



Ricerca di Sistema elettrico

1.

Comparazione tra standard e strumenti di calcolo per le prestazioni solari e luminose di componenti vetrati con accoppiamento di schermature solari

M. Zinzi, S. Agnoli, G. Fasano

COMPARAZIONE TRA STANDARD E STRUMENTI DI CALCOLO PER LE PRESTAZIONI SOLARI E LUMINOSE DI COMPONENTI VETRATI CON ACCOPPIAMENTO DI SCHERMATURE SOLARI

M. Zinzi, S. Agnoli, G. Fasano (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Sviluppo e caratterizzazione di schermature solari ad elevato contenuto tecnologiche

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ SOLARI E LUMINOSE DELLA VETRATA ISOLANTE CON SCHERMATURE SOLARI SECONDO LA NORMA ISO 15099-2003.....	6
3 IL CALCOLO DELLE PROPRIETÀ SOLARI E LUMINOSE DELLA VETRATA ISOLANTE CON SCHERMATURE SOLARI SECONDO LA NORMA UNI EN 13363- PARTE 1 E 2.....	11
3.1 IL METODO SEMPLIFICATO UNI EN 13363- PARTE 1 - 2008	11
3.2 IL METODO DETTAGLIATO UNI EN 13363- PARTE 2 – 2006.....	12
4 COMPARAZIONE TRA STRUMENTI DI CALCOLO.....	15
4.1 WINSHELTER.....	15
4.2 WINDOW.....	17
4.3 MATERIALI E COMPONENTI PER L'ESECUZIONE DEI CALCOLI	19
5 RISULTATI	22
6 SULL'IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI CLASSIFICAZIONE ENERGETICA PER LE SCHERMATURE SOLARI	26
7 CONCLUSIONI.....	27
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27
9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	28

Sommario

Le schermature solari sono una delle più importanti tecnologie per l'efficientamento energetico dell'involucro edilizio; i motivi sono: riscaldamento globale, innalzamento dei consumi per la climatizzazione estiva (prevalentemente elettrica degli edifici), utilizzo sempre maggiore di materiali trasparenti che richiedono una protezione addizionale dell'ambiente costruito. Nell'ottica di edifici a consumo quasi zero, sarà dunque necessario equipaggiare gli involucri con prodotti di protezione solare sempre più performanti e, di conseguenza, appare necessario disporre di strumenti che siano in grado di predire in modo accurato la risposta termica, energetica e luminosa dei sistemi semitrasparenti. Software quali: Winshelter, sviluppato all'interno di RSE, Window e Wis, eseguono i calcoli necessari, basandosi su un set di norme europee ed internazionali. Questo rapporto focalizza l'attenzione sulle diverse modalità di calcolo, in particolare sull'utilizzo dei dati spettrali per i sistemi vetriati e le schermature, ponendoli in confronto con l'utilizzo dei dati integrati. La selettività spettrale è un tema importante per i materiali semitrasparenti ad elevate prestazioni e, per tale ragione, è rilevante confrontare i due modelli di calcolo, anche ai fini di un eventuale schema di classificazione ed etichettatura energetica. Il confronto tra i diversi modelli e software è eseguito in funzione di un serie di variabili: caratteristiche dei componenti vetriati, natura (tende e lamelle) e caratteristiche delle schermature solari, caratteristiche dell'intercapedine, spettri di integrazioni di riferimento. Limiti e vantaggi delle diverse soluzioni sono analizzate e discusse, con la proposta di ulteriori approfondimenti per lo sviluppo di un sistema di classificazione energetiche delle schermature.

1 Introduzione

Gli usi finali di energia nel settore civile (residenziale e servizi/terziario) sono passati dai quasi 35 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) del 1990 a valori superiori a 45 Mtep a partire dal 2009, aumento non compensato dall'incremento di usi energetici da fonti rinnovabili. È interessante notare tuttavia che all'aumento del 38% degli usi finali è corrisposto un aumento del 16% degli usi termici e del 72% degli usi elettrici nel periodo, come evidenziato in figura 1. Tenendo conto delle nuove costruzioni realizzate a partire dall'inizio del periodo di osservazione, si può osservare che gli usi termici (prevalentemente riscaldamento e acqua calda sanitaria) sono sostanzialmente stabili, viceversa gli usi elettrici sono in continuo aumento.

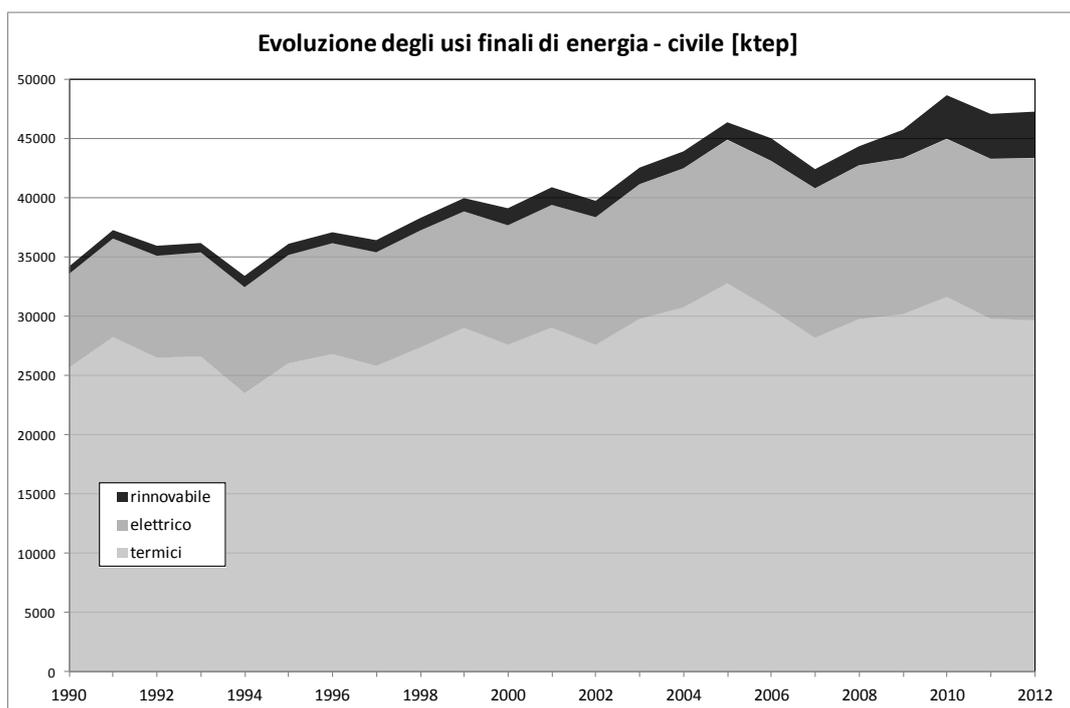


Figura 1. Usi finali nel settore civile a partire dal 1990

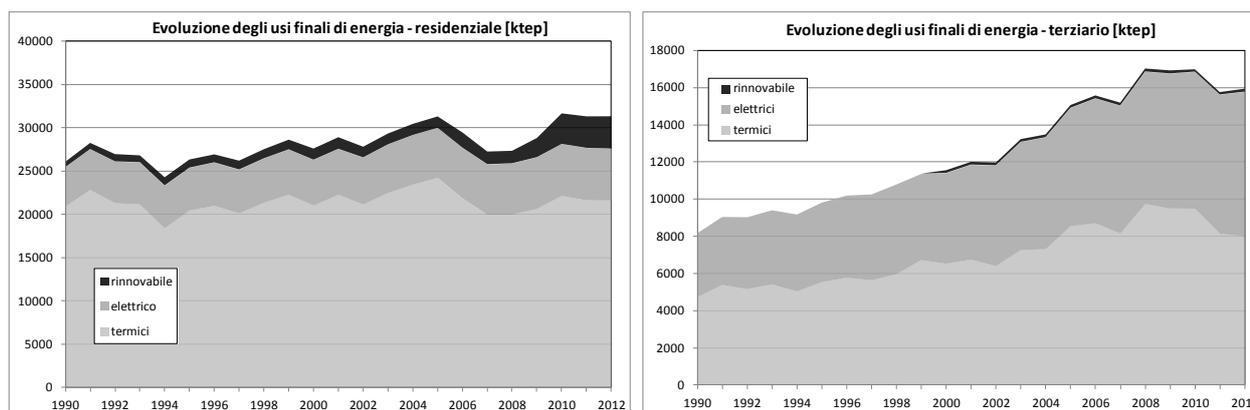


Figura 2. Usi finali nel settore residenziale (sinistra) e terziario a partire dal 1990

Gli andamenti sono ben distinti a seconda che si considerino gli usi nel residenziale e nel terziario, grafici rispettivamente a sinistra e destra in figura 2. Gli usi termici sono rimasti pressoché costanti; considerando le nuove costruzioni, si può affermare che i consumi normalizzati rispetto all'edificato sono effettivamente in diminuzione. Al contrario gli usi elettrici sono aumentati nel periodo di oltre il 30% e sono dunque

responsabili insieme all'aumento della quota rinnovabile, prevalentemente elettrica, dell'aumento degli usi nel settore (circa il 20% a partire dal dato del 1990).

L'andamento è decisamente diverso nel terziario dove da poco più di 8 Mtep nel 1990 si è passati a quasi 16 Mtep nel 2012. L'incremento è però ripartito in modo diverso tra i vari usi finali, tenendo presente che il contributo da rinnovabile è in questo caso praticamente trascurabile. Gli usi termici sono aumentati di circa il 70%, quelli elettrici di oltre il 120; inoltre nel 1990 la ripartizione tra usi termici ed elettrici era 58 e 42% rispettivamente, nel 2012 i due usi erano praticamente equivalenti.

Questi pochi dati evidenziano un deciso aumento dei consumi elettrici all'interno degli edifici e numerosi studi evidenziano che una quota rilevante di tele energia sia impiegata per la climatizzazione estiva dell'ambiente costruito. Da notare la penetrazione sul mercato di climatizzatore per abitazioni, che oggi si aggira su circa il 20% del parco immobiliare. Le motivazioni di tale aumento sono molteplici: climatico (riscaldamento globale ma anche locale, tipicamente nei grandi agglomerati urbani); costruttivo (edifici sempre più isolati possono causare surriscaldamento in estate se adeguate precauzioni progettuali e gestionali non sono messe in atto); fisiologico e psicologico (maggiore richiesta di comfort e minore attitudine all'adattamento).

In questo contesto le schermature solari hanno un ruolo fondamentale poiché modulano gli apporti solari cui è soggetto l'involucro edilizio, che si realizzano in misura maggiore attraverso i componenti trasparenti. Il quadro normativo nazionale ed internazionale riconosce l'esigenza di regolare le prestazioni energetiche anche in regime estivo, ponendo limiti prestazionali all'edificio nella sua interezza e/o ai singoli componenti di involucro. Uno dei parametri principali su cui agire è il fattore solare dei componenti semi-trasparenti (vetratura con accoppiata protezione solare). Il ruolo fondamentale svolto dalle schermature impone quindi un'attenta analisi sulla valutazione di metodi e normative per la determinazione di tali grandezze termofisiche. Questo studio si concentra sulla comparazione tra metodi di calcolo definiti nelle normative di riferimento e implementi in software di libera distribuzione.

2 Il calcolo delle proprietà solari e luminose della vetrata isolante con schermature solari secondo la norma ISO 15099-2003

In questo paragrafo si riportano sinteticamente alcuni cenni relativi alla norma *ISO Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations* del 2003. Le norme ISO sono standard tecnici internazionali, non necessariamente cogenti nella legislazione nazionale. Nel caso specifico dell'Italia, ad esempio, sono obbligatorie le norme nazionali emanate dall'UNI e le norme europee EN previo recepimento dagli Stati Membri. Le norme ISO devono essere obbligatoriamente recepite a livello nazionale solamente dopo l'avvenuto recepimento delle stesse in ambito CEN (ad esempio, lo standard tecnico ISO 10077, recepito come EN e successivamente come UNI).

La norma ISO 15099 non si trova in queste condizioni e può essere utilizzata, per il progetto e la verifica dei serramenti, su base volontaria. È utile tuttavia dare alcune informazioni, per due motivi fondamentali:

- La norma è il documento tecnico più accurato per determinare le caratteristiche luminose, solari e termiche di sistemi trasparenti dotati di schermature solari. Le modellazioni solare e termica sono quelle che con maggiore accuratezza riproducono le condizioni operative reali.
- Diversi strumenti di calcolo termico, che garantiscono risultati molto accurati per la valutazione delle prestazioni sia dei componenti trasparenti che degli interi edifici, si basano sugli algoritmi definiti nella presente norma.

Nello specifico la norma prescrive anche la procedura di calcolo per determinare il valore della trasmittanza termica dei diversi componenti che compongono i serramenti.

La trasmittanza termica del serramento viene poi calcolata secondo una procedura che tiene conto dei valori di trasmittanza dei singoli componenti, pesati sulle singole aree e sui perimetri visibili, secondo lo schema riportato nella fig. 3.

Vengono poi dedicati alcuni capitoli alla descrizione dei metodi di calcolo per determinare i valori delle proprietà solari e della trasmittanza termica della vetrata isolante, della trasmittanza termica lineare ψ (per

tener conto dell'interazione della vetrata montata nel telaio), delle proprietà termiche e ottiche delle schermature solari considerando anche le intercapedini ventilate.

