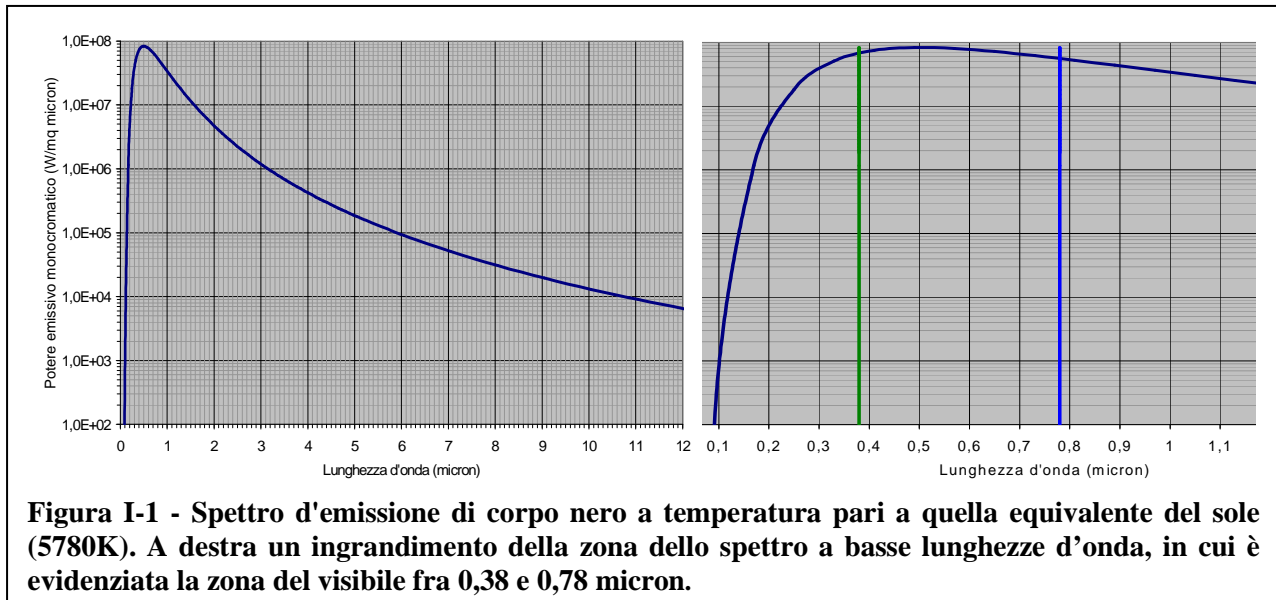


## Capitolo I – La radiazione solare

### I-1 Generalità

Lo spettro di emissione solare (extra atmosferico) è ritenuto equivalente a quello di un corpo nero ad una temperatura effettiva di 5780K. Su questa base si ottiene uno spettro d'emissione solare mostrato in figura I-1, rappresentativo della formula dovuta a Planck:



$$e_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[ W / m^2 \mu m \right]$$

$$C_1 = 3,742 \cdot 10^8 W \mu m^4 / m^2$$

$$C_2 = 1,439 \cdot 10^4 \mu K$$

$$T = 5780 K$$

La lunghezza d'onda per cui si ha il valore massimo dell'emissione (legge di Wien<sup>2</sup>) nel vuoto è pari a:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{5780} = 0,501 \mu m$$

che corrisponde al valore massimo del coefficiente di visibilità<sup>3</sup> dell'occhio umano per la visione diurna. Il sole emette una frazione di poco superiore al 40% (42,8%) della potenza totale emessa su tutte le lunghezze d'onda (pari a  $\sigma T^4$  secondo la legge di Stefan – Boltzman con  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$ ), nell'intervallo nel campo della radiazione visibile, cioè fra 0,38  $\mu m$  e 0,78  $\mu m$ .

In generale una tale frazione F, ad esempio ad una temperatura T e nell'intervallo  $(\lambda_1, \lambda_2)$ , è calcolabile come:

<sup>1</sup> Il pedice 0 indica che ci si riferisce ad un corpo nero.

<sup>2</sup> La legge di Wien lega la temperatura del corpo, T, e la lunghezza d'onda,  $\lambda_{\max}$ , a cui si verifica il massimo dell'emissione come  $T \lambda_{\max} = c$ , con il valore di c assunto qui uguale a 2898 K  $\mu m$ .

<sup>3</sup> Il coefficiente di visibilità  $v(\lambda)$  è un coefficiente che consente di legare il flusso luminoso monocromatico  $\phi(\lambda)$  percepito dall'occhio umano in funzione dell'energia emessa da un corpo su una certa lunghezza d'onda  $e(\lambda)$ :

$$\phi(\lambda) = v(\lambda)e(\lambda)$$

$$F_T(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} e_0(\lambda, T) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e_0(\lambda, T) d\lambda = F_T(0, \lambda_2) - F_T(0, \lambda_1)$$

con

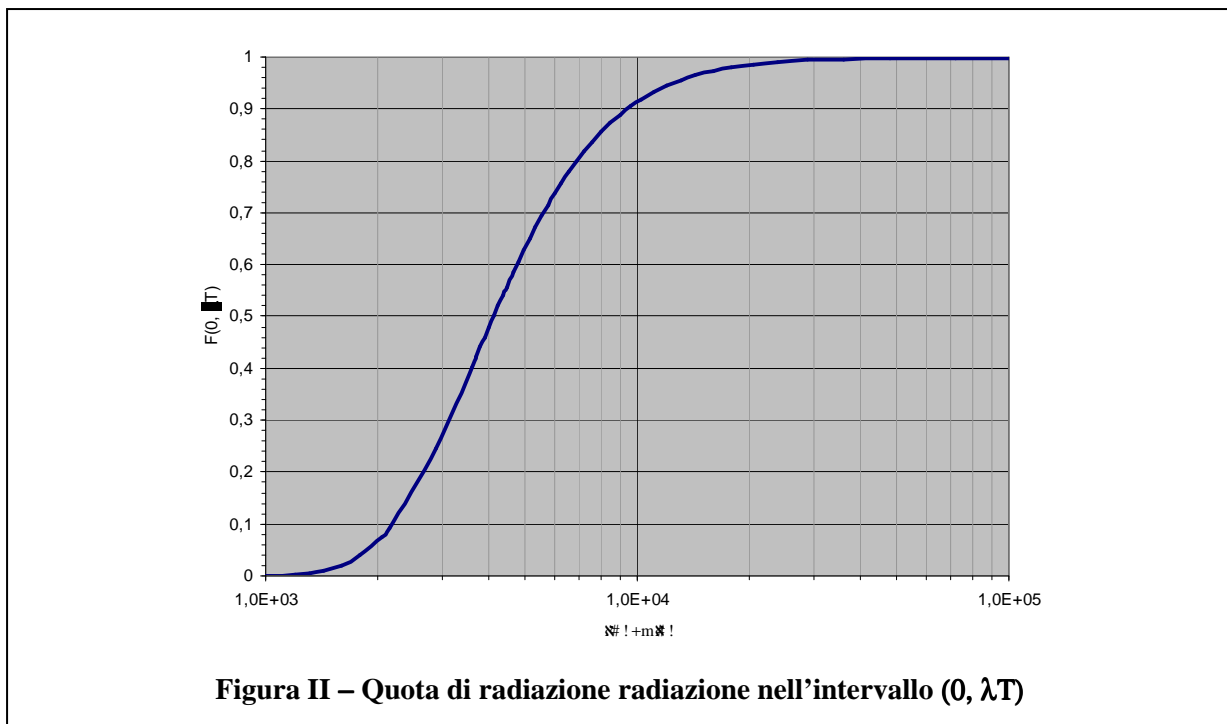
$$F_T(0, \lambda_2) = \frac{\int_0^{\lambda_2} e_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} e_0(\lambda, T) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_2} e_0(\lambda, T) d\lambda; \quad F_T(0, \lambda_1) = \frac{\int_0^{\lambda_1} e_0(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} e_0(\lambda, T) d\lambda} = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda_1} e_0(\lambda, T) d\lambda$$

Il valore di F può essere calcolato attraverso un'espansione in serie: come segue:

$$F_T(0, \lambda) = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\lambda} e_0(\lambda, T) d\lambda = \frac{C_1}{\sigma C_2^4} \int_x^{\infty} \frac{x^3}{(e^x - 1)} dx = \frac{C_1}{\sigma C_2^4} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{-kx}}{k} \left[ x^3 + \frac{3x^2}{k} + \frac{6x}{k^2} + \frac{6}{k^3} \right]$$

$$\text{con } x = \frac{C_2}{\lambda T}$$

Normalmente sono sufficienti i primi tre o quattro termini della sommatoria per avere una buona approssimazione, ma, in ogni caso è opportuno aumentare il numero dei termini quando il valore di x è molto basso. La figura I-2 riporta il grafico di F in funzione del prodotto  $\lambda T$  ( $\mu\text{mK}$ ), da cui, di



volta in volta, sono desumibili le quote di potenza emessa ad un dato valore del prodotto lunghezza d'onda – temperatura del corpo.

Conoscere la ripartizione dell'energia solare in base alla posizione nei vari intervalli possibili dello spettro solare può essere estremamente comodo per una progettazione corretta dei vari sistemi di captazione solare. Ad esempio, nel caso di celle fotovoltaiche in silicio cristallino sappiamo che la radiazione a bassa energia (lunghezze d'onda superiori a 1,1 micron) non può venire utilizzata dal fenomeno così come quella ad alta energia (lunghezza d'onda inferiore a 0,40 micron) può venire utilizzata solo in parte.

