

# Ricerca di Sistema elettrico



Sistema di schermatura a prestazione variabile con layer a geometria tridimensionale (LA1.10)

A.G. Mainini, T. Poli, G. Basso, A. Mohamed Amhed Mohamed, E. Casolari, A. Speroni, M. Cavaglià, L. Navas, M. El Shemy



**POLITECNICO**  
MILANO 1863



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA,  
INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI  
E AMBIENTE COSTRUITO



## Titolo completo del report

SISTEMA DI SCHERMATURA A PRESTAZIONE VARIABILE CON LAYER A GEOMETRIA TRIDIMENSIONALE (LA1.10)

A.G. Mainini, T. Poli, G. Basso, A. Mohamed Amhed Mohamed, E. Casolari, A. Speroni, M. Cavaglià, L. Navas, M. El Shemy (Politecnico di Milano -Dipartimento ABC - SEEDLAB)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Edifici ad alta efficienza per la transizione

Linea di attività: LA 1.10

Responsabile del Progetto: Giovanni, Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Domenico, Iatauro, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Politecnico di Milano

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte

## Indice

1	Risultati attesi .....	7
1.1	Schede prodotto e materiali .....	7
1.2	Schede di Sistemi e tecnologie di Movimentazione.....	7
1.3	Modelli digitali e analisi comparative.....	7
2	Risultati ottenuti.....	8
3	Prodotti attesi .....	10
4	Prodotti sviluppati .....	11
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	12
6	Sintesi delle attività svolte .....	13
7	Dettaglio delle attività svolte .....	14
7.1	Flusso di lavoro .....	14
7.2	Selezione campioni .....	14
7.3	Modellazione geometrica digitale .....	16
7.4	Misurazioni di laboratorio .....	17
7.5	Analisi speditiva dell'efficacia schermante .....	19
7.5.1	Scopo e ipotesi dell'analisi e impostazione della struttura di test virtuale .....	19
7.5.2	Parametri di valutazione e comparazione della prestazione schermante.....	20
7.5.3	Valutazione del parametro SF nella configurazione originale .....	21
7.5.4	Valutazione del parametro SF con differenti inclinazioni del campione. ....	23
7.5.5	Test di ottimizzazione geometrica .....	23
7.6	Simulazione di dettaglio tramite Bidirectional Scattering Distribution Function ....	24
7.6.1	Fasi del Processo per la creazione del modello: .....	25
7.6.2	Risultati BSDF: Trasmittanza luminosa angolare .....	26
7.7	Analisi Climate Based su campioni selezionati .....	27
7.7.1	Metodo e ipotesi di analisi, strumenti e valori di riferimento .....	27
7.7.2	Selezione delle metriche di analisi.....	27
7.7.3	Risultati di UDI e Illuminamento medio .....	28
7.7.4	Efficacia del sistema schermante statico e con movimentazioni semplici. Illuminamento orario.....	29
7.7.5	Diagrammi di Kyviat per la comparazione dell'efficacia dei sistemi schermanti...	30
7.8	Definizione dei sistemi di movimentazione.....	31
7.8.1	Movimenti.....	32
7.8.2	Meccanismi.....	33

7.9	Schede Prodotto .....	34
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	36
9	Pubblicazioni scientifiche .....	37
10	Eventi di disseminazione .....	38

## Indice delle figure

Figura 1 - Diagramma di flusso della metodologia utilizzata per caratterizzare i prodotti come schermature edilizie tramite l'analisi delle caratteristiche geometriche, della prestazione schermante e delle possibili movimentazioni.....	14
Figura 2 - Sintesi dei 14 campioni selezionati durante la fase preliminare di screening dei prodotti commerciali con indicazioni su produttore, materiale e percentuale di vuoto su pieno. Nelle note, vengono specificate peculiarità del prodotto che hanno influito sulle analisi successive.....	15
Figura 3 - Risultati della modellazione digitale parametrica di due campioni esemplificativi B ed L. ....	16
Figura 4 - Processo e risultati della scansione della maglia E. ....	16
Figura 5 - Fotografia dello strumento di misura utilizzato per il test di laboratorio. Figura 6 - Posizionamento del campione davanti al foro della sfera, con descrizione dei parametri $\alpha$ (orientamento del campione) e $\beta$ (inclinazione del fascio). ....	17
Figura 7 - Fotografie scattate durante le misurazioni eseguite sui campioni G ed M presso il centro ENEA di Casaccia. Misure con campioni a $45^\circ$ e orizzontali. ....	18
Figura 8 - Distribuzione spettrale della trasmissione VIS-NIR dei campioni con inclinazione del fascio a $0^\circ$ - ovvero incidenza normale. I risultati vengono riportati per il campione posizionato orizzontalmente, ma sono equivalenti anche modificando l'orientamento del campione a $45^\circ$ e $90^\circ$ . ....	18
Figura 9 - Misure ed impostazioni della struttura di test virtuale realizzata in <i>Rhino-Grasshopper</i> per la valutazione speditiva delle prestazioni schermanti, con schematizzazione posizione campione verticale ed inclinato positivamente e negativamente. La dimensione del Box per campioni inclinati è qui indicativa, nella valutazione è stato considerato un box 6m x 6m per evitare effetti di bordo sulla superficie di misura ....	20
Figura 10 - Schema esemplificativo del parametro T, in riferimento al campione A disposto orizzontalmente e a $10^\circ$ . ....	21
Figura 11 - Risultati dell'analisi per Roma riportati sui grafici SFJ-T, SFD-T, SFD-SFJ per tutti i campioni. ....	22
Figura 12 - Grafico efficienza materica - efficienza schermante per le configurazioni a geometria ottimizzata del campione N. ....	24
Figura 13 - Rappresentazione delle Patch del Cielo Klems ....	25
Figura 14 - Interfaccia BSDFViewer. È possibile selezionare la direzione di incidenza della radiazione (incident hemisphere) e ottenere il risultato di trasmissione e riflessione emisferica (outgoing hemisphere). Per le schede prodotto e figura 18 sono stati tracciati i valori di trasmittanza angolare lungo le direzioni x e y identificate dalle frecce in rosso (corrispondenti agli angoli di incidenza: $0^\circ$ - $5^\circ$ ; $5^\circ$ - $15^\circ$ ; $15^\circ$ - $25^\circ$ ; $25^\circ$ - $35^\circ$ ; $35^\circ$ - $45^\circ$ ; $45^\circ$ - $55^\circ$ ; $55^\circ$ - $65^\circ$ ; $65^\circ$ - $75^\circ$ ; $75^\circ$ - $90^\circ$ ). ....	25
Figura 15 - Risultati BSDF per ogni campione posizionato orizzontalmente (direzione Y Figura 17), confrontati al dominio delle schermature secondo EN ISO 52022-3.....	26

Figura 16 - Risultati BSDF per ogni campione posizionato verticalmente (Direzione X figura 17), confrontati al dominio delle schermature secondo EN ISO 52022-3. ....	26
Figura 17 - Stanza di riferimento di Reinhart dimensioni. ....	27
Figura 18 - Rappresentazione dei punti di misura dell'illuminamento e delle superfici di analisi dei tavoli di lavoro (desk), raggruppate per file Griglia di analisi 45x45 cm. Piano verticale di analisi per illuminamento. ....	27
Figura 19 - Risultati UDI per le configurazioni della stanza di riferimento con solo vetro, louver statico, schermatura A, M, ed N in posizione statica parallela al piano del vetro. Valori per Milano. Valori misurati sul piano di lavoro. ....	28
Figura 20 - Valori di illuminamento medio per i campioni A, M, N comparati sia a louver statico che per la configurazione senza schermatura per la stanza di riferimento di Figura 18 e per i punti individuati dalla griglia di analisi. Roma. ....	29
Figura 21 - Illuminamento orario misurato ogni 0.45 m dalla finestra il 21 Agosto ed il 21 Dicembre alle 12.30, misurati per la configurazione con solo vetro, e per le configurazioni del campione N verticali ed inclinate. Valori per Roma. ....	29
Figura 22 - Apporti solari per le configurazioni senza schermatura, con louvers, con campione A verticale statico e campione A inclinato dinamicamente (-10°C Aprile settembre, + 10°C Altri mesi. Valori per Roma. ....	30
Figura 24 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Milano. ....	30
Figura 25 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Roma. ....	31
Figura 25 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Palermo. ....	31

## Indice delle tabelle

Tabella 3 - Valori integrali di trasmittanza e riflettanza luminose e solari dei materiali costituenti i campioni, utilizzati nella modellazione del materiale nei files BSDF. ISO 9050 ....	19
Tabella 2 - Valori target del fattore di schermatura nei periodi invernale ed estivo. ....	20
Tabella 3 - Risultati sintetici del fattore di schermatura per i mesi di giugno e dicembre nelle tre località. ....	21
Tabella 4 - Fattore di schermatura dei campioni D, G, M, N per le inclinazioni -10°, -5°, 0°, 5°, 10°. ....	23
Tabella 5 - Valori dei parametri diametro foro e profondità combinati per il test di ottimizzazione geometrica. ....	23
Tabella 6 - Risultati sintetici del fattore di schermatura per i mesi di giugno e dicembre e del parametro di efficienza materica nelle tre località per la configurazione ottimizzata migliore. ....	24

Tabella 7 – Dati UDI per ogni desk (Figura 19) per Milano, Roma, Palermo per le configurazioni della stanza di riferimento con solo vetro, louver statico, schermatura A, M ed N in posizione statica parallela al piano del vetro. ....	28
Tabella 8 - Tabella macrocategorie movimentazioni. Con movimentazioni si intendono uno o un gruppo di movimenti che hanno lo scopo di regolare la posizione del pannello schermante rispetto all'infisso e la conseguente esposizione alla radiazione solare. Possono essere di apertura totale o parziale, automatici o manuali. ....	32
Tabella 9 – Tabella sottocategorie movimentazioni .....	32
Tabella 10 - Tabella dei sistemi funzionali. Per ogni sistema funzionale è stata individuata la componente motrice ed è stato riportato un riassunto delle relative proprietà tecniche minime e massime in base alle tecnologie presenti sul mercato compatibili con l'ambito di applicazione. ....	33

# 1 Risultati attesi

Il presente report è l'output principale della Linea di Attività 1.10. L'elenco puntato a seguire riporta gli obiettivi specifici dell'attività nel periodo:

## 1.1 Schede prodotto e materiali

Schede prodotto e materiali: contenenti una sintesi delle prestazioni dei materiali selezionati, costituenti un database di riferimento per la scelta e l'opportunità di utilizzo dei materiali per tipo di applicazione. Contengono informazioni di carattere qualitativo e quantitativo e permettono di comparare tra loro i sistemi.

Le informazioni minime contenute saranno:

- riflettanza ( $\rho$ ), trasmittanza solare ( $\tau_e$ ) e luminosa ( $\tau_{vis}$ )
- Riferimenti commerciali (dove disponibili)
- Approcci di trasferimento tecnologico e potenziali di applicazione al contesto edilizio
- Indicatori sintetici di costo, durabilità ed eventuali incompatibilità e/o variabili di impatto ambientale

## 1.2 Schede di Sistemi e tecnologie di Movimentazione

Schede di sistemi e tecnologie di movimentazione: modelli di funzionamento e tecnologie di movimentazione abilitanti tali modelli per la selezione combinata materiale-applicazione, includendo valutazioni qualitative e modelli semplificati.