La formula indicata per il calcolo della trasmittanza termica del serramento, privo di schermatura, è la seguente:

$$U_t = \frac{\sum A_{gv} U_{gv} + \sum A_f U_f + \sum l_\psi \psi}{A_t}$$

dove:

U_t : è la trasmittanza termica del serramento;

A_{gv} : è l'area visibile della vetrata

l_ψ : è il perimetro della parte visibile della vetrata

A_f : è l'area del telaio

ψ : è la trasmittanza termica lineica

L'equazione viene applicata anche nei casi in cui il telaio dello stesso serramento abbia componenti con trasmittanza termica differente, secondo quanto riportato nella fig. 4.

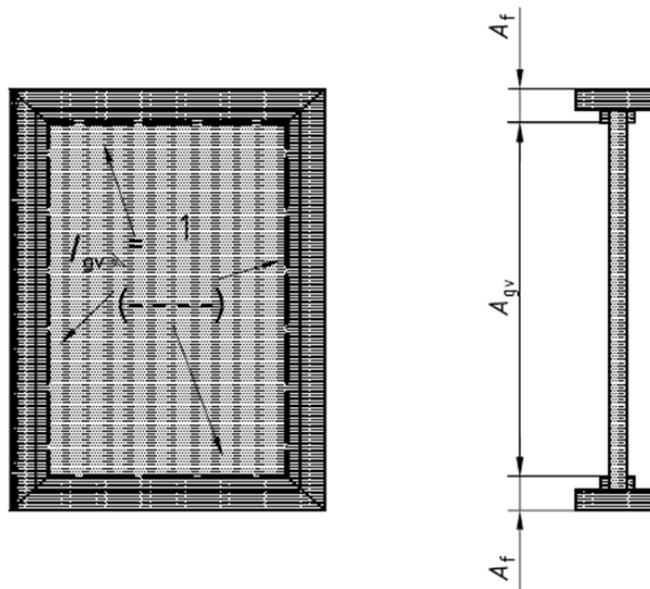


Figura 3. schematizzazione delle aree e del perimetro visibile dei componenti considerati nel calcolo della norma

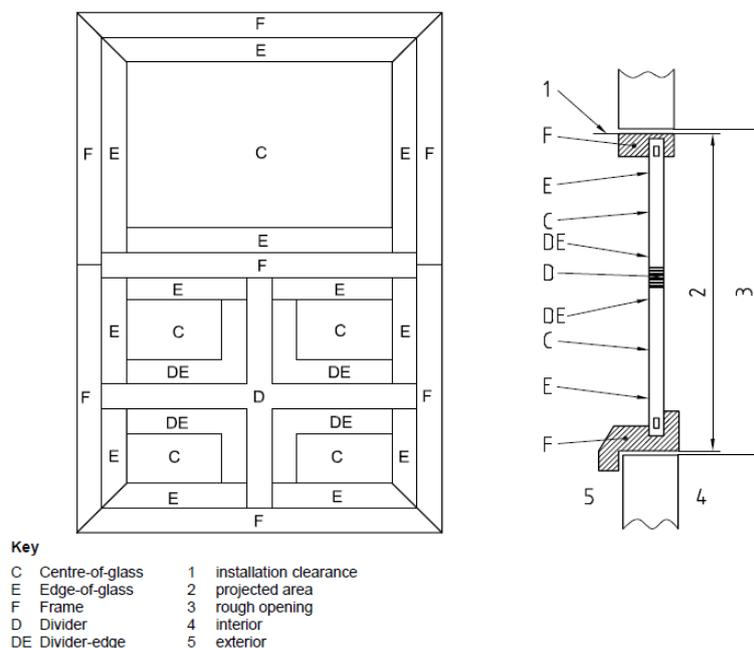


Figura 4. individuazione dei componenti, delle aree e dei perimetri di un serramento

La trasmittanza termica della vetrata invece viene determinata, nei casi in cui non si tenga conto delle radiazione solare, calcolando il reciproco della resistenza termica, secondo la formula seguente:

$$U_{gv} = \frac{1}{R_t}$$

dove R_t è data dalla somma delle resistenze termiche dovute ai fattori di adduzione interno ed esterno e dalle resistenze termiche delle lastre e delle intercapedini, secondo la seguente relazione (Fig. 5):

$$R_t = \frac{1}{h_{ex}} + \sum_{i=2}^n R_i + \sum_{i=1}^n R_{gv,i} + \frac{1}{h_{int}}$$

dove:

$$R_{gv,i} = \frac{t_{gv,i}}{\lambda_{gv,i}} \qquad R_i = \frac{t_{f,i} - t_{b,i-1}}{q_i}$$

essendo $t_{f,i}$ e $t_{b,i-1}$ le temperature superficiali esterna ed interna della *iesima* lastra di vetro.

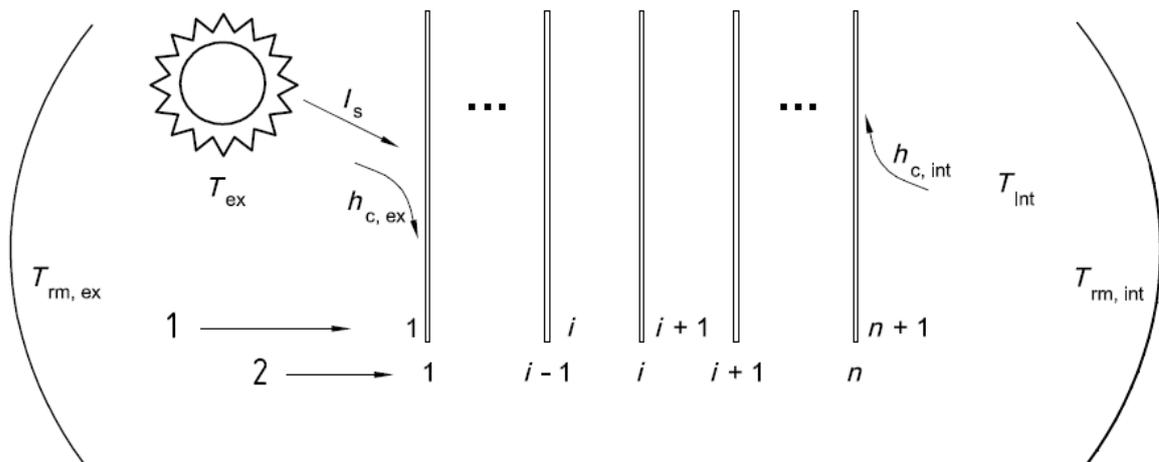
Nel caso in cui si debba considerare anche la radiazione solare, la formula della trasmittanza termica della vetrata diventa:

$$U_{gv} = \frac{q_{int} (I_s = 0)}{T_{ni} - T_{ne}}$$

dove la temperatura ambiente è pari a:

$$T_n = \frac{h_{cv} T_{ai} + h_r T_m}{h_{cv} + h_r}$$

essendo q_{int} la densità netta del flusso di calore attraverso la finestra verso l'ambiente interno senza il contributo della radiazione solare.



Key

- 1 gap
- 2 glazing

Figura 5. Numerazione del sistema trasparente

La norma inoltre prescrive le modalità di calcolo del fattore solare, per l'intero serramento. Per le vetrate prive di schermatura viene indicata la seguente formula:

$$\tau_s = \frac{\sum \tau_g A_g + \sum \tau_f A_f}{A_t}$$

dove τ_g e τ_f sono rispettivamente i valori di trasmittanza solare totale del sistema vetrato e del telaio. Tralasciando il calcolo della trasmittanza solare totale del telaio, il valore della trasmittanza solare della vetrata viene determinata attraverso la seguente formula:

$$\tau_s = \frac{q_{\text{int}} - q_{\text{int}}(I_s = 0)}{A_t}$$

dove:

q_{int} è la densità totale del flusso di calore attraverso il sistema verso l'ambiente interno nelle specifiche condizioni espresso in W/m^2

$q_{\text{int}}(I_s=0)$ è la densità totale del flusso di calore attraverso il sistema verso l'ambiente interno nelle specifiche condizioni, senza il contributo della radiazione solare, espresso in W/m^2 .

La risoluzione della precedente equazione comporta che debbano essere noti i valori di assorbimento (A_i) e di trasmissione (τ_{sl}) totali e del q_i del sistema vetrato.

È previsto inoltre che nei calcoli si debba tener conto dei dati spettrali, sia della radiazione solare che dei componenti del sistema che si deve calcolare.

La distribuzione spettrale della radiazione solare verrà considerata per specifici valori di lunghezza d'onda, mentre per i valori intermedi si procederà per interpolazione lineare.

Il calcolo dei valori A_i , τ_s e q_i vengono determinati attraverso un'integrazione numerica, secondo le seguenti equazioni (Fig.6):

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sl}-1} \alpha_i(\lambda_{wj/j+1}) E_{sl}(\lambda_{wj/j+1}) \Delta\lambda_{wj}}{\sum_{j=1}^{N_{sl}-1} E_{sl}(\lambda_{wj/j+1}) \Delta\lambda_{wj}}$$

$$\tau_{sl} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sl}-1} \tau_{sl}(\lambda_{wj/j+1}) E_{sl}(\lambda_{wj/j+1}) \Delta\lambda_{wj}}{\sum_{j=1}^{N_{sl}-1} E_{sl}(\lambda_{wj/j+1}) \Delta\lambda_{wj}}$$

$$q_l = h_{cv,i}(T_{ft,i} - T_{b,i-1}) + J_{ft,i} - j_{b,i-1}$$

dove:

A_i è l'energia totale assorbita dal sistema vetrato

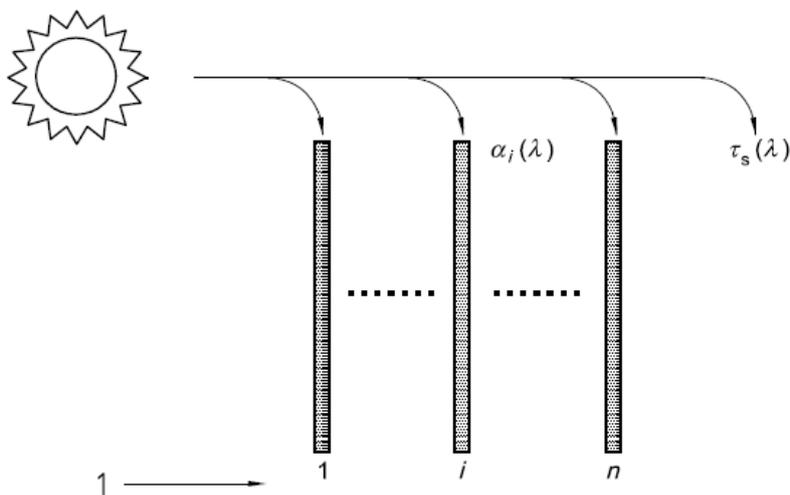
τ_{sl} è la trasmittanza solare del sistema vetrato

q_i è la densità del flusso di calore

La norma fornisce anche le indicazioni per determinare i valori di trasmittanza termica e del fattore solare di serramenti dotati di sistemi schermanti.

In questi casi le equazioni introdotte precedentemente dovrebbero essere modificate ottenendo delle formule complesse e di difficile comprensione. Verrà dunque di seguito riportata solamente la descrizione di alcuni contenuti ritenuti fondamentali:

- Le due versioni della norma UNI EN 13363 si basano sull'ipotesi che la radiazione incidente sia collimata e che a valle delle schermature solari sia completamente diffusa. La norma ISO 15099 considera invece sia la radiazione collimata che quella diffusa. Questo metodo di calcolo approssima meglio condizioni reali, in cui un qualunque elemento di involucro è soggetto sia alla radiazione diretta proveniente dal disco solare (collimata) che a quella diffusa proveniente dalla volta celeste. Inoltre viene tenuto in conto che la radiazione solare può attraversare il componente secondo le due modalità: diretta e diffusa. Per quanto sopra menzionato, e come evidenziato in figura 7, la trasmittanza (e in modo analogo la riflettanza) di una vetrata accoppiata ad una schermatura solare è pari alla somma di tre componenti:
 - Trasmittanza diretta-diffusa, come definito in UNI EN 13363
 - Trasmittanza diretta-diretta, definita come la parte della radiazione incidente che attraversa il componente trasparente, senza essere intercettata dalla schermatura solare.
 - Trasmittanza diffusa-diffusa, definita come la radiazione diffusa trasmessa dai vari elementi del sistema semi-trasparente in modo diffuso verso l'interno.