La prima quota corrisponde ( $\lambda T = 1,1 \cdot 5780 = 6358 \mu\text{mK}$ ) ad un valore  $F_{5780}(1,1 \mu\text{m}; \infty) = F_{5780}(0; \infty) - F_{5780}(0; 1,1 \mu\text{m}) = 1 - F_{5780}(0; 1,1 \mu\text{m}) = 1 - 0,766 = 0,234$ . La seconda ( $\lambda T = 0,40 \cdot 5780 = 2312 \mu\text{mK}$ ) a  $F_{5780}(0; 0,40 \mu\text{m}) = 0,132$ .

Ovviamente al progettista interessa sapere qual è la potenza di cui può disporre per i suoi fini. A questo scopo è necessario compiere dei passi successivi, che tengano conto delle variabili che, via via, entrano in gioco.

Cominciamo col fare alcune considerazioni semplificate (assumendo, cioè di poterci riferire ad una simmetria sferica) circa la geometria del sistema terra sole, le cui dimensioni principali sono riportate di seguito:

- Diametro del sole  $D$  (km)  $1,36 \cdot 10^6$
- Diametro della terra  $d$  (km)  $12700$
- Distanza terra sole  $l$  (km)  $149,5 \cdot 10^6 \pm 1,7\%$  (eccentricità dell'orbita)
- Potenza emessa dal sole  $P_s$  (kW)  $3,84 \cdot 10^{23}$

La densità di potenza,  $I_0$  ( $W/m^2$ ), che giunge all'esterno dell'atmosfera è pari a:

$$P_s = \sigma T^4 \cdot \pi D^2 = 3,84 \cdot 10^{26} W$$

$$\sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5780^4 = 6,328 \cdot 10^7 (W / m^2)$$

$$I_0 = \sigma T^4 \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^2 = 1367,7 W / m^2$$

Il valore di  $I_0$ , cambia in funzione della distanza terra sole, che varia fra un minimo di  $l_{\min} = 147 \cdot 10^6$  km, a gennaio, ed un massimo di  $l_{\max} = 152 \cdot 10^6$  km, a giugno. Per cui, con i valori suddetti:

$$I_{0,\max} = I_0 \left(\frac{l}{l_{\min}}\right)^2 = 1414,6 W / m^2$$

$$I_{0,\min} = I_0 \left(\frac{l}{l_{\max}}\right)^2 = 1322,3 W / m^2$$

Questo valore corrisponde a quello della cosiddetta costante solare. Essa è definita come la potenza complessivamente (sull'intero spettro di lunghezze d'onda) emessa dal sole, per unità di superficie perpendicolare ai raggi solari, in prossimità dell'atmosfera terrestre alla distanza media terra-sole. A questa è spesso attribuito il valore  $I_0 = 1353 \pm 21 W/m^2$  proposto da Thekaekara e Drummond nel 1971, che si trova in molti riferimenti bibliografici. Più recentemente<sup>4</sup> il World Radiation Center ha proposto  $I_0 = 1367^5 W/m^2$  con una incertezza dell'1%.

Oltre che per l'effetto della variazione della distanza terra – sole<sup>6</sup>, funzione della posizione della terra sull'orbita, il valore della costante solare deve, poi, essere modificato per tener conto di vari fenomeni fra cui del fatto che l'alta atmosfera rimuove una certa parte dello spettro solare. Si definisce perciò un "angolo annuale",  $y$ , dato da:

$$y = \frac{360}{365} n(^{\circ}) \quad y = \frac{2\pi}{365} n(rad)$$

in funzione del quale si propone il nuovo valore,  $I_r$ , da considerare per i calcoli, con  $y$  in radianti,  $I_r$  in  $W/m^2$  ed  $I_0 = 1354 W/m^2$ :

$$I_r = 0,862 [I_0 + 85,2 \cos(y - 0,1396)]$$

E, di conseguenza, un valore medio  $\langle I_r \rangle$  su un periodo dell'anno ( $n_1; n_2$ ) dato da:

$$\begin{aligned} \langle I_r \rangle &= \frac{1}{(y_2 - y_1)} \int_{y_1}^{y_2} 0,862 [I_0 + 85,2 \cos(y - 0,14)] dy = \\ &= 0,862 \left\{ I_0 + 85,2 \frac{[\text{sen}(y_2 - 0,14) - \text{sen}(y_1 - 0,14)]}{(y_2 - y_1)} \right\} \end{aligned}$$

Inoltre la radiazione extra atmosferica viene attenuata, nel passare attraverso l'atmosfera, in funzione della "massa d'aria" attraversata dai raggi solari, cioè dalla lunghezza del cammino

<sup>4</sup> Duffie J.A., Beckman W.A., Solar Energy of Thermal Processes, 2<sup>a</sup> Edizione, John Wiley & Sons.1991.

<sup>5</sup> Il calcolo precedente è stato svolto in modo molto semplice ed ha ottenuto questo valore: A monte di esso è stato necessario determinare con misure impegnative tutta una serie di grandezze ed, inoltre sono state compiute svariate rilevazioni sperimentali con l'uso di satelliti.

<sup>6</sup> Il rapporto fra la distanza terra – sole ed il suo valore medio va da un minimo di 0,9832 a gennaio ad un massimo di 1,0167 a luglio.

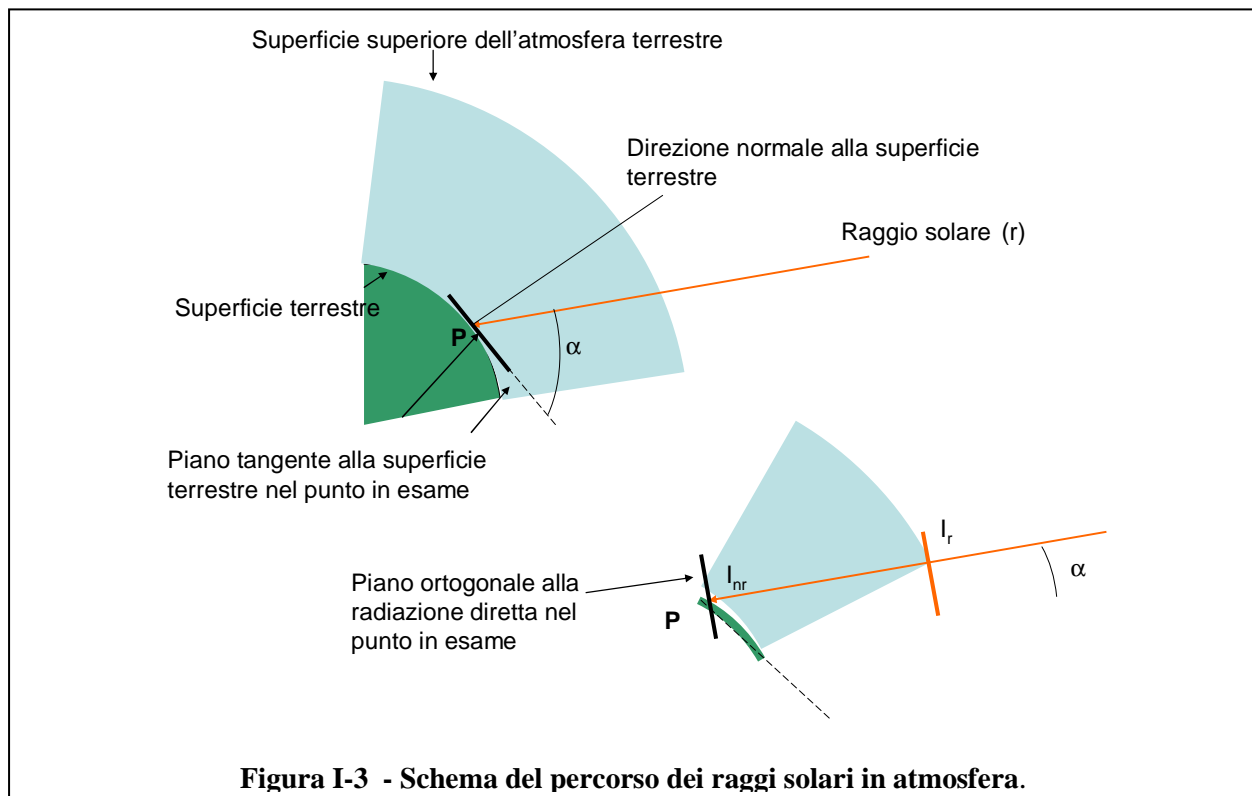
percorso dai raggi solari dal loro ingresso in atmosfera alla superficie terrestre..Infatti essa subisce effetti di attenuazione nel passaggio attraverso l'atmosfera ricca di polveri, vapor d'acqua e gas diversi che riflettono e assorbono: il fenomeno di riflessione è dovuto principalmente all'urto con le molecole di aria, pulviscolo, vapor d'acqua, che fa sì che una quota di radiazione venga sia riflessa verso lo spazio esterno in tutte le direzioni (back scattering) sia inviata verso la terra in forma diffusa (forward scattering); invece l'assorbimento è dovuto principalmente all'ozono (nella banda dell'ultravioletto), all'anidride carbonica e al vapor d'acqua (nella banda dell'infrarosso).!

