



Zeno Martini (admin)

IL FATTORE SOLARE DELLE VETRATE

9 November 2009

Qualcosa sulla radiazione elettromagnetica

Un corpo a temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazioni elettromagnetiche in tutte le direzioni.

La **potenza radiante** (W) è in genere rapportata alla superficie che la emette, per cui si valuta, della radiazione, la potenza specifica $\left(\frac{W}{m^2}\right)$.

La radiazione complessiva comprende un ampio campo di lunghezze d'onda, ciascuna dotata di una propria energia.

Si definisce un corpo ideale detto **corpo nero**, assunto come riferimento per tutti gli altri corpi, quello che emette la massima energia per ogni lunghezza d'onda e per ogni temperatura.

Il corpo nero, oltre che **perfetto emettitore**, è anche un **perfetto assorbitore**, cioè assorbe tutta l'energia radiante che riceve senza alcuna riflessione. Per questo motivo è detto nero, in quanto il colore percepito è dato dalla composizione spettrale della luce riflessa. Se un corpo riflette tutta la luce ricevuta appare bianco, se l'assorbe, nero. In pratica può essere realizzato praticando un piccolo foro su di un corpo cavo. Il foro si comporta come il corpo nero. La luce è una porzione dell'intero spettro elettromagnetico compresa tra le lunghezze d'onda di **400** ed i **760 nm**.

L'energia totale emessa dal corpo nero è regolata dalla legge di **Stefan-Boltzmann**: il **potere emissivo** del corpo nero, espresso in $\frac{W}{m^2}$, è dato da

$$E_n = \sigma_n \cdot T^4$$

$$\sigma_n = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \text{Costante di Stefan-Boltzmann}$$

T : temperatura assoluta del corpo (K)

E_n è il potere emissivo totale ed è la somma della radiazione emessa in tutte le lunghezze d'onda.

Si definisce **potere emissivo monocromatico** (o *spettrale*) la potenza specifica emessa dal corpo alla temperatura T , ad una data lunghezza d'onda e per unità di lunghezza d'onda. Cioè la potenza specifica di quella lunghezza d'onda diviso la lunghezza d'onda stessa. Quindi è misurata in $\frac{W}{m^3}$: più comunemente

$$\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} = 10^6 \cdot \frac{W}{m^3}$$

Vale per il corpo nero la

legge di distribuzione di Planck

$$E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}$$

illustrata in figura fs.1

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: costante di Planck

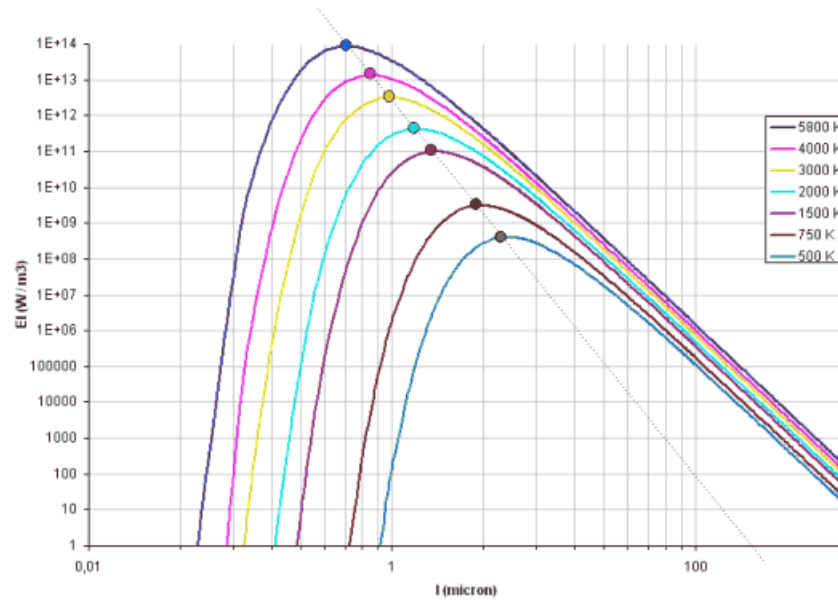
$c = 2,99792 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$: velocità della luce

