
D.G.R. VIII/8745

Punto 5.4 a)

Nota interpretativa sulla
valutazione quantitativa
dell'efficacia dei sistemi
schermanti



1 INTRODUZIONE

La finalità del presente documento è di proporre una strategia per il rispetto degli obiettivi di controllo della radiazione solare fissati dalla D.G.R. VIII/8745 del 22 dicembre 2008.

Il punto 5.4 a) della suddetta norma riporta quanto segue:

"Ad eccezione degli edifici appartenenti alle categorie E.6 ed E.8, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva o il raffrescamento e di contenere la temperatura interna degli ambienti, il progettista, con applicazione limitata alle parti di edificio oggetto dell'intervento:

- a) *valuta e documenta l'efficacia dei sistemi schermanti, che devono essere tali da ridurre del 70% l'irradiazione solare massima sulle superfici trasparenti durante il periodo estivo e tali da consentire il completo utilizzo della massima irradiazione solare incidente durante il periodo invernale; nel caso di ristrutturazioni edilizie che coinvolgano il 25% o meno della superficie disperdente dell'edificio a cui l'impianto è asservito, nel caso di manutenzioni straordinarie, nel caso di ampliamenti volumetrici, sempreché il volume lordo a temperatura controllata o climatizzato della nuova porzione sia inferiore o uguale al 20% dell'esistente e nel caso di recupero a fini abitativi di sottotetti esistenti è consentito impiegare al posto dei sistemi schermanti sistemi filtranti che assicurino le stesse prestazioni. Nel caso di documentata impossibilità tecnica di raggiungere il 70% di riduzione dell'irradiazione solare massima estiva con i soli sistemi schermanti è consentita l'adozione combinata di sistemi schermanti e sistemi filtranti;".*



2 INTERPRETAZIONE DELLA NORMATIVA

Le disposizioni contenute nella D.G.R. VIII/8745 richiedono al progettista di valutare e documentare le prestazioni dei sistemi schermanti, definiti al punto 2 bbb) come:

"sistemi che permettono di ridurre l'irradiazione solare sulle superfici trasparenti appartenenti all'involucro edilizio; non sono considerati tali i sistemi, fissi o mobili, applicati all'interno dell'ambiente a temperatura controllata o climatizzato".

La definizione quindi riconosce come sistemi schermanti tutte quelle soluzioni che, poste all'esterno degli ambienti, risultano degli efficaci sistemi di controllo solare, in quanto respingono la radiazione prima che questa raggiunga la superficie del vetro, innescando un microeffetto serra tra la superficie dello schermo solare e quella del vetro. Il posizionamento dei sistemi schermanti all'esterno dell'involucro consente, inoltre, di disperdere il re-irraggiamento nell'infrarosso prodotto dalla superficie dello schermo quando questa viene investita dai raggi solari.

Possono essere considerate in accordo con le prescrizioni della norma anche tutte quelle soluzioni progettuali che prevedono l'inserimento di sistemi schermanti all'interno di apposite intercapedini, purché quest'ultime siano ventilate naturalmente o meccanicamente (si vedano in proposito le Figure 1 e 2). In entrambi i casi sarà comunque cura del progettista verificare che nel periodo estivo la portata d'aria di ventilazione sia sufficiente ad evitare fenomeni di surriscaldamento dell'intercapedine.

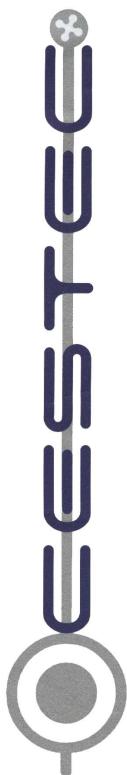
Rientrano tra i sistemi schermanti esterni anche gli elementi non appartenenti all'involucro bensì al contesto in cui l'edificio si trova: costruzioni limitrofe e vegetazione. Per quanto riguarda la vegetazione, affinché siano soddisfatti i requisiti della norma, è necessario che non vengano utilizzate essenze arboree sempreverdi, bensì caducifoglie affinché non limitino il passaggio della radiazione solare durante il periodo invernale.

Vengono esclusi, invece, dalla definizione di sistemi schermanti tutti quei dispositivi che, collocati all'interno degli ambienti, non impediscono alla radiazione solare di attraversare i componenti vetrati dell'involucro e penetrare nei locali.

Non sono considerati, inoltre, sistemi schermanti tutti quei trattamenti superficiali del vetro definiti nel decreto "sistemi filtranti" e descritti al punto 2 aaa) come:

"pellicole polimeriche autoadesive applicabili sui vetri, sul lato interno o esterno, in grado di modificare una o più delle seguenti caratteristiche della superficie vetrata: trasmissione dell'energia solare, trasmissione ultravioletti, trasmissione infrarossi, trasmissione luce visibile".

L'impiego di sistemi filtranti è consentito, dalla norma, solo nel caso in cui il progettista riscontri un'oggettiva impossibilità tecnica nel garantire il rispetto dei requisiti richiesti al punto 5.4 mediante il solo utilizzo di sistemi schermanti. Tale impossibilità tecnica, che deve essere opportunamente documentata negli allegati progettuali, può essere di varia natura. A solo titolo esemplificativo, possono rientrare nel concetto di "impossibilità tecnica" i vincoli derivanti da strumenti urbanistici e regolamenti comunali.



