

Convezione naturale o forzata

Meccanismo di scambio termico tra una superficie solida, a temperatura t_s ed un fluido a temperatura t_{∞} in moto rispetto ad essa.

Convezione forzata: il fluido è in movimento con velocità imposta da un propulsore (es. ventilatore, vento,...) ed è indipendente dalla temperatura delle superficie;

Convezione naturale: il moto del fluido è prodotto dai gradienti locali di densità, indotti dalla differenza di temperatura tra la superficie e il fluido, e dalla presenza del campo gravitazionale terrestre.

Meccanismi di scambio termico: descrivere i meccanismi di scambio termico, esempi, espressioni del flusso termico con spiegazione delle grandezze termofisiche che vi compaiono.

Conduzione: meccanismo di scambio termico tra parti di un solido, o fluido fermo (aeriforme o liquido), a diverse temperature o tra corpi posti a diretto contatto.

Postulato di Fourier

$$q = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad [\text{W}]$$

La costante di proporzionalità $\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$ è detta conduttività o conducibilità termica ed è una caratteristica del materiale.

Convezione: meccanismo di scambio termico tra una superficie solida, a temperatura t_s ed un fluido a temperatura t_{∞} in moto rispetto ad essa.

Lex Newton

$$q = h A (t_s - t_{\infty}) \quad [\text{W}]$$

dove $h \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$ è il coefficiente di convezione o di scambio termico convettivo e A è l'area della superficie $[\text{m}^2]$. La (3) è nota come **legge di Newton**.

Irraggiamento: meccanismo di scambio termico legato alla propagazione di onde elettromagnetiche che avviene nel vuoto o in mezzi più o meno trasparenti.

$$q'' = \varepsilon \sigma T_1^4 \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

dove $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$ è la costante caratteristica del corpo nero o di Stefan-Boltzmann

dove ε è l'emissività, compresa tra 0 e 1, caratteristica della superficie considerata.

Bilancio termico per una superficie grigia opaca (espressione del flusso radiativo specifico uscente dalla superficie J , del flusso netto che lascia la superficie q , ecc...)

Superficie grigia: superficie con proprietà radiative indipendenti dalla lunghezza d'onda considerata sullo spettro elettromagnetico.

$$\varepsilon_{\lambda} = \varepsilon < 1 \quad ; \quad \alpha_{\lambda} = \alpha < 1$$

Superficie grigia opaca: superficie grigia + coeff. di trasmissione nullo.

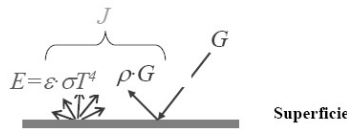
$$\begin{aligned} J &= \varepsilon \cdot E_n + \rho \cdot G \\ &= \varepsilon \cdot \sigma T^4 + \rho \cdot G \end{aligned}$$

Resistenza di superficie di una superficie grigia opaca

$$J = \varepsilon \cdot E_n + \rho \cdot G$$

$$= \varepsilon \cdot \sigma T^4 + \rho \cdot G$$

dove J è la radiosità ovvero la somma del flusso specifico emesso e il flusso specifico riflesso.



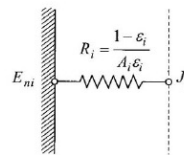
Poiché il flusso specifico entrante è pari all'irradiazione G, il flusso netto che lascia la superficie può essere espresso come

$$q = A \cdot (J - G)$$

Poiché per una superficie grigia opaca $\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon$ sostituendo $G = \frac{J - \varepsilon E_n}{\rho} = \frac{J - \varepsilon E_n}{1 - \varepsilon}$ si ottiene

$$q = \frac{A \cdot \varepsilon}{1 - \varepsilon} \cdot (E_n - J) = \frac{(E_n - J)}{\frac{1 - \varepsilon}{A \varepsilon}}$$

$R = \frac{1 - \varepsilon}{A \varepsilon}$ rappresenta la resistenza di superficie ovvero la resistenza al passaggio delle radiazione attraverso la superficie