## 1.3 Modelli digitali e analisi comparative

Modelli digitali e analisi comparative: ricostruzione digitale di almeno un sistema selezionato (materiale + modello di funzionamento) ed elaborato grazie ai precedenti step di analisi, applicato come sistema di schermatura solare. Saranno da preferire sistemi a complessità ridotta (materiale + modello di funzionamento)

## 2 Risultati ottenuti

Tra i materiali e i campioni selezionati (mesh plastiche tridimensionali) sono state individuate alcune soluzioni promettenti, potenzialmente applicabili come sistemi di schermatura solare. La geometria tridimensionale degli elementi garantisce variabilità prestazionale nella gestione degli apporti solari estivi e invernali in condizione statica, con il layer parallelo al piano di facciata, rendendoli comparabili con una soluzione tradizionale a louver statico con lamelle orizzontali. Semplici movimentazioni (inclinazione positiva o negativa di  $10^\circ$  del layer) permettono di modulare apporti solari e luminosi sfruttando le caratteristiche di auto-ombreggiamento del layer stesso. Si rimanda al capitolo di dettaglio delle attività svolte per i risultati.

Le schede prodotto e le schede dei sistemi di movimentazione sono stati inserite a conclusioni del capitolo di dettaglio delle attività svolte.

Di seguito la lista dei risultati ottenuti:

- Individuazione di 14 campioni appartenenti a differenti settori merceologici nell'ambito sia dell'edilizia (e.s. rinforzi strutturali, griglie salvapratto, griglie di scolo acque meteoriche), che del design industriale, che del supporto alle attività produttive. Tutti i campioni hanno dimostrato potenziali di trasferimento tecnologico verso l'ambito della schermatura solare.
- Ricostruzione geometrica dei materiali con strumenti digitali, attraverso tool di modellazione geometrica e parametrica (12 campioni) e scansione tridimensionale (2 campioni).
- Definizione di una procedura di scansione tridimensionale per campioni complessi con elevato vuoto su pieno
- Misura delle proprietà ottiche solari – luminose dei materiali costituenti 12 campioni (Riflessione e trasmissione solare nel campo UV-VIS-NIR 300-2500 nm)
- Misura delle proprietà ottiche solari-luminose angolari di 12 campioni (riflessione e trasmissione solare nel campo UV-VIS NIR 350 -1550 nm). Misura per tre orientamenti del campione ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) e tre angoli di incidenza del fascio luminoso ( $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ )
- Sviluppo di un metodo speditivo per la valutazione delle prestazioni solari di 14 campioni. Tutti e 14 valutati come sistemi statici, paralleli al piano di facciata, 3 di questi anche con differenti inclinazioni rispetto al piano di facciata (da  $-10^\circ$  a  $+10^\circ$ , step  $5^\circ$ ). Le valutazioni sono state eseguite per le latitudini di Milano, Roma, Palermo.
- Test di ottimizzazione parametrica sui 3 campioni selezionati. È stato generato un insieme di geometrie possibili, variando i rapporti geometrici (spessore e forometria) e l'inclinazione del pannello. Successivamente, l'efficacia schermante invernale ed estiva è stata valutata con il metodo speditivo, identificando infine la soluzione ottimizzata.
- Sviluppo di un indicatore (Parametro T), che supera la definizione di Openness Factor del campione e che considera sia l'incidenza del materiale (volume per unità di superficie), che della prestazione angolare dello stesso.
- Creazione di modelli digitali BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) di 12 campioni, per la valutazione delle prestazioni angolari solari e luminose. Definizione dei profili di decadimento della trasmissione luminosa in relazione all'angolo di incidenza e

per direzioni prevalenti (orientamento 0°, 90° del campione) e comparazione con sistema tradizionali di schermatura fissa (Louvers 0°/45°)

- Ricostruzione di un modello digitale di un ambiente tipo uso ufficio selezionato da letteratura (WWR 37%) e applicazione di 3 campioni selezionati come sistema di schermatura in differenti scenari di riferimento (Esposizione SUD - Milano, Roma e Palermo)

Valutazione di:

- Useful Daylight Illuminance (UDI) e Annual solar exposure (ASE) - (sistemi statici);
- Illuminamento medio (sistemi statici);
- Illuminamento orario in due giornate di riferimento per sistemi statici e dinamici (inclinazione +10° inverno e -10° inverno);
- Valutazione degli apporti solari medi mensili per i sistemi sia statici, che dinamici (inclinazione +10° inverno e -10° inverno);
- Diagrammi sintetici Kyviat per la comparazione dei sistemi tra loro rispetto a un sistema statico di tipo louvers 0°.
- 12 schede prodotto e materiali contenenti:
  - Descrizione generale, materiale costituente, colore, dimensione del modulo base
  - Rappresentazione grafica
  - Applicazione corrente e potenzialità di applicazione al contesto edilizio come sistema di schermatura tramite Approcci di trasferimento tecnologico.
  - Indicatori sintetici riferiti alle caratteristiche del materiale/componente quali: massa per unità di superficie, proprietà meccaniche, reazione al fuoco, resistenza agli UV, resistenza allo sporco, permeabilità all'aria, permeabilità visiva, impatto visivo, resa architettonica per applicazioni in facciata, frazione riciclabile come variabile di impatto ambientale, costo.
  - Percentuale di vuoto su pieno e indicazioni sul tipo di misura effettuato)
  - Dettaglio dei risultati per le misure ottico energetiche materiale costituente e del componente (riflettanza (r), trasmittanza solare (te) e luminosa (tvis).
  - Risultati delle simulazioni di trasmissione luminosa e curva di risposta angolare del campione (BSDF) per due direzioni predominanti (X, Y)
  - Indicazione delle tipologie di movimentazione consigliata per layer e link con le schede di sistemi e tecnologie di movimentazione
- 7 Schede di movimentazioni per schermature dinamiche contenenti:
  - Classificazione per spostamento
  - Illustrazioni grafiche esemplificative
  - Classificazione per numero moduli
  - Indicazione qualitativa su esposizione, latitudine e complessità del sistema
- 5 Schede meccanismi di movimentazione e sistemi abilitanti contenenti
  - Descrizione generale, compatibilità con movimentazioni
  - Schemi statici associati
  - Proprietà tecniche del sistema

### 3 Prodotti attesi

Il presente report è il prodotto atteso. Non erano previsti prodotti software/hardware.

## 4 Prodotti sviluppati

Non erano previsti prodotti software/hardware.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Dal punto di vista tecnico non si sono verificati scostamenti significativi rispetto quanto previsto da capitolato. Alcune semplificazioni geometriche si sono rese necessarie per permettere la creazione dei modelli geometrici di analisi, ma senza determinare una penalizzazione significativa dei risultati.

Visto che alcune geometrie dei materiali non sono proprietarie e possono essere trasversali per alcuni produttori, si è deciso di non riportare nelle schede il dettaglio dei riferimenti commerciali dei produttori all'interno delle schede prodotto. Tali informazioni sono comunque in possesso del team e possono essere consultati.

Sempre nelle schede, essendo tutti i materiali costituiti da maglie e reti plastiche, come variabile di impatto ambientale è stata considerata la frazione riciclata.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Identificati 14 materiali per il trasferimento tecnologico alla schermatura solare. Ricostruiti 12 campioni con modellazione parametrica e 2 tramite scansione 3D, definendo una procedura per campioni complessi. Misurate le proprietà ottiche solari di 12 campioni (UV-VIS-NIR), incluse prestazioni angolari in 3 orientamenti e 3 angoli di incidenza. Sviluppato un metodo rapido per test speditivo prestazioni solari statiche e dinamiche in diverse latitudini italiane. Ottimizzati parametri geometrici di 3 campioni per migliorare l'efficacia schermante. Creato l'indicatore Parametro T per valutazioni integrate. Generati modelli BSDF per valutazione dettaglio prestazioni angolari solari/luminose per 12 campioni e svolte simulazioni illuminotecnica e solari per 3 campioni in 2 scenari di funzionamento su ambiente ufficio tipo. Redatte 12 schede prodotto, 7 di movimentazioni dinamiche e 5 di meccanismi abilitanti, documentando caratteristiche qualitative e quantitative.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Flusso di lavoro

Per analizzare e promuovere l'utilizzo delle maglie plastiche come schermature solari in edilizia, è stato sviluppato un flusso di lavoro finalizzato alla caratterizzazione di diversi prodotti e al loro impiego nella progettazione architettonica. A tale scopo, sono stati selezionati prodotti esistenti ([paragrafo 7.2](#)), le cui prestazioni schermanti sono state valutate attraverso test di laboratorio ([paragrafo 7.4](#)) e analisi digitali ([paragrafi 7.5 e 7.6](#)).

La modellazione digitale delle geometrie, necessaria per le analisi virtuali ([paragrafo 7.3](#)), si è rivelata complessa per geometrie non ripetitive; per tali casi è stato testato lo scanner 3D, con esiti poco soddisfacenti. L'analisi delle prestazioni schermanti è stata condotta inizialmente con un approccio speditivo ([paragrafo 7.5](#)) e successivamente con metodologie più dettagliate tramite BSDF ([paragrafo 7.6](#)). I tre campioni con le migliori prestazioni sono stati selezionati per un'ulteriore analisi climate-based ([paragrafo 7.7](#)). Dove richiesto maggiore dettaglio nei risultati, riferirsi all'**Allegato A cap 2.**

Parallelamente, è stata condotta una ricerca sui sistemi di movimentazione esistenti, con una categorizzazione delle tipologie di movimento e dei meccanismi di attuazione (**Allegato A Cap 3 e 4**).

I risultati di tutte le fasi sono stati sintetizzati in schede prodotto (**Allegato Cap. 5**) e schede di movimentazione e funzionali (**Allegato Cap 3 e 4**), pensate per supportare i progettisti nell'integrazione di questi prodotti come schermature solari.

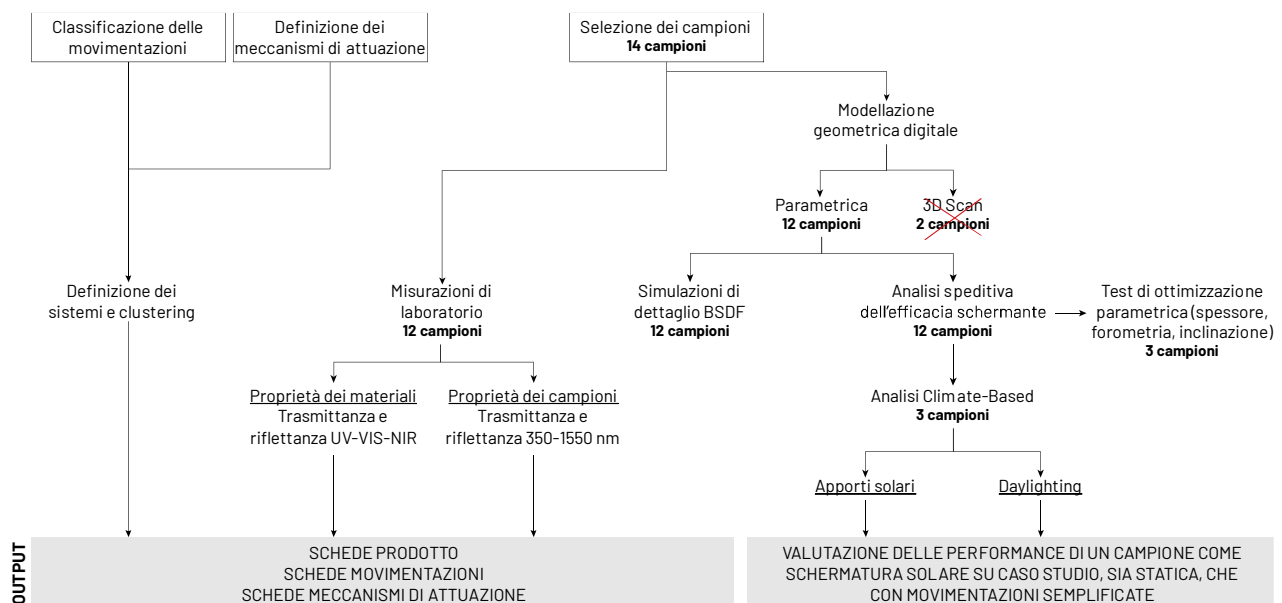


Figura 1 - Diagramma di flusso della metodologia utilizzata per caratterizzare i prodotti come schermature edilizie tramite l'analisi delle caratteristiche geometriche, della prestazione schermante e delle possibili movimentazioni.

