permettere il contatto con l'esterno (possibilità di "veduta" attraverso l'involucro dell'edificio) e l'illuminazione naturale. Grazie alle prestazioni di certi vetri moderni, un ulteriore aspetto ha una funzione sempre più importante. Infatti, come conseguenza dell'effetto serra che caratterizza il vetro, la finestra costituisce un ricevitore solare passivo che può ridurre notevolmente il fabbisogno di riscaldamento di un edificio, ma se progettata male può avere anche l'effetto contrario: far uscire grandi quantità di calore.

La trasmissione di calore attraverso lo spazio tra i due vetri di una finestra avviene per irraggiamento, convezione e conduzione. Il flusso di calore generato dalla convezione e dalla conduzione può essere ridotto mediante l'introduzione di gas pesanti. A tale scopo si utilizzano gas nobili (chimicamente inerti) come l'Argon, il Krypton e lo Xenon. Per ogni gas esiste una distanza ottimale tra i due vetri, per la quale il flusso di calore generato della convezione e conduzione è minimo.

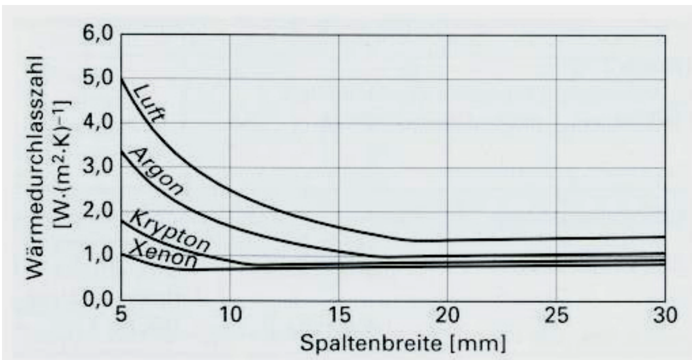


Fig. 14: Grafico del coefficiente convezione/conduzione di vari gas nobili in funzione dello spazio tra i due vetri.

La trasmissione di calore generata dall'irraggiamento può essere ridotta grazie a vetri con uno strato microscopico (ossidi di elementi della famiglia delle terre rare) che conservano la trasparenza nel visibile ma aumentano fortemente la riflessione per l'infrarosso lontano. Questi vetri, denominati vetri selettivi hanno dunque emissività piccole nell'infrarosso. Gli effetti del rivestimento sull'irraggiamento sono caratterizzati dal grado di emissività ε (come illustrato nel grafico della figura 15).

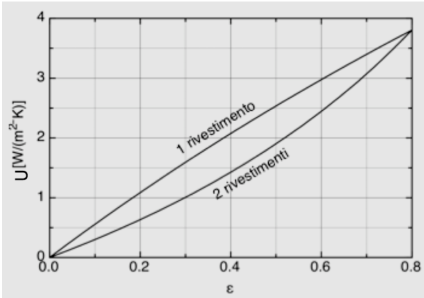


Fig. 15: Grafico del coefficiente di trasmissione del calore (per irraggiamento) in funzione del grado di emissione ε per vetri con 1 e rispettivamente 2 strati di rivestimento.

Nella figura 15 sono rappresentate le funzioni, calcolate mediante l'equazione (21), che esprimono il coefficiente di irraggiamento in funzione del grado di emissione ε per vetri doppi con uno o due rivestimenti. Nel primo caso è stato posto il valore di emissività di uno strato a 0.8 e si è lasciato variare l'emissività ε dell'altro strato, mentre nel secondo caso sono stati le 2 emissività sono state poste uguali ad ε che si è poi utilizzato come parametro. Il valore utilizzato per la temperatura media è di 293 K.

Sul mercato ogni vetro è accompagnato da un coefficiente che quantifica le perdite di calore, definito in questo modo:

$$U_G \quad \left[W \cdot \left(m^2 \cdot K\right)^{-1}\right] \tag{24}$$

Esso dipende da vari fattori, quali il grado di emissività del vetro in questione, lo spazio tra i due vetri, il gas utilizzato come isolante, la percentuale di aria mischiata insieme al gas (v. figura 16).