Scambio termico tra due superfici grigie / Resistenza di forma nello scambio radiativo tra due superfici grigie / Schema grafico dell'analogia elettrica per lo scambio radiativo tra due superfici grigie opache con indicazione delle resistenze di superficie e di forma / Flusso termico radiativo scambiato fra due superfici grigie in funzione delle temperature delle stesse

$$J = \varepsilon \cdot E_n + \rho \cdot G$$

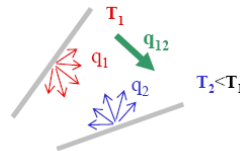
$$= \varepsilon \cdot \sigma T^4 + \rho \cdot G$$

$$q_{12} = q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1} = A_1 \cdot J_1 \cdot F_{12} - A_2 \cdot J_2 \cdot F_{21}$$

ovvero

$$q_{12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot (J_1 - J_2) = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{A_1 \cdot F_{12}}}$$

$$= A_2 \cdot F_{21} \cdot (J_1 - J_2) = \frac{(J_1 - J_2)}{\frac{1}{A_2 \cdot F_{21}}}$$

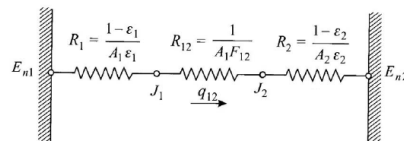


dove $R_{12} = \frac{1}{A_1 F_{12}} = \frac{1}{A_2 F_{21}}$ è la resistenza di forma al passaggio della radiazione tra le due superfici

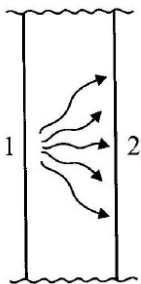
Riportando l'espressione del flusso termico radiativo dalla radiosità J al potere emissivo del corpo nero avente stessa tem

$$q_{12} = \frac{E_{n1} - E_{n2}}{R_{tot}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_{tot}}$$

dove $R_{tot} = \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}$



Resistenza totale dello scambio radiativo fra due superfici piane parallele



$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_{tot}}$$

dove $R_{tot} = \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}$

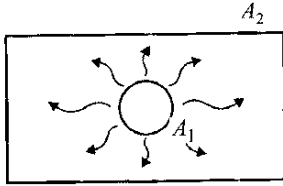
poiché $A_1 = A_2 = A$
 $F_{12} = F_{21} = 1$

$$R_{tot} = \frac{1 - \varepsilon_1}{A \varepsilon_1} + \frac{1}{A} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A \varepsilon_2} = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)$$

se inoltre $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

$$R_{tot} = \frac{1}{A} \left(\frac{2}{\varepsilon} - 1 \right)$$

Resistenza totale dello scambio radiativo nel caso di un corpo convesso contenuto in una cavità



$$q_{12} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{R_{tot}}$$

$$\text{dove } R_{tot} = \frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}$$

poiché $F_{12} = 1$

$$R_{tot} = \frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} - 1 + \frac{A_1}{A_2} \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2} \right)$$

se inoltre $A_1 \ll A_2 \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} \rightarrow 0$

$$R_{tot} = \frac{1}{A_1\epsilon_1}$$

$$\text{e } q_{12} = A_1\epsilon_1\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

2. Trasmissione del calore

2.1) Isolamento termico delle pareti edilizie:

- a) Tracciare l'andamento qualitativo delle temperature in una parete piana multistrato
 - con isolamento 'a cappotto'
 - con isolamento sul lato interno
- b) Descrivere i vantaggi e gli svantaggi dell'isolamento 'a cappotto' e dell'isolamento sul lato interno
- c) Ponti termici: definizione ed esempi

Interno

inserimento di un pannello di materiale isolante tra le pareti e il rivestimento interno.

Pro:

mantiene le caratteristiche della facciata
economico

Contro:

non elimina ponti termici
riduce lo spazio abitato
non consente sfruttamento dell'inerzia termica della parete
attenzione al comportamento igrometrico

Esterno (cappotto)

materiale isolante dissato alla parete e ricoperto di intonaco rinforzato

Pro:

elimina i ponti termici;

contro:

intervento di facciata

Ponti termici: discontinuità di geometrie e/o materiale in corrispondenza delle quali il flusso termico non può essere assunto come monodimensionale.

