



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi delle proprietà e delle prestazioni di vetrate isolanti con schermature in intercapedine

*S. Agnoli, M. Zinzi*

Report RdS/2015/090

## ANALISI DELLE PROPRIETÀ E DELLE PRESTAZIONI DI VETRATE ISOLANTI CON SCHERMATURE IN INTERCAPEDINE

Stefano Agnoli, Michele Zinzi (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

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

Obiettivo: Tecnologie per involucri edilizi ad elevate prestazioni

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
ABSTRACT .....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 OBIETTIVO E METODO .....	5
3 CARATTERISTICHE GENERALI DI TENDE E LAMELLE .....	6
4 CARATTERIZZAZIONE DELLE SCHERMATURE SOLARI PER INTERCAPEDINI DI VETRATE MULTIPLE .....	7
5 CARATTERISTICHE TERMICHE DI SISTEMI TRASPARENTI CON SCHERMATURE SOLARI.....	11
6 CASI STUDIO.....	15
6.1 DESCRIZIONE GEOMETRICA DEGLI AMBIENTI E CONDIZIONI AL CONTORNO .....	15
6.2 DESCRIZIONE DELL'INVOLUCRO .....	16
6.3 IPOTESI DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTORNO .....	18
6.4 ANALISI ENERGETICA PER IL RAFFRESCAMENTO - SISTEMI SCHERMANTI POSIZIONATI NELL'INTERCAPEDINE .....	19
6.5 CONFRONTO TRA SISTEMI SCHERMANTI POSIZIONATI NELL'INTERCAPEDINE E ALL'INTERNO E ALL'ESTERNO DELLA VETRATA ISOLANTE .....	24
7 CONCLUSIONI.....	25
BIBLIOGRAFIA .....	27

## Sommario

L'edilizia moderna, in particolare quella del settore non residenziale, è caratterizzata da grandi superfici trasparenti. La facciata continua, come è chiamata in termini tecnici, espone l'involucro edilizio a elevati apporti solari, in quanto è generalmente priva di opportune schermature solari per scelte prevalentemente architettoniche. Essendo l'efficacia delle schermature solari interne molto limitata, è apparso opportuno investigare caratteristiche e prestazioni di schermature solari poste all'interno di vetrate isolanti. Si sono inizialmente individuati i materiali più utilizzati per queste soluzioni, presentando una serie di misure sperimentali svolte nei laboratori ENEA, atte a caratterizzare dal punto di vista ottico questi materiali. I dati sono poi stati usati come input per la determinazione delle proprietà luminose, solari e termiche di sistemi semi-trasparenti complessi per l'involucro edilizio, evidenziandone limiti e benefici prestazionali in funzione di una serie di variabili significative. Nell'ultima sezione del report si analizzano le prestazioni energetiche e illuminotecniche di un edificio di riferimento ad uso ufficio, in cui le superfici trasparenti sono equipaggiate con diverse soluzioni di sistemi vetrati e schermanti. L'analisi energetica ha esplorato anche la dipendenza climatica della risposta termica dell'edificio in funzione delle soluzioni tecnologiche testate.

## Abstract

Modern buildings, especially in the not residential sector, are characterised by large glazed surfaces. Transparent facades causes huge solar gains through the building envelope, being generally not protected by adequate solar shading device in most of the cases for architectural and aesthetics criteria. Being the internal solar protection system generally poor performing in terms of energy efficiency, it was considered worth of interest exploring characteristics and performances of shading materials placed in the gap of multiple glazing units. In the first phase the most used materials for such technological solutions are selected, presenting a set of experimental measures carried out at the ENEA laboratories, aimed at the optical characterization of different products and materials. These measured data were then used as input for the determination of luminous, solar and thermal properties of semi-transparent complex system to be used for the building skin, showing limits and potentialities of the technology as a function of a number of relevant variables. The last section of the report is dedicated to the calculation and evaluation of energy and lighting performances of a reference office building, equipped with different shading and glazing configuration. The energy analysis also explored the climatic dependence of the building thermal response for the different tested solutions.

## 1 Introduzione

A partire dagli anni trenta del secolo scorso l'edilizia commerciale è stata caratterizzata da un massiccio utilizzo di superfici trasparenti, al punto da diventare marchio di fabbrica di alcuni maestri dell'architettura. Si cita come esempio il grattacielo Seagram Building è un grattacielo di New York City, progettato dall'architetto Ludwig Mies van der Rohe in collaborazione Philip Johnson. Ancora oggi le superfici trasparenti giocano un ruolo fondamentale nelle scelte progettuali, tuttavia ha acquisito sempre maggior rilevanza la protezione solare, da conseguire con particolari tipologie di vetrate o con l'accoppiamento di schermature solari, a causa dei sempre più elevati carichi per la climatizzazione estiva. Si tratta di soluzioni costruttive decisamente complesse in tema di riduzione dei consumi energetici complessivi dell'edificio, dovendo ottimizzare delle proprietà spesso alternative come l'isolamento termico e gli apporti solari della struttura, nella stagione estiva e in quella invernale.

Le facciate trasparenti continue mantengono comunque un notevole richiamo nel mercato, così che la protezione solare non può essere affidata alle schermature solari esterne, soluzione energeticamente più efficaci. Una soluzione per evitare il surriscaldamento estivo è legata all'utilizzo di vetri a filtro solare, in grado di lasciar passare la radiazione solare che cade all'interno dello spettro visibile e di riflettere la quota parte che cade nell'infrarosso vicino. Vetrocamera di questo tipo limitano gli apporti solari, avendo un fattore g di circa 0.3-0.4 a fronte di un vetrocamera tradizionale che ha un fattore g di circa 0.75 o di circa 0.6 nel caso di vetrate basso emissive. Va comunque notato che un basso fattore solare, per quanto appena ricordato, riduce gli apporti solari nella stagione estiva ma, inevitabilmente, lo fa anche nella stagione fredda, facendo così aumentare il fabbisogno di riscaldamento. Il problema è tutt'altro che trascurabile in climi come quello italiano, caratterizzati da un clima temperato che induce carichi significativi tanto in inverno quanto in estate.

Una possibile soluzione è legata a schermature solari all'interno del vetrocamera, più efficienti rispetto a quelle interne all'ambiente costruito, e che garantiscono la continuità della facciata trasparente. Il presente rapporto esplora le potenzialità delle schermature solari in intercapedine, in prima fase determinandone le caratteristiche solari e termiche attraverso una campagna di misura e calcolo, tesa anche a confrontare le diverse procedure di valutazione di tali proprietà. In una seconda fase si esplorano le prestazioni della tecnologia in un edificio di riferimento, analizzando in funzione di una serie di variabili l'andamento dei carichi elettrici per illuminazione e climatizzazione estiva.

## 2 Obiettivo e metodo

Questo studio intende valutare le prestazioni di vetrate multiple con schermature solari poste all'interno dell'intercapedine, al fine di quantificare le potenzialità della tecnologia in termini di controllo solare e visivo, nonché di contributo al miglioramento delle capacità isolanti di vetrocamera così realizzati. Lo studio ha un doppio binario di valutazione:

1. Determinazione e valutazione delle caratteristiche ottiche e termiche a livello di materiale componente, al fine di comparare diverse soluzioni configurazioni e soluzioni.

2. Valutazione delle prestazioni energetiche (climatizzazione e illuminazione) di un edificio di riferimento con diverse soluzioni di involucro trasparente, a partire ovviamente da vetrate con schermature solari in intercapedine.

Inizialmente si disserta sulle caratteristiche generali dei materiali in esame, sulle modalità di caratterizzazione e su alcune misure esemplari condotte nei laboratori ENEA. Successivamente si analizzano diverse configurazioni di vetrocamera accoppiati a diverse configurazioni di protezione solare, derivando i limiti e le potenzialità della tecnologia in esame in termini di caratteristiche termo-fisiche dei componenti di involucro assemblati. Infine queste configurazioni sono utilizzate come dai di input per analisi energetiche su un edificio di riferimento, condotte con un codice di simulazione dinamico. L'analisi consentirà di valutare gli effettivi benefici della tecnologia in esame, analizzando confronti per diversi materiali nella stessa configurazione di involucro e per diverse configurazioni di involucro e caratteristiche climatiche.

### 3 Caratteristiche generali di tende e lamelle

Le lamelle, classiche veneziane, sono largamente usate come protezione solare interna ed hanno solitamente profondità variabile tra 4 e 8 centimetri, con passo scelto dal produttore. L'attivazione, in termini di salita e discesa della schermatura e di inclinazione delle lamelle, è generalmente affidata al singolo utente, il quale è solitamente spinto da criteri di comfort visivo (protezione dall'abbagliamento) e termico (protezione dal surriscaldamento, problema tipicamente estivo). Sistemi a lamelle sono utilizzati anche in esterno, di dimensioni più grandi (fino a pale con profondità di diversi decimetri) e spesso fissi, hanno spesso profili e materiali in grado di migliorare la qualità architettonica del manufatto edilizio. Nel caso di sistemi a controllo della singola finestra, le lamelle esterne possono essere orientabili e mobili, in diversi casi gestite da sistemi automatizzati di gestione dell'edificio. Le lamelle in intercapedine devono essere inevitabilmente di dimensioni ridotte, profondità tipicamente nel range 12-20 millimetri). Le lamelle, realizzate in alluminio, sono nel caso più semplice, identiche sulle due facce e hanno caratteristiche diffondenti. In altri casi le due facce possono essere differenti, mantenendo per la faccia concava (quella che guarda verso l'interno) valori più elevati, per favorire le inter-riflessioni e quindi il passaggio di luce diffusa. Per migliorare l'illuminazione naturale, le lamelle possono anche essere perforate, in modo da garantire il passaggio della radiazione solare non solo per inter-riflessione ma anche per trasmissione diretta. In sistemi automatizzati, con strategie di ottimizzazione dello sfruttamento della luce naturale, la superficie convessa della lamella (quella rivolta all'esterno) può essere trattata con finiture speculari in grado di intercettare la luce naturale e introdurla opportunamente all'interno dell'edificio. Le lamelle sono generalmente verniciate, quindi con elevata emissività, per migliorare l'isolamento termico delle vetrate isolanti, sono introdotte sul mercato lamelle a bassa emissività (0.2-0.4, rispetto allo standard di 0.9), in grado di ridurre gli scambi radiativi all'interno dell'intercapedine, migliorando così le capacità isolanti del sistema semi-trasparente.

Tessuti e tende sono usate da secoli per la protezione e schermatura solare (tipicamente soluzioni da esterno) e per il benessere visivo e la privacy (tipicamente applicazioni da interno). Numerosi sono i materiali, naturali e sintetici, utilizzati per la realizzazione di questi componenti. Questi sono generalmente mobili e azionati dagli utenti in relazione alle condizioni di comfort visivo/termico da realizzare all'interno

dell'ambiente. Sistemi di gestione automatizzata degli edifici prevedono, comunque, di attivare schermature opportunamente automatizzate, soprattutto per quanto riguarda la protezione solare. Le tende per intercapedine sono tipicamente plissettate o a rullo, le caratteristiche ottiche nei vari spettri di riferimento (assorbimento, riflessione e trasmissione) determinano le capacità di protezione solare e visiva del sistema semitrasparente. Nel caso più semplice la tenda si presenta allo stesso modo sulle due facce, ma è possibile realizzare finiture e colorazioni differenti. Le soluzioni di maggiore interesse per applicazioni di efficienza energetica sono ovviamente quelle con tessuti filtranti, anche se esistono prodotti oscuranti con trasmittanza nulla che consentono di realizzare il buio in ambiente. I materiali utilizzati sono di tipo plastico. Come per le lamelle, sono in commercio prodotti a bassa emissività che consentono di migliorare le capacità isolanti di vetrocamera con tende in intercapedine.