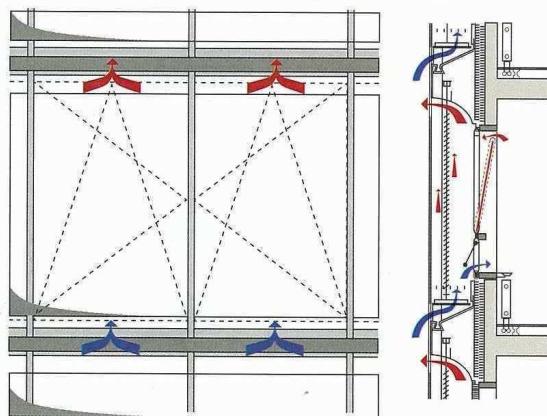


Figura 1 - Esempio di Box Window con sistema schermante integrato

(Fonte: rivista Cda n. 07/08)

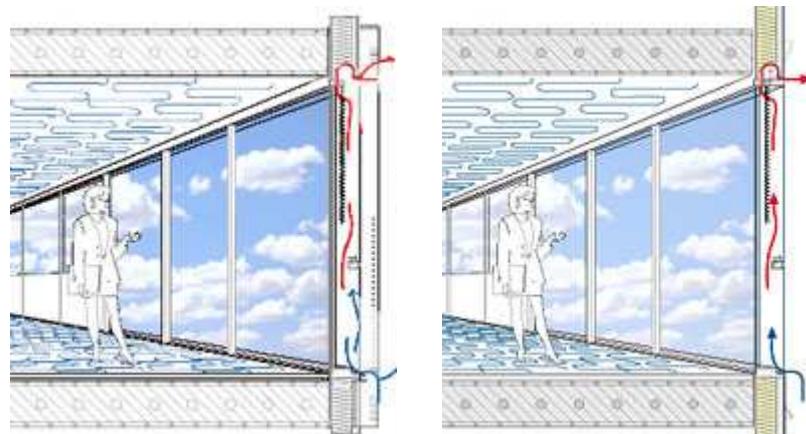


Figura 2 – Esempio di facciata ventilata naturalmente (a sinistra) e meccanicamente (a destra) con sistema schermante integrato nella doppia pelle

(Fonte: [2])

La grandezza da verificare al punto 5.4 a) è l'irradiazione solare definita nella norma UNI 10349:1994 ("Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici") come:

"Rapporto tra l'energia radiante che incide su una superficie e l'area della medesima superficie"

cioè l' energia solare che incide complessivamente nell'arco di una giornata su una superficie per unità d'area della superficie stessa, [MJ] o [kWh].

Ai fini dell'applicazione della D.G.R. relativamente alla verifica sull'efficacia dei sistemi schermanti, dal momento che tali sistemi per loro natura servono a limitare l'ingresso della radiazione diretta e non della diffusa, questo si ritiene soddisfatto se la condizione di riduzione pari al 70% della massima irradiazione solare sulla superficie orientata viene verificata sulla sola componente diretta e intendendo con irradiazione massima quella che si verifica in condizioni di cielo sereno.

La verifica va effettuata mensilmente, nel giorno di declinazione media riportato in Tabella 1, per tutto il periodo estivo e tutto il periodo invernale.

Mese	n per l' i-esimo giorno del mese	per il giorno medio nel mese		
		data	n-esimo giorno dell'anno	Declinazione δ
Gennaio	i	17	17	-20,9
Febbraio	31 + i	16	47	-13,0
Marzo	59 + i	16	75	-2,4
Aprile	90 + i	15	105	9,4
Maggio	120 + i	15	135	18,8
Giugno	151 + i	11	162	23,1
Luglio	181 + i	17	198	21,2
Agosto	212 + i	16	228	13,5
Settembre	243 + i	15	258	2,2
Ottobre	273 + i	15	288	-9,6
Novembre	304 + i	14	318	-18,9
Dicembre	334 + i	10	344	-23,1

Tabella 1 – Valori medi mensili dell'angolo di declinazione δ

Per periodo estivo e periodo invernale si intendono i mesi che compongono la stagione meteorologica, cioè:

- il periodo estivo è quello che comprende i mesi di giugno, luglio, agosto e settembre;
- il periodo invernale è quello che comprende i mesi di dicembre, gennaio, febbraio e marzo.

In tali periodi, la D.G.R. VIII/8745 richiede:

- per il mese estivo considerato, la riduzione pari al 70% della irradiazione solare diretta incidente sulla superficie orientata;
- per il mese invernale considerato, il completo utilizzo della irradiazione solare diretta incidente sulla superficie orientata.

Per quanto riguarda il primo requisito, la verifica deve essere effettuata garantendo, nel contempo, il rispetto delle condizioni di comfort visivo all'interno degli ambienti; sarà cura del progettista gestire tale aspetto durante la fase progettuale.

Per quanto riguarda la verifica del secondo requisito, "il completo utilizzo della massima irradiazione solare incidente durante il periodo invernale" deve essere applicata solo agli schermi adottati per la riduzione della radiazione solare nel periodo estivo, che non devono quindi impedire la disponibilità di radiazione diretta sulle superfici interessante durante il periodo invernale. Tale verifica non esclude comunque il rispetto delle condizioni di comfort visivo all'interno degli ambienti (devono essere evitate situazioni di discomfort locale nelle aree adiacenti



alle finestre a seguito di fenomeni di abbagliamento dovuti alla presenza di radiazione diretta), che sarà cura del progettista gestire durante la fase progettuale.

3 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI SISTEMI SCHERMANTI – METODI DI CALCOLO

La valutazione dell'efficacia dei sistemi schermanti può essere verificata sia mediante l'utilizzo di software dedicati sia ricorrendo alla metodologia di calcolo riportata di seguito.