Key

1 glazing layer

Figura 6. Assorbimento della lastra *iesima* e trasmittanza solare spettrale

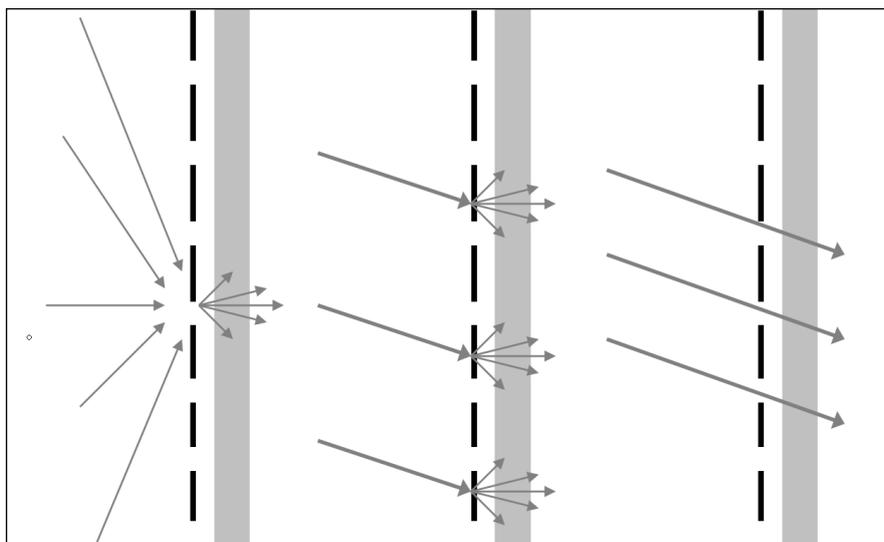


Figura 7. Le modalità di trasmissione definite dalla norma 15099. Da sinistra: trasmissione diffusa-diffusa; trasmissione diretta-diffusa; trasmissione diretta-diretta.

La norma considera inoltre i seguenti punti:

- I calcoli richiedono che siano noti i dati spettrali degli elementi del sistema poiché non viene ammesso l'utilizzo di dati integrati e, per quanto sopra esposto, devono essere forniti sia quelli relativi alla componente diretta che a quella diffusa.
- Nel caso di sistemi schermanti a veneziana, il bilancio energetico sulla singola lamella deve essere eseguito suddividendo la stessa in cinque segmenti adiacenti.
- La trasmittanza e la riflettanza speculare del vetro non sono costanti, ma variano in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione. Poiché la norma esegue il calcolo sulla radiazione diretta ad angoli di incidenza anche maggiori, è necessario fornire anche le caratteristiche ottiche degli elementi trasparenti a tali angoli di incidenza.
- La norma definisce una serie di equazioni per il calcolo dello scambio termico all'interno delle intercapedini, nel caso sia presente nella stessa una forma di ventilazione, naturale o forzata. Inoltre tiene conto della ventilazione dovuta alla spinta del vento, limitatamente al caso di schermature solari esterne. Viene definito lo scambio termico dovuto all'effetto camino, funzione anche della permeabilità all'aria dell'eventuale schermatura solare (tenda o sistema a lamelle) inserita nell'intercapedine.

La tabella 1, fornisce le condizioni al contorno per l'esecuzione dei calcoli secondo la norma in esame.

Tabella 1. Condizioni di calcolo definite dalla norma ISO 15099

Dato	Unità	Invernale	Estivo
Temperatura aria esterna	°C	0	30
Temperaturaradianteesterna	°C	0	30
Coefficiente di scambio termico convettivo esterno	W/m ² K	20	8
Radiazione solare incidente	W/m ²	300	500
Temperatura aria interna	°C	20	25
Coefficiente di scambio termico convettivo interno	W/m ² K	3.6	2.5

3 Il calcolo delle proprietà solari e luminose della vetrata isolante con schermature solari secondo la norma UNI EN 13363- parte 1 e 2

La norma UNI EN 13363 - *Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate – Calcolo della trasmittanza solare e luminosa*, prescrive i metodi di calcolo per determinare la trasmittanza solare e altri parametri ottici dei dispositivi di protezione solare abbinati alle vetrate.

La norma europea è stata recepita dall'UNI ed adottata anche in Italia.

È divisa in due parti e consta: di un metodo semplificato (UNI EN 13363 parte 1 del 2004) e un metodo dettagliato (UNI EN 13363 parte 2 del 2006). I due metodi hanno diversi punti in comune sia nei principi di modellazione che di calcolo, di seguito se ne riporta l'elenco dettagliato:

- I materiali usati per lastre trasparenti e elementi schermanti devono essere omogenei;
- Elementi solidi (schermature e lastre trasparenti) sono privi di resistenza termica;
- Due elementi solidi devono essere sempre separati da uno strato gassoso;
- Tende e lamelle devono essere in posizione tale da evitare il passaggio di radiazione solare diretta.

Tuttavia, le differenze tra i due approcci rimangono profonde e verranno descritte in dettaglio successivamente.

3.1 Il metodo semplificato UNI EN 13363- parte 1 - 2008

Il metodo semplificato fornisce una procedura di calcolo applicabile alle schermature solari esterne, interne o poste nell'intercapedine di un vetrocamera (Fig. 8). La sua applicazione è subordinata al rispetto delle seguenti condizioni:

1. Il sistema schermante deve avere giacitura parallela al piano della finestra.

2. Oltre alle tende, la norma fornisce un metodo anche per il calcolo di schermature a lamelle orizzontali (le classiche veneziane). La norma considera solo lamelle piatte, sono quindi a rigore escluse le lamelle curve o a geometria complessa. Nella pratica, non esistendo altri standard di riferimento, la metodologia è applicata anche per le comuni lamelle curve.
3. La sola parte trasparente deve avere un fattore solare compreso tra 0.15 e 0.85.
4. I calcoli sono effettuati utilizzando dati integrati (non sono ammessi i dati spettrali)
5. La radiazione incidente è ortogonale al piano del sistema semitrasparente.
6. Il calcolo prevede radiazione collimata incidente e radiazione trasmessa totalmente diffusa
7. Lo spazio tra schermo e vetro esterno e tra schermo e vetri in intercapedine è non ventilato; lo è, viceversa, nel caso di schermo interno.

L'applicazione del metodo proposto per la determinazione dei valori del fattore solare comporta deviazioni comprese tra +0.1 e -0.02, rispetto al dato corretto. Il risultato è dunque cautelativo rispetto all'impatto che realmente avrebbe avuto il sistema schermante sul fabbisogno energetico di raffrescamento.

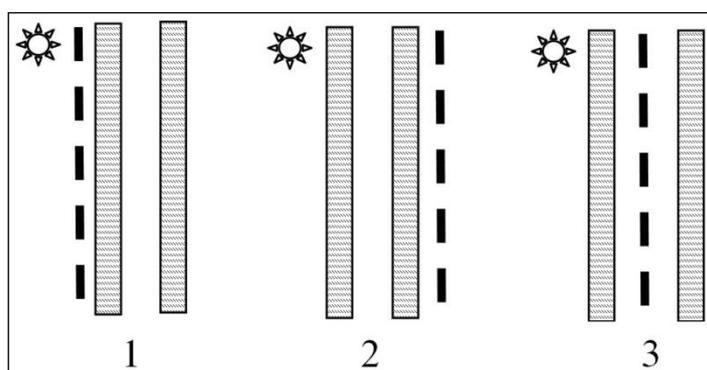


Figura 8. Posizione dello schermo solare rispetto al componente vetrato: 1) esterno, 2) interno, 3) in intercapedine

3.2 Il metodo dettagliato UNI EN 13363- parte 2 – 2006

Il metodo precedente si lega concettualmente alla norma UNI EN 410-2011, che non prevede il calcolo dei flussi termici attraverso il componente, di conseguenza le formule vengono definite in funzione delle sole caratteristiche solari e di resistenza termica dei vari elementi che compongono il sistema semi-trasparente. Il metodo dettagliato, ovvero la parte 2 della UNI EN 13363, pur mantenendo una serie di semplificazioni introdotte nella parte 1, introduce il metodo di calcolo per determinare il flusso termico che attraversa il sistema, individuando così il valore di q_i e, di conseguenza, il fattore solare g .

Le equazioni principali indicate nella norma, utilizzate per il calcolo delle precedenti grandezze, ripercorrono i criteri applicati nella norma ISO 15099.

Il metodo dettagliato fornisce le indicazioni per l'applicazione di una procedura di calcolo che può essere utilizzata per determinare le prestazioni di un sistema schermante composto da un vetrocamera e da una schermatura solare posizionata: all'esterno, all'interno o nell'intercapedine della vetrata stessa. A differenza del metodo semplificato, la parte 2 della norma considera gli effetti della ventilazione in qualsiasi posizione vengano montati i sistemi schermanti.

Il metodo di calcolo si basa sulle proprietà spettrali dei componenti (vetri e sistemi schermanti), ma consente anche di utilizzare i valori integrati qualora i primi non fossero disponibili, evidenziando però che l'accuratezza dei risultati potrebbe ridursi, soprattutto nei casi in cui intervengano nel calcolo una o più lastre con un comportamento spettrale selettivo.

È possibile calcolare sistemi trasparenti in cui sono stati montati schermi trasparenti, traslucidi o opachi.

Nel calcolo vengono considerate le seguenti ipotesi:

- Il sistema schermante deve avere giacitura parallela al piano della finestra;
- I sistemi schermanti sono considerati materiali omogenei, a tal fine vengono utilizzate caratteristiche ottiche equivalenti che possono dipendere anche dall'angolo di incidenza della radiazione;

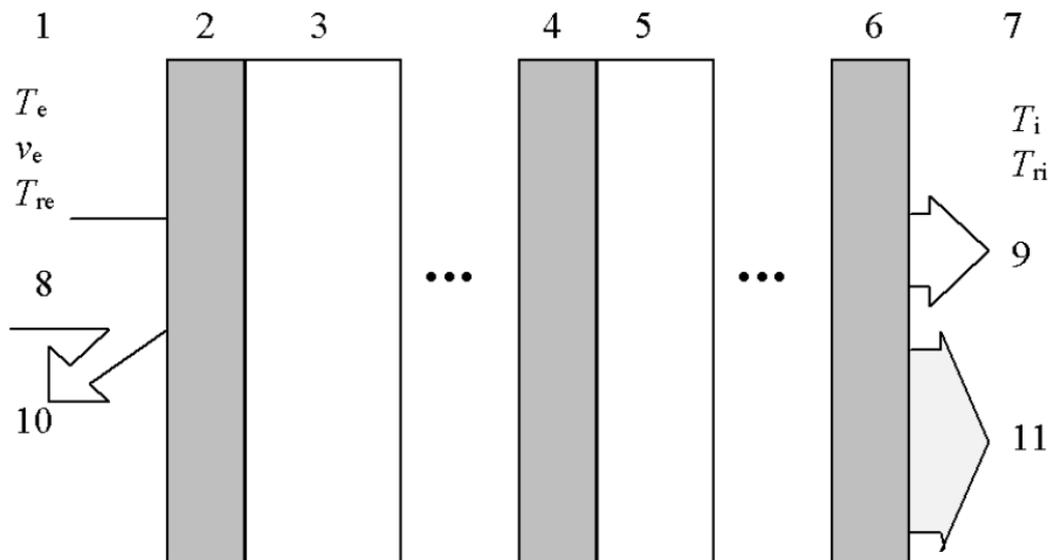
- La radiazione viene ipotizzata collimata e viene calcolata con qualsiasi angolo di incidenza, mentre la radiazione trasmessa a valle dell'elemento trasparente viene considerata totalmente diffusa;
- Gli strati gassosi hanno un valore di trasmittanza pari a 100, di conseguenza non hanno assorbimento;
- Le proprietà ottiche dei materiali solidi sono indipendenti sia dall'intensità della radiazione incidente che dalle temperature al contorno;
- Le caratteristiche spettrali dei componenti vengono considerate all'interno di un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 0.3 μm e 2.5 μm .
- Il metodo di calcolo non considera la dipendenza angolare della trasmittanza e della riflettanza;

Oltre alle tende, la norma fornisce un metodo anche per il calcolo di schermature a lamelle orizzontali (le classiche veneziane). In quest'ultimo caso vengono considerate solo le lamelle piatte, escludendo dal calcolo le lamelle curve o a geometria complessa. Nella pratica, non esistendo altri standard di riferimento, la metodologia viene applicata anche per le comuni lamelle curve.

In generale la norma considera che il sistema trasparente sia composto da una serie di piani, separati da intercapedini o spazi riempiti di aria o gas, di resistenza termica trascurabile.

Per calcolare l'energia solare e termica che attraversa il componente viene ipotizzato un flusso monodimensionale (ad eccezione degli spazi ventilati per i quali sono previste equazioni più complesse); i piani e gli spazi sono numerati da 1 a n , dove n rappresenta lo spazio interno e 1 quello esterno (Fig. 9).

Il numero di piani è illimitato. Il calcolo prevede la risoluzione di equazioni del bilancio energetico di ogni layer la cui risoluzione, vista la complessità, avviene tramite un processo iterativo.



Key

T_e	external air temperature	1	external	7	internal
T_{re}	external radiant temperature	2	layer 1	8	solar radiation
v_e	external wind velocity	3	space 1	9	direct solar and light transmittance
T_i	internal air temperature	4	layer j	10	direct solar and light reflectance
T_{ri}	internal radiant temperature	5	space j	11	thermal radiation and convection (direct and indirect)
		6	layer n		

Figura 9. Schematizzazione del sistema trasparente

È utile inoltre descrivere i concetti e le assunzioni che sono alla base del calcolo, che vengono riportate di seguito:

- Il calcolo delle proprietà solari dirette del componente, in funzione delle proprietà solari dei singoli elementi solidi, prevede la risoluzione di un sistema di equazioni pari al numero di elementi solidi di cui è costituito il componente. Per ogni elemento solido j si esegue un bilancio energetico, funzione dell'energia radiante (normalizzata nel calcolo) trasmessa dagli n strati più esterni, e che incide

sulla faccia esterna dell'elemento, e dell'energia radiante riflessa dagli m strati più interni, e che arriva sulla faccia interna dell'elemento.