Il flusso termico disperso attraverso un ponte termico si calcola come:

$$q_j = \Psi_{L_j} \cdot L_j \cdot (t_i - t_e)$$

- Ψ_{L_j} è detto coefficiente lineico del ponte termico j

- L_j è la lunghezza caratteristica del ponte termico j

La valutazione di Ψ_{L_j} avviene attraverso simulazione numerica o prove sperimentali \Rightarrow diagrammi e tabelle

2. Trasmissione del calore

Coefficiente di trasmissione globale in una parete piana multistrato:

- 2.a) resistenza termica specifica conduttiva di una parete monostrato
- 2.b) resistenze convettive (specifiche) interna ed esterna per una parete piana
- 2.c) circuito elettrico equivalente, resistenza specifica globale e coefficiente di trasmissione globale per parete piana multistrato
- 2.d) rapporti di temperatura e resistenze specifiche in una parete piana multistrato
- 2.e) andamento qualitativo delle temperature in una parete piana multistrato
 - con isolamento 'a cappotto'
 - con isolamento interno

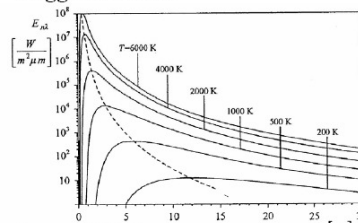
2.1) Leggi di emissione del corpo nero:

- a) Legge di Planck: rappresentazione grafica della distribuzione del potere emissivo monocromatico $E_{n,\lambda}$ del corpo nero
- b) Legge di Wien
- c) Legge di Stefan-Boltzmann (potere emissivo totale del corpo nero $E_n = \dots$)

Il corpo nero è una superficie radiante/assorbente ideale di riferimento per le proprietà radiative delle superfici reali.

- emette la radiazione massima (più di qualunque superficie reale) per ogni temperatura T e lunghezza d'onda
- emette una radiazione di tipo diffuso (indipendente dalla direzione)
- assorbe tutte le radiazioni incidenti indipendentemente dalla direzione di provenienza e dalla lunghezza d'onda

• Legge di Planck



Esprime il potere emissivo $E_{n,\lambda}$ in funzione della temperatura assoluta T e della lunghezza d'onda λ (vedi figura):

- All'aumentare di T, aumenta $E_{n,\lambda}$
- $E_{n,\lambda}$ presenta un massimo in corrispondenza di un valore di λ
- All'aumentare di T, il massimo si sposta verso valori di λ crescenti

• Legge di Wien

Esprime la relazione tra lunghezza d'onda in corrispondenza delle quali si ha il massimo potere emissivo λ_{max} e la temperatura assoluta

$$\lambda_{max} \cdot T = \text{cost} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

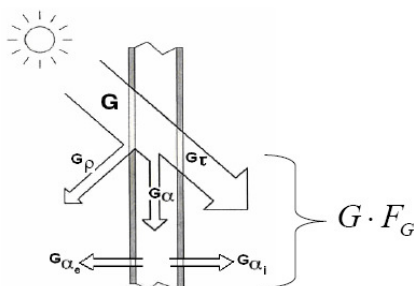
Dalla quale risulta che i corpi a temperatura ambiente hanno un picco di emissione intorno a 9-10 μm (infrarosso) e il Sole ($T \approx 5770 \text{ K}$) a 0,5 μm

• Legge di Stefan-Boltzmann

Integrando la legge di Planck su tutto lo spettro di emissione si ottiene

$$E_n = \int E_{n,\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{con } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4) \text{ costante di Stefan Boltzmann}$$

Descrivere il comportamento termico di una superficie trasparente colpita dalla radiazione solare G_s



G è l'irradiazione solare [W/m^2]

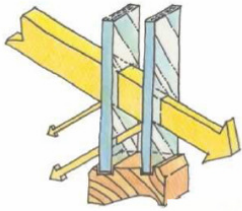
$$F_G = \tau_s + \alpha_s \frac{U}{h_e} \quad \text{è il fattore di guadagno solare}$$

dipendono da:

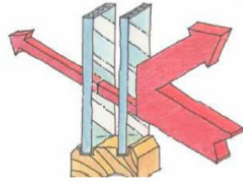
- tipo di vetro
- lunghezza d'onda della radiazione incidente
- angolo di incidenza della radiazione solare

Ragioni fisiche dell'effetto serra

Irraggiamento solare ad alta frequenza



radiazione termica a bassa frequenza



Ragioni fisiche dell'effetto serra: Il vetro è un materiale semitrasparente (ha coefficiente di trasmissione diverso da zero per un certo intervallo di lunghezze d'onda della radiazione incidente e pari a zero nel resto dello spettro). Si verifica quindi che sia trasparente per le radiazioni che cadono nel campo del visibile (0.4 - 0,8 μm) e opaco per radiazioni ricadenti nella lunghezza d'onda dell'infrarosso ($>4 \mu\text{m}$)