## 4 Caratterizzazione delle schermature solari per intercapedini di vetrate multiple

Le caratteristiche ottiche di materiali schermanti per intercapedine sono determinate attraverso misure spettrali nell'intervallo solare, successivamente integrate negli opportuni range di riferimento. Date le caratteristiche di questi materiali, in termini di texture e geometria, è possibile eseguire le misure con spettrofotometri commerciali, strumenti non adeguati per materiali (semi)trasparenti a geometria più complessa. Le misure di trasmittanza e riflettanza, ad incidenza normale la prima e a 5° (near-normal) la seconda, sono state effettuate utilizzando lo spettrofotometro Perkin-Elmer Lambda 900 che presenta un fascio con angolo di apertura di 2° circa, realizzando così una radiazione incidente quasi parallela e quasi normale. Si tratta di uno spettrofotometro a doppio raggio, a doppio monocromatore e a doppio rivelatore (fotomoltiplicatore per l'intervallo UV-vis e cella a PbS). Come riferimento per le misure di riflettanza è stata utilizzata una piastrina di Spectralon, materiale altamente diffondente e con riflettanza superiore al 95% su tutto lo spettro di misura.

Nel caso di materiali diffondenti è necessario equipaggiare lo spettrofotometro un accessorio a sfera integratrice, in grado di raccogliere tutta l'energia trasmessa/riflessa dal campione in esame. Si tratta di una sfera integratrice di 150 mm di diametro rivestita in Spectralon che può operare nell'intero intervallo solare. Date le sue caratteristiche questo accessorio consente la determinazione della trasmittanza e della riflettanza spettrale emisferica sia totale che, essendo dotata di "trappola di luce", della sola componente diffusa, parametro importante per la caratterizzazione di materiali con caratteristiche diffondenti non troppo marcate (comportamento quasi speculare).

Le misure sono state eseguite utilizzando i seguenti parametri di scansione: larghezza della slitta 2 nm nel visibile e ultravioletto (UV), servo mode (modalità che ottimizza l'apertura in funzione dell'energia alla lunghezza d'onda in misura) nel vicino infrarosso (NIR); gain 1 nel visibile/UV e 3 nel NIR; risoluzione di lettura 5 nanometri.

Nel corso degli anni presso i laboratori ENEA sono stati testati numerosi prodotti diversi in: caratteristiche ottiche e termiche, materiali utilizzati, tipologia di applicazione. Di seguito si riportano, a titolo esemplificativo) alcuni grafici di prodotti disponibili in commercio per le applicazioni oggetto della ricerca. Le riflettanze spettrali sono integrate sui range di riferimento: spettro solare 300-2500 nm (pedice e);

spettro visibile 380-680 nm (pedice v). I dati ottenuti sono stati elaborati seguendo le procedure di calcolo specificate nella norma UNI EN 410: 2011 "Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing" e riportati in tabella 1. La lamella L2 è perforata ed ha dunque una trasmittanza di 8% su entrambi gli spettri di riferimento.

In figura 1 si riportano le misure spettrali della lamella L1 (riflettanza) e della lamella L2 (riflettanza e trasmittanza). L1 è un prodotto convenzionale in alluminio verniciato, il picco dello spettro tra 500 e 500 nanometri indica una colorazione verde, da notare la risalita della riflettanza nel vicino infrarosso, che spiega il più elevato valore di riflettanza solare rispetto a quella calcolata nel visibile. L2 presenta una trasmittanza piatta su tutto lo spettro come ampiamente prevedibile, essendo la radiazione non trasmessa per una caratteristica propria del materiale ma attraverso i fori praticati sulla lamella. La riflettanza ha un andamento abbastanza piatto (tra 54 e 66% tra 400 e 2500 nanometri).

In figura 2 si riportano le riflettanze della lamella L3, prodotto più evoluto e tipico di alcune applicazioni. Il lato interno della lamella ha una riflettanza totale decisamente più bassa della faccia esterna ed ha un comportamento diffondente, essendo la riflettanza totale e quella diffusa quasi coincidenti (si ricorda che la riflettanza totale, o emisferica, è la somma della componente diffusa e di quella diretta). La curva è piatta, tipica del grigio/beige e comunque priva dei picchi spettrali legati a colorazioni più marcate. La riflettanza totale della faccia esterna è molto elevata, ma la componente diffusa ammonta a circa il 10% in termini relativi, si tratta quindi di un prodotto con caratteristiche speculari tipico per applicazioni di daylighting.

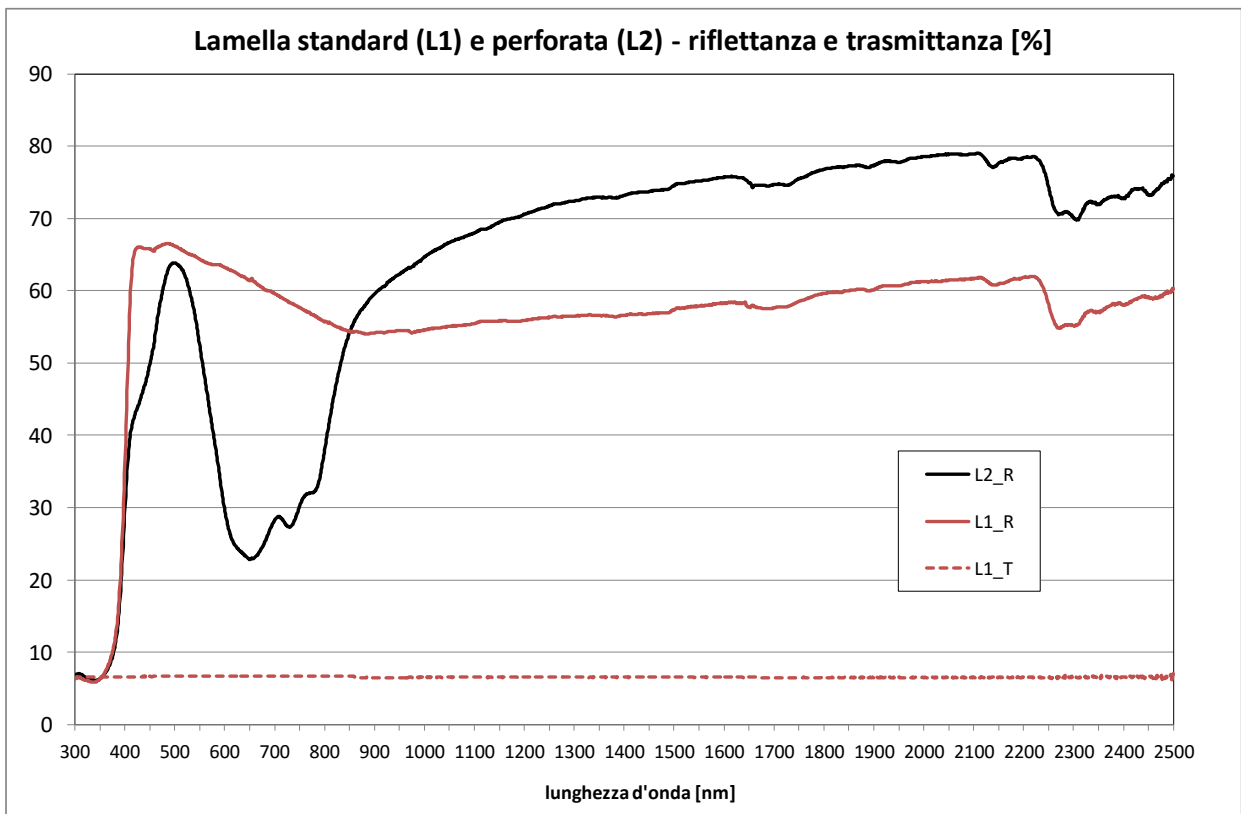
La tabella 2 riporta la trasmittanza e la riflettanza di due tende con caratteristiche decisamente diverse: una tenda bianca a basso assorbimento e trasmittanza piuttosto elevata; una tenda blue, scura ad elevato assorbimento e bassa trasmissione soprattutto nel visibile, si tratta di valori in grado di proteggere l'utente dall'abbagliamento anche in caso di radiazione diretta ma inadeguati a fornire un adeguato livello di luce naturale in tutto l'ambiente.

**Tabella 1. Riflettanza visibile e solare di lamelle per applicazioni in intercapedine di un vetrocamera**

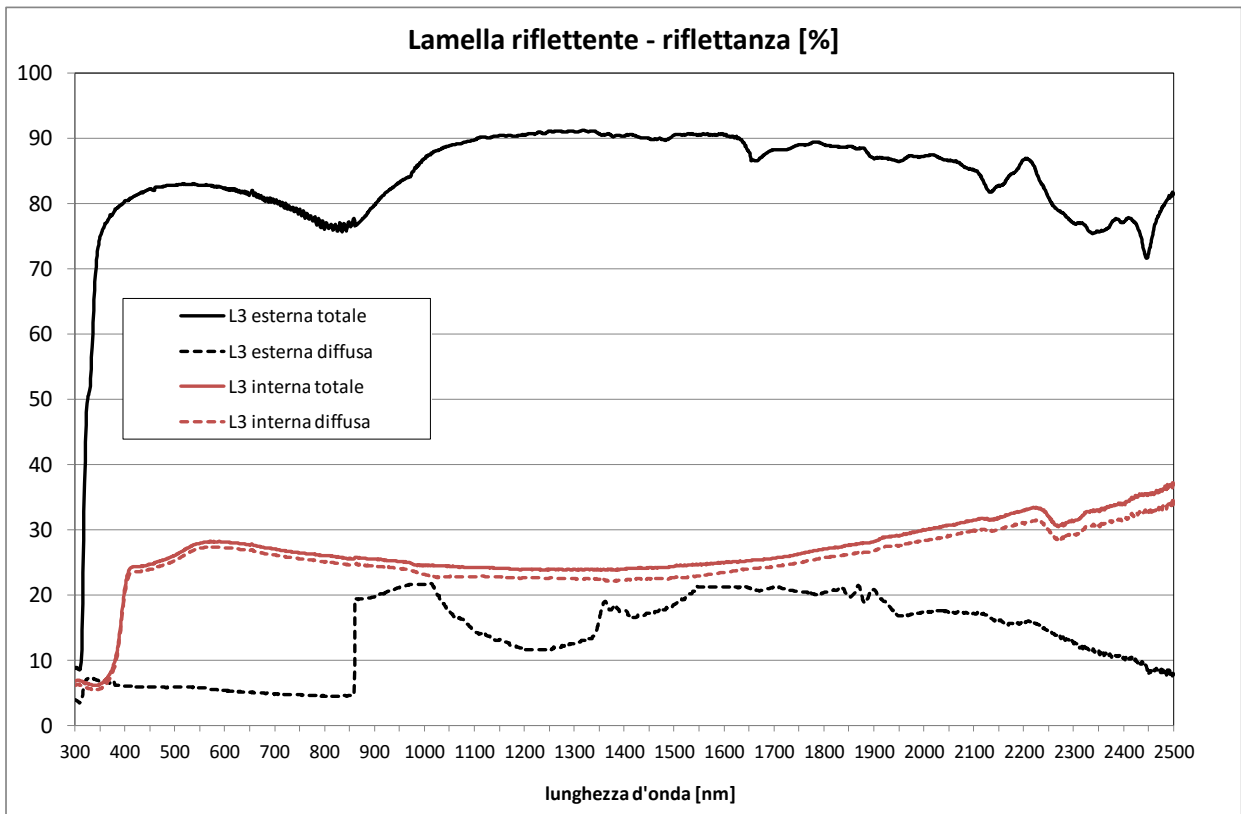
Lamella	$\rho_v$ (%)	$\rho_e$ (%)
L1	47	49
L2 ro	64	57
L3 interna diffusa	27	24
L3 interna totale	28	25
L3 esterna diffusa	6	9
L3 esterna totale	83	82

**Tabella 2. Caratteristiche ottiche di due tessuti per tende**

Colore	$\tau_e$ (%)	$\tau_v$ (%)	$\rho_e$ (%)	$\rho_v$ (%)
Bianco	34	34	60	60
Blu	17	3	45	30