$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$: costante di Boltzmann

λ : lunghezza d'onda (μm)

$$C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 = 3,742 \cdot 10^8 \frac{\mu\text{m}^4}{\text{m}^2}$$

$$C_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$



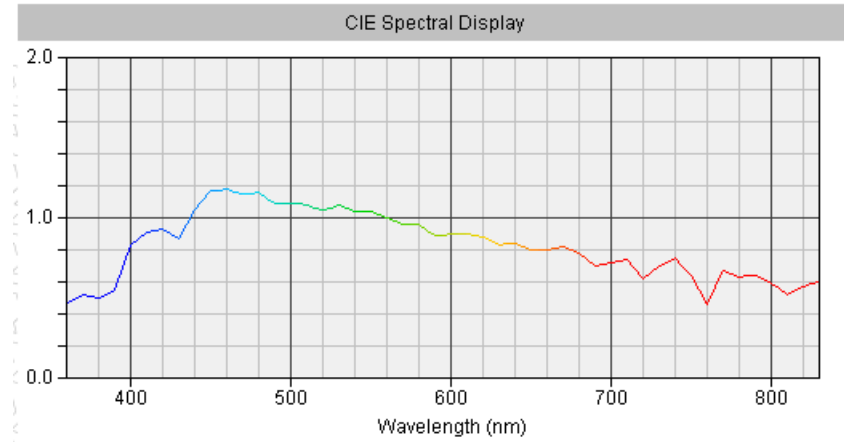
fs.1

Nota: la retta tratteggiata passa per i massimi di ogni curva. Essa esprime la *legge dello spostamenti di Wien*:

$$(\lambda \cdot T)_{potenza-massima} = 2897,8(\mu\text{m K})$$

Trasmissione luminosa: τ_e

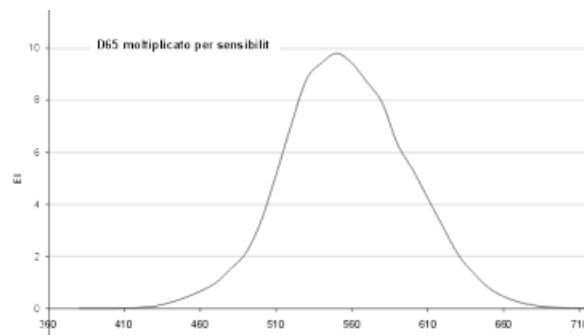
La trasmissione luminosa riguarda il comportamento di una vetrata rispetto alla luce (cioè, come detto, le radiazioni elettromagnetiche comprese tra **400** ed i **760 nm**). L'andamento dell'energia emessa da una sorgente all'interno di quell'intervallo è dipendente dalla natura della sorgente e dalla sua temperatura. Nello studio delle proprietà ottiche e colorimetriche si usano gli illuminanti standard. Per determinare la trasmissione luminosa si usa il **D65**, la cui emissione spettrale è mostrata dalla curva di figura.



fs.2

Nota: Diagramma realizzato con l' applicazione della pagina [CIE Spectral Display](#) di **Bruce Lindbloom**

Poiché l'occhio non è ugualmente sensibile a tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico visibile, i valori dell'illuminante per una data lunghezza d'onda sono moltiplicati per il [fattore di visibilità, \$V_\lambda\$](#) , relativi a quella lunghezza d'onda. Si ottiene, per l'illuminante D65 , la curva di figura fs.3



fs.3

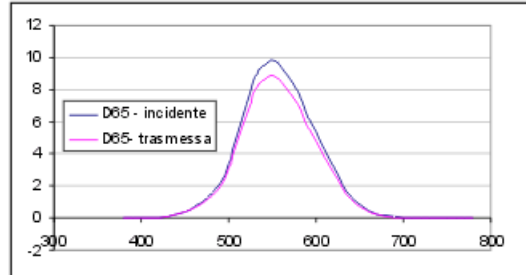
L'area delimitata dalla curva rappresenta la totale energia visibile, cioè il [flusso luminoso](#) emesso, nel caso specifico dall'illuminante D65.