- Scambio termico q_{th} . Il metodo, per quanto riguarda il calcolo dell'energia radiante, prevede la risoluzione di un sistema di equazioni pari al numero di elementi solidi di cui è costituito il componente. Per ogni elemento solido j si esegue un bilancio termico, funzione del flusso termico incidente e proveniente dagli n strati più esterni, e funzione del flusso termico proveniente m strati più interni. Analogamente a quanto accade con le equazioni del modello solare, il modello termico richiede che siano noti i valori: della emissività degli elementi solidi, della trasmittanza all'infrarosso (solitamente nulla per il vetro ed altri materiali) e della temperatura dell'elemento stesso.
- La conduzione e la convezione termica, q_c , per ogni intercapedine del sistema semi-trasparente si ricava in funzione della conduttività termica del gas λ , del relativo spessore e del numero di Nusselt, secondo quanto definito nella norma UNI EN 410. Si ricorda che la resistenza termica degli elementi solidi si assume nulla, quindi tale sarà anche il relativo scambio termico per conduzione.

La norma prevede inoltre la possibilità di modellare intercapedini ventilate, considerando le ipotesi che la ventilazione possa essere forzata o naturale; a tal proposito introduce un modello per il calcolo bidimensionale del flusso termico, ovvero in direzione perpendicolare e parallela (verticale) rispetto al piano del sistema trasparente; di seguito vengono elencati i dati richiesti per calcolare lo scambio termico per ventilazione.

Per ogni intercapedine sono:

- H altezza dell'intercapedine;
- T_1 temperatura dell'aria all'ingresso dell'intercapedine dal basso;
- T_m temperatura media delle due lastre che si affacciano sull'intercapedine
- H_{tp} altezza caratteristica dell'intercapedine (o lunghezza di penetrazione della temperatura), a sua volta funzione di:
 - ρ densità dell'aria alla temperature dell'intercapedine;
 - c calore specifico dell'aria;
 - s larghezza dell'intercapedine;
 - v velocità dell'aria, calcolata secondo le appendici della norma stessa;
 - h_c coefficiente di scambio termico convettivo dell'intercapedine.

Lo schema dei flussi termici in intercapedine nel caso di ventilazione è riportato nella figura 10.

In condizioni di scambio termico, l'equazione di bilancio per ogni strato si risolve assumendo che: la somma dello scambio termico radiativo e dello scambio termico convettivo/conduittivo, e il prodotto dell'assorbimento solare per energia incidente, sia pari a zero.

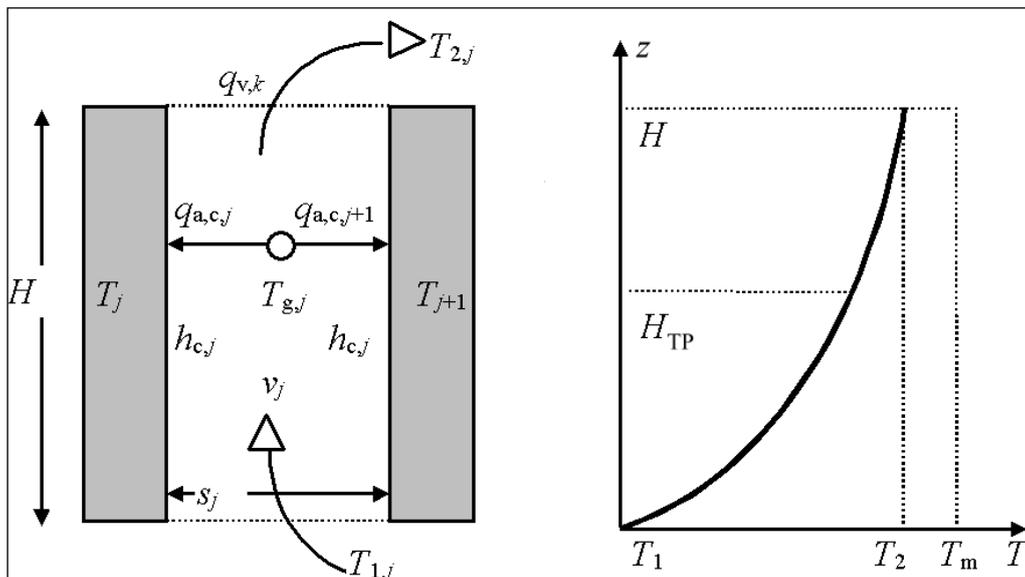


Figura 10. Schemi funzionali del modello di calcolo di intercapedini ventilate.

Infine la norma definisce due diverse condizioni al contorno, le cui caratteristiche sono indicate in tabella 2. La prima condizione prende come riferimento la norma UNI EN 410 e viene utilizzata nei calcoli relativi al periodo invernale, la seconda, che prevede condizioni climatiche più estreme, viene utilizzata nei casi in cui si debbano studiare i livelli di comfort e i carichi di raffrescamento estivi.

Tabella 2. Condizioni di calcolo definite dalla norma UNI EN 13363 parte 2

Dato	Unità	Riferimento	Estivo
Temperatura aria esterna	K (°C)	278 (5)	298 (25)
Temperaturaradianteesterna	K (°C)	278 (5)	298 (25)
Coefficiente di scambio termico convettivo esterno	W/m ² K	18	8
Radiazione solare incidente	W/m ²	300	500
Temperatura aria interna	K (°C)	293 (20)	298 (25)
Temperaturaradianteinterna	K (°C)	293 (20)	298 (25)
Coefficiente di scambio termico convettivo interno	W/m ² K	3.6	2.5

4 Comparazione tra strumenti di calcolo

In questa sezione vengono presentati una serie di calcoli per comparare gli strumenti di calcolo rispetto alle norme di riferimento. L'obiettivo è quello di individuare eventuali discrepanze nei diversi approcci legate non solo alle equazioni che regolano gli scambi termici ma anche alla geometria dei sistemi trattati e all'influenza delle condizioni al contorno.

4.1 WINSHELTER

Winshelter è un software sviluppato da ENEA con la collaborazione della Stazione Sperimentale del Vetro e finanziato negli anni scorsi all'interno dell'accordo di programma RSE. Il software implementa il metodo dettagliato della norma UNI EN 13363 e, con l'ultima, versione anche il metodo della norma ISO 15099, seppur introducendo alcune limitazioni e semplificazioni. Si riportano a seguire alcuni cenni sull'interfaccia. Il modulo delle proprietà di sistemi trasparenti con schermature solari consente di eseguire il calcolo delle proprietà ottiche e solari di sistemi trasparenti accoppiati con sistemi schermanti, secondo quanto stabilito nelle norme UNI EN 13363-2006 *"Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato"* e la norma ISO 15099-2003 *"Thermal performance of windows, doors and shading device – Detailed calculations"*. Il software, implementando la norma: UNI EN 410-2000 *"Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate"*, consente anche di eseguire il calcolo delle proprietà ottiche e solari del solo sistema trasparente. Inoltre, è possibile determinare il valore della trasmittanza termica del solo componente trasparente, secondo le indicazioni della norma UNI EN 673-1999 *"Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo"* e del sistema trasparente integrato con il sistema schermante secondo il modello di calcolo della già citata ISO 15099.

Avendo come obiettivi l'accuratezza di calcolo unita alla semplicità di utilizzo, il software da la possibilità di scegliere se eseguire le modellazioni con dati spettrali o integrati.

Di seguito verranno presentate alcune funzionalità operative di questo strumento.

Per andare incontro alle esigenze e alle conoscenze di tutti i potenziali utenti sono state previste diverse opzioni di calcolo, selezionabili direttamente dall'utente:

- Modello UNI EN 13363 semplificato. Sono preselezionate le condizioni di calcolo (irraggiamento e temperature esterne ed interne) e l'angolo di altezza solare, nel caso fossero presenti delle lamelle con un dato orientamento. Il software esegue solo i calcoli con dati integrati. È possibile modellare facciate ventilate.
- Modello UNI EN 13363 dettagliato. L'utente può selezionare le condizioni di calcolo e la tipologia di dati di partenza dei materiali (valori integrati e/o spettrali). L'angolo di incidenza è scelto

dall'utente a patto che non vi sia passaggio di radiazione solare diretta attraverso le schermature, così come definito dalla norma di riferimento. È possibile modellare facciate ventilate.

- Modello ISO 15099. L'utente può selezionare le condizioni di prova e la giacitura delle schermature, deve utilizzare però i dati spettrali dei materiali di base. Si ricorda che con questo modello è possibile ipotizzare il passaggio di radiazione diretta attraverso le schermature. È possibile modellare facciate ventilate.
- Modello tende a proiezione secondo ISO 15099. È possibile calcolare il contributo delle tende a proiezione, ovvero con schermature non parallele al piano della superficie trasparente, attraverso una routine semplificata. Il modello è stato introdotto per fornire delle indicazioni su una tipologia di prodotti molto diffusa e, tuttavia, non adeguatamente coperta dal parco normativo esistente. È possibile, anche in questo caso, modellare facciate ventilate.

La figura 11 presenta la schermata per il calcolo delle proprietà del sistema trasparente. I menu a tendina sul lato destro riportano i database dei materiali di base, tutti dotati di opportuni filtri per semplificare la ricerca del prodotto da scegliere. I prodotti presenti nel database riguardano: lastre trasparenti, sistemi schermanti di vari tipo, intercapedini pre-calcolate, singoli gas per intercapedine. L'utente deve selezionare semplicemente il prodotto da inserire e trascinarlo dal database nel campo centrale della schermata. Ogni prodotto è identificato attraverso uno specifico colore ed è collegato al database dove sono contenuti tutti i dati geometrici e termo fisici necessari per eseguire il calcolo. Qualora il prodotto non sia presente nel database, l'utente può crearne e salvarne uno nuovo premendo i pulsanti sulla barra dei comandi e, ovviamente, inserendo tutti i dati necessari. Nella parte superiore della schermata principale è possibile definire la geometria del componente e le condizioni di calcolo.

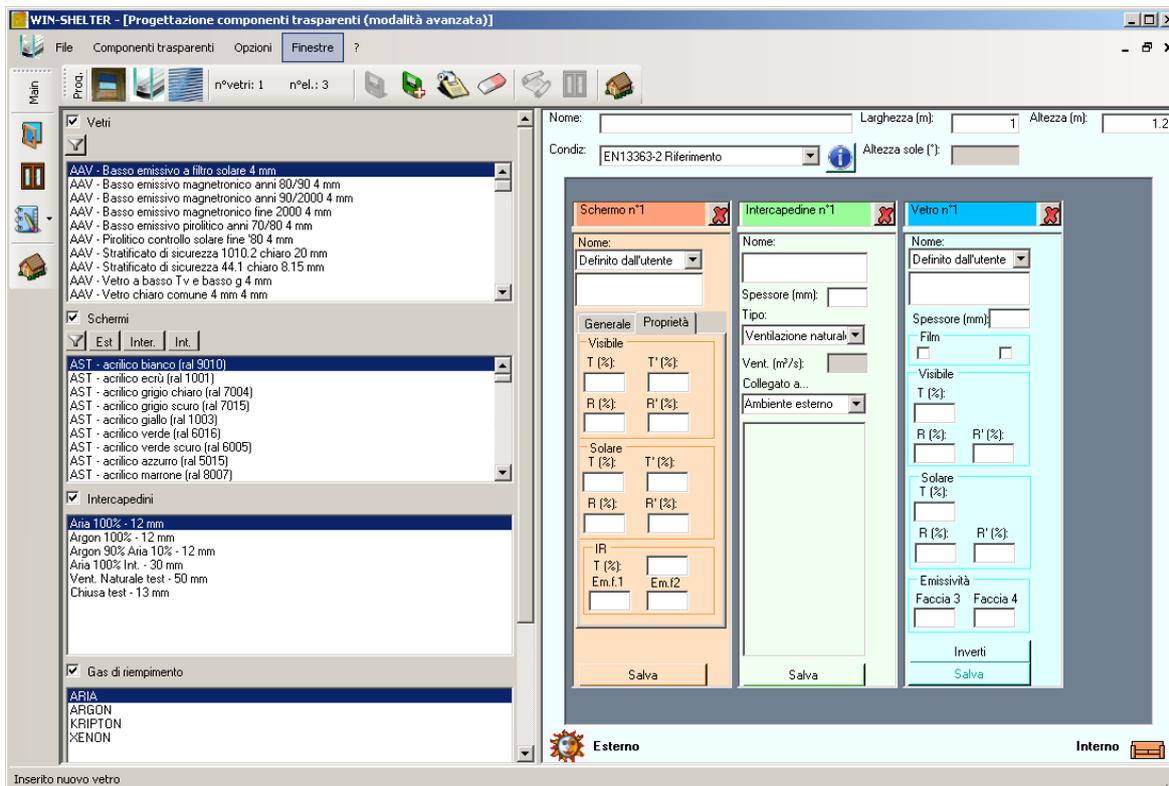


Figura 11. Modulo di calcolo proprietà solari di sistemi trasparenti

Il modulo per il calcolo della trasmittanza termica, che riproduce in parte quello appena visto, è presentato in figura 12. Sulla sinistra sono inseriti i menu con i database dei telai, caratterizzati in base ai dati forniti dalle associazioni di categoria, e dei progetti archiviati dall'utente. Nella finestra principale sono presenti campi con i dati geometrici e termo fisici necessari per eseguire il calcolo della trasmittanza termica. Il

software, per semplificare la descrizione del modello da calcolare, fornisce alcuni pulsanti caratterizzati da punti interrogativi riferibili ai dati geometrici, che fanno aprire altre finestre contenenti tutti i dati relativi alle tipologie di telaio (alluminio, legno, plastica), le tipologie di sistema trasparente (numero di lastre, superfici basso emissive, tipologie di gas intercapedine), caratteristiche del ponte termico telaio-lastre trasparenti-distanziale, forniti dalla norma UNI EN ISO 10077.