La radiazione diretta (o collimata) che giunge sulla terra, su una superficie posta ortogonalmente ai raggi solari (vedi figura I-3 ), contrassegnata col pedice nr (superficie normale ai raggi solari), secondo la legge di Bouger (detta anche legge di Lambert, di Bouger-Lambert o di Beer), si ottiene:

$$I_{d(nr)} = I_r \exp\left(-\frac{B}{\sin\alpha}\right)$$

in cui  $\alpha$  è l'angolo di altezza solare. Quest'ultimo rappresenta l'inclinazione dei raggi solari rispetto al piano tangente alla superficie terrestre passante per il punto in esame Per il parametro B si può ricorrere alla relazione ( $y$  in radianti)

$$B = 0,172 - 0,033 \cos(y - 0,19)$$



In definitiva per valutare la potenza che investe qualunque corpo posto sulla superficie terrestre dobbiamo considerare i seguenti tipi di radiazione.

Radiazione collimata o diretta ( $I_d$ ), che raggiunge la superficie della terra nella direzione dei raggi solari senza aver subito riflessioni o assorbimenti. Si può dire che essa giunge direttamente senza essere assorbita o dispersa dall'atmosfera e per cui è individuabile una sua direzione (sole – oggetto) precisa.

Radiazione diffusa ( $I_D$ ), che invece raggiunge il suolo terrestre da tutte le direzioni a causa di processi atmosferici di riflessione e diffusione. Tale radiazione è sempre presente al livello del suolo, anche nelle giornate perfettamente serene proprio perché tali processi nell'atmosfera si

verificano in ogni caso. giornate in cui il cielo è sereno quest'ultima è, mediamente, circa il 10% di quella diretta, mentre in giornate molto nuvolose essa costituisce la totalità dell'energia raggiante.

Radiazione riflessa ( $I_r$ ), che giunge al suolo terrestre (o al corpo in questione) perché riflessa dai corpi circostanti (alberi, edifici, masse d'acqua...). Per meglio capire, Si pensi alla facilità con cui ci si abbronzia sulla neve o in acqua, al mare, in una giornata serena. In tali casi alla radiazione solare vera e propria si aggiunge la riflessione della neve o dell'acqua. Il coefficiente di riflessione (albedo) proprio di ogni materiale è definito, nei suoi valori, dalla norma UNI 8477, di cui si riporta una tabella. In molti casi, specialmente se il coefficiente di albedo dei corpi circostanti la superficie captante è basso e se questo stesso è poco inclinato rispetto all'orizzontale, questo contributo viene trascurato.

**Tabella I-1 Coefficiente di riflessione di alcune superfici.**

Tipo di superficie	Coeff. di albedo
Neve (caduta di fresco o con un film di ghiaccio)	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (creta, marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno	0,26
Asfalto	0,10
Calcestruzzo	0,22
Foglie morte	0,30
Erba verde	0,26
Tetti e terrazze in bitume	0,13
Superfici scure di edifici	0,27
Superfici chiare di edifici	0,60
Pietrisco	0,20

Un aspetto che è opportuno richiamare è il fatto che il comportamento delle superfici nei confronti della radiazione è selettivo in base al valore della lunghezza d'onda della stessa. Sappiamo che il sole (con una temperatura superficiale effettiva di 5762K) emette il 95% dell'energia nell'intervallo di lunghezze d'onda che va da 0,3 a 2 micron (circa il 50% nel campo del visibile, cioè nell'intervallo 0,38 – 0,78 micron) mentre la lunghezza d'onda,  $\lambda_M$ , a cui corrisponde il massimo dell'emissione dei corpi (neri) può essere calcolata dalla legge di Wien:  $\lambda_M T = 2898 \mu\text{mK}$ . Quindi un corpo con una temperatura superficiale di 35°C (epidermide del corpo umano) ha  $\lambda_M = 9,4 \mu\text{m}$  e, di conseguenza, emette nell'infrarosso lontano. Per tale motivo i corpi avranno un coefficiente di assorbimento  $a_s$  dell'energia solare diverso dal valore della loro emissività  $\epsilon^7$  a temperatura ambiente. Alcuni valori di queste grandezze sono dati in tabella

Si vede come i materiali esaminati ed in genere tutti quelli non metallici d'interesse per l'edilizia

**Tabella I-2 Valori del coefficiente di assorbimento e dell'emissività di alcuni materiali**

<i>Materiale della superficie</i>	$a_s$	$\epsilon$
Asfalto	0,90	0,90
Calcestruzzo	0,60	0,88
Laterizio	0,63	0,93
Marmo bianco	0,46	0,95
Neve	0,28	0,97
Pelle umana	0,62	0,97
Vernice bianca	0,14	0,93
Vernice nera	0,97	0,97

<sup>7</sup> Si ricordi corrisponde

McGraw-Hill Libri Italia, Milano, 1998, p.490).

tanto in calore",

abbiano emissività molto prossime fra loro, mentre il comportamento nei confronti della radiazione solare sia estremamente diversificato. In particolare una vernice bianca si comporterà come un mezzo molto riflettente nei confronti della radiazione solare (la colorazione bianca degli edifici è una caratteristica dei paesi caldi in cui ci si deve “difendere” dal sole), mentre sarà molto prossima ad un corpo nero in relazione alla radiazione che emette.

## I-2 La radiazione diretta

L'intensità e la direzione della radiazione collimata dipendono dalla posizione del sole nel cielo, variando istante per istante durante l'anno, e dalla disposizione dell'area ricettrice nello spazio. Tali grandezze sono espresse in funzione degli angoli caratteristici del luogo, del tempo e dell'inclinazione e orientamento dell'area ricettrice. Dunque i parametri fondamentali per lo studio della radiazione solare, sono i seguenti (vedi figura seguente) e si possono suddividere in parametri fissi, dipendenti dal luogo, dal periodo dell'anno e del giorno di studio, e parametri variabili, caratteristici dell'area captante.

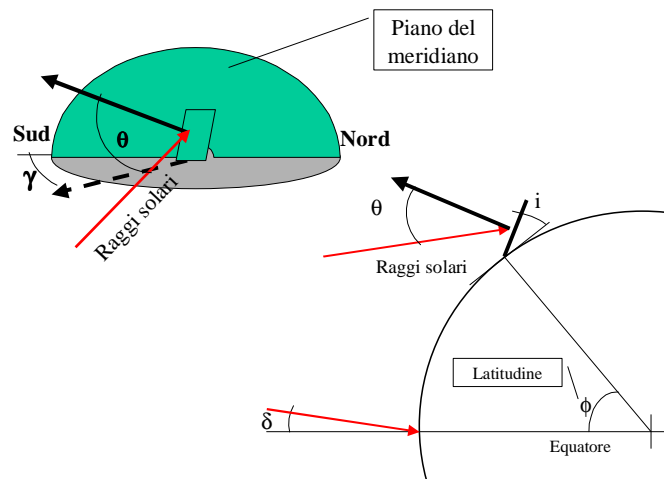


Figura I-4 - Angoli di interesse per il calcolo della radiazione solare incidente

### Parametri relativi alla località ed al tempo:

- La latitudine ( $\Phi$ ) : è l'angolo che la retta passante per la località in esame e il centro della terra forma con il piano dell'equatore. E' positiva se emisfero settentrionale.
- La declinazione solare ( $\delta$ ) : è l'angolo compreso tra la direzione dei raggi solari a mezzogiorno e lo zenit sull'equatore. E' positiva se il sole sta al di sopra del piano equatoriale e si calcola con la formula di Cooper qui riportata:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen}\left(\frac{(284 + n)360}{365}\right)$$

in cui  $n$  è il numero del giorno dell'anno (il 31 gennaio  $n=31$ , il 28 febbraio  $n=59$ , ecc.). L'andamento di questo parametro è riportato in figura I-4 . Da essa si osserva facilmente come il sole sia sempre “più alto sull'orizzonte” via via che si passa dall'inverno all'estate e viceversa. Questo è un aspetto che viene utilizzato nella progettazione dei frangisole, cioè di quei componenti

che schermano i raggi solari in estate, lasciandoli però passare d’inverno. Tale parametro assume quindi valore massimo (23,45) il 21 Giugno, e valore minimo (-23,45) il 21 Dicembre.

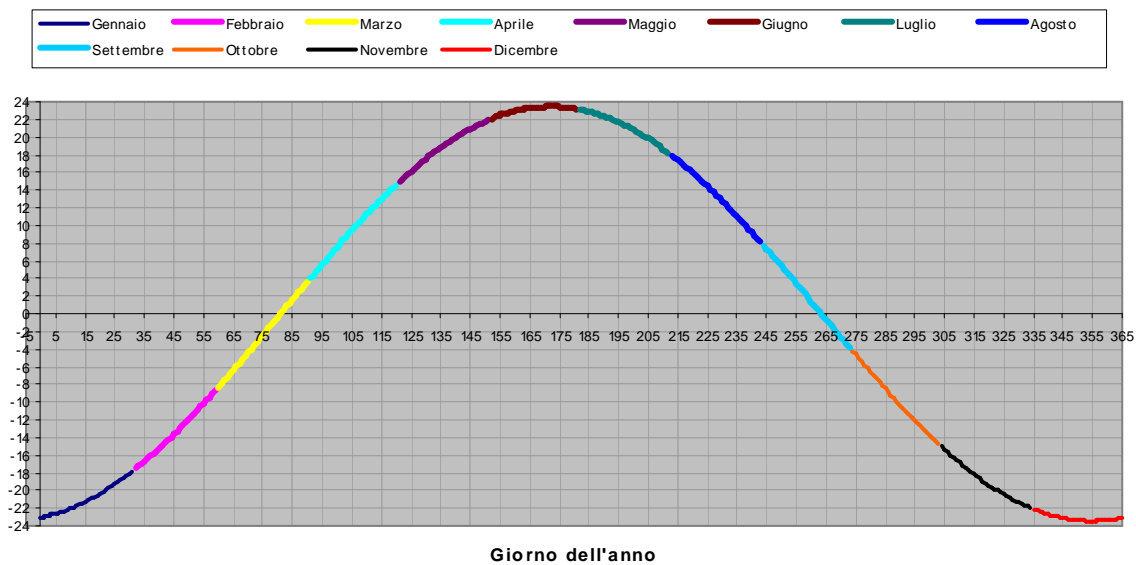
● L’angolo orario ( $\omega$ ) : è la distanza angolare tra il sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste. Ha valore nullo a mezzogiorno, positivo la mattina e negativo il pomeriggio. Si calcola con la seguente formula:

$$\omega = 15^\circ h_{sol} - 180^\circ$$

dove  $h_{sol}$  rappresenta l’ora solare vera (espressa in ore), che non coincide con l’ora locale, in primo luogo a causa della differenza fra la longitudine della località ( $L_{loc}$ ) in esame ed il meridiano di riferimento ( $L_{conv}$ ) per l’ora convenzionale ed in secondo luogo a causa delle diverse perturbazioni nell’orbita della terra e nella velocità di rotazione (equazione del tempo E). ). Per la determinazione del tempo effettivo della località in esame si ricorre quindi all’equazione:

$$h_{sol} = h_{conv} + 4'(L_{rif} - L_{loc}) + ET$$

in cui ET è il valore in minuti, risultato della equazione del tempo così definita



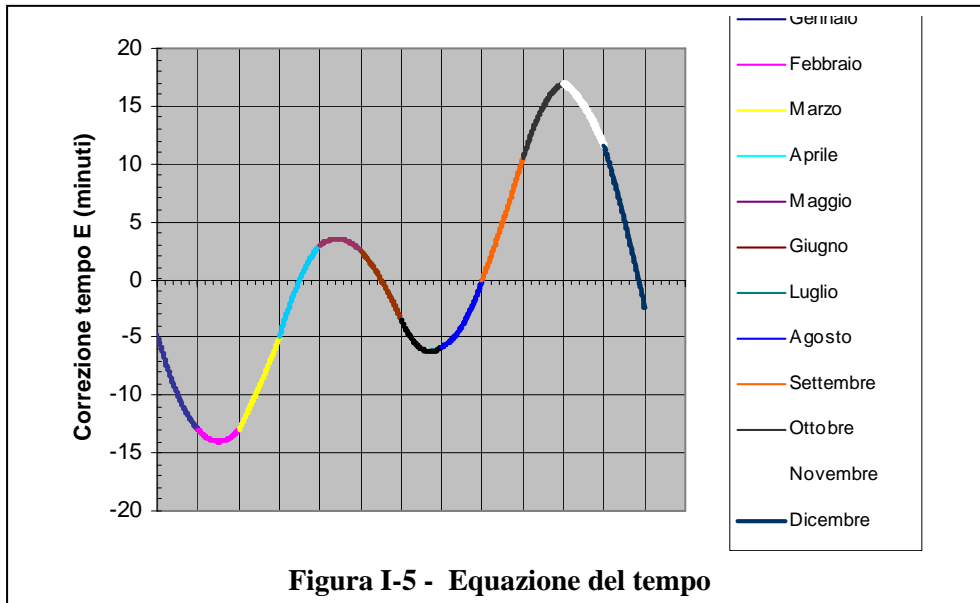
**Figura I-4 - Andamento della declinazione in funzione del giorno dell'anno**

$$ET = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cos(B) - 0,032077 \sin(B) - 0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B))$$

In cui

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

Tali valori sono graficati per ulteriore chiarezza nella figura I-5.



*Esempio– Determinare il valore dell'ora solare in funzione dell'ora convenzionale per l'Italia al 31 di Marzo.*

*Dalla figura si trova  $E = -5$  minuti.*

*La differenza fra la longitudine convenzionale e quella di riferimento per l'Italia è  $L_{conv} - L_{loc} = -15$*

*Da cui si giunge a: ora solare = ora di Greenwich - 5 - 60 = ora di Greenwich - 65 (minuti).*

- L'angolo di altezza solare ( $\alpha$ ): è l'angolo compreso tra la direzione dei raggi solari e il piano orizzontale. Si ricava dalla seguente espressione:

$$\text{sen} \alpha = \text{sen} \phi \text{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

- L'angolo zenitale ( $\theta_z$ ): è il complementare dell'altezza solare, è l'angolo compreso tra i raggi solari e la direzione dello zenit. Infatti:

$$\cos \theta_z = \text{sen} \alpha = \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \cos \delta \cos \omega \cos \phi$$

- L'angolo di azimuth solare ( $az$ ): è l'angolo formato dalla proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud. E' positivo se la proiezione è ad est (mattino) e negativo il pomeriggio. Si ricava dalla seguente espressione:

$$\text{sen}(az) = \frac{\cos \delta \text{sen} \omega}{\cos \alpha}$$

L'azimut può avere valori superiori a  $90^\circ$  in modulo, mentre l'arcoseno fornisce valori compresi fra  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ . Pertanto se non sono verificate le seguenti relazioni (la latitudine è positiva nell'emisfero boreale e negativa in quello australe):

$$\text{sen} \alpha \geq \frac{\text{sen} \delta}{\text{sen} \phi} \quad \text{per } \phi \geq 0$$

$$\text{sen} \alpha < \frac{\text{sen} \delta}{\text{sen} \phi} \quad \text{per } \phi < 0$$

il valore corretto,  $az^*$ , dell'angolo si deve calcolare con:

$$az^* = \text{segno}(az) \cdot (180 - |az|)$$

in cui  $az$  è il valore determinato con la relazione precedente.



*Esempio*

Calcolare gli angoli  $\alpha$  ed  $az$  per il 21 Giugno alla latitudine,  $\phi$ , di  $40^\circ N$ . Il 21 Giugno corrisponde al 172esimo giorno dell'anno ( $n=172$ ).

I calcoli effettuati con il programma Excel sono riportati nella tabella seguente. In fucsia sono indicati i casi in cui si è dovuto correggere il valore dell'azimut.

$\phi(^{\circ})$	$n$	ora	$\omega$	$\delta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$co(\theta)=sen(\alpha)$	$\theta(^{\circ})$	$cos(\alpha)$	$sen(\delta)/sen(\phi)$	$az(^{\circ})$	$az^{*}(^{\circ})$
40	172	4	120	23,45	-5,473	-0,0953	95,52	0,9954	0,6190	53,03	126,9
40	172	5	105	23,45	4,259	0,0742	85,79	0,9972	0,6190	62,77	117,2
40	172	6	90	23,45	14,85	0,2561	75,20	0,9666	0,6190	71,69	108,3
40	172	7	75	23,45	25,99	0,4379	64,06	0,8989	0,6190	80,32	99,74
40	172	8	60	23,45	37,42	0,6074	52,62	0,7944	0,6190	89,34	90,66
40	172	9	45	23,45	48,87	0,7529	41,18	0,6581	0,6190	80,22	80,22
40	172	10	30	23,45	59,86	0,8645	30,19	0,5026	0,6190	65,86	65,86
40	172	11	15	23,45	69,21	0,9347	20,83	0,3555	0,6190	41,91	41,91
40	172	12	0	23,45	73,49	0,9586	16,55	0,2847	0,6190	0	0
40	172	13	-15	23,45	69,21	0,9347	20,83	0,3555	0,6190	-41,91	-41,91
40	172	14	-30	23,45	59,86	0,8645	30,19	0,5026	0,6190	-65,86	-65,86
40	172	15	-45	23,45	48,87	0,7529	41,18	0,6581	0,6190	-80,22	-80,22
40	172	16	-60	23,45	37,42	0,6074	52,62	0,7944	0,6190	-89,34	-90,66
40	172	17	-75	23,45	25,99	0,4379	64,06	0,8989	0,6190	-80,32	-99,68
40	172	18	-90	23,45	14,85	0,2561	75,20	0,9666	0,6190	-71,69	-108,3
40	172	19	-105	23,45	4,259	0,07423	85,79	0,9972	0,6190	-62,77	-117,2
40	172	20	-120	23,45	-5,472	-0,0953	95,52	0,9954	0,6190	-53,03	-126,9

Ad esempio alle cinque della mattina si ha che

$$sen\alpha = 0,074$$

mentre

$$sen\delta/sen\Phi = 0,62$$

per cui è necessario ricorrere alla correzione, ricordando che, dalla tabella, risulta segno( $az$ )=+.