Il calcolo della trasmissione luminosa consiste nel tracciare la curva spettrale dell'energia visibile trasmessa, pesata secondo la sensibilità spettrale dell'occhio, ed eseguire il rapporto tra l'area delimitata da questa curva e l'area della curva dell'illuminante.

La figura illustra il confronto.

Nelle figura *fs.3* ed *fs.4*, i valori della curva **D65** sono stati predeterminati in modo che l'area valga 100.

Nella figura *fs.4* è tracciato il grafico della luce trasmessa da un vetro chiaro. Si ha, in tal caso, una trasmissione luminosa elevata, attorno al 90%.

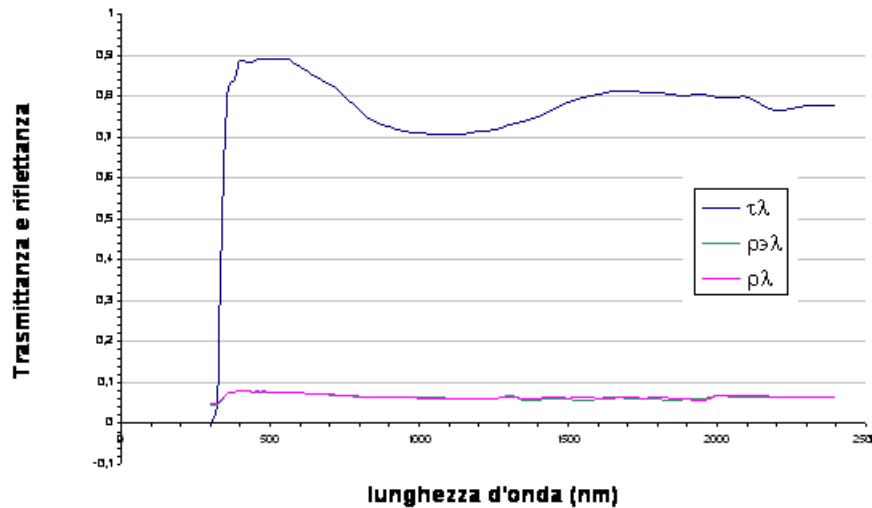


fs.4

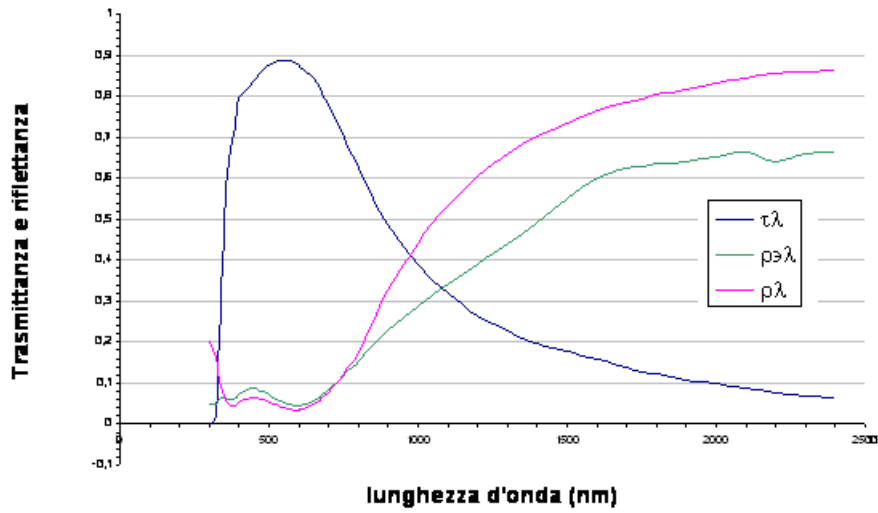
La trasmissione luminosa rappresenta dunque il rapporto tra il flusso luminoso trasmesso ed il flusso luminoso incidente.