### 7.2 Selezione campioni

Sono stati selezionati 14 campioni per l'analisi, tramite approcci di trasferimento tecnologico. A seguire, è fornito un elenco completo con le immagini dei campioni, i codici di riferimento e le relative informazioni sintetiche di materiale e percentuale di vuoto su pieno. Solo i campioni con le migliori performance sono stati inclusi nell'analisi Climate-Based relative all'ultima fase di analisi. Eventuali eccezioni sono riportate nelle note associate a ciascun campione nell'elenco di sintesi.






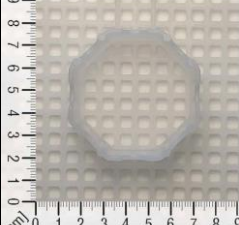
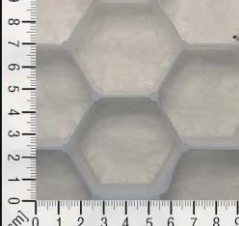
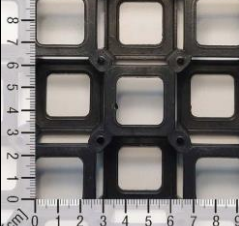


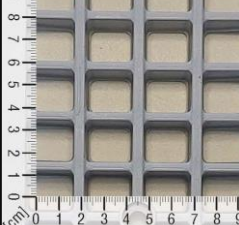
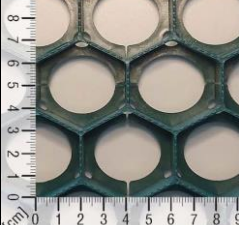
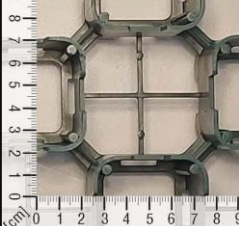

SINTESI CAMPIONI SCELTI					
	<b>Campione A</b>			<b>Campione H</b>	
	Materiale	HDPE		Materiale	ABS
	Vuoto su pieno	96%		Vuoto su pieno	12%
<b>Note:</b> Valutato come campione con le migliori proprietà schermanti durante la fase di valutazione speditiva. Scelto per l'analisi Climate Based su caso studio (paragrafo 7.7)		<b>Note:</b>			
	<b>Campione B</b>			<b>Campione I</b>	
	Materiale	PP		Materiale	Technopolimero
	Vuoto su pieno	68%		Vuoto su pieno	54%
<b>Note:</b>		<b>Note:</b>			
	<b>Campione C</b>			<b>Campione L</b>	
	Materiale	PP		Materiale	HDPE
	Vuoto su pieno	61%		Vuoto su pieno	49%
<b>Note:</b>		<b>Note:</b>			
	<b>Campione D</b>			<b>Campione M</b>	
	Materiale	HDPE		Materiale	PP
	Vuoto su pieno	83%		Vuoto su pieno	55%
<b>Note:</b> Scelto per l'analisi Climate Based su caso studio (paragrafo 7.7)		<b>Note:</b> Scelto per l'analisi Climate Based su caso studio (paragrafo 7.7)			
	<b>Campione E</b>			<b>Campione N</b>	
	Materiale	PP		Materiale	sconosciuto
	Vuoto su pieno	53%		Vuoto su pieno	59%
<b>Note:</b> incluso solo per i test del processo di scansione tridimensionale della geometria		<b>Note:</b> Scelto per l'analisi Climate Based su caso studio (paragrafo 7.7)			
	<b>Campione F</b>			<b>Campione O</b>	
	Materiale	PP		Materiale	PP
	Vuoto su pieno	55%		Vuoto su pieno	59%
<b>Note:</b>		<b>Note:</b>			
	<b>Campione G</b>			<b>Campione P</b>	
	Materiale	HDPE		Materiale	HDPE
	Vuoto su pieno	69%		Vuoto su pieno	61%
<b>Note:</b> Scelto per l'analisi Climate Based su caso studio (paragrafo 7.7)		<b>Note:</b> escluso dall'analisi perché proprietà non misurabili con strumentazione disponibile, incluso solo per i test del processo di scansione tridimensionale della geometria			

Figura 2 – Sintesi dei 14 campioni selezionati durante la fase preliminare di screening dei prodotti commerciali con indicazioni su produttore, materiale e percentuale di vuoto su pieno. Nelle note, vengono specificate peculiarità del prodotto che hanno influito sulle analisi successive.

### 7.3 Modellazione geometrica digitale

I campioni raccolti sono stati misurati utilizzando un calibro digitale con una precisione di 0,1 mm. Successivamente, sono stati creati script parametrici in *Rhinoceros V7-Grasshopper* per la ricostruzione geometrica. Gli script di ricostruzione sono stati progettati in modo parametrico per consentire la modifica delle dimensioni dei fori e dello spessore dei campioni.

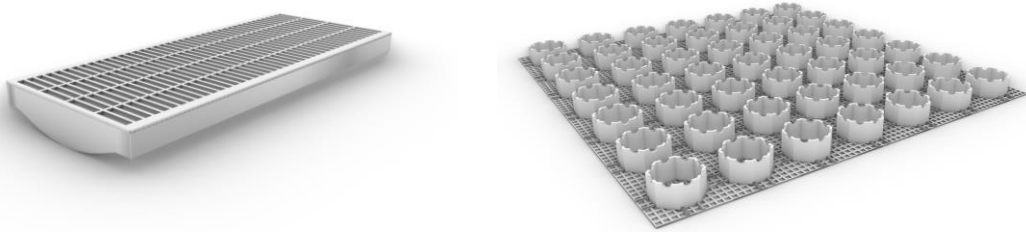


Figura 3 – Risultati della modellazione digitale parametrica di due campioni esemplificativi B ed L.

Per i campioni E e P, caratterizzati da pattern particolarmente complessi, è stato necessario ricorrere alla scansione 3D anziché alla generazione di script in *Grasshopper*. La scansione è stata effettuata utilizzando una fotocamera specializzata e i software *Luma AI web application* e *Revo Studio*, che hanno consentito la ricostruzione delle maglie a partire da nuvole di punti, con successive fasi di post-elaborazione per correggere eventuali imperfezioni delle geometrie finali.

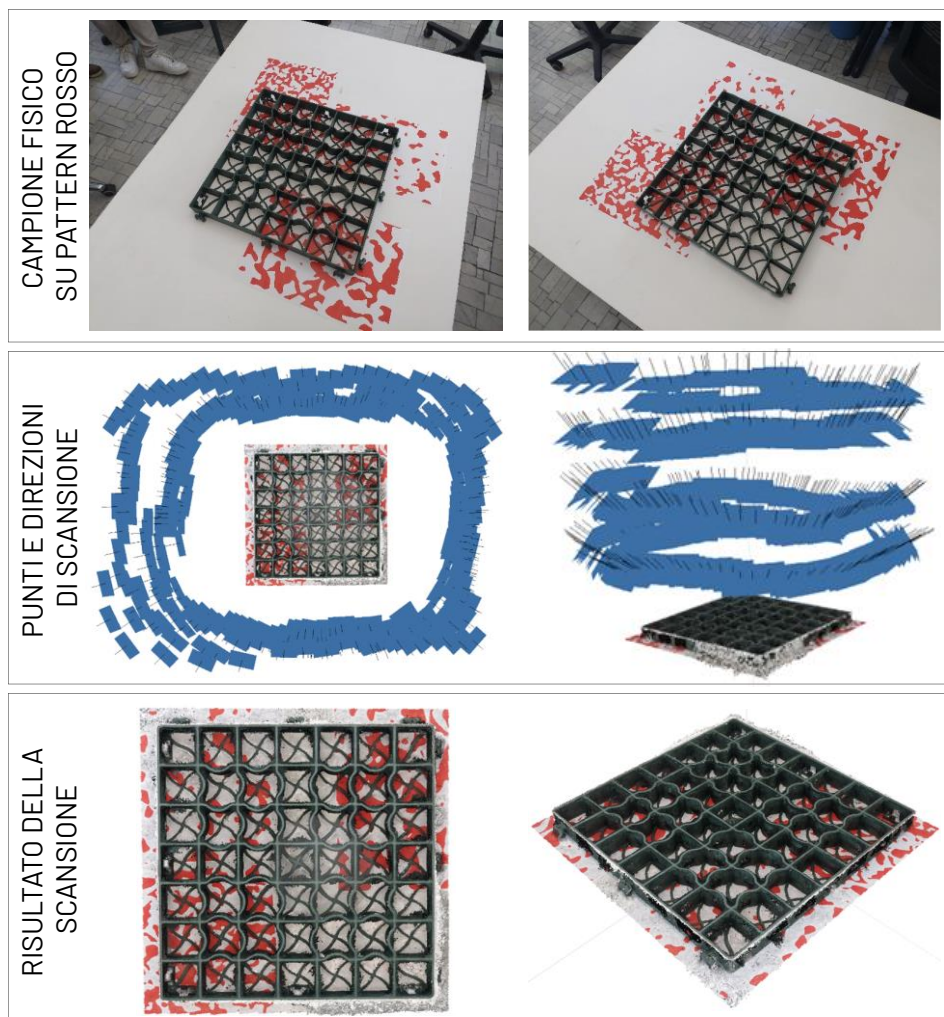


Figura 4 – Processo e risultati della scansione della maglia E.

Le difficoltà nella scansione di dettagli fini e nella forometria, insieme alla complessità delle maglie generate, hanno reso i campioni E e P inadatti ad alcune simulazioni di dettaglio, portandone l'esclusione.

#### 7.4 Misurazioni di laboratorio

Le misurazioni sono state condotte per caratterizzare la trasmissione solare e luminosa di 12 maglie plastiche e validare i risultati ottenuti digitalmente. Il test è stato svolto il 19-20 maggio 2024 presso il centro di ricerca *ENEA Casaccia*, mediante l'apparato CATRAM (sfera di Ulbricht - 75 cm diametro, sorgente 300 W a Xenon - Figura 5). La dimensione del fascio luminoso (8 cm) ha permesso di minimizzare le tolleranze di posizionamento del campione.

La trasmittanza è stata determinata come il rapporto tra l'energia trasmessa attraverso il campione, posizionato sulla porta dedicata, e l'energia che entra direttamente nella sfera integratrice. Le misurazioni sono effettuate tra da 350 a 1550 nm, comprendendo l'intero spettro visibile e il 91,4% dello spettro solare. La misura è poi corretta utilizzando il metodo della porta ausiliaria.

Il sistema di rilevamento impiega tre spettrometri (NMOS da 250 a 1000 nm, disp. 1.4 nm - InGaAs da 900 a 1700 nm, disp. 3.125 nm, ExtInGaAs da 1600 a 2500 nm, disp. 3.52 nm). La misura è riferita a campioni orientati a diverse angolazioni ( $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) e con fascio luminoso per angoli di incidenza variabili ( $\beta = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ ) - Figura 6. La sfera, dotata di supporti regolabili, ha garantito il corretto centraggio dei campioni di dimensioni diverse.