Verifica termoigrometrica:

1. Ragioni fisiche dalla formazione di condensa interstiziale;
2. Legge di diffusione del vapore e analogia termica con il postulato di Fourier per la conduzione in una parete monostrato;
3. Diagramma Glaser;
4. Interventi per ridurre il rischio di formazione di condensa interstiziale

formazione di condensa del vapore acqueo contenuto nell'aria ambiente

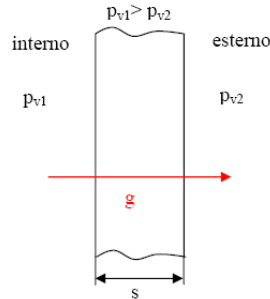
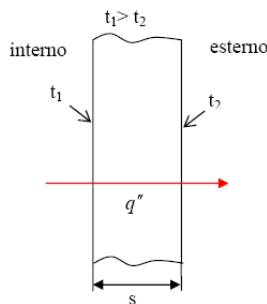
- sulle superfici della struttura (superficiale)
- all'interno delle struttura (interstiziale)

è un problema tipicamente invernale. Il vapore d'acqua tende a migrare dall'ambiente interno verso l'esterno e, se si vengono a creare determinate condizioni, può condensare all'interno delle strutture.

Il vapore d'acqua contenuto nell'aria ambiente (aria umida = miscela di aria secca e vapore d'acqua) condensa quando

$$\text{pressione di vapore } (p_v) = \text{pressione di saturazione } (p_s)$$

La verifica termoigrometrica consiste nel verificare se sulla superficie della parete o al suo interno si verifica tale condizione



$$q'' = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{s} \quad \text{postulato di Fourier}$$

Δt differenza di temperatura

λ conduttività termica

$$R_{\lambda} = \frac{s}{\lambda} \quad \text{resistenza termica conduttiva}$$

$$g = \delta \cdot \frac{\Delta p_v}{s} \quad \text{legge di Fick}$$

Δp_v differenza di pressione di vapore

δ permeabilità al vapore

$$R_v = \frac{s}{\delta} \quad \text{resistenza al flusso di vapore}$$

Diagramma Glaser

- Calcolare t_i dei vari strati;
- Pressione di saturazione interna, esterna e negli strati intermedi ricavabile da tabelle o da formule esponenziali;
- Raffigurare su grafico i valori di spessore equivalente degli strati;
- Calcolare le pressioni di vapore su superficie interna ed esterna:

$$g = \delta \cdot \frac{p_{v1} - p_{v2}}{s} = \delta \cdot \frac{\Delta p_v}{s} \quad \text{legge di Fick}$$

dove

g portata di vapore per unità di superficie $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$

Δp_v differenza di pressione di vapore $[Pa]$

δ permeabilità del materiale al vapore $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m s Pa}} \right]$

$$P_{v1} = \Phi_i \cdot P_s(t_1)$$

$$P_{v2} = \Phi_e \cdot P_s(t_2)$$

- Tracciare i diagrammi in scala
- Se $p_v < p_s(t)$ sempre \Rightarrow no problemi di condensa
- Se p_v interseca $p_s(t) \Rightarrow$ problemi di condensa (v)

Interventi per ridurre:

- inserire barriere al vapore (hanno resistenza termica bassa – ininflue – e fattore di resistenza al flusso alto – Sd aumenta);
- Cappotto (cambia stratigrafia)

Irraggiamento:

- fornire la definizione di corpo nero e l'espressione del flusso termico radiativo emesso da una superficie nera;
- descrivere il comportamento di una superficie reale rispetto alla una radiazione emessa e fornire l'espressione del flusso termico radiativo emesso da una superficie reale;
- indicare lo strumento che permette di rilevare la temperatura superficiale degli oggetti attraverso la misura del flusso termico radiativo emesso dalla superficie medesima;

Il corpo nero è una superficie radiante/assorbente ideale di riferimento per le proprietà radiative delle superfici reali.

- emette la radiazione massima (più di qualunque superficie reale) per ogni temperatura T e lunghezza d'onda
- emette una radiazione di tipo diffuso (indipendente dalla direzione)
- assorbe tutte le radiazioni incidenti indipendentemente dalla direzione di provenienza e dalla lunghezza d'onda

$$q_1'' = \varepsilon \sigma T_1^4 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{dove } \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \text{ è la costante caratteristica del corpo nero o di Stefan-Boltzmann}$$

Per un corpo nero $\varepsilon = 1$ (emissività)

Una superficie reale è caratterizzata dall'emissività ε definita come il rapporto tra il potere emissivo E della superficie reale e il potere emissivo E_n del corpo nero: $\varepsilon = E / E_n$ (riferito a tutto lo spettro delle lunghezze d'onda, o a singoli intervalli λ).