Per tracciare la curva dell'energia visibile trasmessa occorre disporre della curva di trasmittanza spettrale τ_λ determinata con misure di laboratorio.

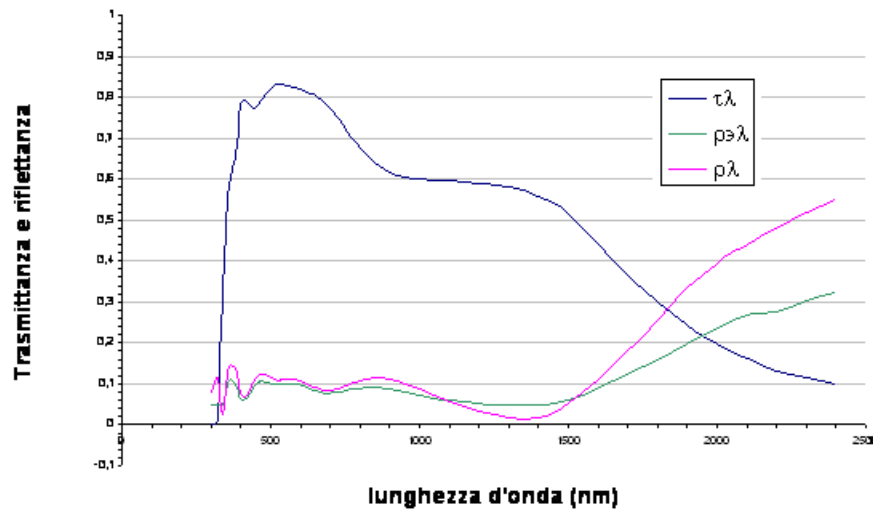
Esempi di queste curve sono mostrati, per diversi tipi di vetro, nelle figure *fs.6,7,8,9*.



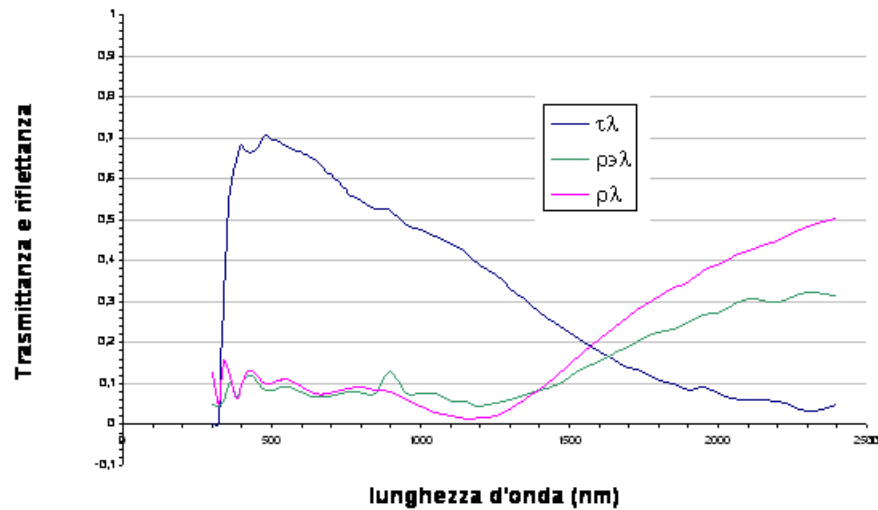
fs.6 - Vetro Float chiaro da 6 mm



fs.7 - Vetro bassoemissivo magnetronico da 4 mm



fs.8 - Vetro bassoemissivo pirolitico da 6 mm



fs.9 - Vetro a controllo solare da 6 mm

Nelle figure precedenti, oltre alla trasmittanza spettrale compaiono altre curve, le riflettanze spettrali (ρ_λ , ρ_λ') delle due facce del vetro, necessarie per poter determinare con il calcolo, condotto in base alla norma **EN 410**, la trasmissione e, come vedremo, il fattore solare, di vetri composti (doppi vetri e tripli vetri).