**Figura 1 Riflettanza della lamella L1, riflettanza e tramistanza della lamella L2**



**Figura 2 Riflettanza del campione L3**

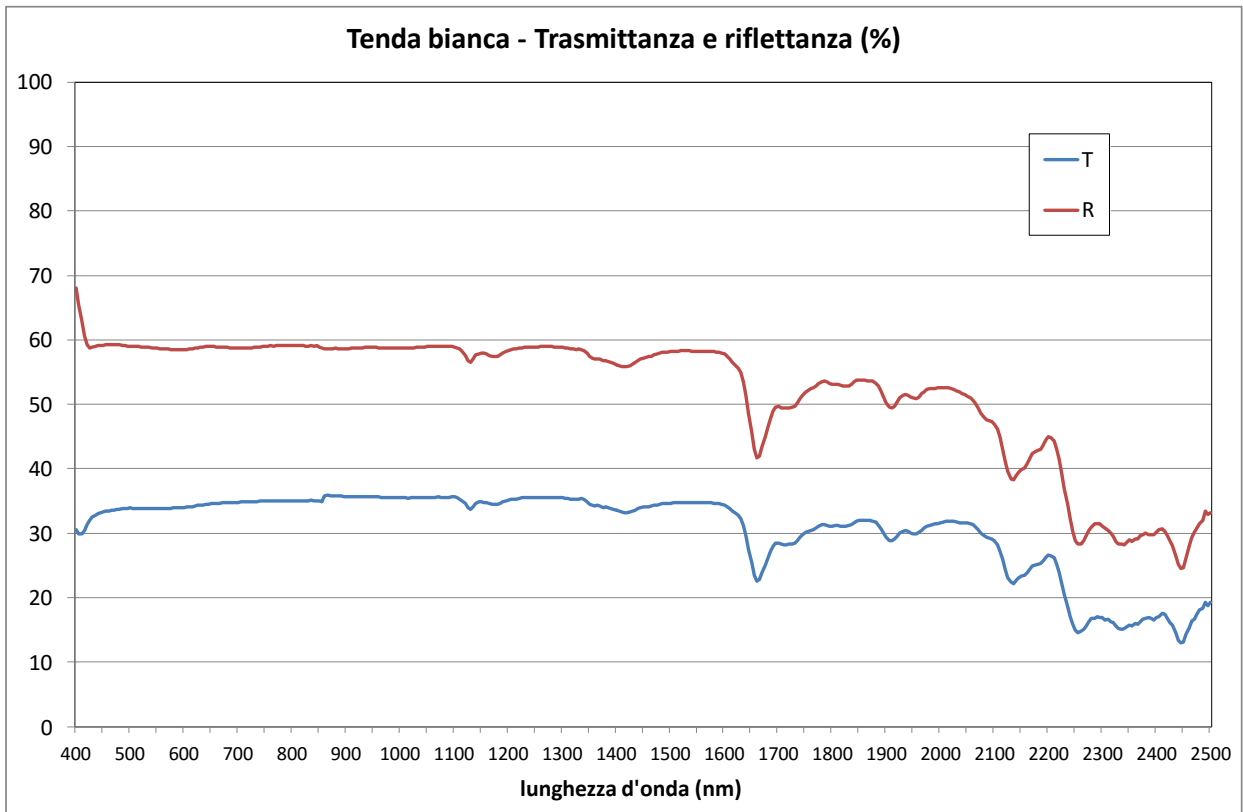


Figura 3. Trasmittanza e riflettanza spettrale di una tenda bianca

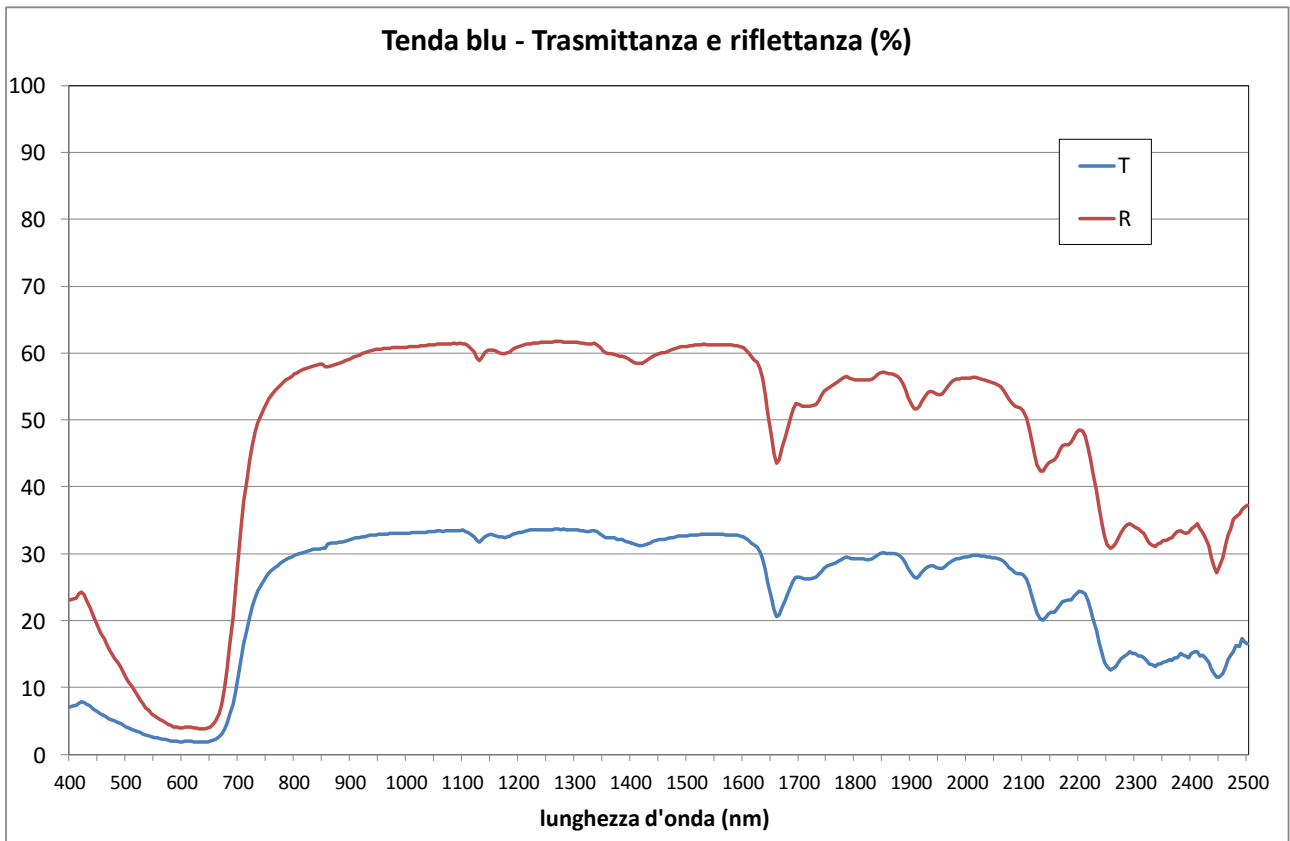


Figura 4. Trasmittanza e riflettanza spettrale di una tenda blu

La figura 3 riporta la trasmittanza e riflettanza spettrale della tenda bianca, come ben si può evincere dalla curva di riflettanza, piatta fino a 1700 nanometri. L'andamento nel vicino infrarosso, presenta valli e picchi dei polimeri utilizzati per lo strato interno e i rivestimenti del prodotto. In figura 4 si riportano le stesse curve per la tenda blu, con i caratteristici picchi in trasmissione e, soprattutto, in riflessione intorno ai 400 nm. La curva in trasmissione è prossima allo zero in buona parte dello spettro visibile; l'elevata riflettanza del tessuto nel vicino infrarosso (oltre il 50% in un range compreso tra circa 700 e 2100nm), riduce l'assorbimento e i rischi di surriscaldamento del tessuto e, quindi, del vetrocamera all'interno del quale è inserito.

## 5 Caratteristiche termiche di sistemi trasparenti con schermature solari

Le proprietà del sistema semi trasparente (vetrata con schermatura solare) sono state determinate per diverse configurazioni e calcolate con il software Winshelter sviluppato da ENEA e disponibile in download gratuito ([www.pit.enea.it](http://www.pit.enea.it)). I calcoli termici sono stati eseguiti su diverse configurazioni riassunte nella tabella 3, nel dettaglio:

- DGU (dgu in tabella) – vetrata isolante convenzionale, realizzata con vetri float (doppio vetro A della norma UNI EN 14501:2006 - Benessere termico e visivo caratteristiche prestazioni e classificazione) e aria in intercapedine.
- DUG Low-e (lowe in tabella) – vetrata isolante basso emissiva, realizzata con vetro float esterno (vetro A della norma UNI EN 14501:2006 - Benessere termico e visivo caratteristiche prestazioni e classificazione) e vetro basso emissivo (vetro C della norma UNI EN 14501:2006 - Benessere termico e visivo caratteristiche prestazioni e classificazione), con aria (10%) e argon (90%) in intercapedine.
- Tipo di schermatura: tenda e lamelle orizzontali
- Emissività della schermatura ( $\epsilon$  in tabella), il coating metallico è sulla faccia esterna della tenda e su quella interna delle lamelle. Ulteriori test saranno condotti per verificare ulteriori configurazioni
- Posizione della schermatura: interna, esterna e all'interno del vetrocamera (gap in tabella)
- Spessore della camera d'aria di 16 e 25 mm, riportato nelle celle relative alla vetrata

A titolo di esempio si riporta la schermata di Winshelter con i dati di input per una simulazione termica per vetrata basso emissiva con tenda all'interno dell'intercapedine. I calcoli sono stati eseguiti secondo il modello e le procedure definite in ISO 15099:2003 - Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations, i risultati fanno riferimento a alle specifiche condizioni di riferimento e non dovrebbero essere confrontati con quelli ottenuti con differenti metodi di calcolo e/o misura).

I risultati sono riportati in tabella 3 dove, per ogni configurazione di calcolo, è stata determinata la trasmittanza termica del sistema semi-trasparente. Per rendere più evidente il contributo della tecnologia in esame sono presentati i risultati di alcune rilevanti configurazioni in figura 6 e 7.



Figura 5. Schermata esemplificativa del software Winshelter

Tabella 3 Caratteristiche e risultati dei sistemi semitrasparenti selezionati

Vetrata	Schermo	$\epsilon$ (-)	Posizione	U (W/m <sup>2</sup> K)	Vetrata	Schermo	$\epsilon$ (-)	Posizione	U (W/m <sup>2</sup> K)
dgu 16	tenda	0.9	gap	1.5	lowe 16	tenda	0.9	gap	1.1
dgu 16	tenda	0.9	interna	2.3	lowe 16	tenda	0.9	interna	1.1
dgu 16	tenda	0.9	esterna	2	lowe 16	tenda	0.9	esterna	1
dgu 16	tenda	0.3	gap	1.3	lowe 16	tenda	0.3	gap	0.9
dgu 16	tenda	0.3	interna	2.1	lowe 16	tenda	0.3	interna	1
dgu 16	tenda	0.3	esterna	2	lowe 16	tenda	0.3	esterna	1
dgu 16	lamella	0.9	gap	2.1	lowe 16	lamella	0.9	gap	1
dgu 16	lamella	0.9	interna	2.4	lowe 16	lamella	0.9	interna	1.1
dgu 16	lamella	0.9	esterna	2.0	lowe 16	lamella	0.9	esterna	1
dgu 16	lamella	0.3	gap	2.1	lowe 16	lamella	0.3	gap	1
dgu 16	lamella	0.3	interna	2.4	lowe 16	lamella	0.3	interna	1.1
dgu 16	lamella	0.3	esterna	2	lowe 16	lamella	0.3	esterna	1
dgu 25	tenda	0.9	gap	1.4	lowe 25	tenda	0.9	gap	0.8
dgu 25	tenda	0.9	interna	2.3	lowe 25	tenda	0.9	interna	1.1
dgu 25	tenda	0.9	esterna	1.9	lowe 25	tenda	0.9	esterna	1
dgu 25	tenda	0.3	gap	1.2	lowe 25	tenda	0.3	gap	0.6
dgu 25	tenda	0.3	interna	2	lowe 25	tenda	0.3	interna	1
dgu 25	tenda	0.3	esterna	1.9	lowe 25	tenda	0.3	esterna	1
dgu 25	lamella	0.9	gap	1.9	lowe 25	lamella	0.9	gap	0.9
dgu 25	lamella	0.9	interna	2.4	lowe 25	lamella	0.9	interna	1.1
dgu 25	lamella	0.9	esterna	1.9	lowe 25	lamella	0.9	esterna	1.1
dgu 25	lamella	0.3	gap	1.9	lowe 25	lamella	0.3	gap	0.9
dgu 25	lamella	0.3	interna	2.4	lowe 25	lamella	0.3	interna	1.1
dgu 25	lamella	0.3	esterna	1.9	lowe 25	lamella	0.3	esterna	1.1