Nella verificare gli obiettivi di controllo della radiazione solare non si può prescindere dal considerare la diversa intensità ed orientamento della radiazione solare diretta durante l'arco del giorno, specialmente in relazione a sistemi di schermatura fissi e dalla co-presenza di ombre portate da edifici adiacenti. Di conseguenza la verifica va effettuata considerando un modello orario applicato al giorno di declinazione media mensile, che calcoli il fattore di ombreggiamento medio giornaliero, relativo allo schermo di tipologia x e all'elemento trasparente y, $\overline{f_{sh,x,y}}$, per la radiazione diretta definito come segue:

$$\overline{f_{sh,x,y}} = \frac{\sum_{i=t_{a,y}}^{t_{t,y}} f_{sh,x,y,i} \cdot F_{h,y,i} \cdot G_{b,y,i} \cdot \Delta t}{\sum_{i=t_{a,y}}^{t_{at,y}} G_{b,y,i} \cdot \Delta t} \quad (1)$$

dove:

$\overline{f_{sh,x,y}}$ fattore di ombreggiamento medio giornaliero per la radiazione diretta dello schermo x relativo alla superficie y, [-];

$f_{sh,x,y,i}$ fattore di ombreggiamento per la radiazione diretta valutato all'ora i dello schermo x relativo alla superficie y, [-];

$F_{h,y,i}$ fattore di ombreggiamento per la radiazione diretta valutato all'ora i relativo alla superficie y dovuto ad ombre portate da altri edifici, [-];

$G_{b,y,i}$ irradianza solare diretta sulla superficie y a cielo sereno all'ora i, [W/m^2];

Δt intervallo temporale di integrazione pari a 1 ora, [h];

$t_{a,y}$ numero dell'ora dell'alba per la superficie y, [-];

$t_{t,y}$ numero dell'ora del tramonto per la superficie y, [-].



La verifica da effettuare per ogni mese del periodo estivo corrisponde quindi al rispetto della seguente condizione:

$$\overline{f_{sh,x,y}} \geq 0.7 \quad (2)$$

La verifica da effettuare per ogni mese del periodo invernale corrisponde invece al rispetto, per le stesse schermature verificate nel periodo estivo, della condizione:

$$\overline{f_{sh,x,y}} = \overline{F_{h,y}} \quad \text{ovvero} \quad f_{sh,x,y,i} = 0 \quad \text{per ogni } i \quad (3)$$

Viene nel seguito riportata la procedura per la valutazione quantitativa dell'equazione (1).

3.1 Modello semplificato della radiazione solare a cielo sereno

Per il calcolo dell'irradianza diretta sulla generica superficie y all'ora i -esima nel giorno n di declinazione media mensile si impiega il seguente modello di radiazione [1], che restituisce il valore orario della irradianza solare diretta normale, G_{cnb} , e dell'irradianza solare diffusa isotropa, G_{cd} , in condizioni di cielo sereno, per il generico giorno n nel sito di latitudine ϕ .

$$G_{cnb}(t_i) = \tau_b(t_i) \cdot G_{on}(n) \quad (4)$$

$$G_{cd}(t_i) = \tau_d(t_i) \cdot G_{on}(n) \cdot \cos\theta_z(t_i) \quad (5)$$

con:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad (6)$$

$$\tau_b(t_i) = a_0 + a_1 \cdot \exp(-k/\cos\theta_z(t_i)) \quad (7)$$

$$\tau_d(t_i) = 0,271 - 0,294 \cdot \tau_b(t_i) \quad (8)$$

$$\cos\theta_z(t_i) = \cos\phi \cdot \cos\delta(n) \cdot \cos\omega(t_i) + \sin\phi \cdot \sin\delta(n) \quad (9)$$

$$\omega(t_i) = (t_i - 12) \cdot 15^\circ \quad (10)$$

con:

τ_b coefficiente di trasmissione dell'atmosfera per la radiazione solare diretta normale, [W/m^2];

τ_d coefficiente di trasmissione dell'atmosfera per la radiazione solare diffusa isotropa, [W/m^2];

G_{on} irradianza solare normale extraterrestre al giorno n , [W/m^2];

G_{sc} irradianza costante solare pari a 1367 [W/m^2];

$\cos\theta_z$ coseno dell'angolo azimutale solare, [-];

ϕ latitudine del sito, [$^\circ$];

δ angolo di declinazione, (da Tabella 1), [$^\circ$];



- ω angolo orario, [$^{\circ}$];
 t_i ora solare i-esima, [h].

Periodo	a_0	a_1	k
Estivo	$0.4110 - 0.00796 \cdot (6 - A)^2$	$0.5004 + 0.00589 \cdot (6.5 - A)^2$	$0.3253 + 0.02230 \cdot (2.5 - A)^2$
Invernale	$0.4364 - 0.00846 \cdot (6 - A)^2$	$0.5106 + 0.00601 \cdot (6.5 - A)^2$	$0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5 - A)^2$
A altitudine del sito espressa in km			

Tabella 2 – Valori dei coefficienti dell'equazione (7)