Per le diverse composizioni vetrarie bisogna dunque disporre dei dati spettrali dei vetri componenti. Essi sono:

Per un **vetro chiaro**

- Trasmittanza spettrale (τ_λ)
- Riflettanza spettrale (ρ_λ)

Per un **vetro bassoemissivo**

- Trasmittanza spettrale (τ_λ)
- Riflettanza spettrale (ρ_λ) lato trattato
- Riflettanza spettrale (ρ_λ) lato non trattato
- Emissività normale lato trattato

Quando si realizza un doppio vetro infatti, per il calcolo dell'energia trasmessa occorre considerare il gioco delle riflessioni interne all'intercapedine. La trasmittanza spettrale risultante non è infatti semplicemente il prodotto delle due trasmittanze, come si potrebbe pensare (senza riflettere è proprio il caso di dire) ma da questa espressione $\tau = \tau_1 \cdot \frac{\tau_2}{1 - \rho_{1b} \cdot \rho_2}$

dove τ_1 e τ_2 sono le trasmittanze spettrali dei due vetri componenti, e ρ_{1b} e ρ_2 le riflettanze spettrali sul lato opposto a quello incidente del vetro esterno e della parte incidente del vetro interno.

Fattore Solare: g

Il fattore solare è il rapporto tra l'energia termica proveniente dal sole ed entrante nell'ambiente, e l'energia che arriva sulla superficie esterna della lastra.

Per il calcolo del fattore solare si considerano le lunghezze d'onda comprese tra i **0,3** ed i **2,5 μm** , quindi, oltre alle radiazioni visibili, una parte dell'ultravioletto ($< 0,380\mu m$) ed una parte di infrarosso ($> 0,780\mu m$).

La figura mostra come si ripartisce il flusso radiante incidente Φ_e

- Una parte è riflessa: $\rho_e \cdot \Phi_e$

ρ_e :coefficiente o fattore di riflessione;

- una parte direttamente trasmessa: $\tau_e \cdot \Phi_e$

τ_e :fattore di trasmissione;

- una parte assorbita: $\alpha_e \cdot \Phi_e$

α_e fattore di assorbimento.

Questa parte di energia assorbita è poi riemessa verso l'interno e verso l'esterno

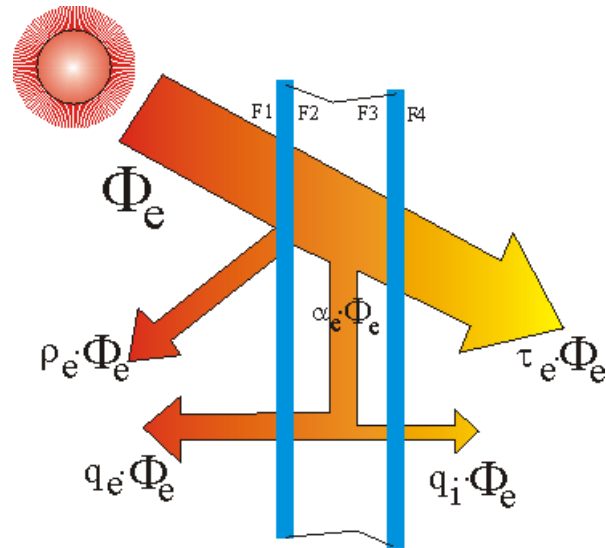
- $q_e \cdot \Phi_e$ è la parte riemessa all'esterno

q_e è il *fattore di scambio termico secondario verso l'esterno*

- $q_i \cdot \Phi_e$ è la parte riemessa all'interno

q_i è il *fattore di scambio termico secondario verso l'interno*

Valgono le relazioni di figura *fs.10* per i vari coefficienti.