Per confrontare adeguatamente le varie configurazioni, di seguito si riportano le trasmittanze termiche dei solo componenti vetrati, privi di schermatura:

- Vetrata isolante convenzionale con intercapedine da 16 mm.  $U=2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Vetrata isolante convenzionale con intercapedine da 25 mm.  $U=2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Vetrata isolante basso-emissiva con intercapedine da 16 mm.  $U=1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Vetrata isolante convenzionale con intercapedine da 25 mm.  $U=1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$

In Figura 6 si riporta la riduzione della trasmittanza termica dovuta all'applicazione di tende in diversa posizione e per diversi componenti vetrati. Le tende in intercapedine sono quelle con migliori prestazioni, soprattutto per vetrate convenzionali, per le quali si ha quasi un dimezzamento della trasmittanza termica, mentre per le altre configurazioni le riduzioni variano tra 18 e 32%. Nel caso di vetrata basso-emissiva con intercapedine da 25 mm si registra una riduzione della trasmittanza termica del 39%; viceversa, per intercapedine da 16 mm, la riduzione è inferiore a 10% e, unico caso, la migliore prestazione si ha per la tenda esterna. Diverso è il caso delle veneziane, calcolate con giacitura delle lamelle di 89°, quindi non perfettamente chiuse. In questo test la veneziana ha prestazioni simili in intercapedini o in esterno, l'unica significativa differenza si ha per il basso emissivo da 25 mm, in cui si registra una riduzione della trasmittanza termica del 30% circa.

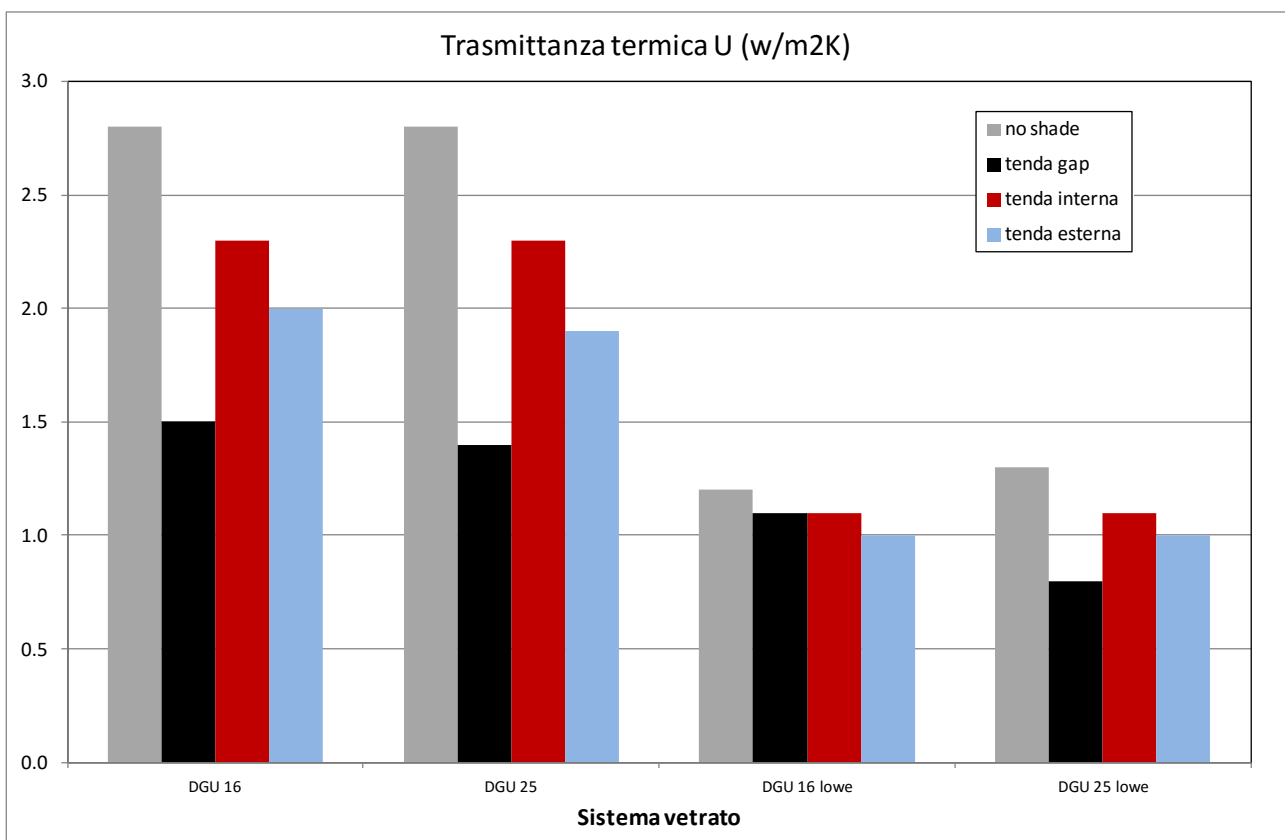
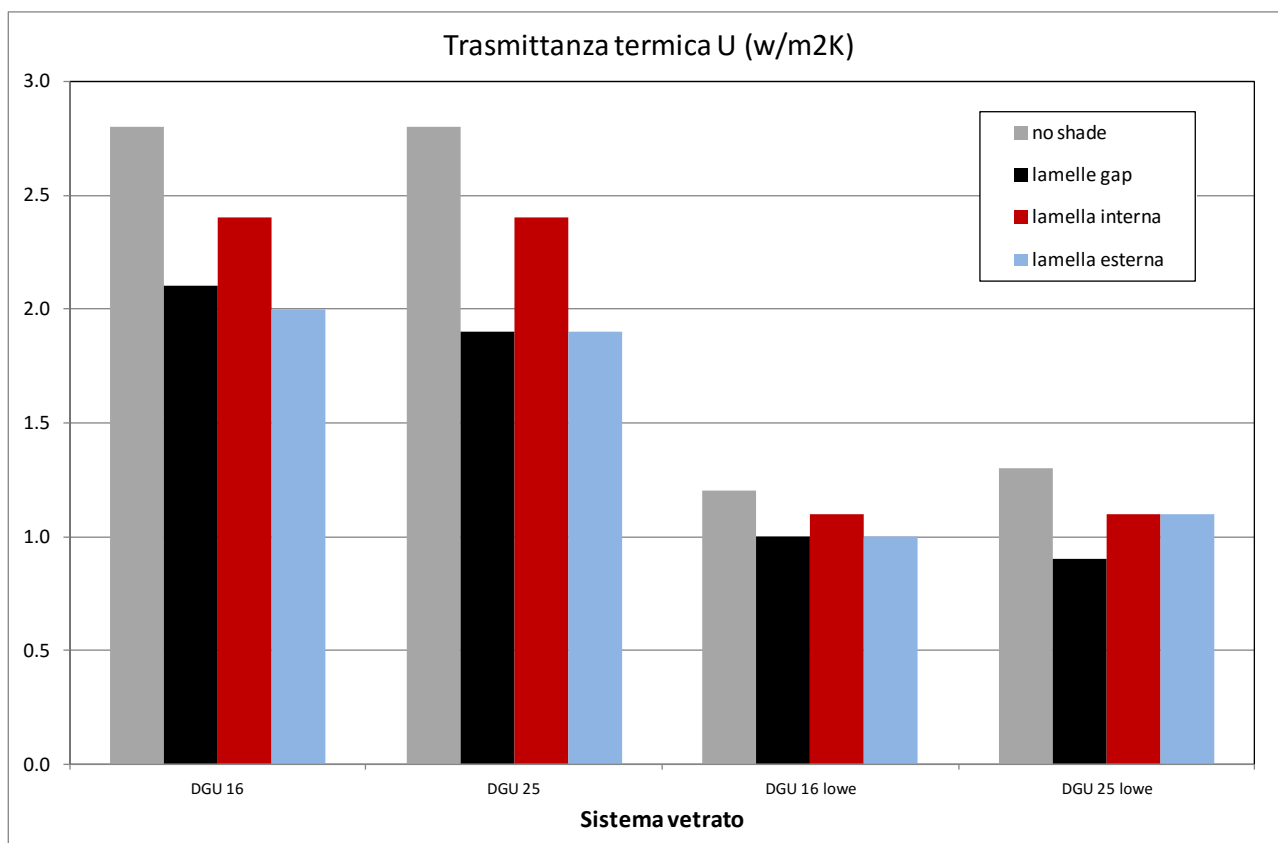


Figura 6. Trasmittanza termica calcolata per diverse configurazioni di tende



**Figura 7. Trasmittanza termica calcolata per diverse configurazioni di lamelle**

Da notare il contributo delle superfici basso-emissive delle schermature solari, soprattutto nel caso di tende, in cui si ha una ulteriore riduzione di 0.2 W/m²K riducendo l'emissività della superficie esterna della tenda in intercapedine da 0.9 a 0.3. Anche nel caso di tende interne si registrano dei miglioramenti, mentre le lamelle e la tenda esterna non mostrano riduzioni di trasmittanza per le configurazioni testate.

Ulteriori test sono stati eseguiti per verificare le prestazioni in termini di protezione solare da parte di vetrate con schermature in intercapedine. In particolare sono state considerate due tende:

1. Tenda bianca, con basso assorbimento solare (7%) e significativa trasmittanza solare (26%). Si tratta di tende con moderato potere filtrante e non sufficienti a garantire in comfort visivo in caso di radiazione solare diretta.
2. Tenda colorata, con bassa trasmittanza solare (14%) ed medio assorbimento solare (48%). Prodotto non scuro e con capacità di controllo della luce visibile.

In tabella 3 sono riportati i dati di fattore solare delle due tipologie di componente vetrato con tenda esterna ed in intercapedine. Non è stata analizzata la configurazione con tenda interna, in quanto poco rilevante ai fini della protezione solare. Dai risultati si evince che con tende a basso assorbimento si ha una notevole dipendenza dalle caratteristiche ottiche, in questi casi la risposta della tenda in intercapedine non risulta molto penalizzante rispetto alla tenda interna (3% assoluto e meno del 10% relativo) ed è molto legata alla trasmittanza solare diretta. Nel secondo caso, l'assorbimento più elevato della schermatura aumenta gli scambi termici nell'infrarosso e diventa prevalente, o quanto meno equivalente, rispetto alla trasmissione diretta. In questo caso la posizione della tenda è più critica, l'incremento di fattore solare in

intercapedine è rispettivamente 15 e 12% per vetrata convenzionale e basso emissiva, in termini relativi si ha in pratica un raddoppio degli apporti solari attraverso il componente semi-trasparente.