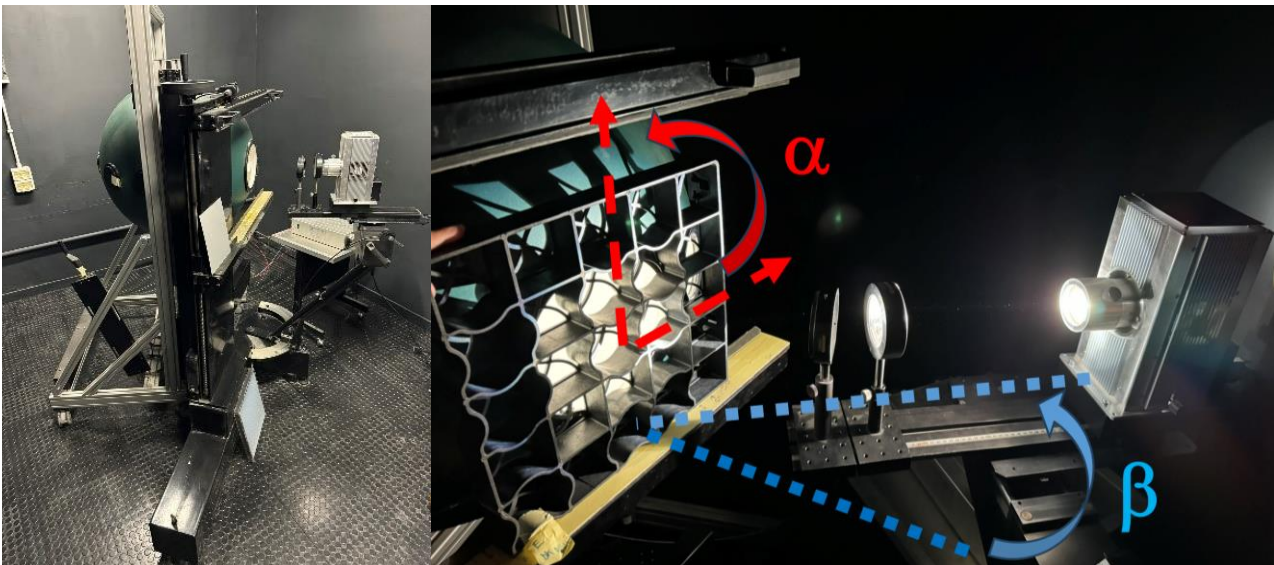


Figura 5 - Fotografia dello strumento di misura utilizzato per il test di laboratorio. Figura 6 - Posizionamento del campione davanti al foro della sfera, con descrizione dei parametri alfa (orientamento del campione) e beta (inclinazione del fascio).

Le misurazioni hanno seguito una procedura strutturata: preparazione dei campioni, posizionamento; calibrazione dello strumento ogni 15 rilevazioni; e misurazioni ripetute su tutti i campioni e orientamenti del fascio.

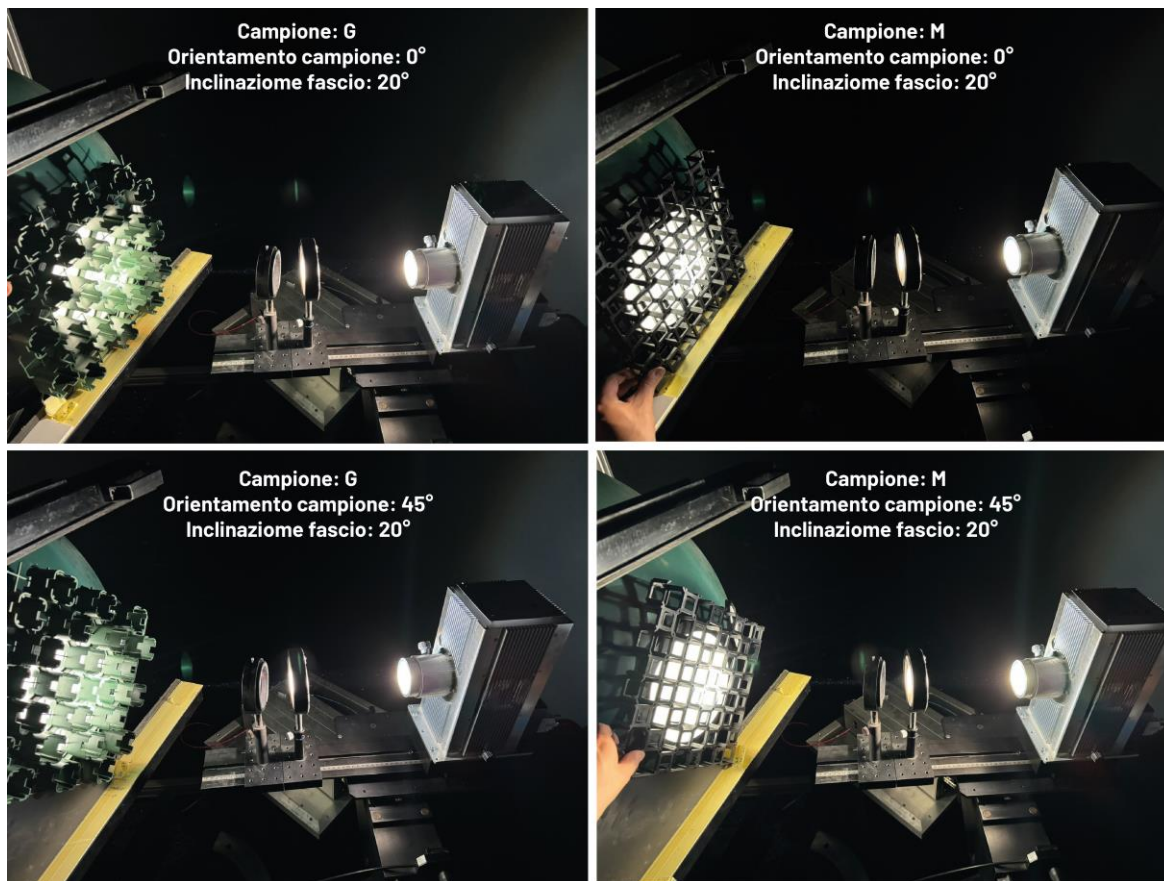


Figura 7 - Fotografie scattate durante le misurazioni eseguite sui campioni G ed M presso il centro ENEA di Casaccia. Misure con campioni a 45° e orizzontali.

Si riportano i dati di spettrali di trasmissione luminosa ( $\tau_{vis}$ ) e solare ( $\tau_e$ ) per le misurazioni eseguite con fascio normale al campione. I risultati per le altre inclinazioni del campione e angoli di incidenza del fascio sono riportate nell'All. A - Fig. 1.

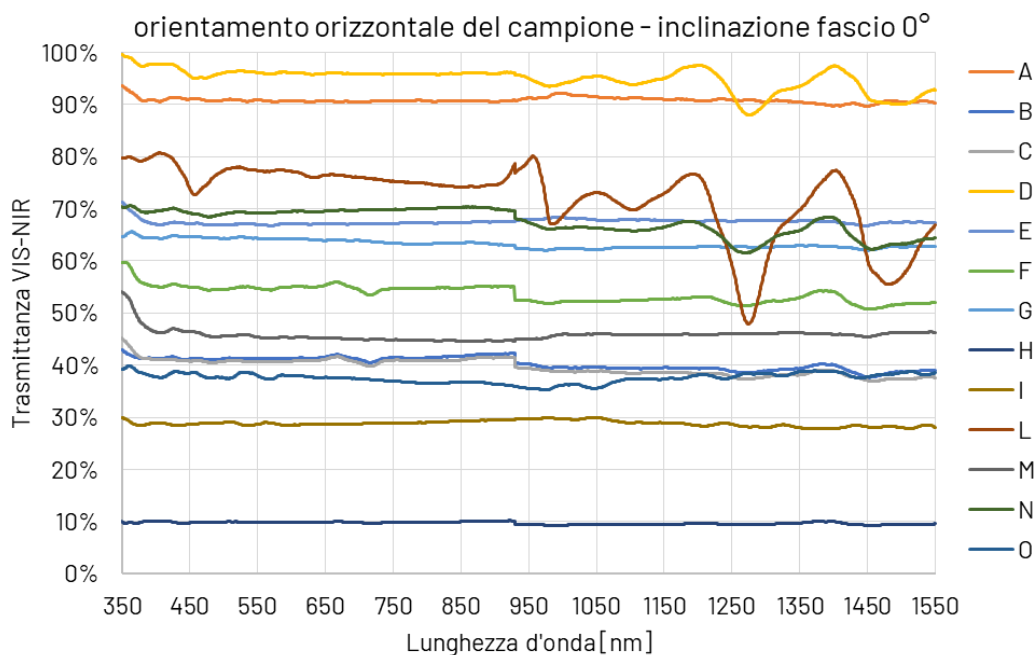


Figura 8 - Distribuzione spettrale della trasmissione VIS-NIR dei campioni con inclinazione del fascio a 0° - ovvero incidenza normale. I risultati vengono riportati per il campione posizionato orizzontalmente, ma sono equivalenti anche modificando l'orientamento del campione a 45° e 90°.

I valori integrali di trasmittanza e riflettanza solare e luminosa sono stati ottenuti dalle misure spettrali e in accordo con ISO 9050, riportati in **All. A – Tab. 1 e 2**.

Per completare l'analisi, sono state valutate le proprietà del materiale costituente i campioni con spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950, i cui risultati vengono riportati per ciascun campione nella Tabella 3 e nelle schede di prodotto (**All. A – Cap 5**). In generale, il contributo del materiale alla trasmissione è quasi nullo, a parte per i campioni A, D ed L costituiti da un materiale semi-opaco.

Materiale del campione:	Proprietà solari		Proprietà luminose	
	$\rho_e$	$\tau_e$	$\rho_v$	$\tau_v$
A	23%	53%	29%	50%
B	48%	0%	53%	0%
C	45%	0%	50%	0%
D	32%	52%	32%	49%
F	46%	0%	51%	0%
G	11%	0%	12%	0%
H	46%	0%	53%	0%
I	4%	0%	4%	0%
L	40%	40%	44%	40%
M	4%	0%	4%	0%
N	34%	0%	43%	0%
O	10%	0%	11%	0%

Tabella 1 - Valori integrali di trasmittanza e riflettanza luminose e solari dei materiali costituenti i campioni, utilizzati nella modellazione del materiale nei files BSDF. ISO 9050

## 7.5 Analisi speditiva dell'efficacia schermante

### 7.5.1 Scopo e ipotesi dell'analisi e impostazione della struttura di test virtuale

Dopo aver modellato le geometrie dei campioni, è stato sviluppato un metodo speditivo per la valutazione delle prestazioni schermanti delle maglie. L'analisi, condotta con il plugin *Ladybug* di *Grasshopper*, ha permesso di confrontare e selezionare i campioni più performanti in un ipotetico scenario di simulazione e in configurazione statica e dinamica. L'analisi speditiva non considera la riflettanza o trasmittanza solare/luminosa del materiale, ma solo l'effetto della geometria.

La superficie di riferimento è stata testata in tre zone climatiche italiane (Milano, Roma e Palermo) nei mesi di giugno e dicembre, rappresentativi dei periodi di raffrescamento e riscaldamento. Questa scelta ha consentito di analizzare le prestazioni in condizioni di massima e minima altitudine solare, includendo gli scenari peggiori dell'anno. Le simulazioni si sono basate su dati meteorologici EPW del database Onebuilding.org – periodo 2008-2021.

La struttura di test virtuale è descritta nell'immagine seguente.



Figura 9 – Misure ed impostazioni della struttura di test virtuale realizzata in *Rhino-Grasshopper* per la valutazione speditiva delle prestazioni schermanti, con schematizzazione posizione campione verticale ed inclinato positivamente e negativamente. La dimensione del Box per campioni inclinati è qui indicativa, nella valutazione è stato considerato un box 6m x 6m per evitare effetti di bordo sulla superficie di misura

### 7.5.2 Parametri di valutazione e comparazione della prestazione schermante

Sono stati selezionati due parametri per valutare l'efficienza schermante. Il primo parametro utilizzato è il fattore di schermatura (SF), definito come:

$$SF = \frac{\text{Radiazione incidente media con schermatura}}{\text{Radiazione incidente media senza schermatura}} \times 100$$

Il parametro SF è stato calcolato per giugno e dicembre per valutare l'efficienza delle maglie durante i periodi di raffrescamento e riscaldamento. Per ciascun periodo sono stati definiti valori target specifici, riportati in tabella.