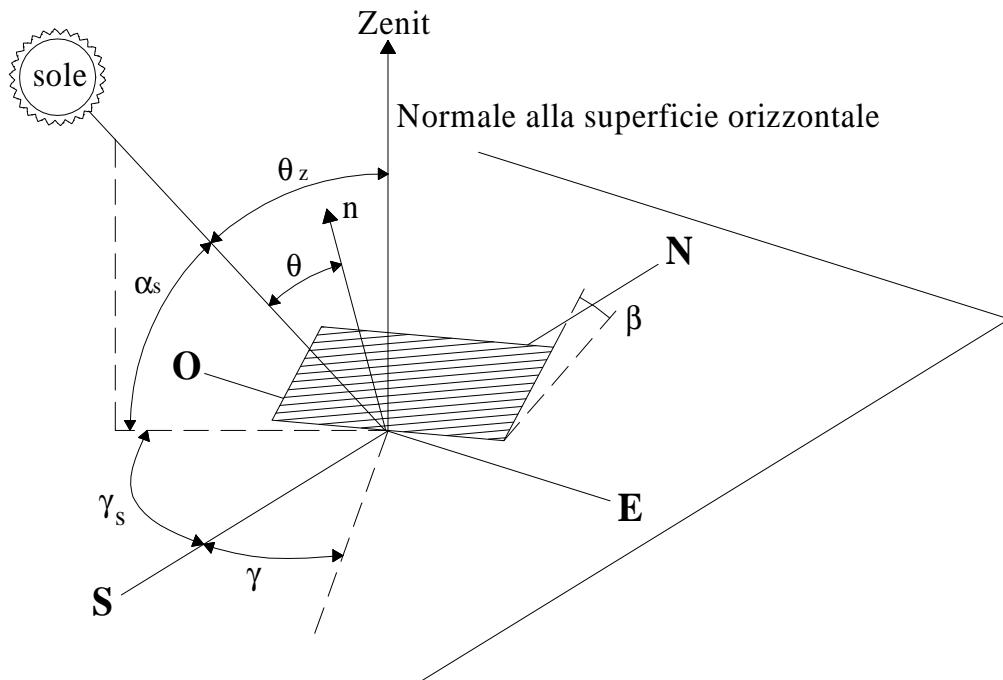


Figura 3 – Posizione del Sole rispetto a superfici di diversa inclinazione e orientamento

La posizione del sole nel cielo è individuata da due angoli, l'altezza solare α_s e l'azimut solare γ_s , che si calcolano come segue:

$$\alpha_s(t_i) = 90^{\circ} - \theta_z(t_i) \quad (11)$$



$$\gamma_s(t_i) = C_1 C_2 \gamma'_s(t_i) + C_3 \left(\frac{1 - C_1 C_2}{2} \right) \cdot 180 \quad [^\circ]$$

con : $\sin \gamma'_s(t_i) = \frac{\sin \omega(t_i) \sin \delta(n)}{\sin \theta_z(t_i)}$ (12)

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } |\omega| \leq \omega_{ew} \\ -1 & \text{se } |\omega| > \omega_{ew} \end{cases} \quad C_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } (\phi - \delta) \geq 0 \\ -1 & \text{se } (\phi - \delta) < 0 \end{cases}$$

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{se } \omega \geq 0 \\ -1 & \text{se } \omega < 0 \end{cases} \quad \text{con} \quad \cos \omega_{ew} = -\frac{\tan \delta(n)}{\tan \phi}$$

L'irradianza diretta sulla generica superficie y all'ora i-esima nel giorno n di declinazione media mensile, $G_{b,y,i}$ si calcola quindi come:

$$G_{b,y,i} = G_{b,y}(t_i) = G_{cbn}(t_i) \cdot \cos \theta(t_i) \quad (13)$$

con:

$$\cos \theta(t_i) = T + U \cdot \cos \omega(t_i) + V \cdot \sin \omega(t_i)$$

e con :

$$T = \sin \delta(n) \cdot (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \quad (14)$$

$$U = \cos \delta(n) \cdot (\cos \phi \cdot \cos \beta + \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma)$$

$$V = \cos \delta(n) \cdot (\sin \beta \cdot \sin \gamma)$$

dove:

$\cos \theta$ coseno dell'angolo di incidenza [-];

γ angolo azimutale della superficie y (0° se sud, -90° se est, $+90^\circ$ se ovest, se $\pm 180^\circ$ nord), [$^\circ$];

β angolo di inclinazione della superficie y sul piano dell'orizzonte (0° se orizzontale, 90° se verticale), [$^\circ$].

L'irradianza diffusa sulla generica superficie y all'ora i-esima nel giorno n di declinazione media mensile, $G_{d,y,i}$ si calcola invece come:

$$G_{d,y,i} = G_{d,y}(t_i) = G_{cdn}(t_i) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \cdot (G_{cbn}(t_i) \cdot \cos \theta_z(t_i) + G_{cdn}(t_i)) \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (15)$$

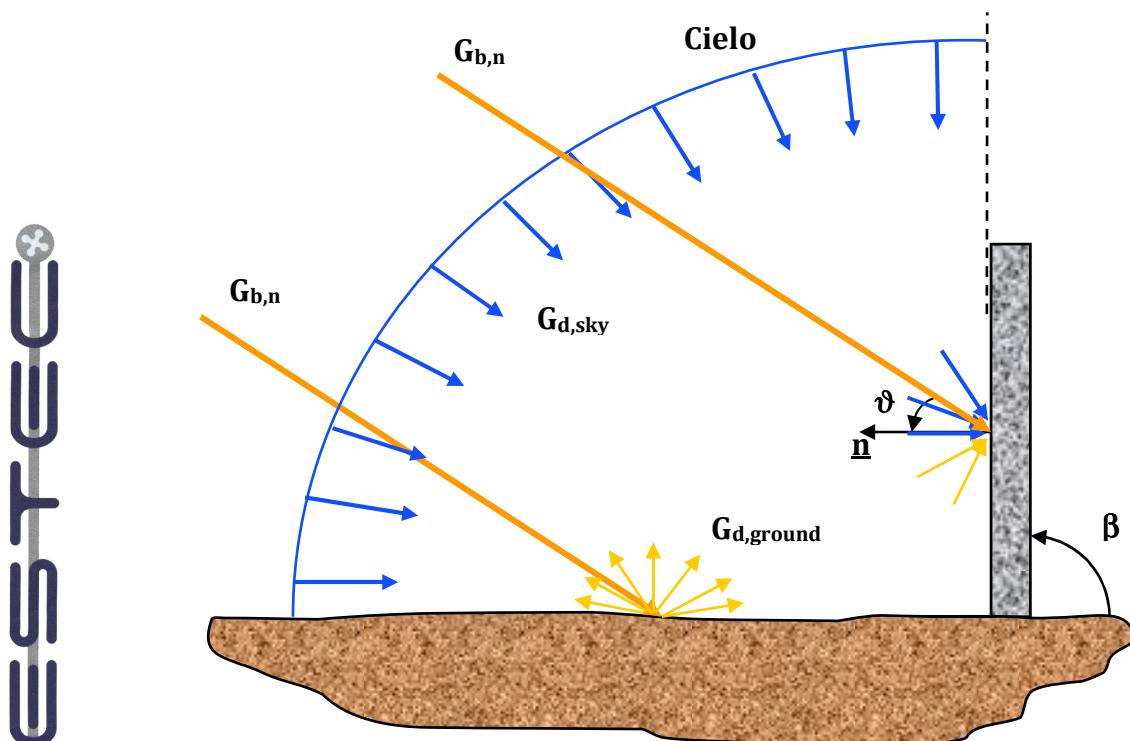
dove:

ρ coefficiente di "albedo" del piano dell'orizzonte, Tabella 3, [-];

Superficie	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/ campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti e terrazze in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superfici scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure)	0,27
Superfici chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare)	0,60

Tabella 3 – Valori del fattore di riflessione solare (Fonte: www.ingegneriadelsole.it)

e dove il primo termine rappresenta la radiazione diffusa proveniente dal cielo e il secondo termine la radiazione diffusa proveniente dal piano dell'orizzonte per riflessione della radiazione totale su esso incidente.

**Figura 4 – Radiazione globale su un piano inclinato**

La radiazione globale o totale sulla superficie orientata è poi data dalla somma del contributo diretto e del contributo diffuso, cioè:

$$G_{T,y,i} = G_{b,y}(t_i) + G_{d,y}(t_i) \quad (16)$$

3.2 Calcolo dell'ora di alba e tramonto per una superficie orientata

Per poter applicare l'equazione (1) per il calcolo del fattore di ombreggiamento medio giornaliero, occorre definire l'ora di alba e l'ora di tramonto per la superficie orientata y , che definiscono l'estro inferiore e quello superiore della sommatoria oraria.

Si definisce, per la generica superficie y , orientata (di azimut γ e inclinazione β):

- ora di alba, $t_{a,y}$, l'ora solare per cui la superficie inizia a vedere il disco solare;
- ora di tramonto, $t_{t,y}$, l'ora solare per cui la superficie termina di vedere il disco solare.

Tali ore, la cui differenza rappresenta il periodo temporale di visone del disco solare da parte della superficie y , si determinano verificando contemporaneamente le seguenti due condizioni:

- il sole è sopra il piano dell'orizzonte:

$$\begin{aligned} t_{a,y} &\geq t_a \\ t_{t,y} &\leq t_t \end{aligned} \quad (17)$$

- il sole è visibile dalla superficie:

$$\cos \theta(t_i) \geq 0 \quad (18)$$

dove:

t_a ora dell'alba del sito, [h];

t_t ora del tramonto del sito, [h];

che si determinano come:

$$\begin{aligned} t_a &= 12 - \frac{\omega_{ss}(n)}{15^\circ} \\ t_t &= 12 + \frac{\omega_{ss}(n)}{15^\circ} \\ \omega_{ss}(n) &= \cos^{-1}(-\tan \delta(n) \cdot \tan \phi) \end{aligned} \quad (19)$$

dove:

ω_{ss} è il modulo dell'angolo orario di alba e tramonto.

In termini di angolo orario, la condizione di visibilità del disco solare espressa dalla (18), si riduce alla determinazione dei valori iniziali, ω_1 (alba), e finali, ω_2 (tramonto), dell'arco orario ottenuti determinando le radici della seguente equazione di secondo grado:



$$\omega_{x,y} = \tan^{-1} \left(\frac{-V(n) \pm \sqrt{U^2(n) + V^2(n) - T^2(n)}}{T(n) - U(n)} \right) \quad (20)$$

ordinate in modo tale che l'angolo orario di alba per la superficie y , $\omega_1 = \omega_x$ oppure, $\omega_1 = \omega_y$, risulti rispettare la seguente condizione:

$$V(n) \cdot \cos \omega_1 > U(n) \cdot \sin \omega_1 \quad (21)$$

Nella ricerca delle due radici vi possono essere due casi singolari:

- $\Delta = U^2(n) + V^2(n) - T^2(n) < 0$, (radici complesse) nel qual caso o la superficie non vede mai il sole oppure lo vede sempre (durante l'arco della giornata):

$$\begin{aligned} T(n) + U(n) &< 0 \Rightarrow \omega_{a,y} = \omega_{t,y} = 0 \\ T(n) + U(n) &> 0 \Rightarrow \omega_{a,y} = -\omega_{ss} ; \omega_{t,y} = +\omega_{ss} \end{aligned} \quad (22)$$

- $\Delta = U^2(n) + V^2(n) - T^2(n) \geq 0$, radici reali, ma con le ulteriori condizioni:

$$\begin{aligned} \beta = 90^\circ ; \gamma = 90^\circ &\Rightarrow \omega_1 = 0^\circ ; \omega_2 = 180^\circ \\ \beta = 90^\circ ; \gamma = -90^\circ &\Rightarrow \omega_1 = -180^\circ ; \omega_2 = 0^\circ \end{aligned} \quad (23)$$