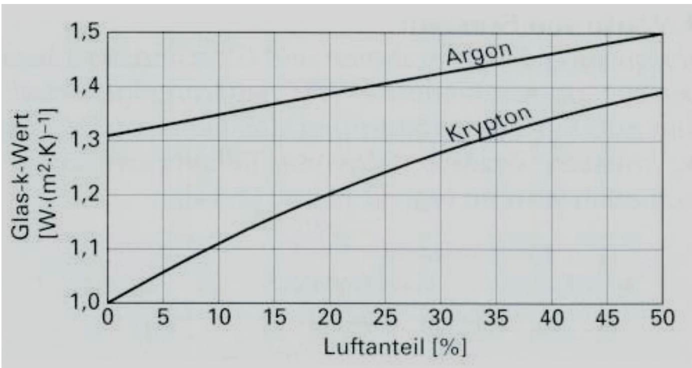


Fig. 16: Influenza della percentuale d'aria mischiata al gas sul coefficiente U_G.

Tuttavia, per quantificare le perdite di calore non è sufficiente tenere conto solo del tipo di vetro ma occorre considerare la finestra nel suo insieme. I vetri, la struttura della finestra e il punto di fissaggio del vetro al telaio costituiscono diversi canali attraverso i quali il calore può fluire.

In termini fisici si devono distinguere il coefficiente di trasmissione U_G del vetro, il coefficiente U_F del telaio, le perdite connesse agli effetti di bordo del vetro (influenzate dalla natura del profilo di separazione fra i vetri, nel caso di vetri doppi o tripli) e le perdite che si manifestano alla giunzione fra il telaio e il muro: tali perdite sono proporzionali alla lunghezza del perimetro e sono definite da un valore U lineare (per unità di lunghezza) Ψ [$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$].

Il coefficiente di trasmissione termica della finestra è dato dalla seguente media ponderata:

$$U_w = \frac{U_F \cdot A_F + U_G \cdot A_G + \Psi \cdot L}{A} \qquad \left[W \cdot \left(m^2 \cdot K\right)^{-1}\right] \tag{25}$$

- A [m^2]: area, rispettivamente, del vetro, del telaio e della finestra;
- L [m]: perimetro del vetro;
- U [$W/(m^2 \cdot K)$]: coefficiente di trasmissione termica rispettivamente del vetro e del telaio;
- Ψ [$W/(m \cdot K)$]: coefficiente di trasmissione termica lineare connesso agli effetti di bordo

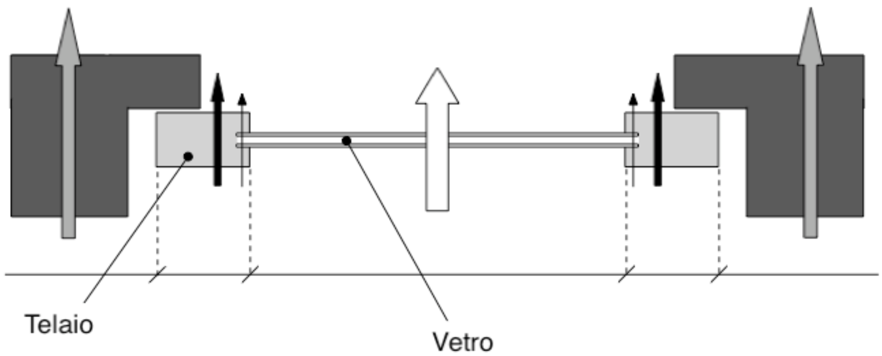


Fig. 17: Sezione di una finestra in pianta.

Irraggiamento attraverso le finestre

Un vetro, sottoposto all'irraggiamento solare, trasmette la maggior parte dell'energia ricevuta, riflettendone una piccola parte e assorbendone la differenza. In seguito, una frazione dell'energia assorbita è trasmessa verso l'interno per riemissione nell'infrarosso (figura 18). Questa frazione è denominata trasmissione secondaria o indiretta.

Per calcolare la trasmissione totale di energia si utilizza il coefficiente g di trasmissione dell'irraggiamento solare (trasmissione energetica), il quale indica la percentuale di radiazione solare che attraversa la finestra. Esso dipende dallo spettro della sorgente e dall'angolo d'incidenza dell'irraggiamento. Fino ad un angolo di 50° questo coefficiente varia poco e può essere ritenuto equivalente al valore misurato con un'incidenza perpendicolare, indicato con $g_\perp$. Al di là dei 50° esso decresce rapidamente.