Mese	Obiettivo	Valore target
Dicembre	Favorire i guadagni solari passivi durante l'inverno, riducendo i carichi di riscaldamento	$SF_D \leq 50\%$
Giugno	Schermare almeno il 75% della radiazione incidente, riducendo i carichi di raffrescamento	$SF_J \geq 75\%$

Tabella 2 - Valori target del fattore di schermatura nei periodi invernale ed estivo.

E' stato quindi definito il parametro di efficienza geometrica T valutato per ciascun campione in funzione della sua inclinazione (Figura 10) come:

$$T_\theta = \frac{V}{A_{ph,\theta}} [mm]$$

Dove:

$V$ : volume del campione [ $mm^3$ ]

$A_{ph,\theta}$ : somma delle aree dei fori proiettati sul piano XY [ $mm^2$ ]

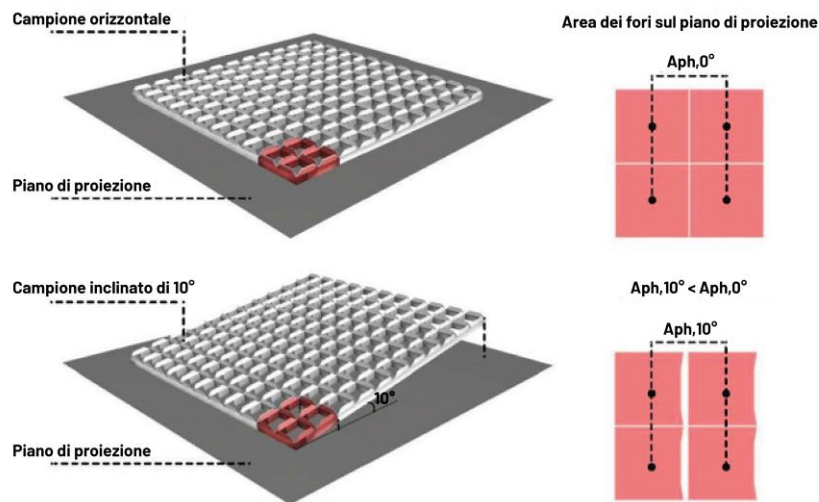


Figura 10 - Schema esemplificativo del parametro T, in riferimento al campione A disposto orizzontalmente e a 10°.

Questo parametro è da intendersi come un superamento del rapporto vuoto su pieno, perché in grado di considerare l'effetto della tridimensionalità della geometria in relazione a un angolo standardizzato di riferimento e un piano di movimentazione del sistema schermante. Minore è T a, parità di schermatura, migliore è l'utilizzo del materiale e della geometria.

### 7.5.3 Valutazione del parametro SF nella configurazione originale

La prima analisi ha mirato a valutare il parametro SF per le 12 maglie in plastica nelle loro geometrie originali, analizzandone l'efficienza schermante in diverse configurazioni (verticale, orizzontale, frontale e posteriore), nei diversi mesi e zone climatiche.

Campione	Giugno			Dicembre		
	MI	RO	PA	MI	RO	PA
A	78.2	80.4	81.8	48.5	48.0	47.8
B	97.8	97.8	97.7	95.5	96.5	97.4
C	96.3	96.3	96.2	89.8	91.7	93.6
D	91.2	91.8	92.0	71.7	72.6	73.7
F	96.9	97.0	97.1	89.3	90.4	91.6
G	89.4	89.9	90.6	64.4	81.8	88.1
H	98.5	98.6	98.6	95.2	95.6	96.2
I	99.2	99.2	97.0	98.4	98.7	99.0
L	91.8	93.7	93.6	79.1	88.8	92.0
M	81.2	82.1	82.6	67.4	67.4	67.6
N	91.9	92.4	92.7	76.3	75.5	76.0
O	95.4	95.7	96.1	84.1	85.6	87.3

Tabella 3 - Risultati sintetici del fattore di schermatura per i mesi di giugno e dicembre nelle tre località.

Sono state visualizzate le maglie più promettenti per mezzo del grafico a zone (Figura 11 e **AII. A - Fig. 2 e 3**). La valutazione ha rivelato che la maggior parte dei campioni offre un'efficace protezione solare durante l'estate, ma non è adatta alle condizioni invernali. Il campione A è stato l'unico a soddisfare i criteri desiderati per entrambi i mesi, con un fattore di schermatura di oltre il 75% a giugno e il 48% a dicembre. Anche il campione M ha mostrato un buon potenziale grazie alle sue perforazioni bidirezionali, così come il campione N rappresenta un buon compromesso tra i due sistemi, grazie all'orientamento delle losanghe.

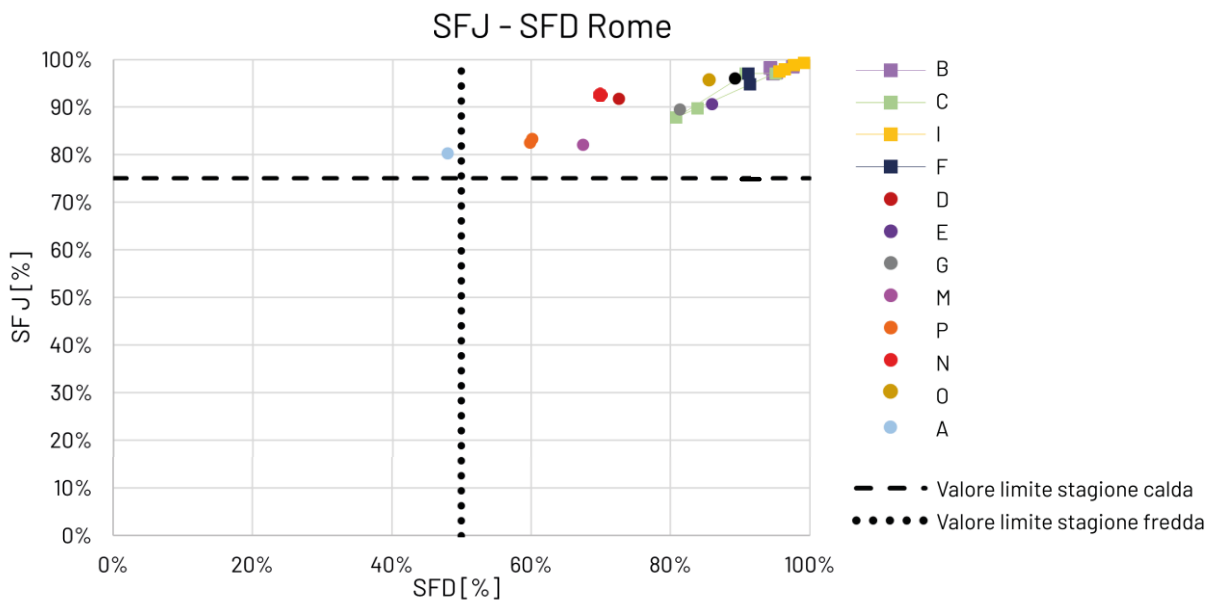
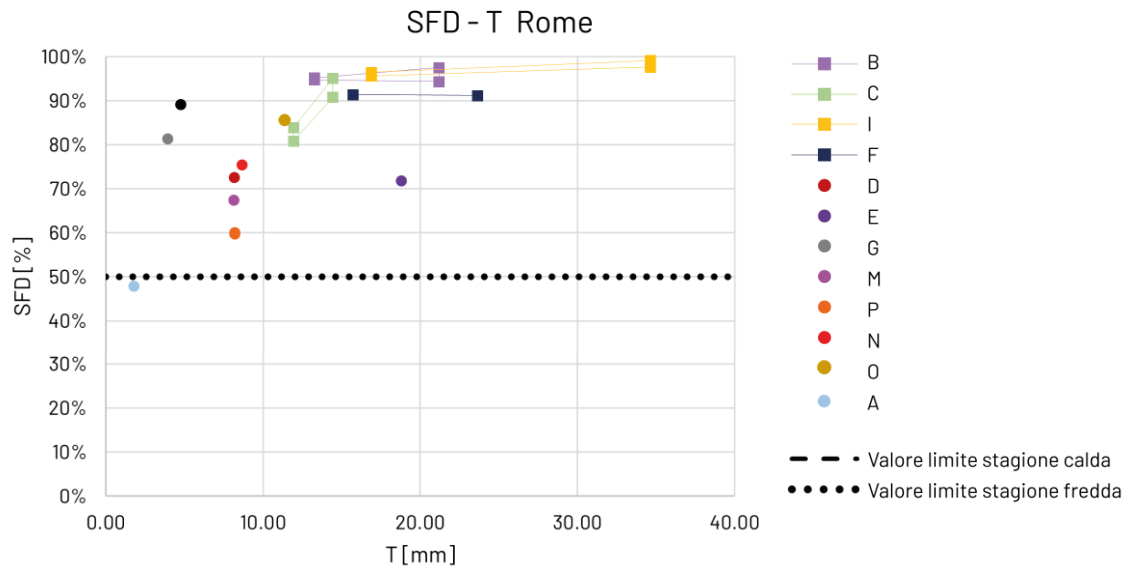
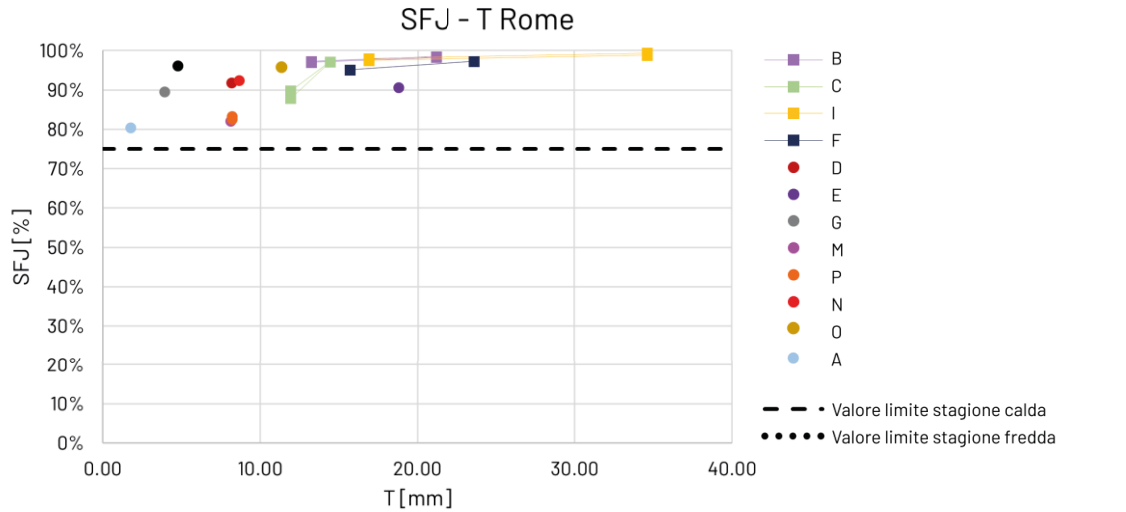


Figura 11 - Risultati dell'analisi per Roma riportati sui grafici SFJ-T, SFD-T, SFD-SFJ per tutti i campioni.

#### 7.5.4 Valutazione del parametro SF con differenti inclinazioni del campione.

Per alcuni campioni selezionati è stata valutata l'efficacia schermante in relazione a movimentazioni semplici (rotazione ad asse centrale: +10° estate; -10° inverno), incrementando così l'efficacia schermante del 5% e riducendola fino al 13% in inverno.