La condizione che sia contemporaneamente il sole sopra l'orizzonte, espressa dalla (17), è poi definita, sempre in termini di angolo orario, dalle seguenti relazioni:



$$\begin{aligned} (\omega_1 > \omega_2 \text{ .and. } \omega_1 > \omega_{ss}) & \left\{ \begin{array}{l} \omega_2 > -\omega_{ss} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_{a,y} = \min(-\omega_{ss}, \omega_1) \\ \omega_{t,y} = \min(+\omega_{ss}, \omega_2) \end{array} \right. \\ \omega_2 \leq -\omega_{ss} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega' = 0 \\ \omega'' = 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \\ (\omega_1 > \omega_2 \text{ .and. } \omega_1 \leq \omega_{ss}) & \left\{ \begin{array}{l} \omega_2 > -\omega_{ss} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_{a,1,y} = -\omega_{ss} ; \omega_{a,2,y} = \omega_1 \\ \omega_{t,1,y} = \omega_2 ; \omega_{t,2,y} = \omega_{ss} \end{array} \right. \\ \omega_2 \leq -\omega_{ss} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_{a,y} = \max(-\omega_{ss}, \omega_1) \\ \omega_{t,y} = \max(+\omega_{ss}, \omega_2) \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned} \quad (24)$$

Il terzo sottocaso della relazione (24) comporta la presenza di due archi di visibilità del sole da parte della superficie e rappresenta il caso di superficie verticale o inclinata esposta a nord nei mesi estivi: la superficie vede il sole per qualche ora subito dopo l'alba e per qualche ora subito prima del tramonto.

Determinati gli angoli orari di alba e tramonto per la superficie il valore (preso intero) dell'ora di alba e tramonto vengono determinati come segue:

$$t_{a,y} = \text{int}\left(12 + \frac{\omega_{a,y}}{15^\circ} - 0,5\right)$$

$$t_{t,y} = \text{int}\left(12 + \frac{\omega_{t,y}}{15^\circ} + 0,5\right) \quad (25)$$

dove la funzione int() arrotonda all'intero superiore se la parte decimale è maggiore-uguale a 0,5.

3.3 Calcolo dell'ombreggiamento dovuto al contesto

La valutazione delle ombre portate da un edificio **B** su una superficie verticale **y** dell'edificio in esame **A** di azimut **y** assegnato, cioè il calcolo del fattore di ombreggiamento $F_{h,y}$, si effettua con le seguenti relazioni:

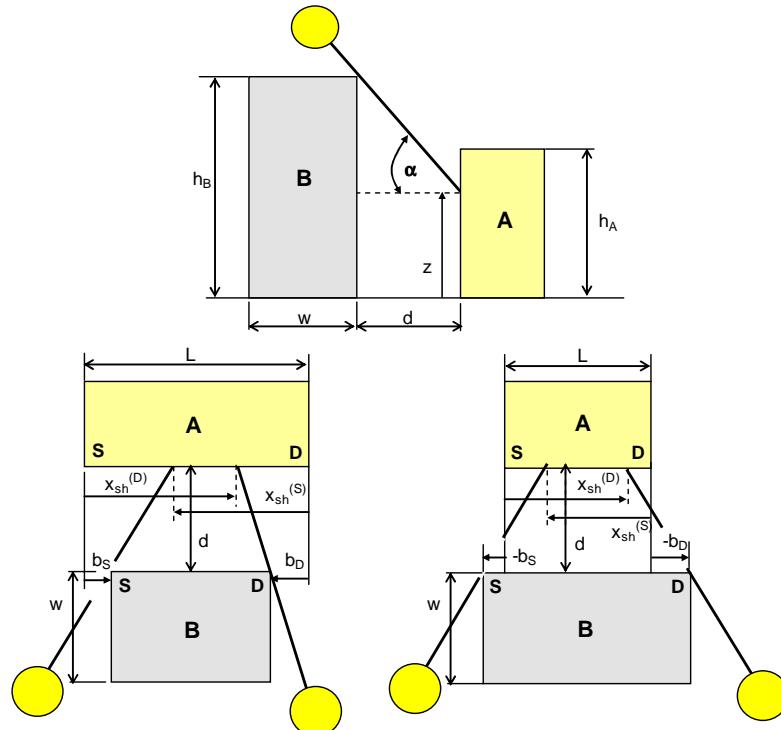


Figura 5 – Ombre portate dovute a edifici prospicienti

$$A_{sh} = z \cdot \min[L; (x_{sh}^{(S)} + x_{sh}^{(D)})] \quad (26)$$

dove la quota z dell'ombra si calcola come:

$$z = h_B \cdot -d \cdot \frac{\tan(\alpha_s)}{\cos(\gamma_s - \gamma)} \quad (27)$$

con $0 \leq z \leq h_A$

mentre le profondità orizzontali dell'ombra portata da sinistra (S) e da destra (D) si calcolano come:

$$x_{sh}^{(S)} = L - x^{(S)} \quad ; \quad x_{sh}^{(D)} = L - x^{(D)} \quad (28)$$

con:

$$\begin{aligned} b^{(S)} > 0 & \left\{ \begin{array}{ll} \Delta\gamma < 0 & x^{(S)} = \max[0; b^{(S)} + (d+w) \cdot \tan(\Delta\gamma)] \\ \Delta\gamma = 0 & x^{(S)} = b^{(S)} \\ \Delta\gamma > 0 & x^{(S)} = \min[L; b^{(S)} + d \cdot \tan(\Delta\gamma)] \end{array} \right. \\ b^{(S)} < 0 & \left\{ \begin{array}{ll} \Delta\gamma < 0 & x^{(S)} = 0 \\ \Delta\gamma = 0 & x^{(S)} = 0 \\ \Delta\gamma > 0 & x^{(S)} = \max[0; \min[L; d \cdot \tan(\Delta\gamma) + b^{(S)}]] \end{array} \right. \end{aligned} \quad (29)$$