$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1$$

$$\alpha_e = q_e + q_i$$

fs.10

Per la definizione data di fattore solare si ha allora

$$g = \tau_e + q_i$$

Calcolo di τ_e

Il procedimento di calcolo è, per quanto riguarda τ_e simile a quello della trasmissione luminosa.

La sorgente luminosa è in questo caso la radiazione solare globalizzata, il cui andamento spettrale è mostrato in figura *fs.11*

[fs.11: radiazione solare globalizzata](#)

fs.11: radiazione solare globalizzata

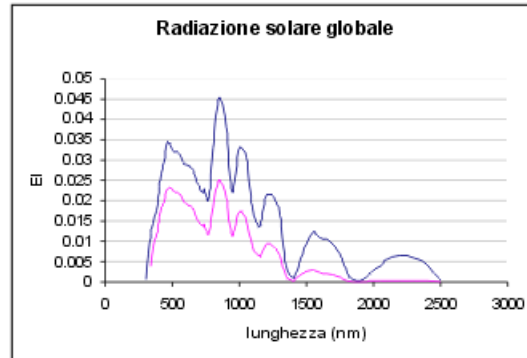
I valori della curva sono normalizzati in modo tale che l'area sottesa dalla curva abbia valore unitario. Si moltiplicano ora i valori di questa curva per i corrispondenti valori di trasmittanza spettrale. Si ottiene in tal modo l'andamento spettrale dalla radiazione solare trasmessa. L'area che sta sotto questa curva, sempre inferiore ad 1, è il fattore τ_e

Le figure *fs.12* ed *fs.13* sono due esempi con vetri diversi. Il primo è relativo ad un vetro chiaro; il secondo ad un vetro a controllo solare. La curva mediamente

più bassa è la radiazione trasmessa e, come si può notare dall'area sottesa, il vetro solare lascia passare meno energia, a tutte le lunghezze d'onda ma, in particolare, nel campo dell'infrarosso (da **760 a 2500 nm**)

[fs.12](#)

fs.12



fs.13

Calcolo di q_i

Il fattore di trasmissione secondaria verso l'interno che, sommato alla trasmissione solare diretta, fornisce il fattore solare, si calcola con

$$q_i = \alpha_e \cdot \frac{h_i}{h_i + h_e}$$

dove h_i ed h_e sono i coefficienti di scambio termico verso l'interno e verso l'esterno, che dipendono dalle condizioni al contorno della vetrata.

Assumendo condizioni convenzionali (vetrata verticale; vento: velocità=4 m/s; convezione naturale all'interno) si ha

$$h_e = 23 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h_i = 3,6 + 4,4 \cdot \frac{e}{0,837} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \text{ con } e \text{ emissività corretta della superficie interna}$$

mentre α_e è il coefficiente di assorbimento solare ricavabile dalla prima uguaglianza in fig. *fs 10*.

Si deve per questo determinare il coefficiente di riflessione esterno ρ_e .

Il procedimento è del tutto simile a quello usato per il coefficiente di trasmissione diretta, ovviamente utilizzando i valori relativi alla riflettanza spettrale. Si moltiplicano cioè i valori della radiazione solare per i valori della riflettanza spettrale ricavando le curve la cui area corrisponde proprio a ρ_e .

Utility

- Il calcolo delle aree è un calcolo integrale e può essere implementato su un **foglio di calcolo EXCEL** utilizzando la tabella del prospetto 2 (per il fattore solare), o del prospetto 1 per la trasmissione luminosa, della Norma più volte citata (EN 410). **Questo** ne è un esempio.
- **[IGDB](#)**

E' un database internazionale periodicamente aggiornato, dove i produttori più importanti e più attenti alle necessità di conoscenza e di documentazione dei costruttori di vetrate isolanti, inseriscono i dati dei loro prodotti.

- **[WINDOW](#)**

E' pubblico anche il software sviluppato dalla LBLN finanziata dal governo degli USA che consente di calcolare i parametri termici e luminosi di ogni composizione vetraria che faccia uso dei prodotti vetrari inseriti in IGDB.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Admin:fattoresolare>"