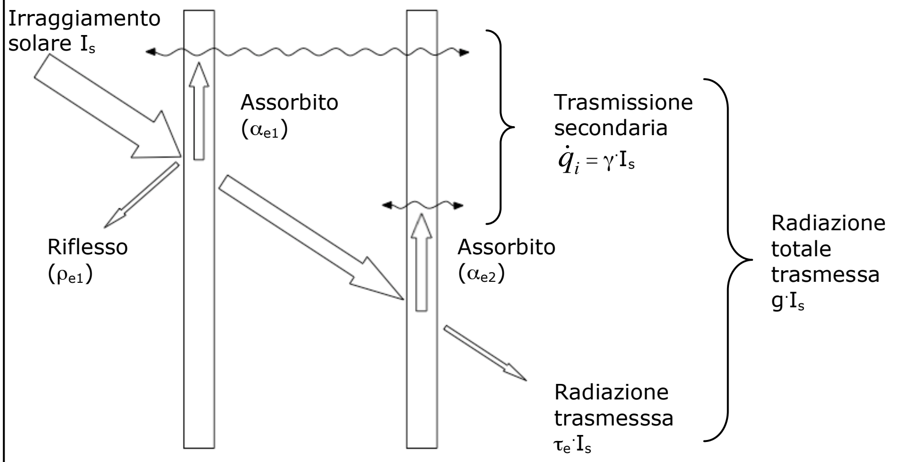


Fig. 18: Sezione di una finestra in pianta

Il coefficiente g è calcolato effettuando la somma:

$$g = \tau_e + \gamma \; [\%] \tag{26}$$

dove τ_e è il grado di trasmissione di energia attraverso i due vetri e γ è il rapporto fra l'irraggiamento secondario trasmesso verso l'interno e l'irraggiamento incidente.

Per trovare la radiazione totale passata attraverso il doppio vetro occorre quindi moltiplicare il grado di trasmissione energetica *g* con la radiazione solare I_S.

$$I = g \cdot I_S \; \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{27}$$

Nel caso di un vetro semplice, τ_e e $\dot{q}_i$ possono essere calcolati a partire dai coefficienti di assorbimento (α_e) e di riflessione (ρ_e) nel seguente modo:

$$\tau_e = 1 - \alpha_e - \rho_e \; [\%] \tag{28}$$

$$\dot{q}_i = \alpha_e \cdot I_S \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_i + \alpha_a} \tag{29}$$

dove α_i e α_a sono i coefficienti di trasmissione superficiale del calore per la parte interna e rispettivamente quella esterna. In sostanza l'equazione (29) dice che l'energia trasmessa verso l'interno è tanto più grande quanto il coefficiente α_i supera α_a. Nel caso in cui i 2 coefficienti si eguagliano, la radiazione secondaria (verso l'interno) è la metà di quella assorbita.

Bilancio netto istantaneo della finestra

Il bilancio netto di una finestra dipende da numerosi fattori, quali ad esempio:

- dal clima locale
  - durata della stagione di riscaldamento;
  - apporti solari durante questo periodo;

- dalla finestra
  - tipo di vetro e di telaio;
  - orientamento;
  - superficie in rapporto alla superficie del pavimento del locale;
  - esistenza o meno di protezioni notturne e di protezioni solari.

L'edificio stesso influenza il bilancio termico della finestra con la disposizione degli elementi massicci in rapporto alle finestre, il tipo di sistema di riscaldamento e la sua regolazione.

Il bilancio energetico netto di una superficie vetrata può essere valutato nel seguente modo:

$$\dot{q} = \underbrace{U_G \cdot (T_i - T_a)}_{perdite} - \underbrace{g \cdot I_S}_{guadagni} \qquad (30)$$

Esempio 5
Vetro doppio con U $\approx$ 3 W/(m^2·K) e g $\approx$ 60%;
Irraggiamento solare globale ($g \cdot I_S$) = 400 W/m^2; $T_i - T_a$ = 25 K;

$$\dot{q} = 3 \cdot 25 - 0.7 \cdot 400 \cong -200 \text{ W/m}^2$$

Il segno negativo indica un bilancio netto istantaneo favorevole: l'apporto solare è maggiore delle perdite dei vetri.