con $\Delta\gamma = \gamma_s - \gamma$

$$\begin{aligned} b^{(D)} > 0 & \left\{ \begin{array}{ll} \Delta\gamma < 0 & x^{(D)} = \min[L; b^{(D)} - d \cdot \tan(\Delta\gamma)] \\ \Delta\gamma = 0 & x^{(D)} = b^{(D)} \\ \Delta\gamma > 0 & x^{(D)} = \max[0; b^{(D)} - (d+w) \cdot \tan(\Delta\gamma)] \end{array} \right. \\ b^{(D)} < 0 & \left\{ \begin{array}{ll} \Delta\gamma < 0 & x^{(D)} = \max[0; \min[L; b^{(D)} - d \cdot \tan(\Delta\gamma)]] \\ \Delta\gamma = 0 & x^{(D)} = 0 \\ \Delta\gamma > 0 & x^{(D)} = 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (30)$$

con $\Delta\gamma = \gamma_s - \gamma$

dove:

L è la lunghezza in pianta della facciata dell'edificio A di cui si vuole calcolare l'ombra portata dall'edificio B, [m];

h_B è l'altezza dell'edificio B, [m];

h_A è l'altezza dell'edificio A, [m];

d è la distanza in pianta tra la facciata dell'edificio A interessata e la facciata dell'edificio B prospiciente, supposte disposte parallelamente, [m];

$b^{(D)}$ è la distanza tra lo spigolo destro dell'edificio A e lo spigolo destro dell'edificio B, presa positiva se la proiezione perpendicolare dello spigolo destro dell'edificio B è contenuta nella facciata dell'edificio A; altrimenti viene presa negativa, [m];

- $b^{(S)}$ è la distanza tra lo spigolo sinistro dell'edificio A e lo spigolo sinistro dell'edificio B, presa positiva se la proiezione perpendicolare dello spigolo sinistro dell'edificio B è contenuta nella facciata dell'edificio A; altrimenti viene presa negativa, [m];
- w è la profondità in pianta dell'edificio B prospiciente all'edificio A, [m];
- γ è l'angolo azimutale della facciata interessata dell'edificio A, [m];
- γ_s è l'angolo azimutale solare, [m].

3.4 Valutazione delle ombre proprie portate da aggetti orizzontali e verticali

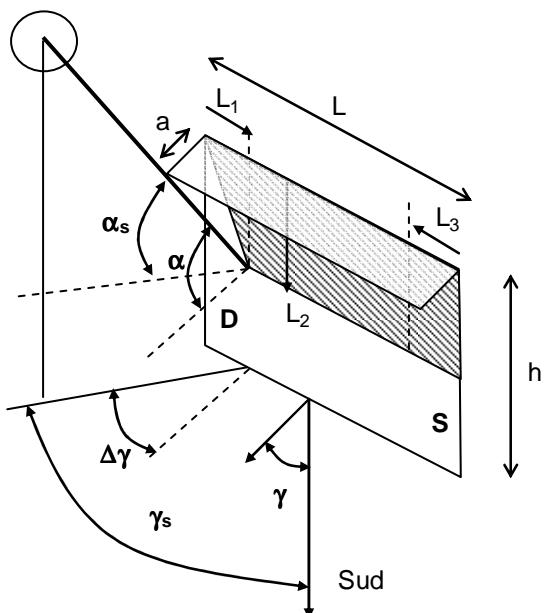


Figura 6 – Ombre proprie dovute a schermi orizzontali

In figura è rappresentato un edificio munito di uno **schermo orizzontale** di larghezza L e profondità a .

La posizione del sole è individuata dall'angolo di altezza solare α_s e dall'azimut solare γ_s ; l'orientazione della parete dal suo angolo azimutale γ , la parete è verticale. Dati i riferimenti di Figura 6, il fattore di ombreggiamento per aggetto orizzontale, $f_{sh,o}$, che è definito come il complemento all'unità del rapporto tra l'area dell'ombra portata dall'aggetto orizzontale sulla superficie sottesa di area $A = L \cdot h$, è :

$$f_{sh,o} = 1 - \frac{A_{sh,o}}{A} \quad (31)$$

con $A_{sh,o}$ calcolabile come:

$$A_{sh,o} = L_2 \cdot \left(L - \frac{L_x}{2} \right) \quad (32)$$

dove:

L_2 lunghezza dell'ombra nella direzione verticale al generico tempo t , [m];

L_x distanza orizzontale dal vertice sinistro o destro dell'inizio dell'ombra (D), [m];

L larghezza dell'aggetto orizzontale, [m].

Le lunghezze L_2 e L_x si calcolano come:

$$L_2 = a \cdot \tan(\alpha)$$

con:

(33)

$$\tan(\alpha) = \frac{\tan(\alpha_s)}{\cos(\Delta\gamma)}$$

$$\Delta\gamma = \gamma_s - \gamma$$

$$L_x = \max[L_1; L_3]$$

con:

$$\Delta\gamma > 0 \quad \begin{cases} L_1 = \min[a \cdot \tan(\Delta\gamma); L] \\ L_3 = 0 \end{cases}$$

$$\Delta\gamma < 0 \quad \begin{cases} L_1 = 0 \\ L_3 = \min[-a \cdot \tan(\Delta\gamma); L] \end{cases}$$

$$\Delta\gamma = 0 \quad L_1 = L_3 = 0$$

(34)

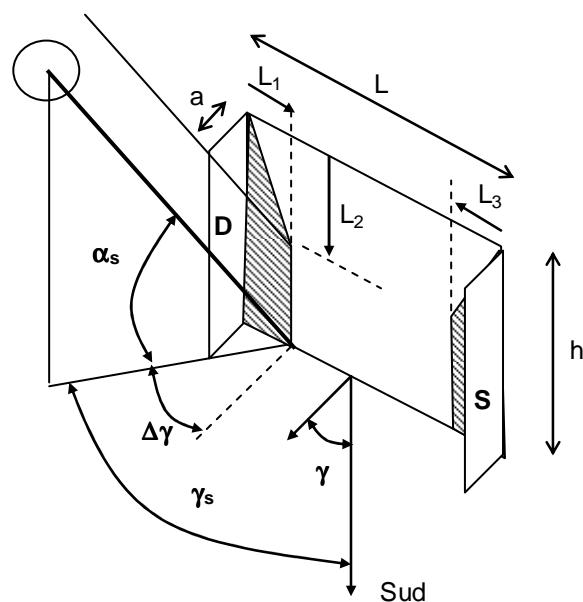


Figura 7 – Ombre proprie dovute a schermi verticali

In figura è rappresentato un edificio munito di due **schermi verticali** di larghezza L e profondità a .