Di conseguenza:

$$az^{*}=(180-62,8)=117,2^{\circ}.$$

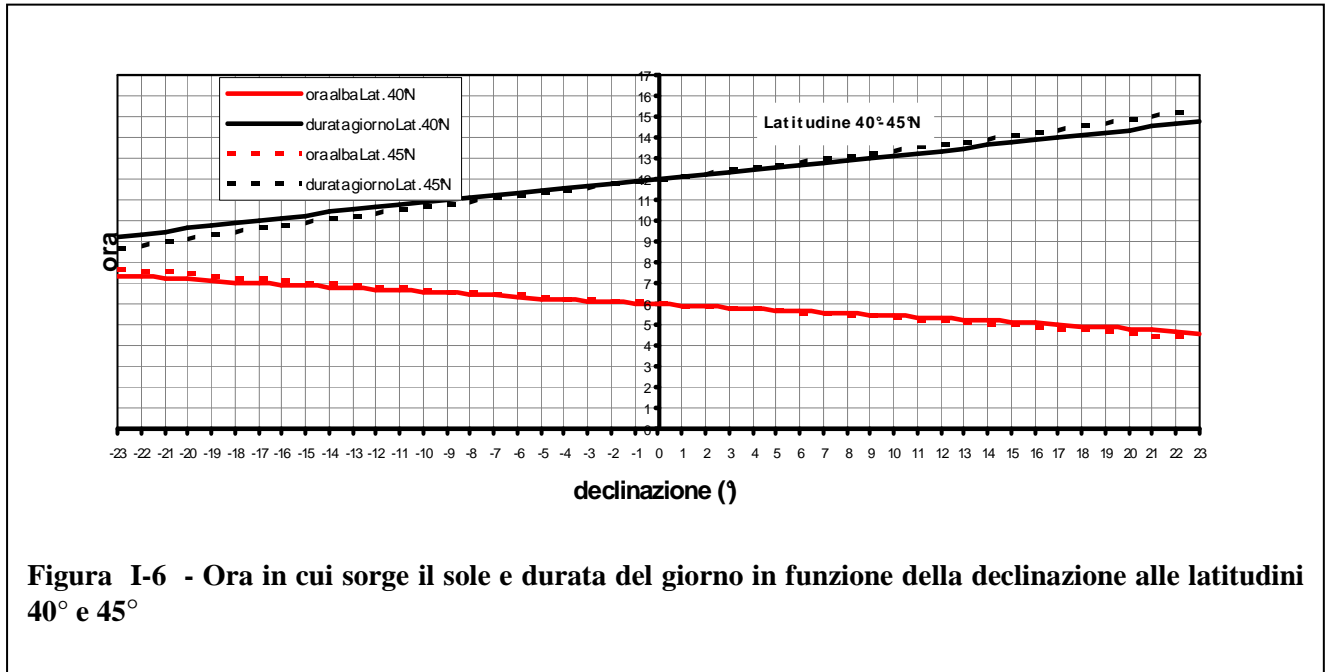
Le stesse considerazioni si possono fare per gli altri valori contrassegnati col colore fucsia.

Dall'espressione dell'altezza solare, possiamo ricavare l'espressione per l'angolo orario relativo all'alba e al tramonto (in questi momenti infatti l'altezza solare è nulla e l'angolo di incidenza è pari a  $90^\circ$ ) e calcolare la durata del giorno solare che risulteranno utili nel calcolo dell'energia raccolta da una superficie comunque orientata. Si ricorda che :

$$-\omega_{alba} = \omega_{tramonto} = ar\cos(-tg\phi \cdot tg\delta)$$

$$t_{giorno} = \frac{2ar\cos(-tg\phi \cdot tg\delta)}{15}$$

Tali espressioni, valide per superfici piane, vanno modificate se la superficie ricettrice è inclinata. Questa "vede" il sole se contemporaneamente l'angolo di incidenza è minore di  $90^\circ$  e l'altezza solare è maggiore di  $0^\circ$ . Quindi l'angolo orario di alba e tramonto è il valore minimo tra gli angoli di alba e tramonto calcolati una volta con altezza solare nulla e un'altra con angolo di incidenza pari a  $90^\circ$ :



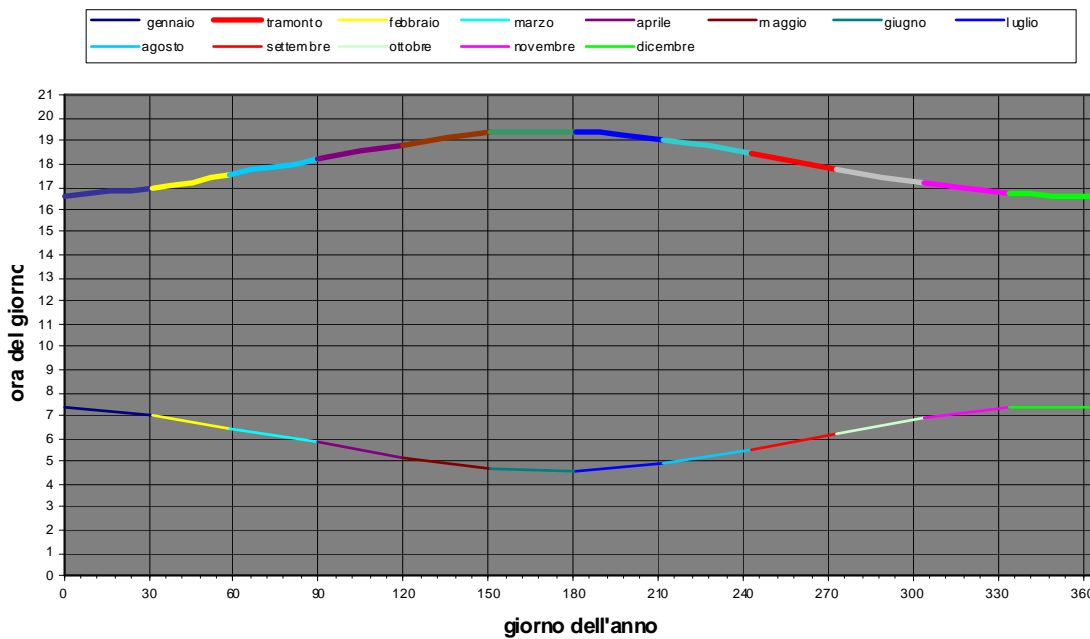
$$|\omega'_{alba}| = \min |\omega_{alba}(\alpha = 0^\circ), \omega_{alba}(\beta = 90^\circ)|$$

$$= \min |ar \cos(-tg(\phi)tg(\delta)), ar \cos(-tg(\phi - \beta)tg(\delta))|$$

$$|\omega'_{tramonto}| = \min |\omega_{tramonto}(\alpha = 0^\circ), \omega_{tramonto}(\beta = 90^\circ)|$$

$$= \min |ar \cos(-tg(\phi)tg(\delta)), ar \cos(-tg(\phi - \beta)tg(\delta))|$$

La figura I-6 mostra sia l'ora in cui sorge il sole che la durata del giorno per le latitudini di 40 e 45



gradi Nord.

Questi stessi dati possono essere rielaborati per una data latitudine in modo da ottenere un grafico che fornisce l'andamento delle linee dell'alba e del tramonto in funzione del giorno dell'anno. Detto tipo di grafico è mostrato per una latitudine di 40°N in figura I-7.

### Parametri dipendenti dall'orientazione della superficie

Per caratterizzare una superficie captante occorre definire altri tre angoli, considerati parametri funzione delle caratteristiche della superficie stessa:

- L'angolo di inclinazione ( $i$ ) della superficie ricettrice rispetto al piano orizzontale.
- L'angolo azimutale ( $\gamma$ ) della superficie ricettrice, ovvero angolo tra la normale alla superficie e l'asse S-N. E' positivo verso est, negativo verso ovest, zero a sud.
- L'angolo di incidenza ( $\theta$ ): è l'angolo tra la normale alla superficie captante e la direzione del raggio solare.

Tale parametro mette in relazione la potenza solare con quella effettivamente incidente sulla superficie considerata. Esso dipende da tutti gli altri angoli sopra citati, ed è espresso dalla seguente relazione:

$$\cos \theta = \sin \delta (\sin \phi \cos i - \cos \phi \sin i \cos \gamma) + \cos \delta (\cos \phi \cos i + \sin \phi \sin i \cos \gamma) \cos \omega + \sin \delta \sin \gamma \sin \omega$$

Si noti, per inciso, che nel caso in esame di superficie orizzontale ( $i=0^\circ$ ) vale, come detto in precedenza, la relazione:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha$$

### I-3 Calcolo della potenza solare diretta, diffusa e riflessa al suolo

Come detto in precedenza il valore della radiazione solare  $I_{0,n}$ , che incide sullo strato più esterno dell'atmosfera il giorno n-esimo, si riduce progressivamente a causa di vari fenomeni

Per calcolare l'irraggiamento solare normale al suolo si possono definire due coefficienti di trasmissione dell'atmosfera, uno relativo all'irraggiamento diretto ( $\tau_d$ ) ed uno a quello diffuso ( $\tau_D$ ). Il primo è definito come il rapporto tra l'irraggiamento diretto normale al suolo (pedice ns),  $I_{d,ns}$ , e quello extraatmosferico ( $I_{ex}$ ):

$$\tau_d = \frac{I_{d,ns}}{I_r}$$

Il secondo invece è dato dal rapporto tra l'irraggiamento diffuso al suolo su piano orizzontale (pedice O),  $I_{D0}$ , e quello extraatmosferico su piano orizzontale ( $I_r \cos(\theta_z)$ ):

$$\tau_D = \frac{I_{D0}}{I_r \sin \alpha} = \frac{I_{D0}}{I_r \cos \theta_z}$$

Per la componente diffusa si tratta sempre della radiazione su superficie orizzontale dato che non si ha una direzione prevalente. Entrambi i coefficienti dipendono sia dalle lunghezze d'onda della radiazione che dal percorso dei raggi solari e dalla composizione dell'atmosfera, e sono fortemente variabili con le condizioni meteorologiche locali.

Al fine di semplificare e standardizzare il calcolo, esistono vari modelli per determinare tali coefficienti. Qui tratteremo in particolare quello di Hottel, per la radiazione diretta e quello di Liu e Jordan per quella diffusa. In entrambi ci si riferisce ad un coefficiente di trasparenza dell'atmosfera.