**Tabella 3 Fattore solare g per diverse configurazioni di sistema semitrasparente**

Tenda	g_dgu (%)	g_lowe (%)
Bianca esterna	24	21
Bianca gap	27	23
Colorata esterna	16	11
Colorata gap	31	23

## 6 Casi studio

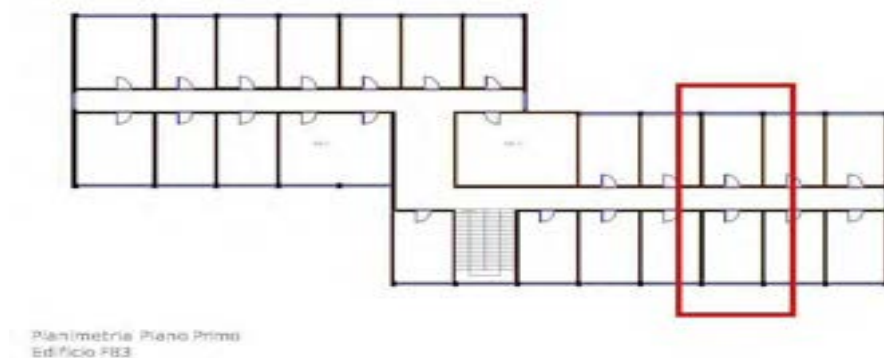
L'obiettivo dello studio è quello di valutare le prestazioni energetiche di diversi sistemi schermanti, verificando come vengono influenzati i fabbisogni energetici per il raffrescamento, in funzione del tipo di protezione solare adottata.

Nel calcolo sono stati considerati dispositivi schermanti a tenda e a veneziana, le cui caratteristiche ottiche ed energetiche verranno presentate successivamente.

Dopo numerose simulazioni è stato possibile valutare l'influenza di ognuno di essi sul fabbisogno energetico annuo necessario a mantenere le condizioni di comfort termo igrometrico, tramite l'utilizzo del software EnergyPlus.

### 6.1 Descrizione geometrica degli ambienti e condizioni al contorno

Per poter valutare l'incidenza del sistema trasparente complesso sull'intero edificio, si è scelto di focalizzare lo studio su di un blocco di riferimento, pensato estrapolato da un contesto più generale di un edificio a "stecca" (Fig. 8), in quanto tale tipologia risulta molto diffusa nell'edilizia relativa al terziario.



**Fig. 8 edificio di riferimento**

Nell'esempio di figura è stata evidenziata la porzione di edificio che rappresenta il dominio di calcolo su cui verranno effettuate le simulazioni successive. L'ambiente è composto da due stanze a pianta rettangolare, di dimensioni 5.90 X 3.60 m, separate da un corridoio la cui larghezza misura 1.20 m. L'altezza delle stesse, misurata all'intradosso, è pari a 2.70 m (figure 9,10). Ognuno di essi presenta una sola parete esposta verso l'esterno su cui è montata, all'altezza di un metro, una finestra di dimensioni 3.40 X 1.50 m.

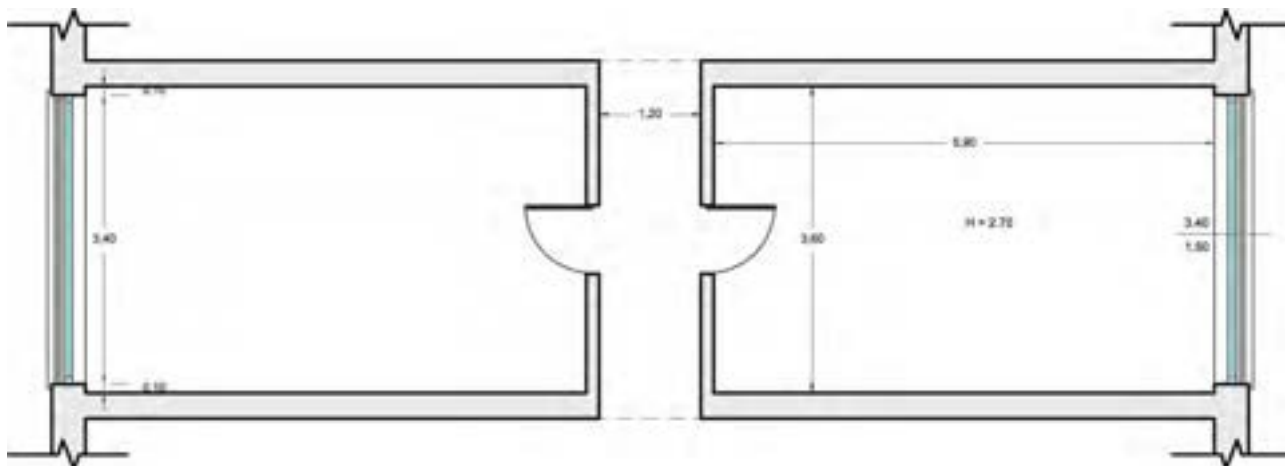


Fig. 9 Pianta

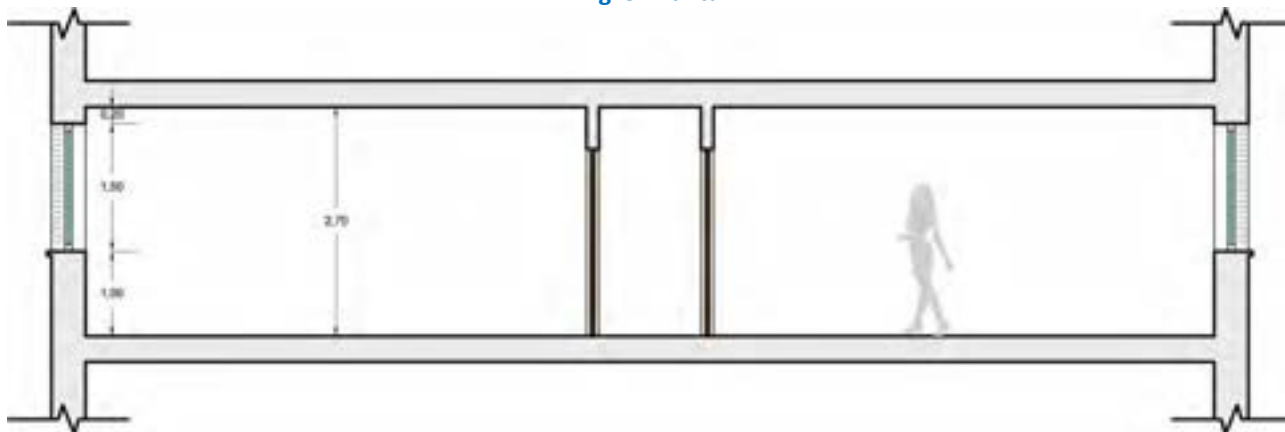


Fig. 10 Sezione

Come risulta evidente dalla pianta, le due zone termiche rappresentate hanno le pareti verticali esterne orientate in modo opposto che, ai fini del calcolo, saranno ipotizzate nord-sud ed est-ovest rispettivamente; in questo modo potrà essere stimata l'efficienza energetica del sistema schermante su tutte le possibili esposizioni in cui l'edificio può trovarsi nella realtà.

Le pareti verticali longitudinali sono ipotizzate adiacenti ad altre zone termiche riscaldate; le stesse ipotesi vengono estese al solaio di copertura e di calpestio.

## 6.2 Descrizione dell'involucro

Nella tabella 4 sono riportati i dati termo fisici dei materiali che compongono le chiusure opache a contatto diretto con l'esterno; i valori di trasmittanza termica e della massa superficiale tengono conto dei parametri indicati nei D.lgs. 192/05, 311/06 e s.m.i.

La stratigrafia riportata di seguito è intesa dall'esterno verso l'interno.

**Tabella 4 (caratteristiche termofisiche della tamponatura esterna)**

Materiale	$\lambda$ (W/m K)	s (m)	$\delta$ (J/Kg K)	$\gamma$ (Kg/m <sup>3</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)
Intonaco	0.9	0.02	1800	910	0.331
Polistirene	0.036	0.06	30	1340	
Poroton	0.27	0.3	850	840	
Gesso	0.3	0.015	900	1000	

Il serramento studiato è costituito da: vetrocamera, telaio di alluminio a taglio termico, sistema schermante.

Relativamente al componente trasparente sono state inoltre considerate 2 differenti tipologie di vetrocamera, le cui caratteristiche sono state riportate di seguito (Tab.5):

- a) (Vdo) vetrocamera realizzato con due lastre di vetro float da 4 mm con intercapedine di 16 mm riempita con aria (4-16-4)
- b) (Vbe) vetrocamera realizzato con una lastra di vetro float di 4 mm ed una lastra, dello stesso spessore, su cui è applicato un coating bassoemissivo posto in faccia 3, intercapedine di 16 mm riempita con gas argon (4-16-4)

**Tab. 5 (caratteristiche termofisiche della vetrata isolante)**

Tip. Vetrata	$T_{sol}$ (%)	$T_{vis}$ (%)	g (%)	$U_g$ (W/m <sup>2</sup> K)
V <sub>do</sub>	72	81	77	2.68
V <sub>be</sub>	50.7	77.1	61	1.46

La posizione e la geometria dello schermo, così come le caratteristiche termofisiche dei materiali che lo compongono, rivestono un ruolo determinante nella definizione delle prestazioni energetiche del sistema schermante sull'intero involucro.

Queste motivazioni hanno indotto a considerare nelle simulazioni le ulteriori seguenti ipotesi:

- a) Posizione dello schermo
  - 1 interno
  - 2 intercapedine
  - 3 esterno
  
- b) Geometria e posizione del sistema schermante a veneziana
  - 1) tenda a veneziana esterna: larghezza stecca 10 cm passo 6 cm
  - 2) tenda a veneziana nell'intercapedine: larghezza stecca 1.5 cm passo 0.9 cm
  - 3) tenda a veneziana interna: larghezza stecca 2.5 cm passo 1.5 cm

Nella tabella 6 sono state riportate le caratteristiche energetiche dei materiali che compongono lo schermo.

**Tab. 6 caratterizzazione dei materiali che compongono i sistemi schermanti**

Campioni	$t_l$ (%)	$t_s$ (%)	$t_{ir}$ (%)	$r_l$ (%)	$r_s$ (%)	S (%)	$h$ (%)
L50	0	0	0	50	50	0	0.9
Tenda	12	12	0	30	30	0	0.9

Il tempo di utilizzo del sistema schermante in realtà è un'ulteriore variabile che influenza le prestazioni complessive del sistema serramento ed è ovviamente soggettivo, dipendendo dalla sensibilità dell'utente verso le condizioni termiche e luminose dell'ambiente confinato. Tuttavia, ai fini della valutazione, è necessario normalizzare il profilo d'utenza in modo da rendere i valori di output confrontabili.

A tal fine è stato considerato che verrà usata la protezione solare quando la temperatura della zona termica considerata supererà i 25.5 °C.

### 6.3 Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte, vista la geometria del modello scelto (Figure 2,3) e le ipotesi descritte nella presentazione dei casi studio, sono le seguenti:

- a) pareti verticali con finestra: condizione al contorno esterna (è possibile lo scambio termico tra l'interno e l'esterno);
- b) pareti verticali adiacenti ad altri moduli: condizione al contorno adiabatica (non è permesso lo scambio termico verso altri ambienti, ma la parete partecipa alla trasmissione di calore verso l'ambiente interno in base alla propria capacità termica);
- c) solai di calpestio e copertura: condizione al contorno adiabatica (come sopra);
- d) tramezzi divisorii tra ambienti di studio e corridoio: condizione al contorno adiacenza (è permesso lo scambio termico tra le zone confinanti).

L'inclinazione delle lamelle della veneziana sono state diversificate secondo l'esposizione e precisamente:

- nord: orizzontale
- sud: cut-off ore 12.00
- est e ovest: cut-off ore 10.00-14.00

L'impianto funziona dalle ore 8.00 alle ore 18.00, in riferimento all'orario di apertura di un ufficio, nei giorni che vanno dal lunedì al venerdì; il numero di ricambi d'aria è fissato in 0.8 V/h; la temperatura di set point estiva è pari a 26 °C.

Per i carichi energetici interni sono state assunte le seguenti ipotesi: presenza media nelle stanze pari a 1.5 persone, potenza delle lampade installate pari a 11 W/m<sup>2</sup>, illuminamento richiesto sul piano di lavoro, posto ad un'altezza di 0.85 m, pari a 500 lux come richiesto da normativa, le lampade si ipotizza che siano montate a soffitto come nella maggior parte dei casi relativi al terziario. Per i computer e le relative periferiche è stata scelta una potenza pari a 13 W/m<sup>2</sup>.