Pagina 16 di 19

La posizione del sole è individuata dall'angolo di altezza solare α_s e dall'azimut solare γ_s ; l'orientazione della parete dal suo angolo azimutale γ , la parete è verticale. Dati i riferimenti di Figura 7, il fattore di ombreggiamento per aggetto verticale, $f_{sh,v}$, che è definito come il complemento all'unità del rapporto tra l'area dell'ombra portata dall'aggetto verticale sulla superficie sottesa di area $A = L \cdot h$, è :

$$f_{sh,v} = 1 - \frac{A_{sh,v}}{A} \quad (35)$$

con $A_{sh,v}$ calcolabile come:

$$A_{sh,v} = L_x \cdot \left(h - \frac{L_2}{2} \right) \quad (36)$$

dove:

L_2 lunghezza dell'attacco dell'ombra nella direzione verticale al generico tempo t , [m];

L_x distanza orizzontale dal vertice sinistro o destro dell'inizio dell'ombra (D), [m];

L larghezza dell'aggetto orizzontale, [m].

Le lunghezze L_2 e L_x si calcolano come:

$$L_2 = a \cdot \tan(\alpha)$$

con :

$$\tan(\alpha) = \frac{\tan(\alpha_s)}{\cos(\Delta\gamma)}$$

$$\Delta\gamma = \gamma_s - \gamma$$



e per l'aggetto posizionato a sinistra (S):

$$\begin{aligned} \Delta\gamma > 0 & \quad L_1 = \min[a \cdot \tan(\Delta\gamma); L] \\ \Delta\gamma \leq 0 & \quad L_1 = 0 \end{aligned} \quad (38)$$

mentre per l'aggetto posizionato a destra (D):

$$\begin{aligned} \Delta\gamma < 0 & \quad L_3 = \min[-a \cdot \tan(\Delta\gamma); L] \\ \Delta\gamma \geq 0 & \quad L_3 = 0 \end{aligned} \quad (39)$$

Se si ha solo l'aggetto di sinistra o di destra, oppure entrambi, si avrà:

$$\begin{aligned} \text{solo (S)} &\Rightarrow L_x = L_1 \\ \text{solo (D)} &\Rightarrow L_x = L_3 \\ \text{entrambi} &\Rightarrow L_x = \max[L_1; L_3] \end{aligned} \quad (40)$$

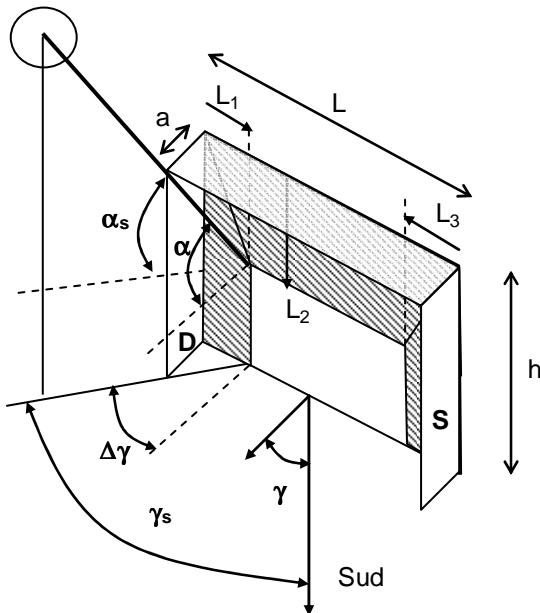


Figura 8 – Ombre proprie dovute sia a schermi verticali che orizzontale

In figura è rappresentato un edificio munito contemporaneamente di **due schermi verticali** di larghezza L e profondità a e di **uno schermo orizzontale** di stessa larghezza e profondità.

La posizione del sole è individuata dall'angolo di altezza solare α_s e dall'azimut solare γ_s ; l'orientazione della parete dal suo angolo azimutale γ , la parete è verticale. Dati i riferimenti di Figura 8, il fattore di ombreggiamento per il sistema di aggetti (due verticali e uno orizzontale), $f_{sh,v+o}$, che è definito come il complemento all'unità del rapporto tra l'area dell'ombra portata sistema di aggetti sulla superficie sottesa di area $A = L h$, è :

$$f_{sh,v} = 1 - \frac{A_{sh,v+o}}{A} \quad (41)$$

con $A_{sh,o}$ calcolabile come:

$$A_{sh,v+o} = L_x \cdot (h - L_2) + L_2 \cdot L \quad (42)$$

Dove L_x e L_2 si calcolano esattamente come per il caso dei soli aggetti verticali.

Bibliografia

- [1] Duffie J.A., Beckman W.A. – Solar engineering of thermal processes, New York, John Wiley & Sons, 1991.
- [2] Colombari M., De Carli M. – Involucri edilizi trasparenti a ventilazione forzata: implicazioni impiantistiche, 54° Convegno ATI, Trento, 2003.