#### Modello di Hottel e Liu e Jordan:

Secondo Hottel esso è dato da:

$$\tau_{d,H} = a_0 + a_1 \exp\left(-\frac{k}{\sin \alpha}\right)$$

Con

**Tabella I-3 – Coefficienti della formula di Hottel per le condizioni del cielo**

Cielo sereno (visibilità 23km)	Cielo con foschia (visibilità 5km)
$a_0 = r_0 \cdot [0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - Z)^2]$	$a_0 = r_0 \cdot [0,2538 - 0,0063 \cdot (6 - Z)^2]$
$a_1 = r_1 \cdot [0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - Z)^2]$	$a_1 = r_1 \cdot [0,7678 + 0,001 \cdot (6,5 - Z)^2]$
$k = r_k \cdot [0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - Z)^2]$	$k = r_k \cdot [0,249 + 0,081 \cdot (2,5 - Z)^2]$

Z è l'altitudine sul livello del mare in km, fino ad un'altezza di 2,5km, ed i coefficienti r dipendono dal tipo di clima secondo la tabella seguente:

**Tabella I-4 – coefficienti della formula di Hottel per le condizioni climatiche**

Clima	$r_0$	$r_1$	$r_k$
Tropicale	0,95	0,98	1,02
Estate (latitudine media)	0,97	0,99	1,02
Estate (latitudine sub artica)	0,99	0,99	1,01
Inverno (latitudine media)	1,03	1,01	1,00

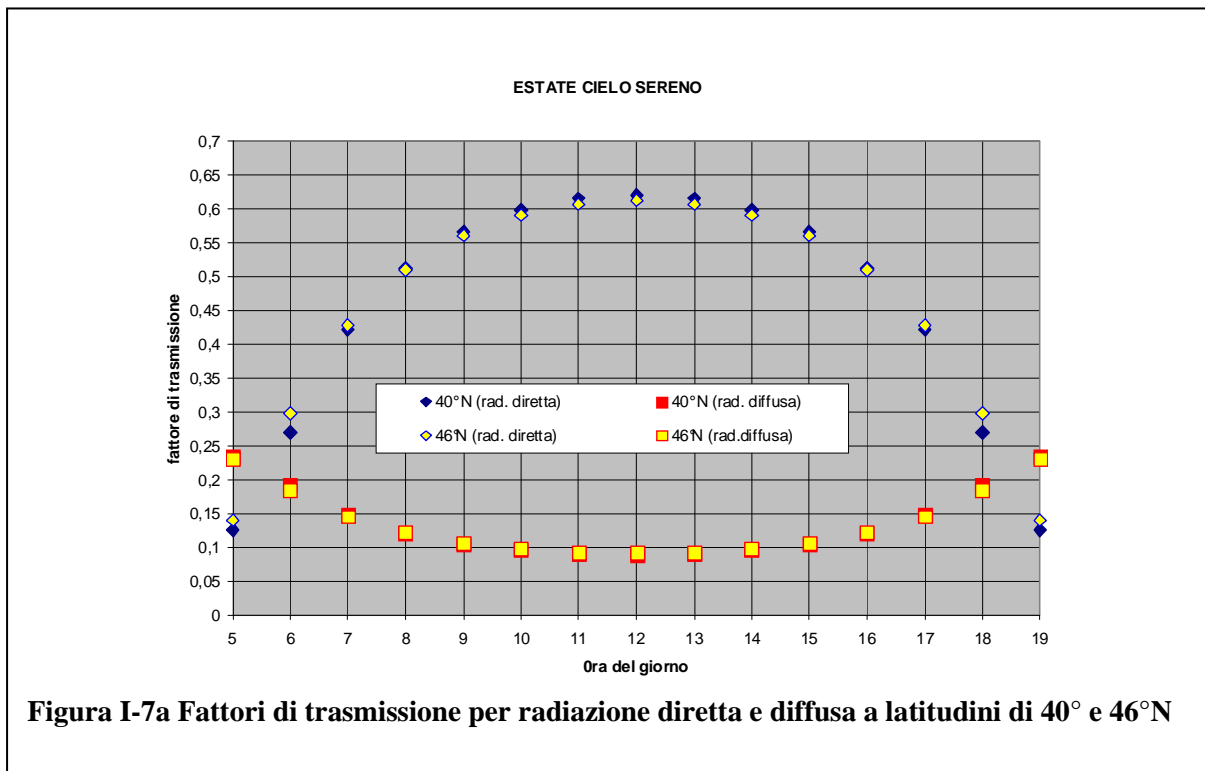
Per la radiazione diffusa, Liu e Jordan hanno proposto un coefficiente di trasmissione pari al rapporto fra la radiazione diffusa,  $I_{D0}$ , che giunge al suolo (piano orizzontale) e la radiazione extratmosferica sul piano orizzontale  $I_r \sin \alpha$ :

$$\tau_D = \frac{I_{DO}}{I_r \sin \alpha} = 0,271 - 0,2939 \tau_d$$

in cui  $\tau_d$  è il coefficiente di trasmissione diretta proposto da Hottel. Alla radiazione che giunge al suolo (diretta normale ad esso più diffusa, pedice ts),  $I_{ts}$ , si può dunque associare una sorta di coefficiente complessivo,  $\tau_{ts}$ , dato da:

$$\tau_{ts} = \frac{I_{ts}}{I_r} = \tau_D \sin \alpha + \tau_d$$

A scopo esemplificativo si mostrano gli andamenti delle quantità fin qui discusse per le latitudini di 40°N e 46°N, in estate (15 Luglio) ed in inverno (15 Gennaio) per cielo sereno e in presenza di foschia come indicato nelle figure. I-7a e I-7b..



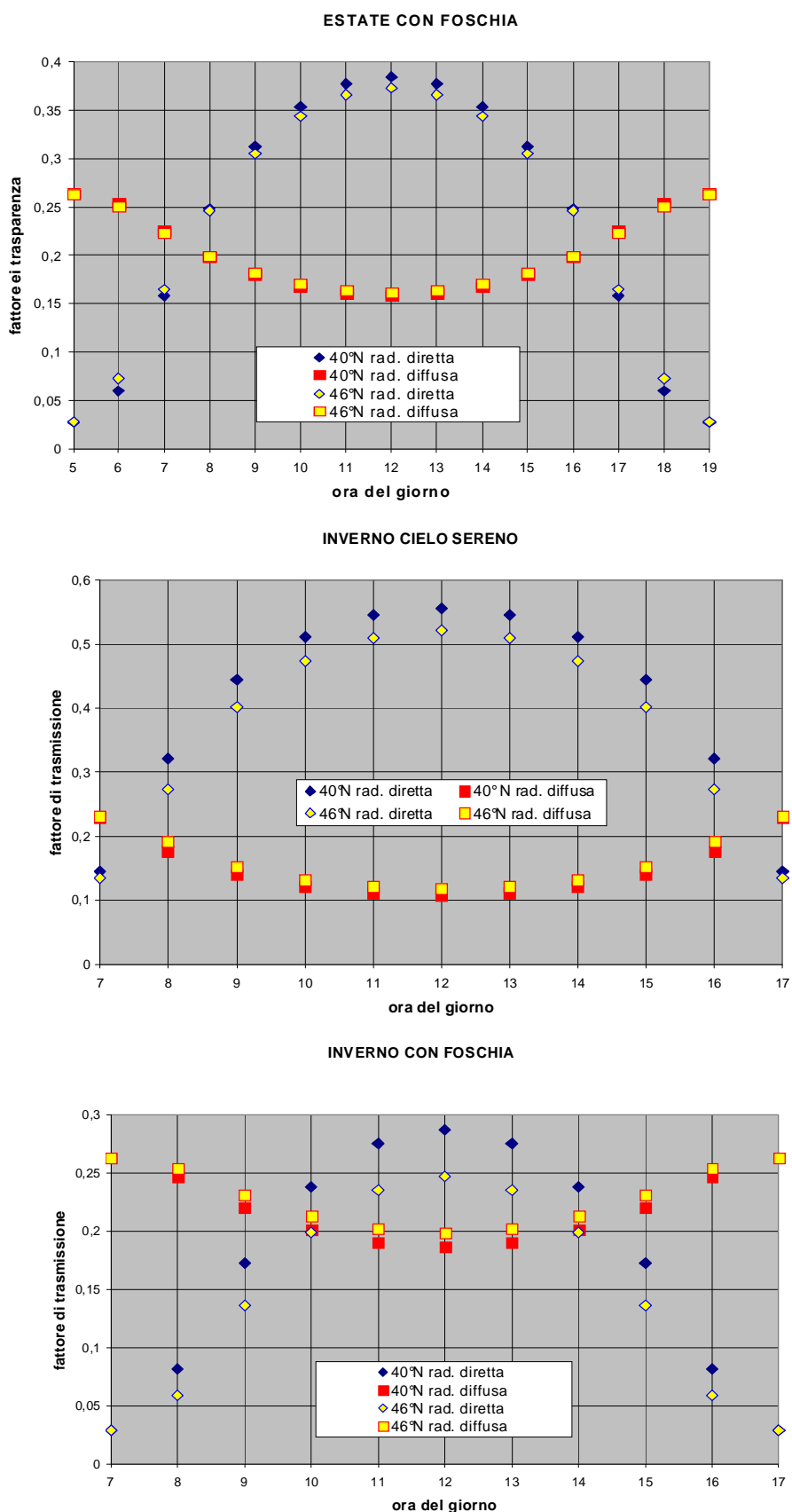


Figura I-7b Fattori di trasmissione per radiazione diretta e diffusa a latitudini di 40° e 46°N

Si osserva facilmente, oltre alla limitata differenza fra le intensità della radiazione solare al suolo in estate ed in inverno (non così elevata neanche nei periodi considerati), alle latitudini considerate, significative per la nostra penisola, come, invece, le condizioni di trasparenza dell'atmosfera abbiano un effetto fondamentale. A questo aspetto si dovrà porre particolare attenzione soprattutto nella inclinazione da dare ai captatori solari in modo che essi possano ricevere la massima intensità di radiazione. Perciò, in caso di cielo prevalentemente sereno, si dovrà inclinare il pannello captatore in modo da sfruttare (prevalentemente) la radiazione diretta, altrimenti (per esempio località ad alta nuvolosità), si dovrà adottare una inclinazione inferiore in modo da utilizzare la radiazione diffusa.