Il software produce poi un report di calcolo con i dati d input ed output più rilevanti .

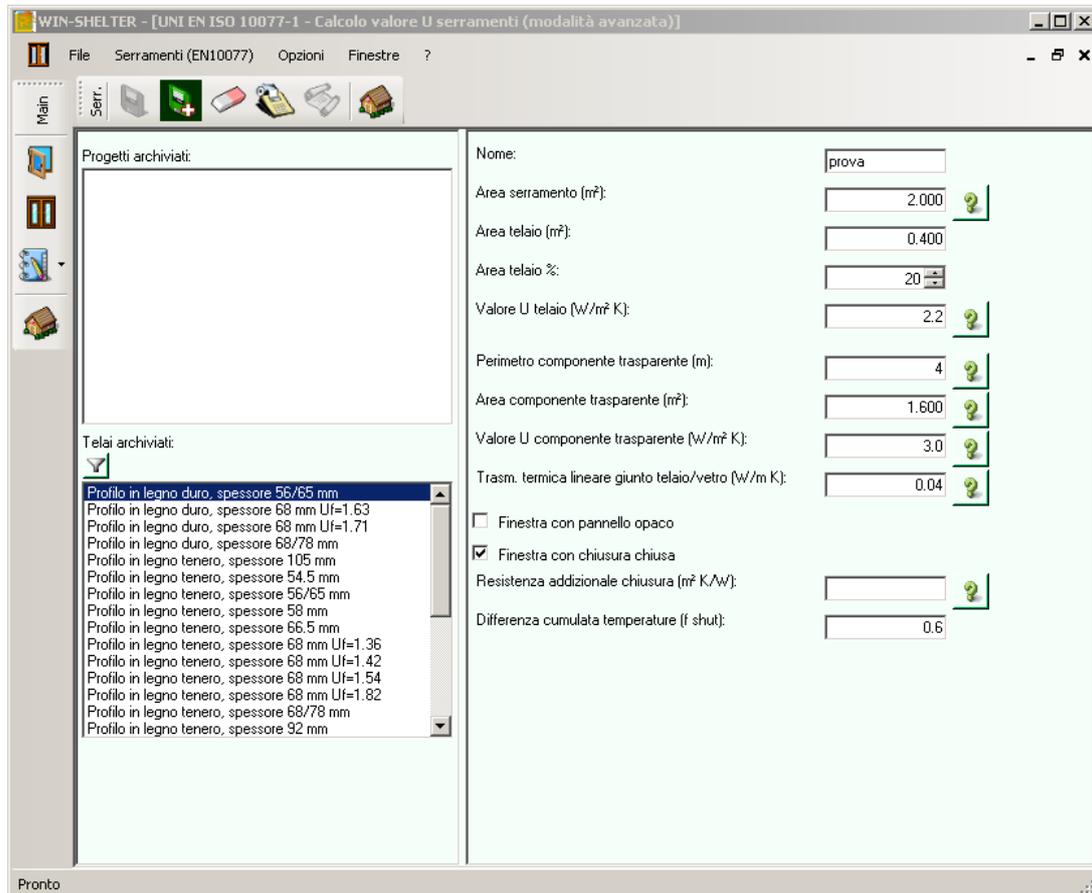


Figura 12. Modulo di calcolo proprietà termiche dei serramenti.

4.2 WINDOW

Window è un software realizzato sotto l'attività di ricerca di Windows and Daylighting Group, afferente al Building Technology Department del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), lavorando a stretto contatto con le industrie che si adoperano per sviluppare specifiche tecnologie, con lo scopo di migliorare l'efficienza energetica degli edifici, il comfort, la salute e la sicurezza degli utenti.

Con Window è possibile calcolare le prestazioni termiche delle finestre, determinando i valori di trasmittanza termica, del fattore solare, del coefficiente di shading e della trasmittanza visibile del componente modellato. Attraverso l'applicazione di questo codice è possibile studiare i prodotti costituiti da qualsiasi combinazione di vetrate isolanti, gas di riempimento, telai, distanziatori e divisori, sotto diverse condizioni ambientali (presenti nel database o personalizzate dall'utente) e per ogni tipo di inclinazione del serramento.

I metodi di calcolo della trasmittanza e del fattore solare sono basati: sull'analisi della trasmissione del calore secondo la norma UNI EN 673 o la norma ISO 15099 nel caso di vetrata isolante dotata di sistemi schermanti. Il calcolo delle prestazioni ottiche può essere eseguito attraverso l'applicazione di diverse norme tra cui è possibile scegliere la UNI EN 410 e la ISO 9050.

Il codice consente di impostare le condizioni ambientali che verranno utilizzate nel calcolo, scegliendo tra le seguenti opzioni: NFRC 100-2010, NFRC 100-2010 summer, NFRC 100-2010 winter, CEN, l'utente può inoltre personalizzare altri modelli secondo le proprie esigenze.

Il calcolo dell'indice di resistenza a condensazione viene effettuato in conformità a NFRC 500.

Attualmente è disponibile una nuova versione del software con la quale è possibile calcolare anche le prestazioni di sistemi trasparenti complessi costituiti da vetrate evacuate, sistemi schermanti tipo a veneziana con lamelle verticali e pannelli forati.

Modellato il sistema trasparente e scelte le condizioni ambientali, il programma calcola:

- Il valore di trasmittanza termica, il fattore solare, il coefficiente di shading e la trasmittanza visibile dell'intero sistema finestrato;
- Il valore di trasmittanza termica, il fattore solare, il coefficiente di shading e la trasmittanza visibile dell'intero sistema vetrato (in riferimento al centro della vetrata);
- Il valore della trasmittanza termica di telai e divisori e la corrispondente superficie di ognuno;
- La trasmittanza e la riflettanza solare e visibile del sistema vetrato;
- Le proprietà di colore secondo le coordinate L^* , a^* , b^* , la lunghezza d'onda dominante;
- La dipendenza angolare della trasmittanza e della riflettanza solare e visibile e del fattore solare del sistema vetrato;
- La percentuale dell'umidità relativa dell'aria interna ed esterna che potrebbe comportare rischi di condensazione superficiale sulla vetrata;
- La distribuzione di temperatura della vetrata.

Di seguito viene riportata una descrizione dell'interfaccia.

Nella figura 13 è stata riportata la schermata principale del programma.

Nella parte in alto a destra è raffigurato il serramento tipo dove sono evidenziati i componenti del serramento. Selezionando ognuno di essi è possibile visualizzare, in basso a destra, le caratteristiche termiche del componente selezionato mentre, cliccando due volte sullo stesso componente, si apre un nuovo scenario dove è possibile apportare le modifiche appropriate (Fig. 15).

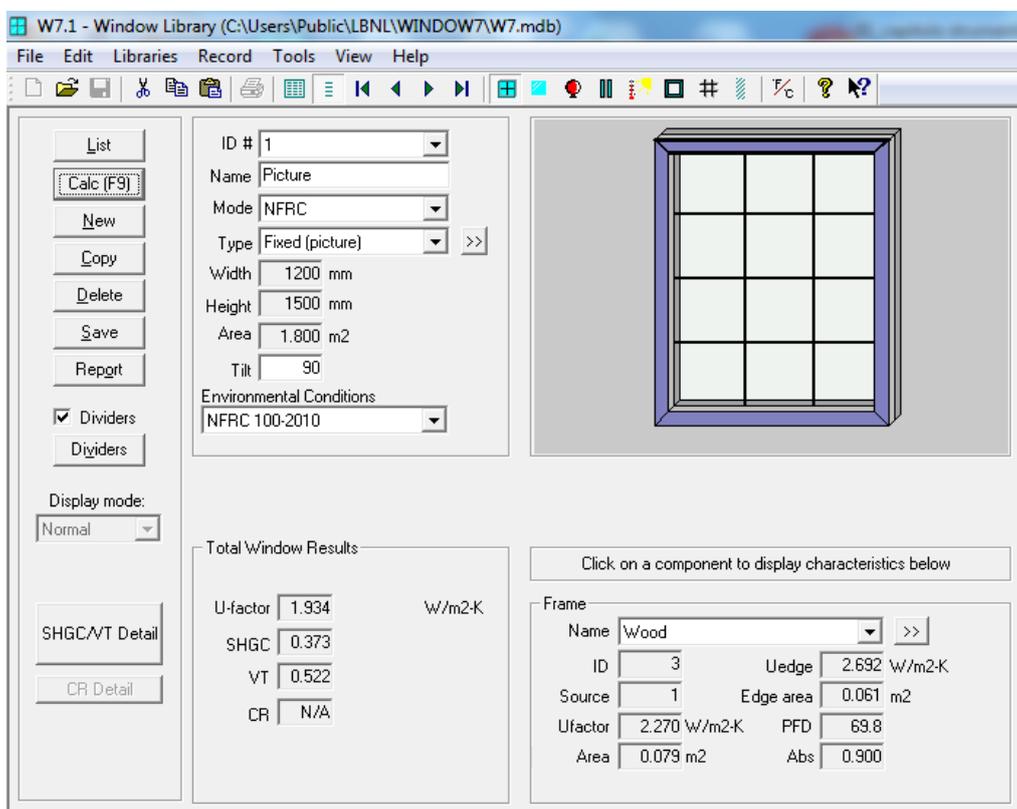


Figura 13. interfaccia principale di Window – modellazione del serramento

Nella colonna a sinistra possono essere eseguite diverse operazioni, tra cui: la stampa del report del sistema studiato, che può essere salvato in diversi formati in funzione del software su cui si lavorerà successivamente, e impostare l'eventuale presenza dei distanziatori. Nella parte in alto della colonna centrale è possibile determinare i modelli che verranno utilizzati per eseguire il calcolo: le condizioni al contorno, il tipo di serramento (porte, finestre, lucernari etc.) il numero delle ante e le relative dimensioni. Nella parte in basso della colonna centrale vengono riportati i dati dell'intero sistema modellato.

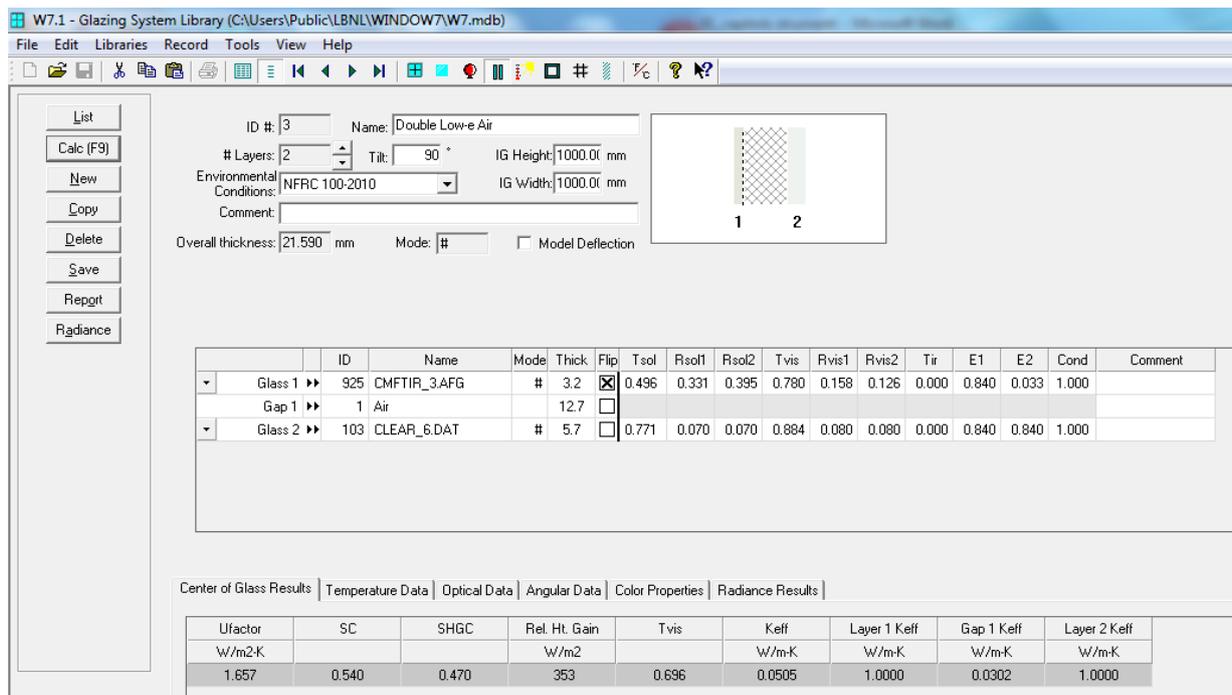


Figura 14. interfaccia per la modellazione della vetrata isolante

La figura 14 mostra la descrizione di una vetrata isolante tipo, già presente nella libreria del programma, ma come anticipato il codice da la possibilità di creare una nuova vetrata definendo il numero e lo spessore delle camere, il tipo di gas di riempimento, la tipologia dei vetri e le condizioni ambientali.