L'analisi che affronteremo, come abbiamo visto, presenterà un numero di dati molto elevato che scaturiscono dalla combinazione dei diversi casi considerati nelle simulazioni, meglio definiti successivamente.

Nella Tab.7 si riportano le variabili la cui aggregazione da luogo ai diversi scenari che possono portare a consumi energetici differenti, che saranno investigati successivamente:

**Tab. 7 Parametri di studio**

3 città	2 espos.	2 schermi	1 controllo	3 posizioni	2 vetri	3 geometrie
Roma Milano Palermo	Sud Ovest	1 veneziana (L50) 1 tenda	Sulla temperatura (25.5 °C)	esterna intercapedine interna	float bassoemissivo	Esterna: L=10cm Passo=6 cm Interc.: L=1.5cm Passo= 0.9cm Int.: L=2.5 m Passo=1.5 cm

I risultati dello studio sono stati riportati sui grafici che seguono, in particolare verranno presentate le risposte energetiche dei sistemi schermanti posti in intercapedine, che verranno comparate successivamente con i fabbisogni energetici derivanti dall'uso di dispositivi schermanti posti nelle altre posizioni prima descritte.

#### *6.4 Analisi energetica per il raffrescamento - Sistemi schermanti posizionati nell'intercapedine*

Dal grafico riportato nella figura 11 emerge che il sistema schermante a tenda raggiunge sempre la migliore prestazione, garantendo un risparmio medio di circa il 26% rispetto al campione L50.

Nel caso in cui i sistemi schermanti vengano installati all'interno dell'intercapedine, la tipologia di vetro non influenza in modo significativo le prestazioni energetiche dei due campioni. Dai risultati riportati nel grafico infatti è possibile osservare, tra le due tipologie di vetrate isolanti e in considerazione dello stesso dispositivo schermante, una discrepanza dei valori compresa tra circa il 3-4% nell'esposizione sud, che scende fino all'1% nell'esposizione ovest. Il fenomeno trova giustificazione nei valori del fattore solare e della trasmittanza termica delle due tipologie di vetrocamera, infatti, ad una trasmittanza maggiore del (Vdo), che comporta un incremento della dispersione di calore verso l'esterno, viene associato un fattore

solare minore del (Vbe), che comporta un contributo minore degli apporti solari; le diverse caratteristiche termofisiche delle due vetrate pertanto tendono a bilanciare il fenomeno di trasmissione del calore.

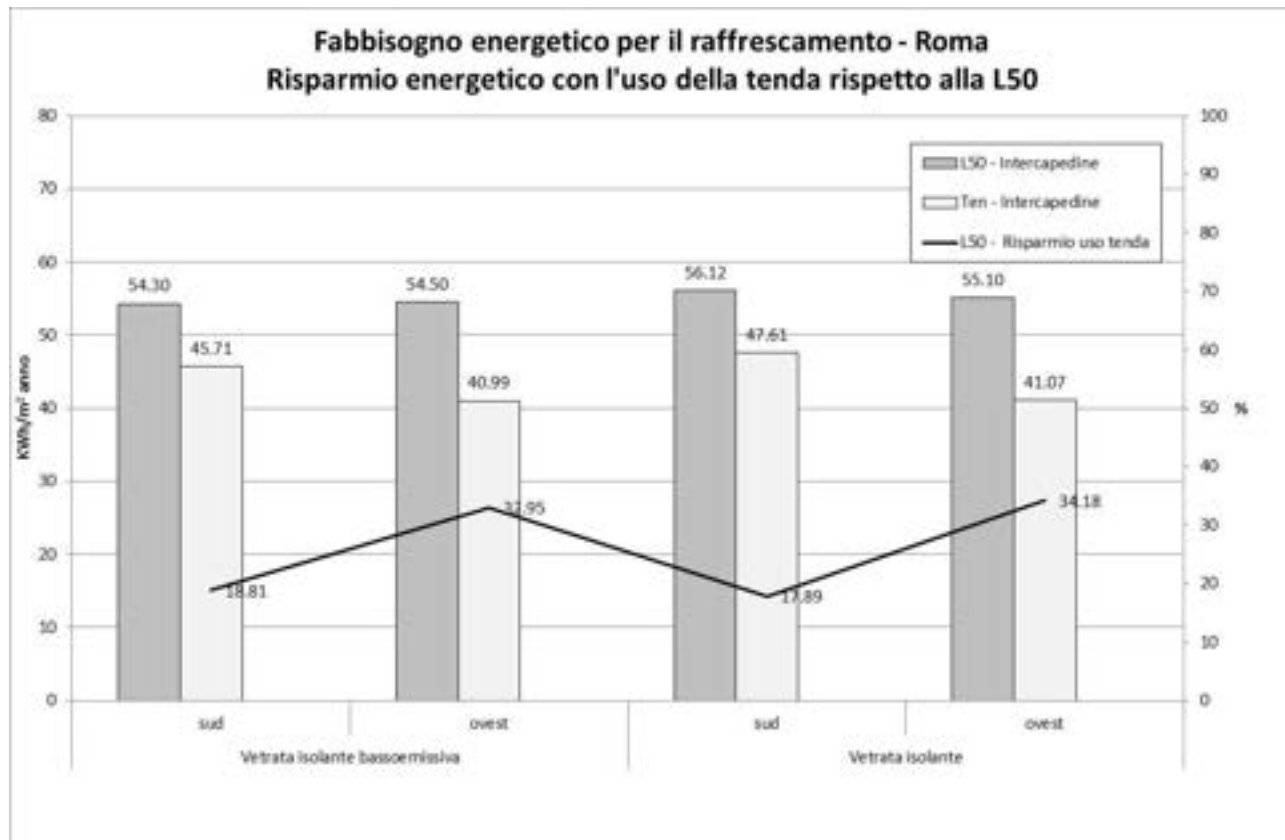


Fig.11 Comparazione di sistemi schermanti posti nell'intercapedine della vetrata isolante

Il comportamento dei due schermi in funzione dell'esposizione risulta invece differente. La prestazione energetica restituita dalla veneziana infatti rimane pressoché costante, sia nel caso in cui la finestra abbia esposizione sud che ovest, mentre la tenda, nell'esposizione ovest, presenta un miglioramento rispetto all'esposizione sud di circa il 14%, in applicazione con la vetrata isolante (Vdo), e del 10% in applicazione con la vetrata bassoemissiva (Vbe). Il fenomeno in questo caso è legato alla configurazione geometrica dei due sistemi schermanti, la prestazione della tenda infatti è svincolata dalla posizione del sole, che ad ovest risulta proibitiva, e consente un controllo costante della radiazione solare incidente; tale aspetto diventa particolarmente influente in questa esposizione, dove i raggi solari raggiungono il sistema trasparente con inclinazioni più basse. In questo caso infatti la veneziana non riesce a garantire la stessa efficacia schermante della tenda, limitatamente ovviamente alla scelta dell'inclinazione delle lamelle adottate in questo studio.

A conferma di quanto appena descritto è possibile osservare sempre dalla figura 11 la linea spezzata che rappresenta il risparmio ottenibile utilizzando un sistema a tenda rispetto a quello a veneziana L50. Dalla

stessa curva emerge che nell'esposizione sud l'uso della tenda garantisce un risparmio del 18% circa, mentre nell'esposizione ovest si arriva fino al 33-34%.

Dalla figura 12 si evidenzia inoltre come siano differenti i valori degli apporti solari in funzione delle due esposizioni. Dalla linea spezzata è possibile osservare che ad ovest l'applicazione del campione L50 comporta apporti solari maggiori del 50-60% circa rispetto all'eventuale applicazione della tenda, mentre i valori rimangono pressoché simili nell'esposizione sud.

Di conseguenza, anche se la soluzione più giusta sotto il profilo energetico sembrerebbe in ogni caso l'applicazione della tenda, per una valutazione più completa sarebbe necessario considerare e comparare anche la diversa distribuzione dei livelli di illuminamento interni, e di conseguenza il benessere visivo di chi abita e lavora nell'ambiente confinato, ottenuti con l'applicazione dei due schermi. Questo tema ovviamente meriterebbe una trattazione specifica, non affrontata in questo studio, alla quale si rimanda per eventuali ulteriori conclusioni in merito.

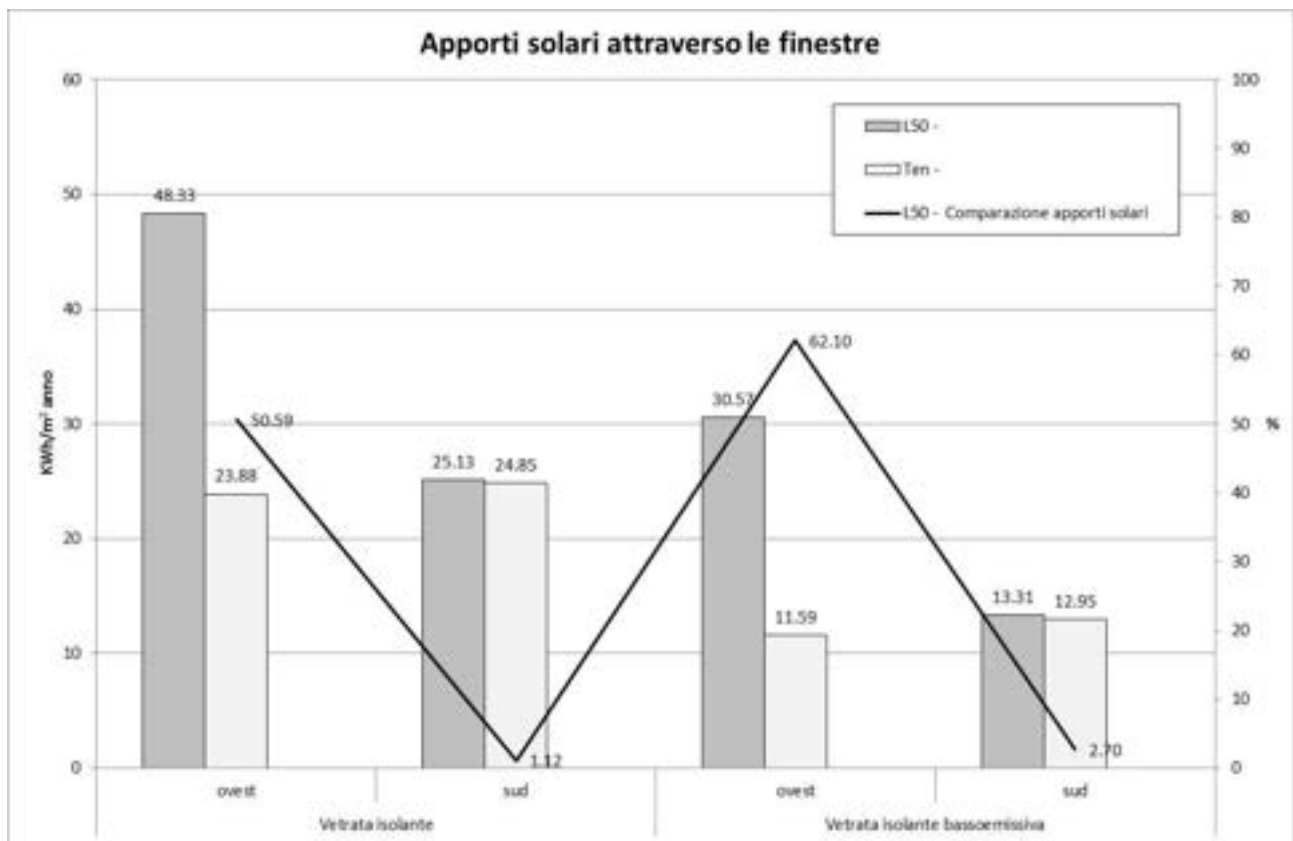
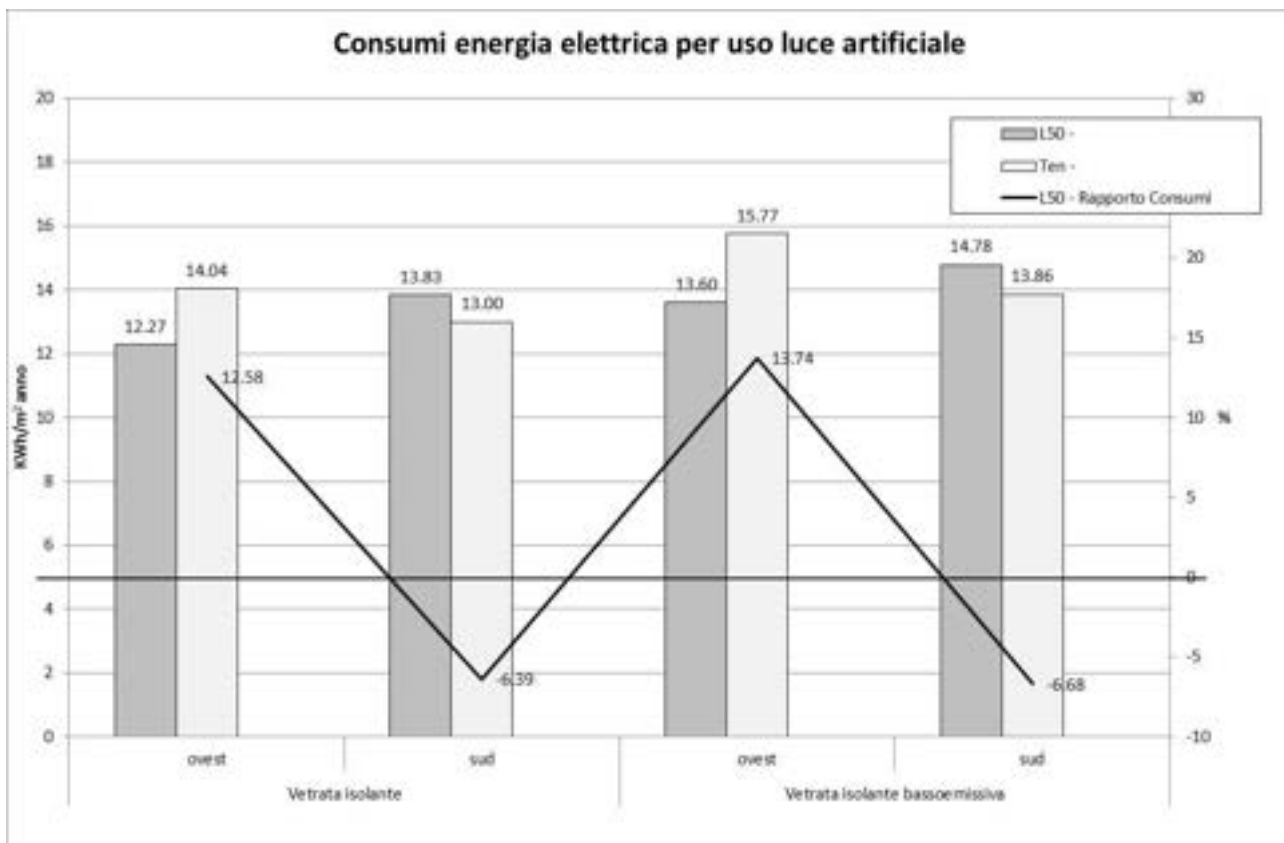