Naturalmente, sia per conoscere il contributo degli apporti solari sia all'energia da fornire agli edifici sia a quella producibile da un captatore solare è indispensabile riferirsi a dati relativi alla zona in esame sull'intero arco temporale d'impiego. A questo scopo si fa riferimento ai dati disponibili in letteratura e su normativa. Spesso sono forniti i cosiddetti dati del giorno medio mensile, da cui si può compiere una stima delle quantità desiderate. Essi si riferiscono all'energia giornaliera disponibile al suolo e, ovviamente, considerano già le caratteristiche locali dell'atmosfera.

#### I-4 Calcolo dell'irraggiamento incidente su superficie inclinata

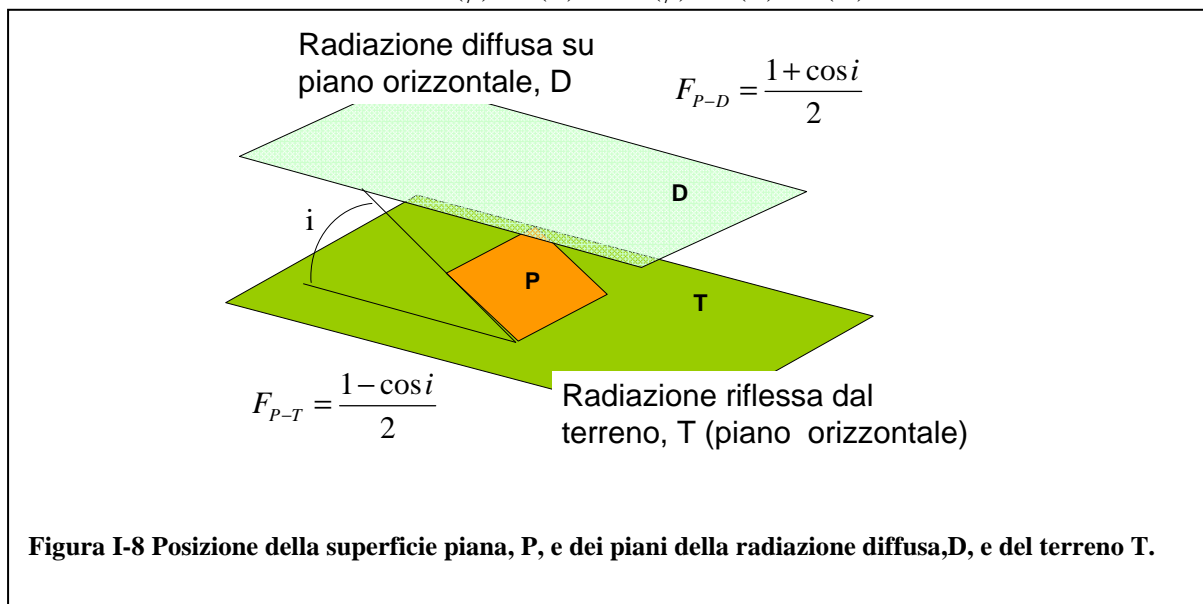
Per calcolare la radiazione solare incidente su una superficie inclinata occorre moltiplicare per  $\cos\theta$  la radiazione diretta ottenuta precedentemente. In tal modo si proietta, in modo trigonometrico, la radiazione dalla direzione dei raggi solari alla direzione normale alla superficie in questione. In figura I-8 la superficie inclinata è rappresentata dal rettangolo indicato con P, il terreno circostante, sgombro da ostacoli, con T è l'effetto della volta celeste è rappresentato dal piano sovrastante, D (la semisfera che rappresenta il cielo viene vista con lo stesso angolo solido con cui si vede il piano D).

► L'irraggiamento istantaneo diretto ( $I_d$ ) intercettato da una superficie comunque orientata è quindi calcolabile come:

$$I_d = I_\alpha \cos \theta = \frac{I_{d0} \cos \theta}{\sin \alpha} = \frac{I_{d0} \cos \theta}{\cos \theta_z} = I_{d0} R_d$$

Dove  $I_\alpha$  è l'irraggiamento diretto (lungo la direzione del raggio solare),  $I_{d0}$  è l'irraggiamento diretto incidente su piano orizzontale e  $R_d$  è il fattore di inclinazione della radiazione diretta, la cui espressione per una superficie esposta a sud è:

$$R_d = \frac{\sin(\phi - i)\sin(\delta) + \cos(\phi - i)\cos(\delta)\cos(\omega)}{\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)}$$



I fattori di vista fra il pannello ed il piano D (cielo) e T (terreno) sono rispettivamente, se  $i$  è l'angolo di tilt (inclinazione) del pannello P:

$$F_{P \leftarrow D} = \frac{1 + \cos i}{2} \quad 8$$

$$F_{P \leftarrow T} = \frac{1 - \cos i}{2}$$

Per cui si hanno i seguenti valori delle componenti diffusa e riflessa

<sup>8</sup> Hamilton D.C., Morgan W.R., Radiant-interchange configuration factors, NASA TN 2836, 1952 e pag.844 di Siegel R., Howell J., Thermal Radiation Heat Transfer, Taylor & Francis, New York, 2002, 4<sup>th</sup> Ed.



► Componente diffusa

$$I_D = I_{Ds} \frac{1 + \cos i}{2} = I_{Ds} R_D$$

dove  $R_D$  è il fattore d'inclinazione della radiazione diffusa  $R_D = F_{P,D}$ .

► Componente riflessa

$$I_r = \frac{r(1 - \cos i)}{2} (I_{ds} + I_{Ds}) = (I_{ds} + I_{Ds}) R_r$$

con  $R_r = r F_{P,T}$  fattore d'inclinazione della radiazione riflessa ed  $r$  coefficiente di riflessione del materiale costituente il piano T. Alcuni valori di questo coefficiente sono dati in tabella I-1.

Naturalmente i vari fattori d'inclinazione possono essere diversi da quelli indicati in funzione della morfologia dell'ambiente circostante il pannello P, in quanto dipendenti dai fattori di vista come verrà illustrato nel seguito.

Possiamo quindi esprimere la potenza totale incidente su una superficie arbitrariamente orientata, come la somma dei tre contributi:

$$I_{tot} = I_d + I_D + I_r = I_\alpha \cos \theta + I_{Ds} \left( \frac{1 + \cos i}{2} \right) + (I_{ds} + I_{Ds}) r \left( \frac{1 - \cos i}{2} \right)$$

Si vede, quindi, come diventi fondamentale lo studio della migliore inclinazione dell'area ricettrice in base agli angoli significativi azimutale e di inclinazione. Nel seguito tratteremo in dettaglio gli aspetti che riguardano la radiazione diretta, mentre mostriamo nelle pagine seguenti un esempio di valutazione della radiazione diffusa e riflessa in un semplice tipo di contesto urbano.

### I-5 Il contributo delle radiazioni diffusa e riflessa sugli edifici

Consideriamo il caso di due edifici molto estesi in lunghezza (approssimazione di lunghezza infinita), adiacenti ad una strada che li separa. E' questa una situazione tipica sia in città sia in paese. Supponiamo anche che sia una giornata nuvolosa in cui non è presente radiazione diretta. Si indichi con il pedice P le grandezze che si riferiscono alle strutture dell'edificio e con T quelle riferite al terreno.

Per un edificio, a forma di parallelepipedo (a tetto piano), si ha, evidentemente, per le facce verticali  $i=90^\circ$  e per il tetto  $i=0^\circ$ :

➤ Tetto

$$F_{P \leftarrow D} = \frac{1 + \cos i}{2} = 1 \rightarrow R_D = 1$$

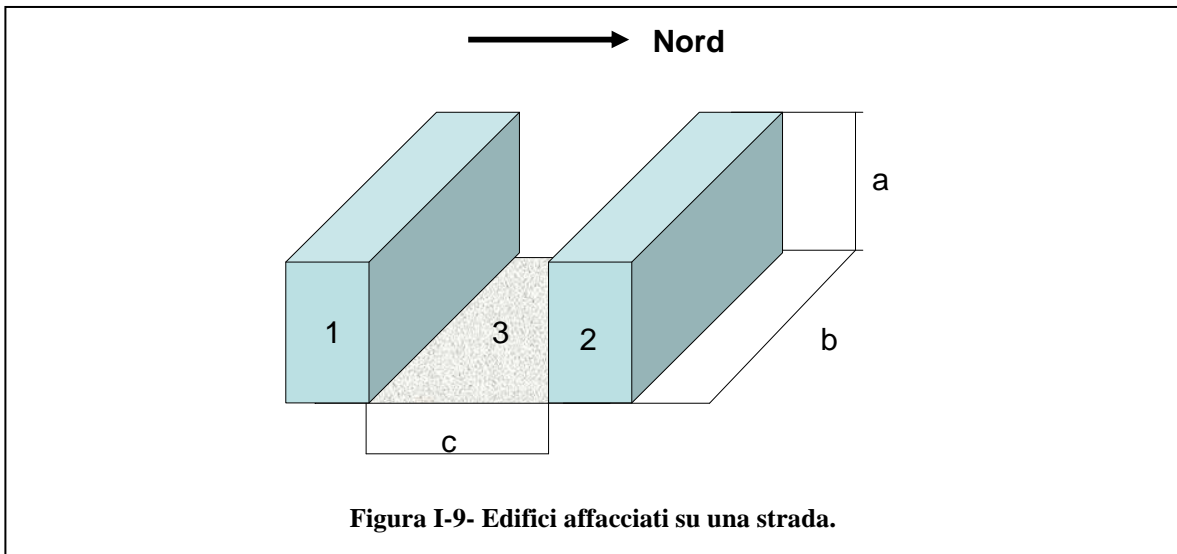
$$F_{P \leftarrow T} = \frac{1 - \cos i}{2} = 0 \rightarrow R_r = 0$$