In basso alla figura vengono riportati i risultati del calcolo relativi al sistema modellato.

Tutti gli altri componenti del serramento possono essere definiti attraverso interfacce simili a quella appena presentata.

4.3 Materiali e componenti per l'esecuzione dei calcoli

La comparazione è stata eseguita scegliendo in prima istanza tre tipologie di vetro: vetro chiaro convenzionale, vetro a bassa remissività, vetro a bassa emissività e selettivo sullo spettro solare. Diversi materiali sono stati considerati necessari per verificare l'impatto della selettività sull'accuratezza del calcolo spettrale rispetto a quella conseguita utilizzando i dati integrati sugli spettri di riferimento, tenendo conto della non uniforme distribuzione dell'energia solare alle varie lunghezze d'onda.

Gli spettri di trasmissione e di riflessione, per le due facce del vetro, sono riportate nelle figure da 15 a 17, dalle quali si evidenzia il diverso comportamento delle caratteristiche spettrali nelle varie regioni dello spettro solare (da 300 a 2500 nanometri), tipicamente ultravioletto (300-380 nanometri), visibile (380-780 nanometri), infrarosso vicino (380-2500 nanometri). Le curve sono state ottenute utilizzando il software Optics e i dati contenuti in IGDB (International Glazing DataBase)

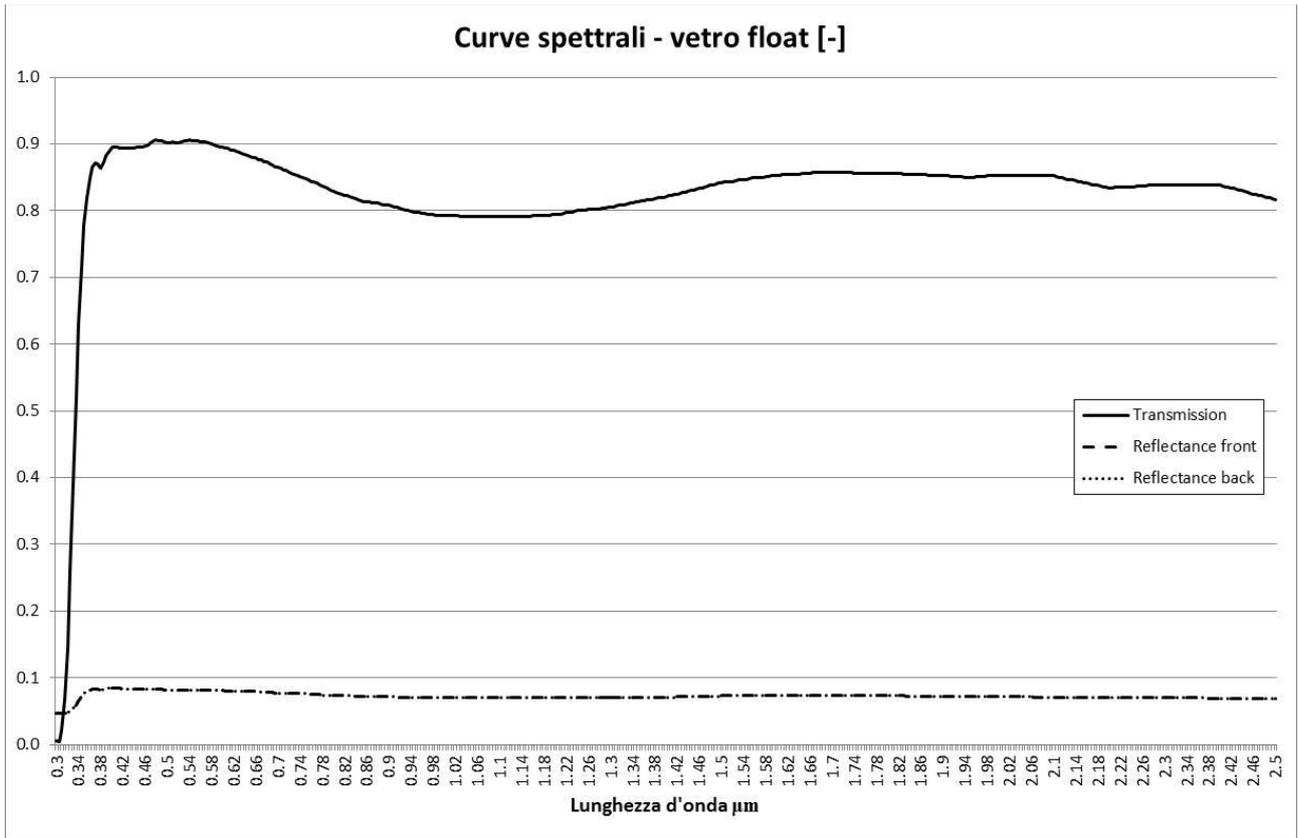


Figura 15. Caratterizzazione spettrale di un vetro float

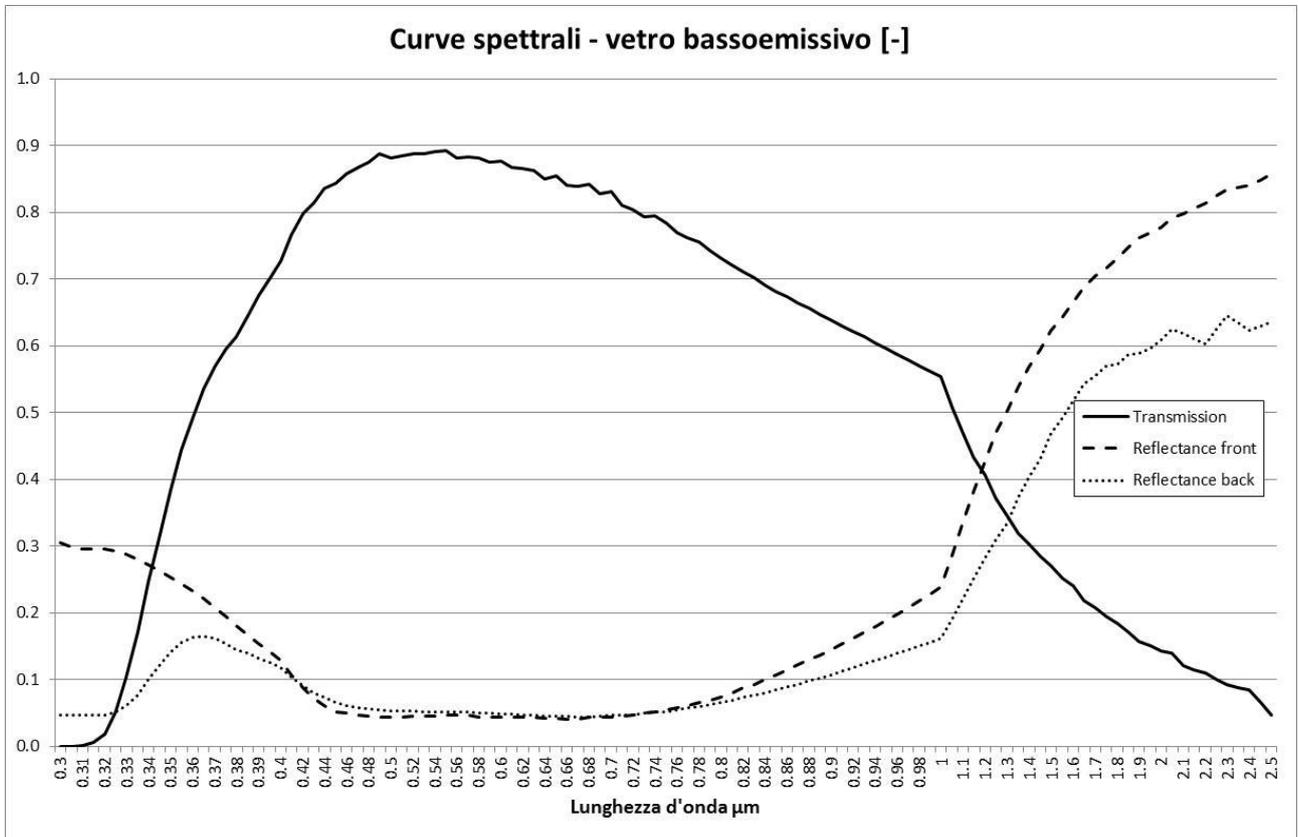


Figura 16. Caratterizzazione spettrale di un vetro bassoemissivo

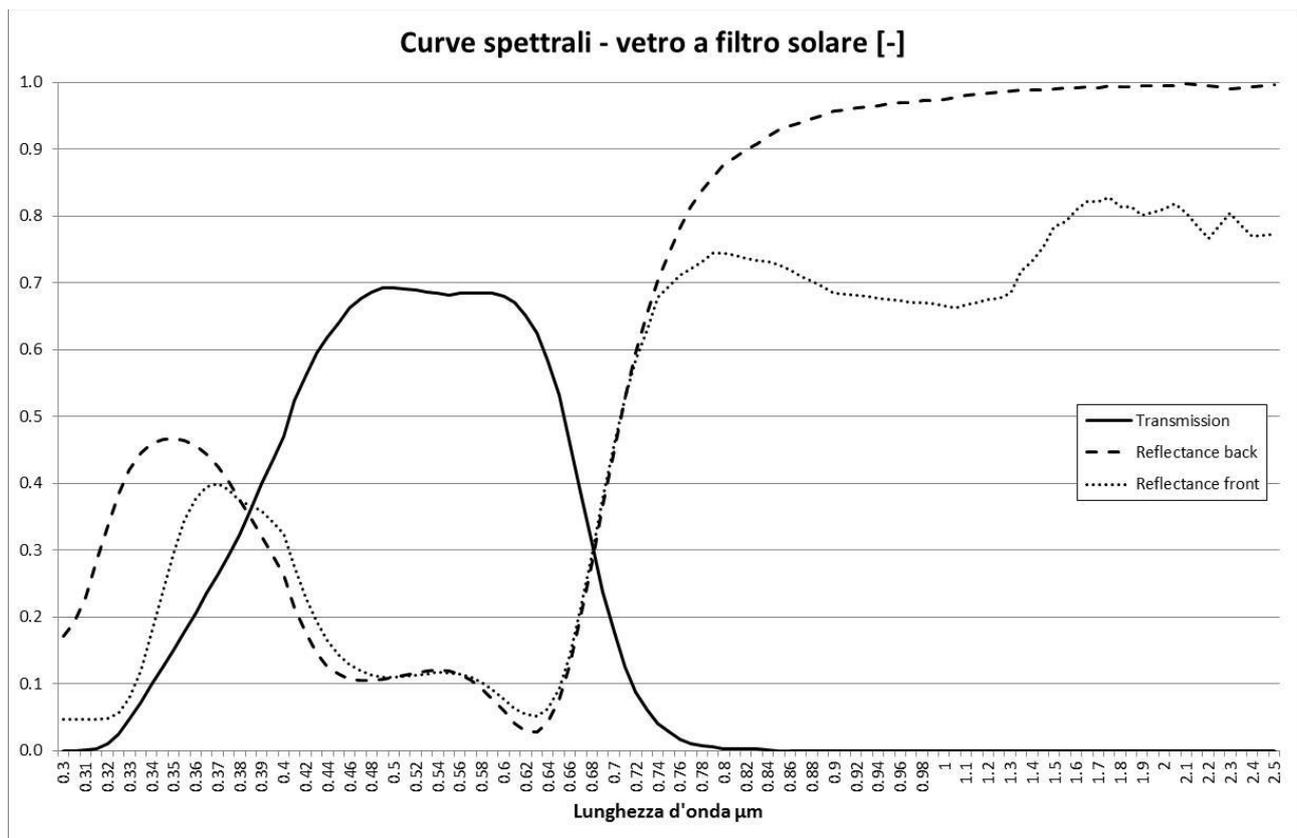


Figura 17. Caratterizzazione spettrale di un vetro a filtro solare

I dati integrati sugli spettri solare e visibile, calcolati utilizzando le norme di riferimento ed espressi su scala 0-100, sono riportati in tabella 3.

Tabella 3. Caratterizzazione delle vetrate

Tipologia	τ_e (%)	ρ_e (%)	α_e (%)	τ_l (%)
Lastra monolitica	84.9	7.6	7.5	90
Lastra bassoemissiva	67	18	15	88
Lastra a filtro solare	29	53	18	67.6

I sistemi schermanti sono stati caratterizzati nella tabella 4. In questo caso sono stati utilizzati direttamente i dati integrati.