Fig.12 Comparazione degli apporti solari attraverso le finestre con l'uso dei due schermi adottati



**Fig.13 Comparazione dei consumi di energia elettrica per l'uso luce artificiale in funzione degli schermi adottati**

Dalla figura 13 tuttavia è possibile notare come i fabbisogni energetici per l'illuminazione artificiale siano diversi in funzione dell'esposizione e della tipologia di schermo applicato. A sud, nel caso del campione L50, il fabbisogno di illuminazione risulta maggiore rispetto al caso in cui venga installata una tenda, mentre ad ovest si verifica una condizione opposta. In quest'ultimo caso inoltre emerge una discrepanza dei fabbisogni molto più marcata tra i due campioni. I fabbisogni energetici maggiori inoltre si traducono in un incremento delle ore di funzionamento della luce artificiale, condizione che aumenta il discomfort luminoso; pertanto nella scelta del sistema schermante più idoneo andrebbero considerati ulteriori parametri.

Le figure 14 e 15 che seguono mostrano il fabbisogno energetico per il raffrescamento, nelle stesse condizioni finora studiate, ma in climi diversi, rispettivamente nelle città di Milano e Palermo.

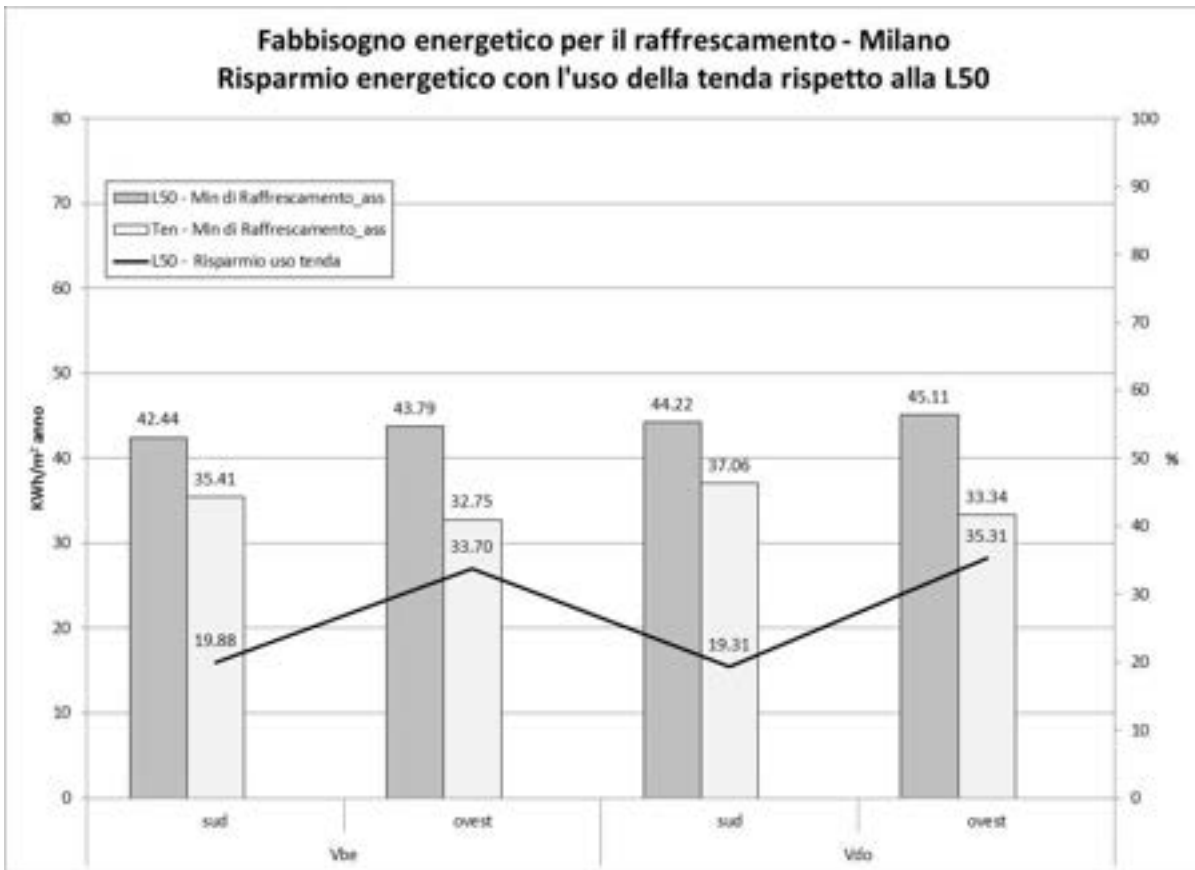


Fig. 14 Comparazione di sistemi schermanti posti nell'intercapedine della vetrata isolante

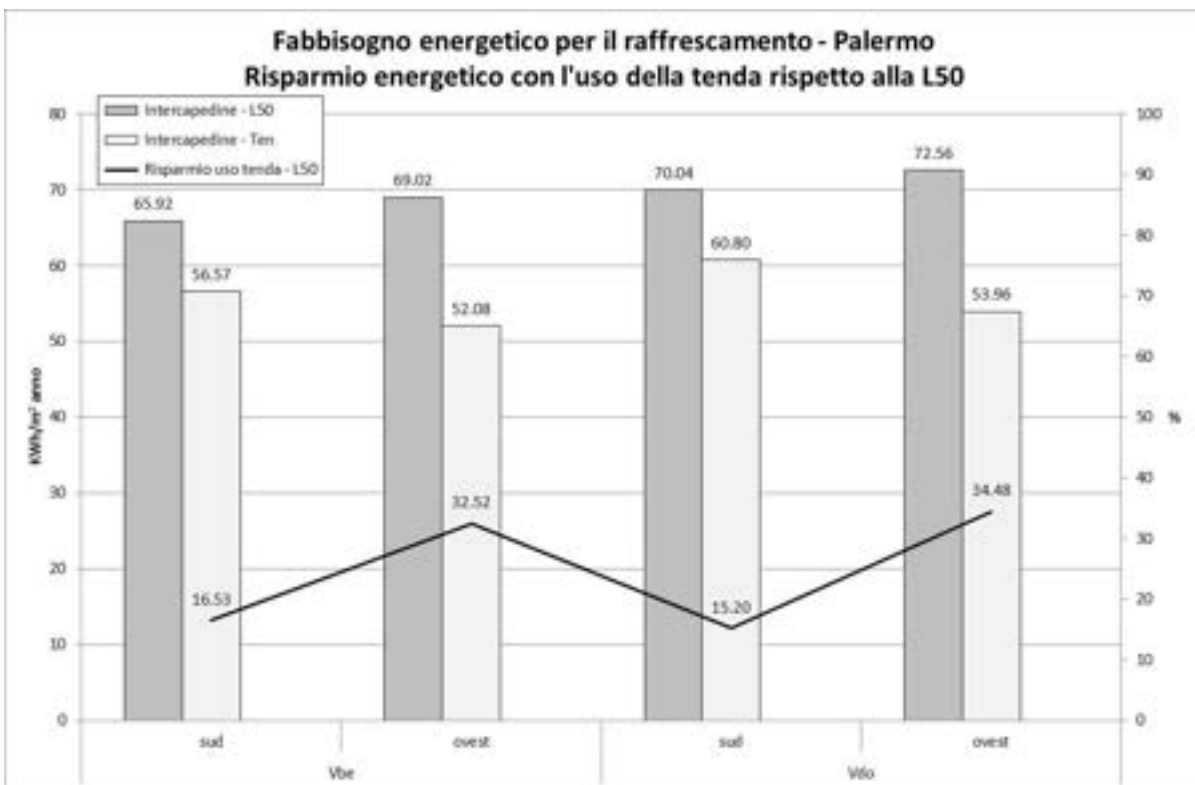


Fig. 15 Comparazione di sistemi schermanti posti nell'intercapedine della vetrata isolante

Nella città di Palermo i fabbisogni energetici per il raffrescamento presentano valori maggiori di circa il 50% rispetto a Milano, ma il comportamento degli schermi tende a mantenersi simile rispetto a quello già rilevato per la città di Roma.

In generale è possibile riscontrare che la tenda garantisce prestazioni migliori soprattutto nelle città con climi più freddi, dove evidentemente il bilancio termico complessivo dell'intero edificio ha un peso inferiore rispetto ai soli apporti solari attraverso le superfici trasparenti e consente di far emergere maggiormente il contributo dei due sistemi schermanti. Nell'esposizione a sud in particolare la discrepanza tra i due schermi raggiunge i valori massimi a Milano.