➤ Pareti verticali non affacciate verso edifici adiacenti

$$F_{P \leftarrow D} = \frac{1 + \cos i}{2} = \frac{1}{2} \rightarrow R_D = \frac{1}{2}$$

$$F_{P \leftarrow T} = \frac{1 - \cos i}{2} = \frac{1}{2} \rightarrow R_r = \frac{r}{2}$$

Vediamo ora come vanno fatti i calcoli nel caso di edifici (1 e 2) che siano affacciati su una strada (3), come quelli indicati in figura I-9, mentre per le parti restanti interagiscono col terreno e col cielo.



Esaminiamo quanto avviene per l'edificio 1. L'unica parete che viene influenzata dalla presenza del 2 è quella rivolta a Nord, inoltre se  $b$  è molto lungo ( $b=\infty$ ) il contributo delle pareti ad est ed ovest è trascurabile. Bisogna anche considerare che l'edificio 1 può ombreggiare parte della parete, ad esso affacciata, dell'edificio 2, per cui solo una parte di questa sarà in grado di rinviare una quota della radiazione solare su esso incidente.

I fattori di vista da considerare sono quelli per due rettangoli ortogonali di estensione  $b$  uguale per entrambi (che nel caso in esame sarà considerato, come detto più volte, infinitamente lungo) ed altezza  $a$ , affacciati l'uno all'altro e con un lato in comune con il rettangolo che rappresenta la strada (parete dell'edificio 1 con il terreno 3 e parete dell'edificio 2 ancora con la strada 3) e per due rettangoli paralleli di uguali dimensioni, affacciati verso Sud e Nord rispettivamente verso il resto del contesto urbano, che per ovvi motivi di semplicità abbiamo già considerato come un semipiano, in assenza di ostacoli di alcun genere.

Indicando con  $c$  la larghezza della strada ed attribuendo ai coefficienti di riflessione un pedice che indica le strutture a cui si riferiscono si hanno i seguenti valori dei coefficienti  $R$

➤ Parete edificio dell'edificio 1 affacciata sulla strada 3

$$F_{3-1} = \frac{1}{2} \left( 1 + x - \sqrt{1 + x^2} \right) \rightarrow R_{r,3} = \frac{r_3}{2} \left( 1 + x - \sqrt{1 + x^2} \right)$$

$$x = \frac{c}{a}$$

➤ Parete dell'edificio 1 affacciato a quella del 2

$$F_{2-1} = x \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1}{x} \right)^2} - 1 \right) \rightarrow R_{r,2} = r_2 x \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1}{x} \right)^2} - 1 \right)$$

Per la radiazione diffusa dal cielo si può ancora considerare un fattore di vista uguale a quello del terreno. Sulla faccia in esame dell'edificio 1 si avrà una componente diffusa inviata direttamente dal cielo, una riflessa dal terreno ed un'ultima quota riflessa dalla parete dell'edificio 2. Per quest'ultima si dovrà considerare la componente di radiazione diffusa che giunge su un piano verticale  $I_{D,v}=I_{D,s}$  (isotropia della radiazione diffusa). Per cui la radiazione diffusa che giunge su 1 si può stimare come segue:

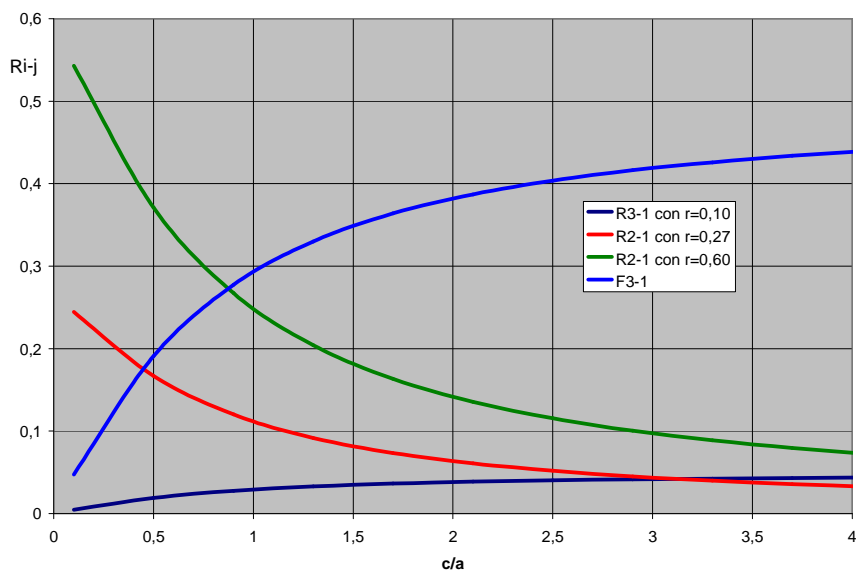
$$I_{1,D} = I_{D,s} (R_{3,r} + F_{3,1} + R_{2,r}) = I_{D,s} R_D$$

$$(R_{3,r} + F_{3,1} + R_{2,r}) = R_D$$

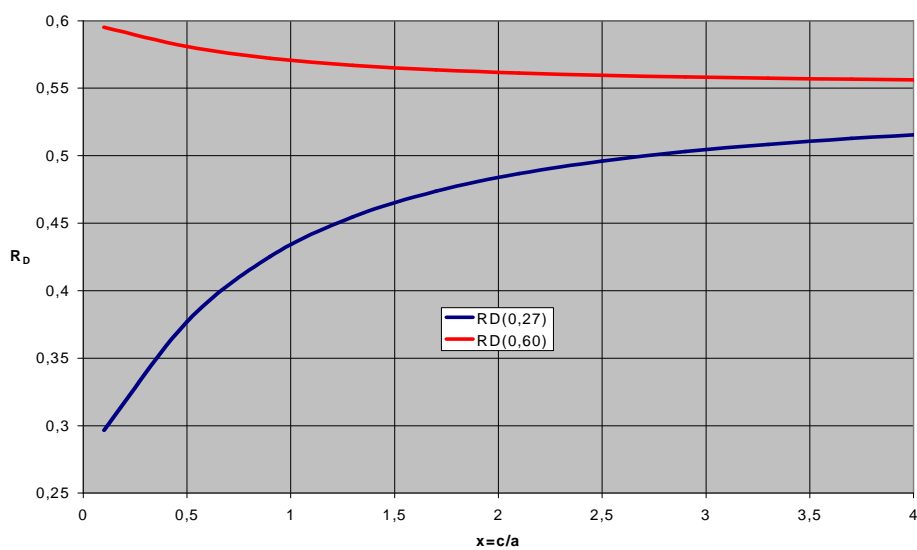
In figura I-10 sono riportati i vari coefficienti su menzionati con un coefficiente di riflessione dell'asfalto della strada  $r_3=0,10$  e per due colorazioni degli edifici: chiara  $r_2=0,60$  e scura,  $r_2=0,27$ , in funzione del rapporto  $x=c/a$ . Al decrescere di questo parametro si passa da una strada "larga" ad un "vicolo". La figura I-11 mostra invece l'andamento dei fattori d'inclinazione equivalenti della radiazione diffusa per colorazione chiara e scura dell'edificio 2.

Dai grafici citati si vede come per strade strette prevalga l'effetto della riflessione dalle superfici solide, mentre, all'aumentare della larghezza relativa ( $a/c$ ) della strada, divenga dominante la radiazione proveniente dal cielo. Risulta anche chiara l'importanza della colorazione delle pareti degli edifici.

Nel caso di presenza anche di radiazione diretta, come detto, una parte dell'edificio 2 può essere



**Figura III-10** Fattori di inclinazione e di vista col cielo per due palazzi affacciati



**Figura IV-11** Fattore equivalente d'inclinazione della radiazione diffusa per pareti con coefficiente di riflessione 0,60 e 0,27.

investita da essa. Riferiamoci a mezzogiorno di un generico giorno, tenendo conto dell'orientazione

degli edifici. La situazione si presenta come in figura ed una parte della parete dell'edificio di destra (2) sarà irraggiata per un tratto  $c \cdot \tan \alpha$  (consideriamo solo il caso in cui il terreno della strada non sia investito dalla radiazione diretta). Sarà, quindi, un rettangolo di altezza  $c \cdot \tan \alpha$  a rinviare verso l'edificio 1 la radiazione diretta secondo un fattore di vista che indichiamo con  $F_{2-1}(\alpha)$ <sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Siegel Howell pag.185.