	Inclinaz.	SFj [%]	SFj [%]	SFj [%]	Inclinaz.	SFd [%]	SFd [%]	SFd [%]
		Milano	Roma	Palermo		Milano	Roma	Palermo
D	0°	90.8	91.0	90.7	0°	71.3	72.3	73.5
	5°	93.9	94.0	93.7	-5°	67.4	68.0	68.8
	10°	96.0	96.0	95.8	-10°	64.3	64.6	64.9
G	0°	91.4	91.7	91.5	0°	77.0	78.0	79.2
	5°	92.9	93.1	92.9	-5°	73.4	74.3	75.3
	10°	94.3	94.5	94.3	-10°	70.9	71.5	72.1
M	0°	84.6	85.5	85.9	0°	70.0	69.9	69.9
	5°	86.8	87.7	87.9	-5°	67.9	67.5	67.2
	10°	89.3	89.9	89.7	-10°	66.7	66.3	65.8
N	0°	91.2	91.5	91.1	0°	74.5	74.9	75.4
	5°	92.6	92.8	92.4	-5°	71.3	71.6	71.9
	10°	93.9	94.0	93.7	-10°	69.7	69.7	69.7

Tabella 4 - Fattore di schermatura dei campioni D, G, M, N per le inclinazioni -10°, -5°, 0°, 5°, 10°.

#### 7.5.5 Test di ottimizzazione geometrica

L'ottimizzazione geometrica è stata realizzata solo per i campioni a pannello (A, D, F, G, H, M, N, O). La geometria viene parametrizzata variando due dimensioni principali: la dimensione dei fori e la profondità. Per ciascuno, sono stati stabiliti cinque passaggi incrementali per ciascun parametro, risultando in un totale di 25 configurazioni possibili.

Diametro foro [mm]	Profondità [mm]
33.3	10
40	20
50	30
66.7	40
100	50

Tabella 5 - Valori dei parametri diametro foro e profondità combinati per il test di ottimizzazione geometrica.

La Tabella 6 mostra i risultati di ogni campione per le configurazioni ottimizzate con le migliori prestazioni, mentre per il campione N viene riportato il grafico esplicativo comprendente tutte le configurazioni (Figura 12).

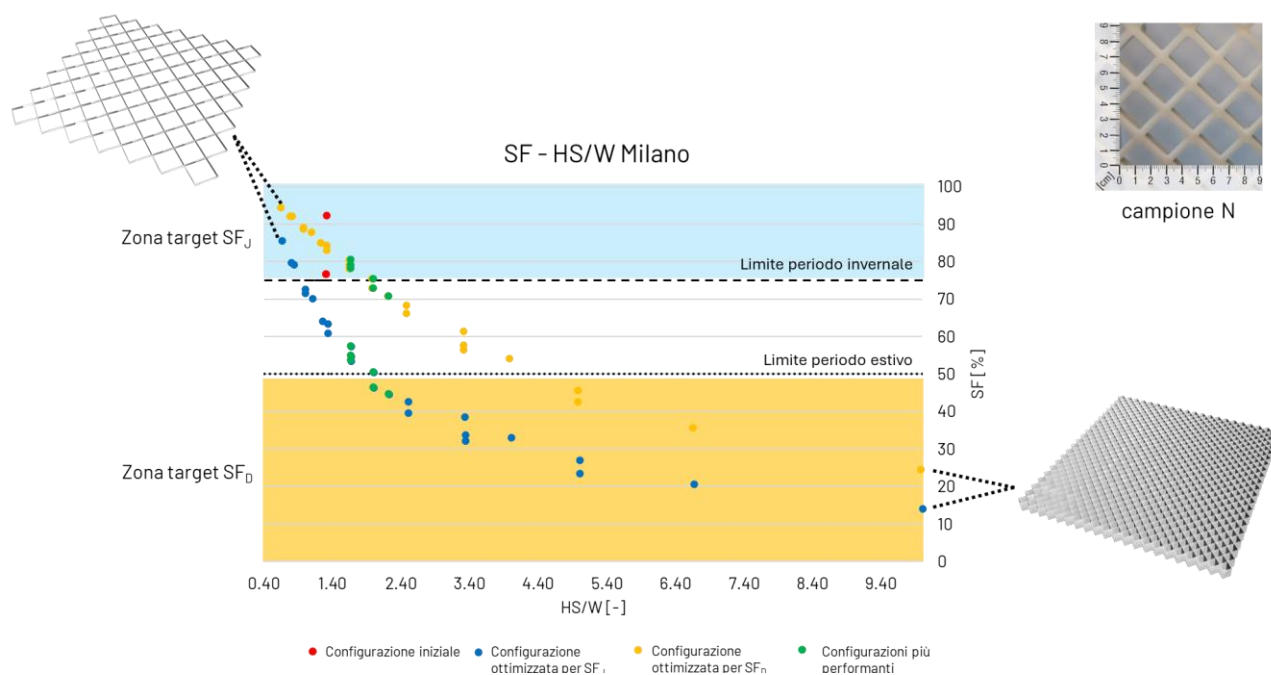


Figura 12 – Grafico efficienza materica – efficienza schermante per le configurazioni a geometria ottimizzata del campione N.

Campione	Diametro foro [mm]	Profondità [mm]	SFj [%]			SFd [%]			T [mm]
			MI	RO	PA	MI	RO	PA	
D	50	40	74.1	74.1	72.1	48.1	48.2	48.61	2.19
F	66.7	30	76.3	76.5	75.0	55.1	55.1	55.24	9.64
G	100	50	74.7	74.8	73.1	51.5	51.8	52.35	0.77
H	66.6	50	70.2	70.4	69.9	57.7	57.8	57.78	4.66
M	40	30	71.7	72.4	71.6	50.9	51.2	51.53	5.18
N	40	20	75.3	75.3	73.3	50.7	50.8	51.15	2.26
O	66.7	30	74.8	75.2	74.2	57.7	57.3	56.93	5.78

Tabella 6 – Risultati sintetici del fattore di schermatura per i mesi di giugno e dicembre e del parametro di efficienza materica nelle tre località per la configurazione ottimizzata migliore.

## 7.6 Simulazione di dettaglio tramite Bidirectional Scattering Distribution Function

La componente angolare di trasmissione e riflessione dei 12 campioni è stata simulata tramite BSDF (*Bidirectional Scattering Distribution Function*) offrendo vantaggi significativi per migliorare la qualità e il tempo delle simulazioni, riducendo i tempi di simulazione astruendo la complessità geometrica in una funzione di trasferimento. Il modello valuta la dipendenza angolare di trasmissione, diffusione e riflessione luminosa utilizzando il modello Klems, che suddivide l'emisfero di possibili direzioni di incidenza e uscita della radiazione in 145 patches (Figura 13). I file BSDF garantiscono compatibilità multiplatforma con strumenti come *LBNL Window*, *EnergyPlus* e *Radiance*, semplificando l'integrazione dei modelli di schermatura in simulazioni di illuminazione e termiche.

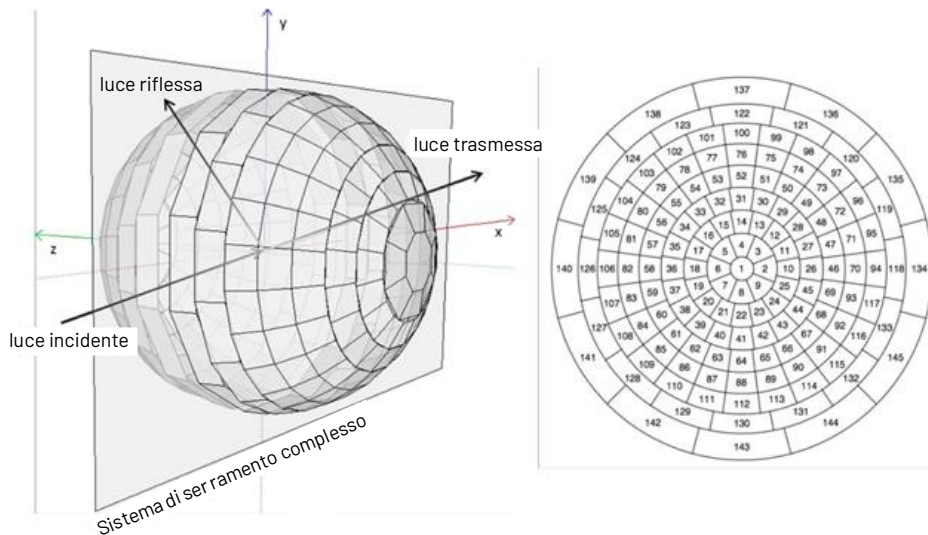


Figura 13 - Rappresentazione delle Patch del Cielo Klems

### 7.6.1 Fasi del Processo per la creazione del modello:

1. **Modellazione ed esportazione:** creazione della geometria in un software 3D ed esportazione in formato compatibile con *Radiance* (es. .obj);
2. **Conversione e configurazione:** trasformazione del file geometrico in un file *Radiance* tramite il comando *obj2rad*, assegnazione delle proprietà ottiche misurate del materiale ([paragrafo 7.4](#));
3. **Generazione del file BSDF tramite Radiance genBSDF.**
4. **Validazione:** dei risultati con strumenti come *BSDFViewer* (Figura 14).

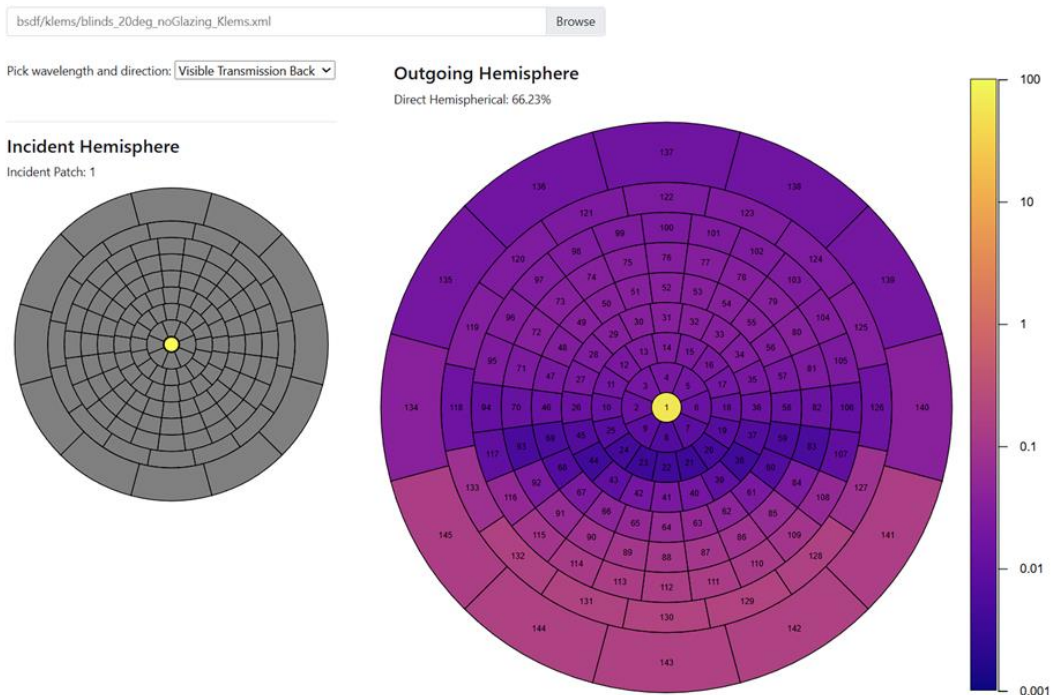


Figura 14 - Interfaccia BSDFViewer. È possibile selezionare la direzione di incidenza della radiazione (incident hemisphere) e ottenere il risultato di trasmissione e riflessione emisferica (outgoing hemisphere). Per le schede prodotto e figura 18 sono stati tracciati i valori di trasmittanza angolare lungo le direzioni x e y identificate dalle frecce in rosso (corrispondenti agli angoli di incidenza:  $0^{\circ}$ - $5^{\circ}$ ;  $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ;  $15^{\circ}$ - $25^{\circ}$ ;  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ;  $35^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ;  $45^{\circ}$ - $55^{\circ}$ ;  $55^{\circ}$ - $65^{\circ}$ ;  $65^{\circ}$ - $75^{\circ}$ ;  $75^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ).