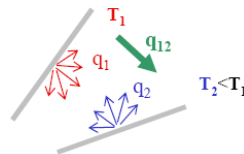
Scambio termico radiativo tra superfici nere;

- flusso termico emesso da una superficie nera a temperatura T (potere emissivo)
- espressione del flusso termico radiativo scambiato tra due superfici nere
- significato del fattore di vista e legge di reciprocità

$$q_{12} = q_{1 \rightarrow 2} - q_{2 \rightarrow 1} = A_1 \cdot E_{n1} \cdot F_{12} - A_2 \cdot E_{n2} \cdot F_{21}$$

$$q_{12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot (E_{n1} - E_{n2}) = A_1 \cdot F_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

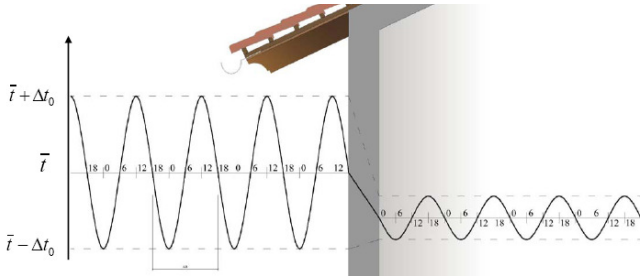
$$= A_2 \cdot F_{21} \cdot (E_{n1} - E_{n2}) = A_2 \cdot F_{21} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$



fattore di vista: è riferito alle radiazioni che dalla superficie emittente raggiungono la superficie ricevitrice. Dipende dalla posizione reciproca delle due superfici.

$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21}$$

- Comportamento di una parete perimetrale esterna sottoposta a variazione sinusoidale della temperatura dell'aria esterna:
- rappresentare graficamente l'andamento sinusoidale giornaliero della temperatura dell'aria esterna e quello della temperatura sulla superficie interna della parete evidenziando le grandezze che descrivono l'azione della parete nel trasferimento della sollecitazione termica dall'esterno all'interno
 - indicare le grandezze fisiche proprie della parete che determinano il suddetto comportamento



Temperatura esterna varia nel tempo con legge approx. sinusoidale → onda caratterizzata da ampiezza e periodo. La parete provoca uno smorzamento dell'ampiezza dell'onda e uno sfasamento temporale dell'onda nel passaggio dall'esterno all'interno. Sfasamento e smorzamento sono i parametri da prendere in considerazione e quantizzare per stabilire il grado di comfort termico offerto da una parete.

$$t(\vartheta, x) = \bar{t} + \Delta t_0 \cdot e^{-\gamma x} \text{sen}(\omega(\vartheta - \vartheta_r))$$

$e^{-\gamma x}$ = fattore di attenuazione o smorzamento

$$\vartheta_r = \frac{\gamma x}{\omega} \text{ tempo di ritardo [s]}$$

$$\gamma \cdot s = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot s = \sqrt{\frac{\omega \rho c}{2 \lambda}} s^2 = \sqrt{\frac{\omega \left(\frac{s}{\lambda}\right) (\rho c s)}{2}} = \sqrt{\frac{\omega}{2} R_\lambda'' C''}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} = \sqrt{\frac{\omega \rho c}{2 \lambda}} \text{ costante di attenuazione [m}^{-1}\text{]} \quad \vartheta_r = \frac{\gamma x}{\omega} = \sqrt{\frac{R_\lambda'' C''}{2\omega}}$$

Il prodotto $\rho \cdot s \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$ è definito massa frontale della parete.