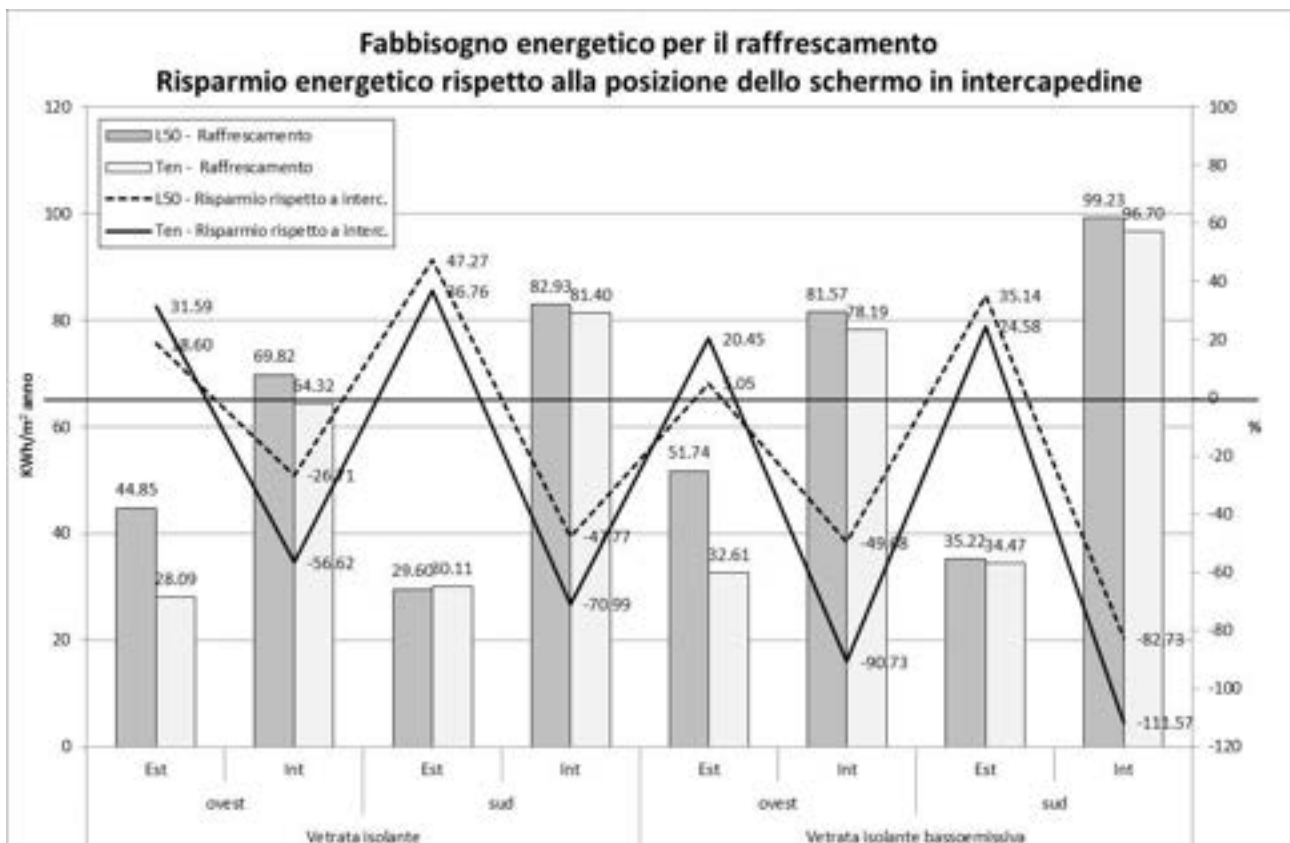
### *6.5 Confronto tra sistemi schermanti posizionati nell'intercapedine e all'interno e all'esterno della vetrata isolante*

Dalla figura 16 emerge che la posizione dello schermo all'interno dell'ambiente risulta proibitiva in tutti i casi considerati. Le prestazioni energetiche dell'intero sistema trasparente infatti vengono penalizzate poiché, ai diversi apporti energetici considerati, si aggiunge quello dell'innalzamento della temperatura dello schermo stesso, che si trasforma in un'ulteriore sorgente di calore all'interno della zona climatica d'interesse; il calore così accumulato dovrà essere rimosso dall'impianto di climatizzazione. Il fenomeno si verifica soprattutto in concomitanza della vetrata bassoemissiva in quanto, in questo caso, il coating posto in faccia 3 riduce le dispersioni del calore accumulato dagli schermi verso l'esterno penalizzando l'intero sistema trasparente.

Un ulteriore aspetto che emerge dal grafico 6 è il comportamento che avviene tra i due schermi: in tutti i casi, ad eccezione dell'esposizione ovest con dispositivo esterno, le risposte energetiche sono pressoché le stesse.

La risposta risiede ancora nella configurazione geometrica e nelle caratteristiche termofisiche dei due schermi, infatti, nel caso dell'esposizione ovest con dispositivo esterno, l'efficacia della schermatura del campione L50 non raggiunge quella della tenda, comportando un fabbisogno energetico per il raffrescamento superiore. Nei casi in cui lo schermo è posizionato all'interno, la ridotta efficacia schermante del campione L50 viene bilanciata dalla maggiore quantità di energia che viene riflessa verso l'esterno rispetto a quanto avviene con la tenda. Nell'esposizione sud, la particolare inclinazione delle lamelle della veneziana, regolata sul cut-off alle ore 12.00, garantisce una schermatura più efficace, pertanto il fabbisogno per il raffrescamento tende a coincidere con quello ottenuto con l'applicazione della tenda.

Il comportamento degli schermi potrebbe comunque essere diverso qualora venissero montate lamelle con inclinazioni differenti rispetto a quelle studiate.



**Graf.16 Comparazione di sistemi schermanti posti all'interno e all'esterno della vetrata isolante**

In ultima analisi, dalla linea spezzata del grafico 6, si può osservare che spostare il dispositivo schermante dall'intercapedine verso l'esterno risulta sempre conveniente; in particolare i risparmi sul fabbisogno energetico per il raffrescamento maggiori si ottengono: con la tenda, nei casi in cui la finestra è esposta ad ovest con lo schermo viene posizionato all'esterno in abbinamento alla vetrata bassoemissiva, e con la veneziana in tutti gli altri casi.

Nell'esposizione sud vengono raggiunti in assoluto le percentuali di risparmio maggiori, nei casi in cui lo schermo viene spostato all'esterno, e i peggiori, nei casi in cui lo stesso viene spostato all'interno; ciò è dovuto in particolare al maggior numero di ore di soleggiamento rispetto all'esposizione ovest, al periodo di funzionamento dell'impianto e al tipo di controllo sulla temperatura ipotizzato.

## 7 Conclusioni

La tecnologia esaminata in questo studio offre diversi prodotti disponibili in commercio e le misure in laboratorio evidenziano numerose soluzioni da applicare in funzione della prestazione richiesta, utilizzando materiali con appropriate caratteristiche ottiche e termiche.

La prestazione a livello di sistema semi-trasparente di facciata raggiunge i migliori risultati, in termini di isolamento termico, con le schermature solari poste nell'intercapedine di vetrate multiple. Le riduzioni di trasmittanza termica raggiungono il 50% nei casi più favorevoli (generalmente quelli con la vetrata meno performante) e, in tutti i casi, la configurazione in vetrocamera risulta essere la più efficace rispetto alla schermatura esterna e interna. In termini di fattore solare, lo studio evidenzia le migliori prestazioni rispetto alle schermature interne, mentre quelle esterne rispondono più efficacemente in termini di protezione solare. Va tuttavia notato che l'utilizzo di materiali a basso assorbimento e elevata riflessione solare avvicina le prestazioni delle schermature in intercapedine rispetto a quelle esterne, circa il 10% in termini relativi) nel confronto tra materiali con identici valori di trasmittanza solare. Nel caso di tende o veneziane ad elevato assorbimento solare, il fattore solare del sistema con schermatura in intercapedine arriva ad essere del 50% superiore (in termini relativi), rispetto alla schermatura solare esterna.

Lo studio relativo all'integrazione negli edifici ha dimostrato che la tenda restituisce sempre la prestazione energetica migliore, limitatamente all'inclinazione delle lamelle adottata, riducendo mediamente dei circa il 26% i fabbisogni energetici per il raffrescamento. I migliori risultati si ottengono nell'esposizione ovest dove la geometria della tenda consente di schermare in maniera più efficace l'irraggiamento solare, che in queste esposizioni raggiunge inclinazioni più basse.

La tipologia del vetro non sembra influenzare le prestazioni del sistema trasparente nei casi in cui il sistema schermante viene posizionato nell'intercapedine, i risultati però potrebbero essere diversi nei casi in cui lo schermo venga posto in posizioni diverse soprattutto in abbinamento a vetri a filtro solare, che in questo studio non sono stati considerati.

La posizione dello schermo risulta determinante sui risparmi energetici conseguibili, i risultati migliori si ottengono posizionando lo stesso all'esterno del serramento, ottenendo in tal caso risparmi medi oltre il 30% rispetto al posizionamento dello schermo nell'intercapedine. Proibitivo risulta invece essere il posizionamento dei sistemi schermanti all'interno, in alcuni casi infatti i valori del fabbisogno energetico risultano doppi rispetto a quelli raggiunti con lo schermo posizionato in intercapedine.

Lo studio comunque presenta alcuni limiti: sarebbe opportuno infatti indagare altre configurazioni dei sistemi a veneziana che presentano passi ed inclinazioni delle lamelle differenti o, in particolare, lamelle disposte in posizione verticale da applicare nelle esposizioni est ed ovest poiché, pur consentendo una buona protezione solare, garantiscono spesso anche un'adeguata illuminazione naturale riducendo i carichi per l'illuminazione artificiale.

In ultima analisi, anche se la tenda ha restituito il migliore comportamento energetico, non è secondario tener conto del comfort psicofisico e luminoso di chi abita l'ambiente confinato. Il tema è ampio ed articolato e richiede un approccio multidisciplinare ed è anche strettamente connesso ad aspetti di consumi energetici degli edifici. Alla luce di queste considerazioni lo studio potrebbe portare a conclusioni opposte.

## Bibliografia

- [1] Energy performance of buildings EU Directive (EPBD2) 2010/21/EU.
- [2] D. Iatauro, P. Signoretti, L. Terrinoni e M. Zinzi, *Artificial lighting energy consumption in buildings: a comparison between EN 15193 and an alternative method based on the Dresler diagrams*. International Workshop Visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow, Rome, Italy, 2008.
- [3] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie (1982), *Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily, and Monthly-Average Global Radiation*, Solar Energy, vol. 28, 1982, p.13
- [4] R.R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart (1990), *Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance*, Solar Energy **44**, 5 (1990), pp. 271-289.
- [5] P.J. Lunde (1980), *Solar Thermal Engineering*, Wiley, New York, 1980.
- [6] G. Rossi, M. Sarotto, P. Iacomussi, P. Soardo, "A new approach to the photometric characterisation of materials and its metrological applications", Proceeding of IMEKO-XV International Congress, 13-18 June 2000, Osaka, Japan, pp. 13-18.
- [7]. EnergyPlus Engineering Reference - The Reference to EnergyPlus Calculations
- [8]. Thanos Tzempelikos "Optical properties of shading devices: a state-of-the-art review" Solar Buildings Research Network, [www.solarbuildings.ca](http://www.solarbuildings.ca) Department of Building, Civil & Environmental Engineering, Concordia University
- [9]. D. DiBartolomeo, E.Lee, F. Rubinstein, (1996), 'Developing a dynamic envelope/lighting control system with field measurements, IESNA 4-7/8/1996 , Cleveland, USA.
- [10]. Beltrán L., Lee E., and Selkowitz S., (1997), "Advanced Optical Daylighting Systems: Light Shelves and Light Pipes". Journal of the Illuminating Engineering Society. Berkley, CA.
- [11]. K. Papamichael, L. Beltran, (1993), "Simulating the daylight performance of fenestration systems and spaces of arbitrary complexity : the IDC method", 3rd Intl. Conference of the International Building Performance Simulation Association, BS'93, August 16-18, Adelaide, Australia.
- [12]. P. Tregenza and I.M. Waters, (Daylight coefficients, Light. Res.Technol., 15 (2) (1983) 65--71.