## 7.6.2 Risultati BSDF: Trasmittanza luminosa angolare

Di seguito sono riportati i valori angolari di trasmittanza luminosa comparati al dominio di valori di un louver statico rapporto 1:1, lamelle orizzontali 0° e 45° calcolato secondo EN ISO 52022-3. I due grafici rappresentano due orientamenti possibili del campione sul piano di facciata.

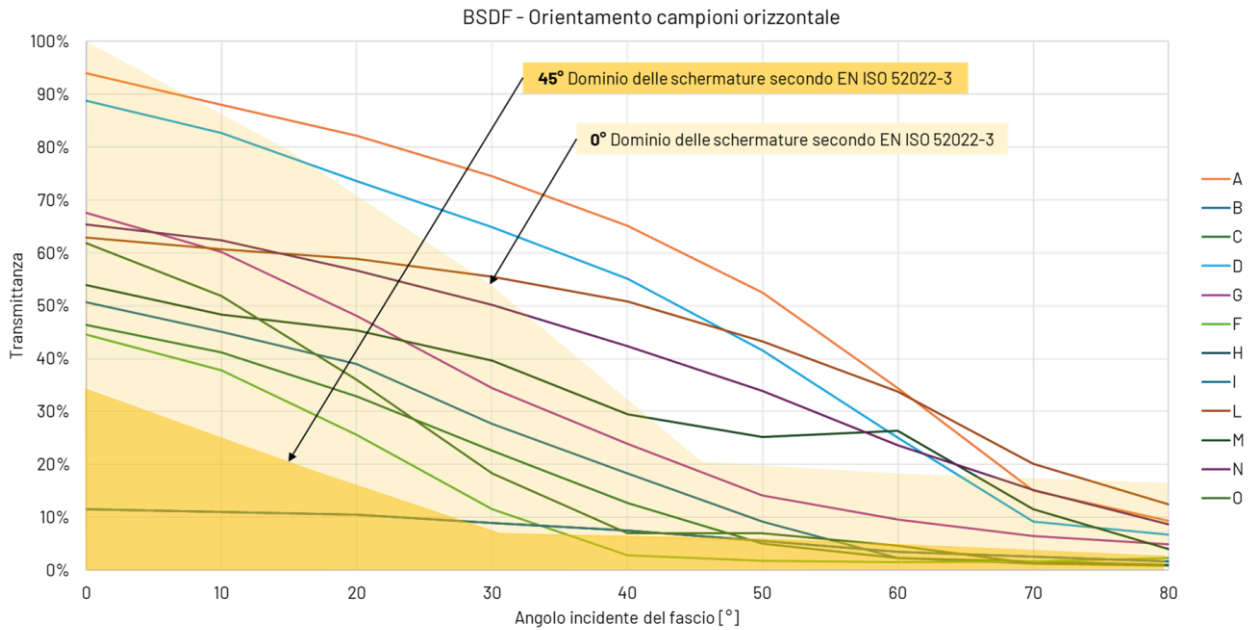


Figura 15 - Risultati BSDF per ogni campione posizionato orizzontalmente (direzione Y Figura 17), confrontati al dominio delle schermature secondo EN ISO 52022-3.

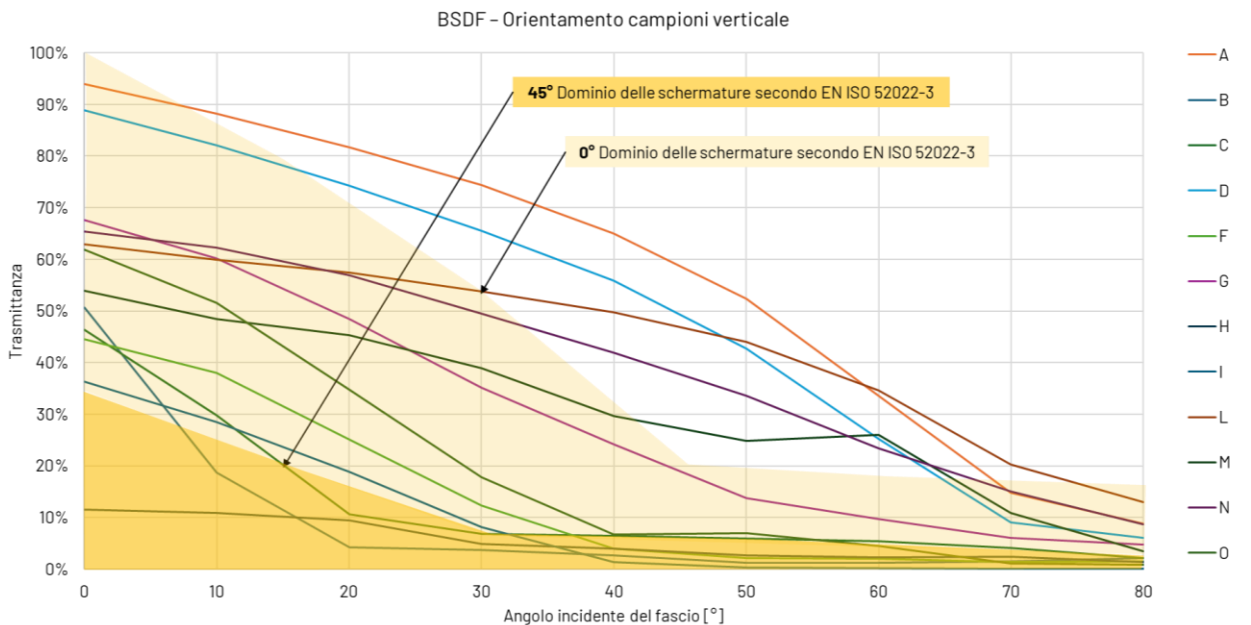


Figura 16 - Risultati BSDF per ogni campione posizionato verticalmente (Direzione X figura 17), confrontati al dominio delle schermature secondo EN ISO 52022-3.

## 7.7 Analisi Climate Based su campioni selezionati

### 7.7.1 Metodo e ipotesi di analisi, strumenti e valori di riferimento

L'analisi climate-based si è concentrata sui campioni A, M e N ([paragrafo 7.5](#)) per tre località italiane Milano, Roma e Palermo. Sono stati utilizzati *Rhino V7* per la modellazione delle geometrie, *Climate Studio V1.9* e *Radiance V5.2* per le simulazioni illuminotecniche e di apporti solari. I modelli BSDF sono stati utilizzati per tutte le analisi illuminotecniche, mentre per la gestione apporti solari le geometrie sono state ricostruite a meno di semplificazioni geometriche per limiti il calcolo del tool.

Per valutare comfort visivo e gli apporti solari in un contesto reale, è stato scelto il *Reinhart Reference Office*. Questo modello standardizzato, rappresentato in Figura 17, sviluppato da Christoph F. Reinhart (MIT), consente di confrontare tecnologie per facciate e illuminazione. Con dimensioni interne di 3,6x8,2x2,8 m, permette di valutare differenti livelli di penterazione della radiazione.

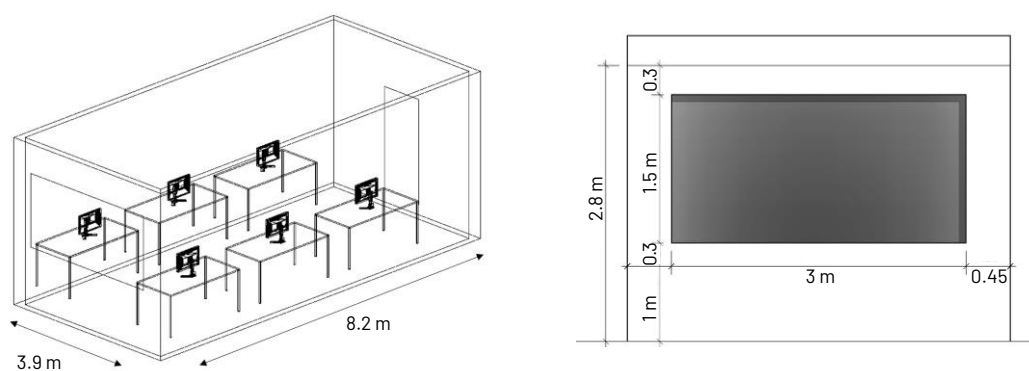


Figura 17 - Stanza di riferimento di Reinhart dimensioni.

Nell'**All. A - Tab. 3**, sono riassunte le impostazioni utilizzate per il calcolo.

### 7.7.2 Selezione delle metriche di analisi

UDI (Useful Daylight Illuminance), ASE (Annual Sunlight Exposure), illuminamento medio, point in time (Figura 18) e apporti solari sono stati scelti come metriche di analisi.

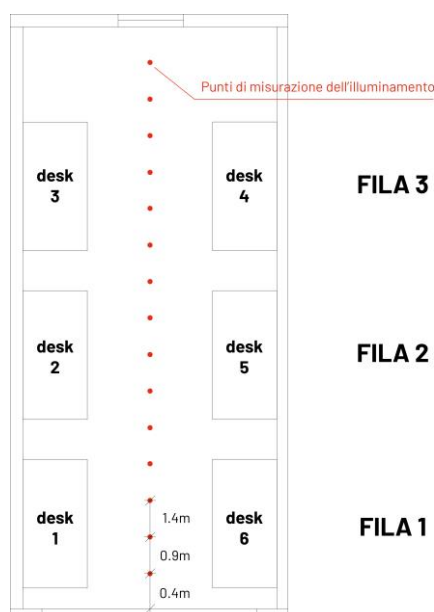


Figura 18 - Rappresentazione dei punti di misura dell'illuminamento e delle superfici di analisi dei tavoli di lavoro (desk), raggruppate per file Griglia di analisi 45x45 cm. Piano verticale di analisi per illuminamento.

Per la comparazione del comfort visivo, è stato aggiunto un campione di louver statico esterno rapporto geometrico 1:1, tramite con LBNL Window. Le lamelle sono orizzontali, riflettanza  $\rho$  superficie superiore 0.7, inferiore 0.4, emissività  $\epsilon$  0.9.

### 7.7.3 Risultati di UDI e Illuminamento medio

Per UDI e illuminamento medio, vengono riportati grafici esemplificativi in Figura 19, Tabella 7 e Figura 20, mentre i risultati in forma sintetica in **All. A- Tab. 4** per tutti i sistemi in configurazione statica e per tutte le località.