Comportamento delle pareti opache e trasparenti in presenza della radiazione solare:

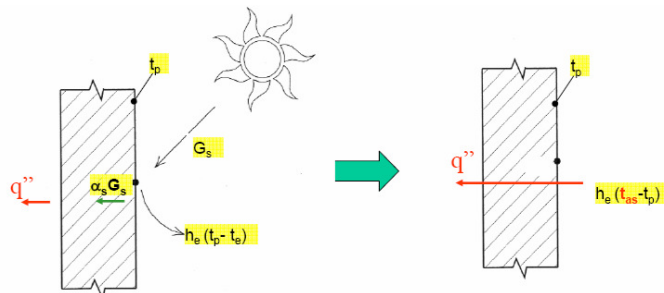
a) Comportamento delle pareti opache in presenza di radiazione solare:

- schematizzazione del bilancio termico
- definizione della temperatura aria-sole
- espressione del flusso termico specifico trasmesso attraverso la parete in presenza della radiazione solare

b) Comportamento delle pareti trasparenti in presenza di radiazione solare:

- schematizzazione del bilancio termico (scomposizione della radiazione solare G incidente)
- descrizione qualitativa della dipendenza del coefficiente di trasmissione del vetro dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente
- definizione di apporti solari

Opache



Temperatura aria-sole: temperatura dell'aria esterna che apporterebbe sulla superficie esterna della parete lo stesso flusso termico q'' comprensivo della radiazione solare incidente:

$$q'' = \alpha_s G_s - h_e \cdot (t_p - t_e)$$

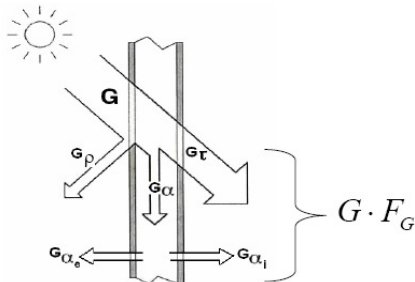
$$q'' = h_e \cdot (t_{as} - t_p)$$

Il flusso termico specifico attraverso la parete è:

$$q'' = U \cdot (t_{as} - t_i)$$

$$\rightarrow U = 1 / R'' \text{ tot}$$

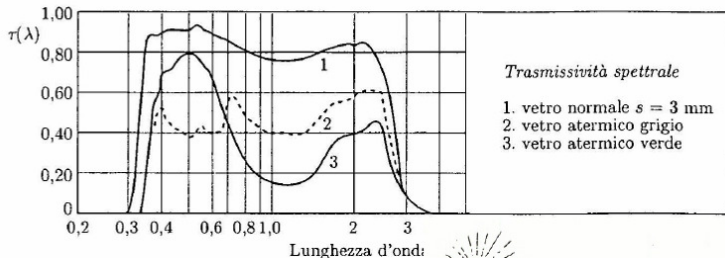
Trasparenti



G è l'irradiazione solare [W/m^2]

$$F_G = \tau_s + \alpha_s \frac{U}{h_e} \text{ è il fattore di guadagno solare}$$

- τ : coeff. di trasmissione
- ρ : coeff. di riflessione
- α : coeff. di assorbimento



Trasmissività spettrale

1. vetro normale $s = 3 \text{ mm}$
2. vetro atermico grigio
3. vetro atermico verde

Apporto solare = sommatoria dell'energia solare trasmessa direttamente e indirettamente = $G \cdot F_G$.

Sistemi solari

Sistemi solari passivi: permettono di captare ed accumulare la radiazione solare senza componenti supplementari quali pompe, ventilatori, ...

Guadagno diretto

- Finestrature a sud.

Guadagno indiretto

- Muro Trombe: il calore viene accumulato e ceduto per irraggiamento o per convezione. E' costituito da una parete di almeno 30cm di materiale massivo (mattoni pieni, calcestruzzo) dipinta di scuro, protetta nella parte esposta al sole da un vetro e con una intercapedine d'aria di una decina di cm. Durante la giornata il muro accumula calore (che irradia verso l'interno) e l'aria nell'intercapedine, che raggiunge valori di temperatura elevati, viene fatta circolare nella stanza attraverso aperture verso l'interno (una vicina al pavimento e l'altra poco sotto il soffitto). Nei mesi estivi deve essere opportunamente ombreggiato.
- Camino solare: costituito da una copertura in vetro, una intercapedine ad una parete isolante con poca inerzia termica. L'aria che si trova nell'intercapedine si surriscalda e circola all'interno della stanza per concludere il suo ciclo tornando all'interno dell'intercapedine;
- Barra-Costantini: ha un pannello metallico nell'intercapedine tra vetrata e muro.

Sistemi di controllo solare:

Orientamento e forma dell'edificio

Collocazione della vegetazione

Controllo delle chiusure esterne trasparenti con aggetti, schermi mobili, vetri