Tabella 4. Caratterizzazione delle tende utilizzate

Tipo	τ_e (%)	ρ_e (%)	τ_l (%)	ρ_l (%)	ϵ (%)
Tenda 1	10	20	10	20	90
Tenda 2	10	50	10	50	90
Tenda 3	10	20	10	20	30
Veneziana 1	0	50	0	50	90
Veneziana 2	0	50	0	50	30

La geometria delle tende a veneziana è la seguente: larghezza pari a 15 mm, passo pari a 9 mm e sono inclinate, nella posizione di cut off, di 37° rispetto alla normale al sistema trasparente.

Le configurazioni studiate sono state riportate nella Tab. 5.

Tabella 5. Configurazioni studiate

Config.	Vetro esterno	Intercapedine	Vetro interno	Posizione schermo	Tipologia schermo
1	Float	12 mm 100% aria	Float	Interna Esterna Intercapedine*	Tenda1,tenda 2, tenda 3, veneziana 1 (cut off e chiusa) veneziana 2 (cut off e chiusa)
2	Float	16 mm 90% argon 10% aria	Basso emissivo	Interna Esterna Intercapedine	Tenda1,tenda 2, tenda 3, veneziana 1 (cut off e chiusa) veneziana 2 (cut off e chiusa)
3	Filtro solare	16 mm 100% argon	Float	Interna Esterna Intercapedine	Tenda1,tenda 2, tenda 3, veneziana 1 (cut off e chiusa) veneziana 2 (cut off e chiusa)
*lo spessore dell'intercapedine è pari a 16 mm					

Tabella 6. Caratterizzazione del sistema trasparente

Posizione	Configurazione		
Esterna	Tenda - Aria 50 mm - Vetro 4 mm - Aria 13 mm - Vetro 4 mm		
Interna	Vetro 4 mm - Aria 13 mm - Vetro 4 mm - Aria 50 mm - Tenda		
Intercapedine	Vetro 4 mm - Aria 13 mm – Tenda - Aria 13 mm - Vetro 4 mm		
Proprietà del materiale			
Materiale	τ_e	ρ_e	ε
Vetro 4 mm	0.82	0.07	0.84
Tenda *	0.2	0.4	0.9
* la radiazione termica non viene trasmessa			

5 Risultati

Il primo set di calcoli è stato implementato per confrontare il test di riferimento contenuto nell'Annex C della norma UNI EN 13363 parte 2 con i metodi implementati in Winshelter and Windows. Con il primo software i calcoli sono stati eseguiti utilizzando dati integrati, con il secondo sono stati selezionati da IGDB dei vetri con dati spettrali quanto più vicini a quelli indicati dall'Annex, mentre i dati delle schermature sono stati inseriti con i valori integrati. I dati di riferimento sono indicati nella tabella 6.

Si noti che in Window alcune condizioni di calcolo fissate in Annex C non possono essere verificate ed editate, ad esempio radiazione incidente solo diretta e aperture laterali tutte aperte per la ventilazione, inoltre Window prevede che la radiazione incidente sia parte diretta e parte diffusa, a differenza di Winshleter che la prevede tutta diretta. I risultati dei calcoli sono presentati in figura 18, dove sono riportati i valori di fattore solare, trasmissione solare e calore secondario di riferimento per la vetrata con accoppiata la schermatura in posizione estera, interna ed intercapedine, con condizioni di calcolo di riferimento. Nella figura successiva si riporta lo stesso esercizio eseguito con le condizioni di calcolo estivo.

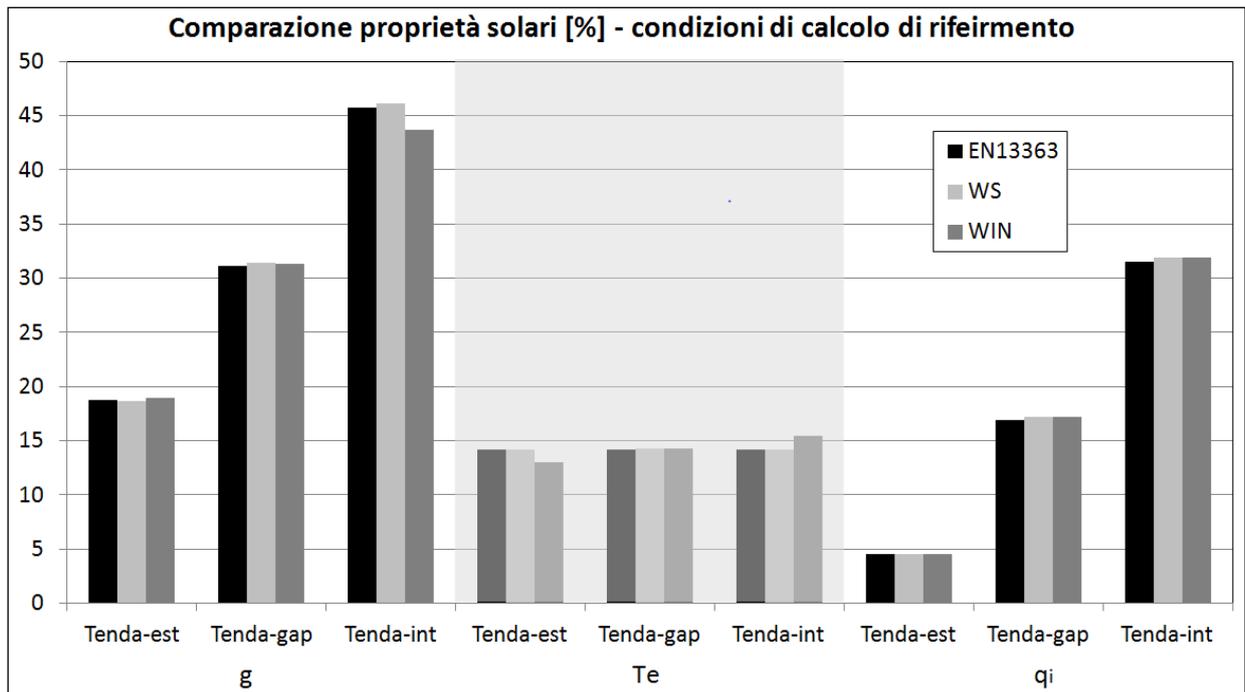


Figura 18. Proprietà ottiche e solari calcolate con diversi metodi - calcolo di riferimento

Il grafico con in calcoli in condizioni estive evidenzia l'allineamento dei risultati. La comparazione tra la norma e Winshelter evidenzia un allineamento dei risultati con differenze non superiori a 0.3% per tutte le configurazioni testate. Differenze fino a $\pm 1.3\%$ sono ricavate dalla comparazione tra la norma e Window, sebbene sussistano delle variabili di configurazione, precedentemente indicate. Appare tuttavia anomalo il diverso valore ottenuto per la trasmittanza solare diretta con diverse posizioni della tenda, in quanto la grandezza solare diretta non dovrebbe essere influenzata dalla sequenza dei layer che costituiscono il sistema.

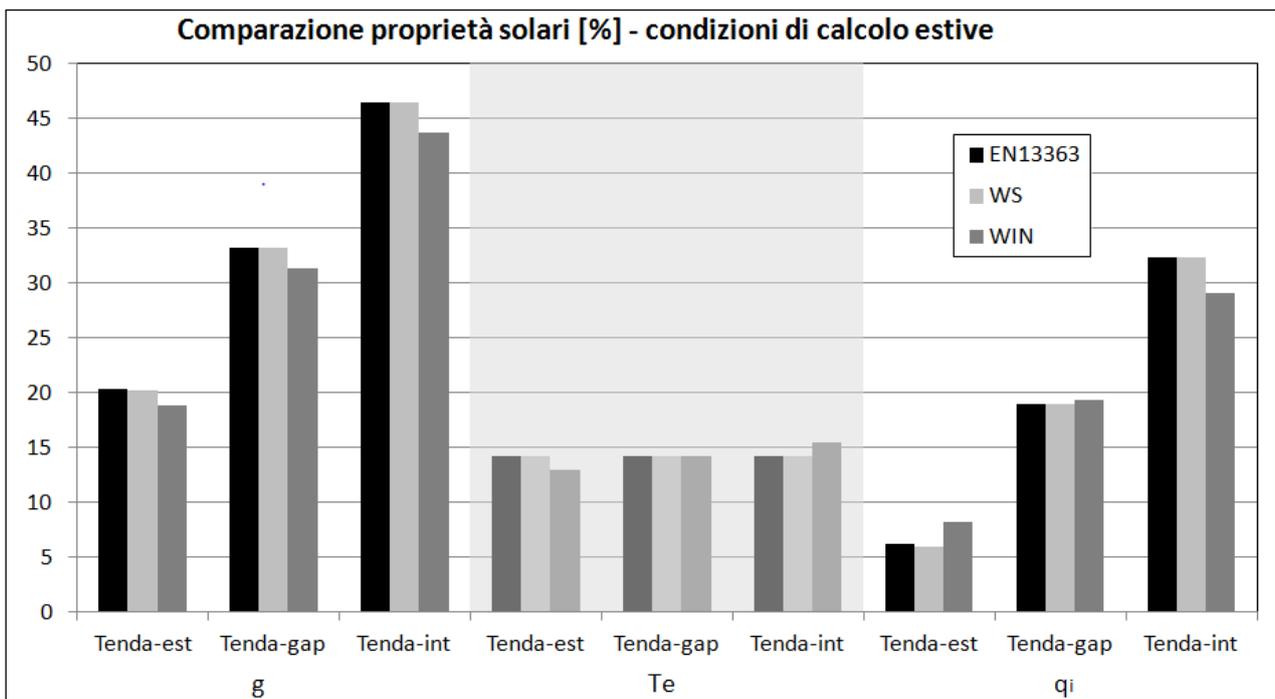


Figura 19. Proprietà ottiche e solari calcolate con diversi metodi - calcolo estivo

I risultati non cambiano in maniera significativa passando dalle condizioni di calcolo di riferimento a quelle estive, figura 19. Rimangono allineati i confronti tra norma e Winshelter, mentre aumentano le discrepanze tra la norma e Window. Queste ultime in particolare arrivano fino al 3%, risultando particolarmente critica la configurazione con la tenda interna, dovuta alle differenze di calcolo del termine q_i .

Verificata l'accuratezza di calcolo di Winshelter, questo è stato utilizzato per confrontare i risultati ottenuti utilizzando il calcolo spettrale e quello con i valori integrati. Sono stati eseguiti i calcoli per tutte le configurazioni così come definite al paragrafo precedente: 63 vetrate con accoppiamento delle varie schermature in diverse posizioni, più il calcolo delle 3 vetrate isolanti senza schermi. I risultati sono presentati in figura 20 e 21, rispettivamente per la trasmissione solare e per il fattore solare.

Il primo grafico evidenzia l'allineamento tra i due metodi per quanto riguarda la trasmissione solare diretta, molti dati sono addensati sui valori bassi di trasmittanza per effetto delle schermature solari. Gli scostamenti sono sempre contenuti entro il limite massimo dello $\pm 0.7\%$. Da notare che non esiste un trend chiaro su quale valore sia superiore; per i tre vetrocameri senza schermatura il valore spettrale supera quello integrato, la situazione si inverte nel caso siano presenti le schermature, anche se sono presenti delle eccezioni per alcune configurazioni.

Nel caso del fattore solare, figura 21, le discrepanze aumentano leggermente. Le differenze sono superiori al 2% in 10 casi su 66 e sono concentrate sui valori di fattore solare molto bassi, come evidenziato in figura all'interno dell'ellisse rossa. In 3 casi la discrepanza è superiore al 3%. Analizzando i dati di figura 21 e 22, risulta evidente che le discrepanze sono dovute essenzialmente al calore secondario di trasferimento q_i . Da notare che in questo caso sono i valori ottenuti con il metodo integrato ad essere superiori. Questo aspetto è particolarmente interessante poiché evidenzia, in un'ottica di sistemi di classificazione prestazionale dei prodotti, i dati ottenuti a partire dai dati spettrali determinano un minore valore di fattore solare e, di conseguenza, una maggiore capacità schermante del sistema semi-trasparente in esame.

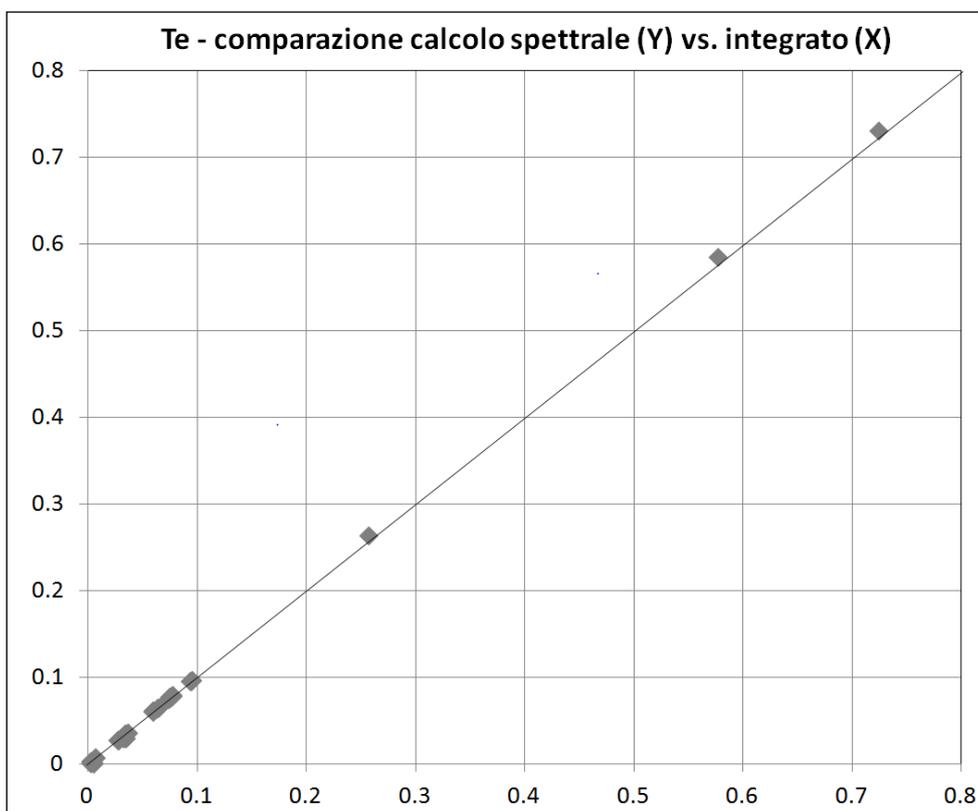


Figura 21. Confronto tra calcoli spettrali ed integrati – trasmissione solare

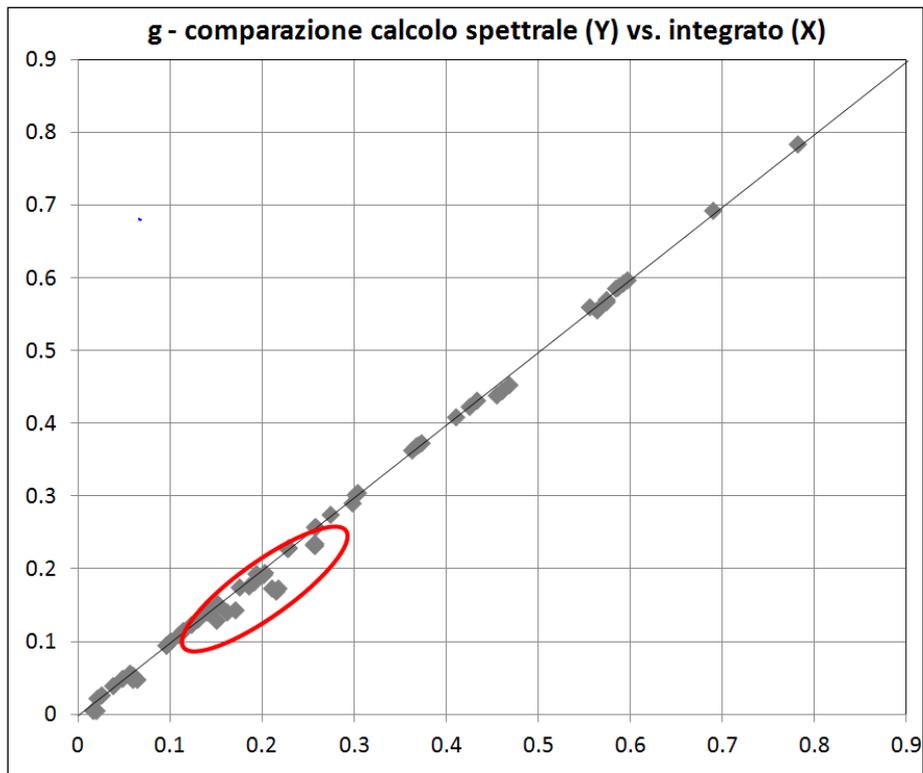


Figura 22. Confronto tra calcoli spettrali ed integrati – fattore solare

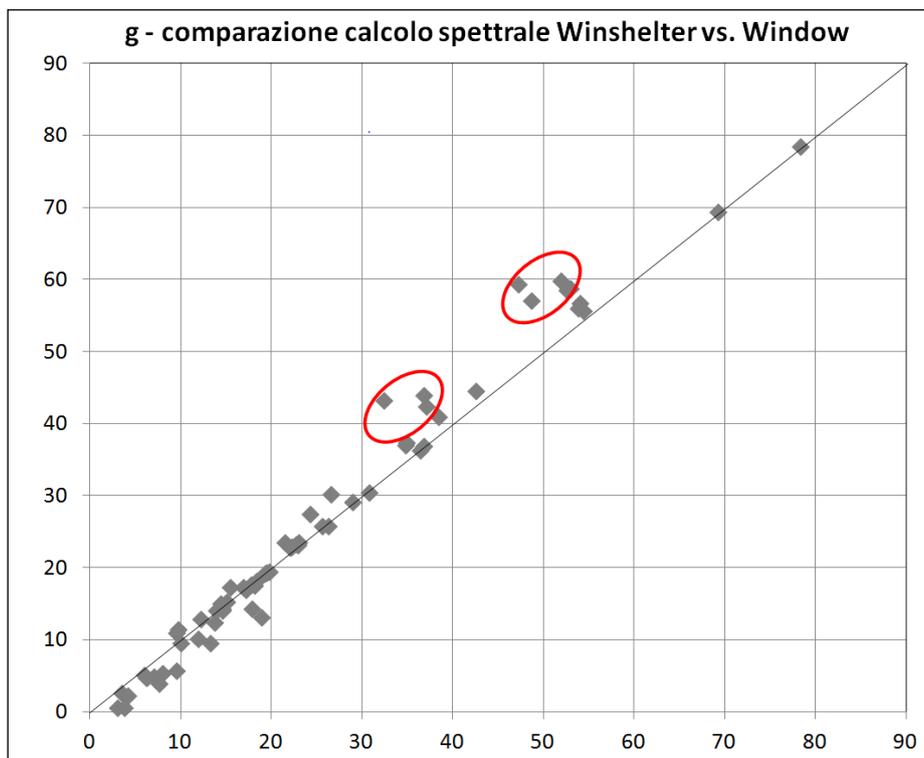


Figura 23. Confronto tra calcoli spettrali con Winshelter e Window

Un ultimo test è stato dedicato al confronto tra Winshelter e Window, per verificare come software differenti gestiscano i medesimi calcoli. I risultati sono presentati in figura 23 e fanno riferimento al fattore solare ottenuto per tutte le configurazioni individuate al paragrafo precedente. Le discrepanze in questo caso sono spesso significative, le differenze di fattore solare sono superiori a: 2% in 25 casi, 3% in 16 casi,

superiori a 5% in 9 casi, a 10% in 2 casi. Per quanto detto ai punti precedenti è lecito aspettarsi delle discrepanze, tuttavia quando queste sono intorno a 5% o oltre verifiche più approfondite sarebbero necessarie. Window non consente di entrare nel dettaglio di alcune assunzioni di calcolo, tuttavia è interessante notare come le differenze maggiori siano concentrate nei test con schermature poste all'interno del vetro camera. Ulteriori analisi sono necessarie per verificare il confronto tra i metodi e saranno approfondite negli step successivi dell'attività.

6 Sull'implementazione di un sistema di classificazione energetica per le schermature solari

Classificazione ed etichettatura energetica son strumenti di marketing a policy che vanno assumendo una importanza sempre maggiore. Sono molto diffusi i sistemi su prodotti che consumano direttamente energia (elettrodomestici, lampadine, etc.), mentre il quadro internazionale si va orientando anche verso i prodotti che consumano indirettamente energia, ad esempio quelli per l'involucro edilizio. È questo un compito decisamente più complesso, per il quale esistono al momento soltanto alcuni studi di riferimento [4], per quanto riguarda l'Italia, o delle applicazioni limitate all'estero, come i sistemi di classificazione delle finestre in USA ed Inghilterra. Non esistono studi dedicati invece alle schermature solari e le loro prestazioni durante la stagione estiva.

La classificazione energetica delle schermature solari può essere implementata fondamentalmente attraverso due approcci:

1. Classificazione sulla base delle proprietà solari e termiche di sistemi semitrasparenti complessi, tipicamente basata sui valori del fattore solare dei prodotti da classificare.
2. Sulla prestazione energetica di uno o più edifici di riferimento equipaggiati con i prodotti di cui sopra.

Il secondo metodo può essere applicato utilizzando strumenti per il calcolo della prestazione energetica degli edifici, purché in grado di valutare le caratteristiche delle superfici trasparenti equipaggiate con sistemi di protezione solare. Un metodo alternativo è quello del bilancio energetico del serramento, definito dalla norma internazionale ISO 18292 Energy performance of fenestration systems for residential buildings – Calculation procedure [5]. Il metodo è basato su determinate condizioni al contorno interne ed esterne; caratteristiche dell'edificio; usi energetici (climatizzazione estiva e/o invernale), oltre che ovviamente sui dati termo-fisici del serramento e dell'eventuale schermatura aggiuntiva, durante la stagione estiva. La procedura riprende lo schema di calcolo che la norma ISO EN UNI 13790 - Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento [6] stabilisce a livello di edificio.

A seguire si fa riferimento al metodo a bilancio mensile che, anche nell'analisi dell'edificio, è quello largamente utilizzato, ma possono essere implementati metodi su base oraria. Il calcolo per il fabbisogno durante la stagione estiva è:

$$Q_c = Q_G - \eta_c Q_L$$

dove:

- Q_L perdite di calore totale (trasmissione e ventilazione)
- Q_G guadagni totali di calore
- η_c coefficiente di utilizzazione delle perdite termiche (adimensionale).

I guadagni solari durante la stagione estiva sono legati al fattore solare corretto con il contributo delle schermature, si rimanda alla norma stessa per il completo set di formule.

Appare dunque evidente la necessità di calcolare in modo accurato il fattore solare dei sistemi semi-trasparenti, tenendo conto del contributo delle schermature, poiché è questo il parametro trainante per una classificazione e, eventualmente, un'etichettatura energetica del sistema trasparente e delle schermature solari. Nell'ottica dell'impatto economico di uno strumento di questo tipo, è necessario poi

eseguire un'attenta valutazione di tutte le proprietà termo-fisiche di tali sistemi, tenendo conto anche di come la trasmittanza termica risulti influenzata dalla presenza di schermature.

7 Conclusioni

Lo studio in esame ha evidenziato la molteplicità di strumenti e norme disponibili per determinare le caratteristiche solari e termiche di sistemi trasparenti con accoppiate schermature solari. Il quadro di riferimento europeo e nazionale da riferimento alle norme UNI EN 13363 parte 1 e 2; la seconda in particolare consente di eseguire il calcolo dettagliato di vetrate e schermature accoppiate, consentendo la scelta di utilizzo dei dati ottici in forma spettrale o integrata dei singoli materiali per calcolare le proprietà dei sistemi assemblati.

Lo studio ha evidenziato che gli strumenti di calcolo sono sufficientemente accurati a confronto dei test forniti dalla norma stessa. Il confronto spettrale integrato ha anche evidenziato che le discrepanze sono inferiori a 1% per quanto riguarda le proprietà dirette (trasmissione solare e luminosa), mentre le differenze possono arrivare fino al 3, nel caso di configurazioni con proprietà schermanti molto spinte.

Gli step successivi della ricerca prevedono un approfondimento sui metodi di calcolo a disposizione degli utenti finali con l'inclusione del calcolo della trasmittanza termica nel caso sistemi trasparenti con sistema di protezione solare accoppiato.

8 Riferimenti bibliografici

- 1 ISO 15099, Thermal performance of windows, doors and shading devices – Detailed calculations, 2003
- 2 UNI EN 13363-1, Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate – Calcolo della trasmittanza solare e luminosa – Parte 1: Metodo semplificato, 2008
- 3 UNI EN 13363-2, Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate – Calcolo della trasmittanza solare e luminosa – Parte Metodo di calcolo dettagliato, 2006
- 4 A. Maccari, M Zinzi, Simplified algorithms for the Italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings, Solar Energy, Volume 69, Supplement 6, July–December 2001, Pages 75-92
- 5 ISO 18292 Energy performance of fenestration systems for residential buildings – Calculation procedure, 2011
- 6 ISO EN UNI 13790 – Prestazione energetica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, 2008

9 Abbreviazioni ed acronimi

Simbolo	Grandezza	Unità di misura
U_t	Trasmittanza termica	$W/m^2 K$
A	Area	m^2
l	Lunghezza	m
R	Resistenza termica	$m^2 K/W$
ψ	Trasmittanza termica lineica	$W/m K$
T,t	Temperatura	K
λ	Conducibilità termica	$W/m K$
q	Flusso termico	W/m^2
I	Radiazione solare totale incidente	W/m^2
h	Coefficiente di adduzione	W/m^2
τ	Trasmittanza	1
N	Numero di vetri + 2	1
E	Irradianza	W/m^2
ρ	Riflettanza	1
α	Assorbanza	1
ε	Emissività	1

Pedice	Significato
t	Totale
gv	Vetro
f	Telaio
ψ	Perimetro visibile vetrata
int	Interno
ex	Esterno
n,j	Contatore
ai	Aria
cv	Convezione
r	Radiante
m	Media
s	Superficie
sl,e	solare
w	Lunghezza d'onda
ft	Frontale
b	Posteriore
l	Visibile
i	interno