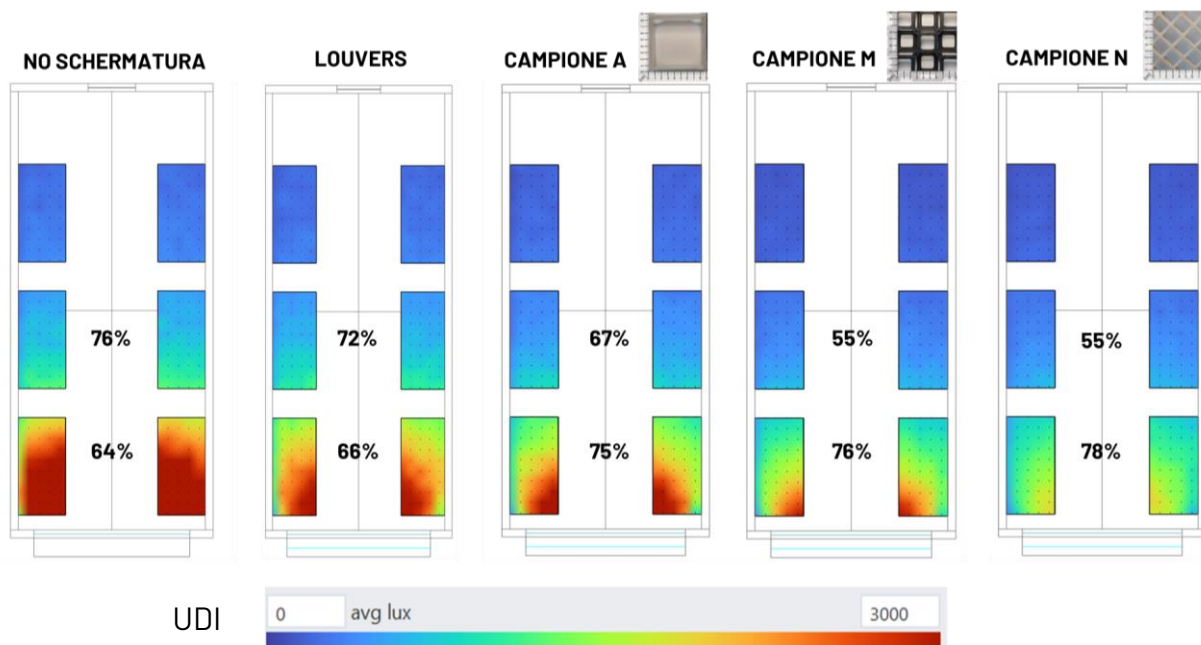


Figura 19 - Risultati UDI per le configurazioni della stanza di riferimento con solo vetro, louver statico, schermatura A, M, ed N in posizione statica parallela al piano del vetro. Valori per Milano. Valori misurati sul piano di lavoro.

Città	Fila	No schermatura	Louvers	A	M	N
Milano	I	62.1%	69.1%	70.2%	68.9%	69.9%
	II	66.6%	61.2%	55.9%	39.0%	45.5%
	III	31.1%	23.2%	17.4%	6.7%	7.8%
Roma	I	63.9%	65.7%	75.5%	76.3%	77.9%
	II	76.5%	72.7%	66.6%	55.6%	55.0%
	III	34.6%	43.8%	24.4%	11.4%	12.2%
Palermo	I	64.8%	74.1%	77.3%	77.5%	79.8%
	II	81.4%	75.4%	69.1%	57.4%	5.6%
	III	41.8%	31.3%	22.9%	12.7%	12.5%

Tabella 7 - Dati UDI per ogni desk (Figura 19) per Milano, Roma, Palermo per le configurazioni della stanza di riferimento con solo vetro, louver statico, schermatura A, M ed N in posizione statica parallela al piano del vetro.

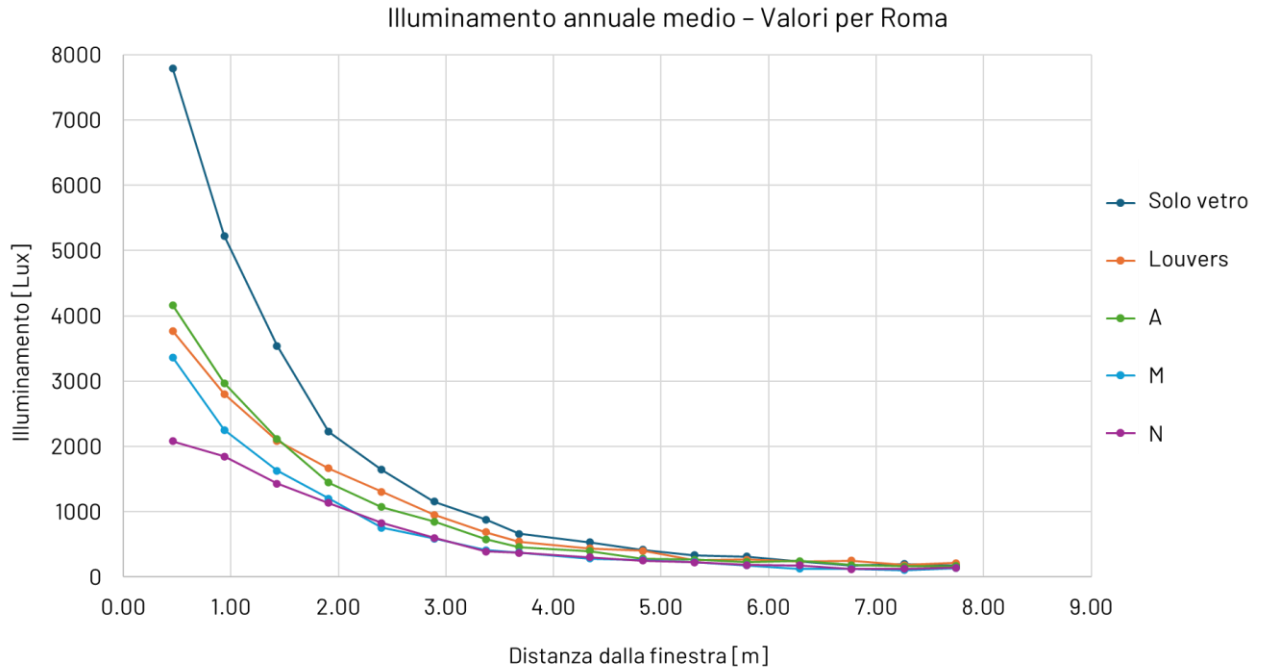


Figura 20 - Valori di illuminamento medio per i campioni A, M, N comparati sia a louver statico che per la configurazione senza schermatura per la stanza di riferimento di Figura 18 e per i punti individuati dalla griglia di analisi. Roma.

#### 7.7.4 Efficacia del sistema schermante statico e con movimentazioni semplici. Illuminamento orario

Si valuta l'illuminamento in relazione alla movimentazione dei layer (invernale  $-10^\circ$ , estiva  $+10^\circ$ ). Si riporta un diagramma tipo per campione e in **All. A - Tab. 5 e 6**.

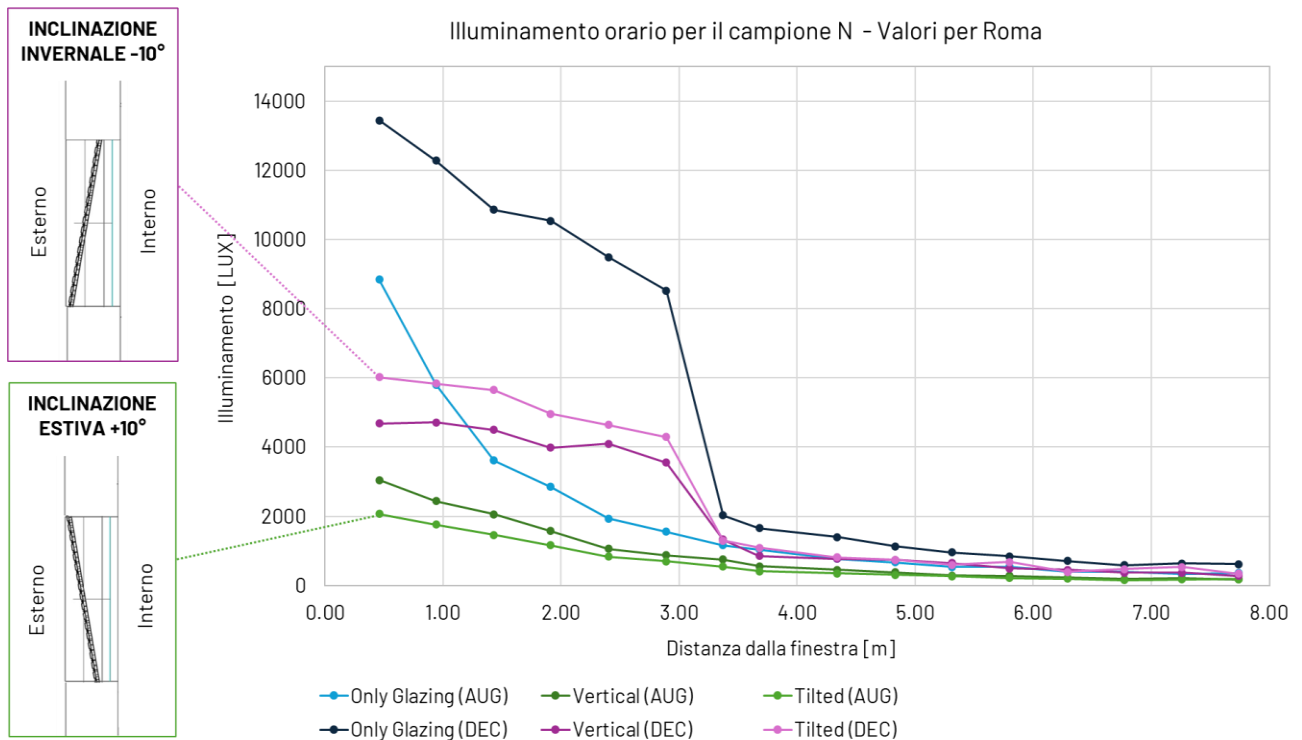


Figura 21 - Illuminamento orario misurato ogni 0.45 m dalla finestra il 21 Agosto ed il 21 Dicembre alle 12.30, misurati per la configurazione con solo vetro, e per le configurazioni del campione N verticali ed inclinate. Valori per Roma.

## Efficacia del sistema schermante statico e con movimentazioni semplici: apporti solari mensili

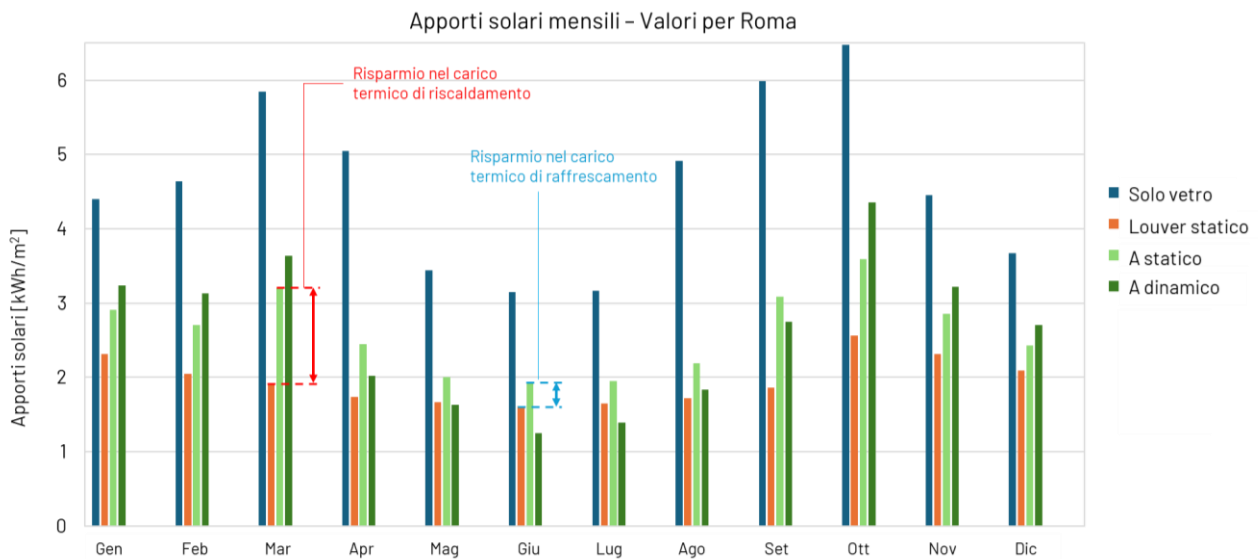


Figura 22 - Apporti solari per le configurazioni senza schermatura, con louvers, con campione A verticale statico e campione A inclinato dinamicamente (-10°C Aprile settembre, + 10°C Altri mesi. Valori per Roma.

### 7.7.5 Diagrammi di Kyviat per la comparazione dell'efficacia dei sistemi schermanti.

In seguito, diagrammi sintetici Kyviat per la comparazione dei sistemi rispetto a un sistema statico louvers.

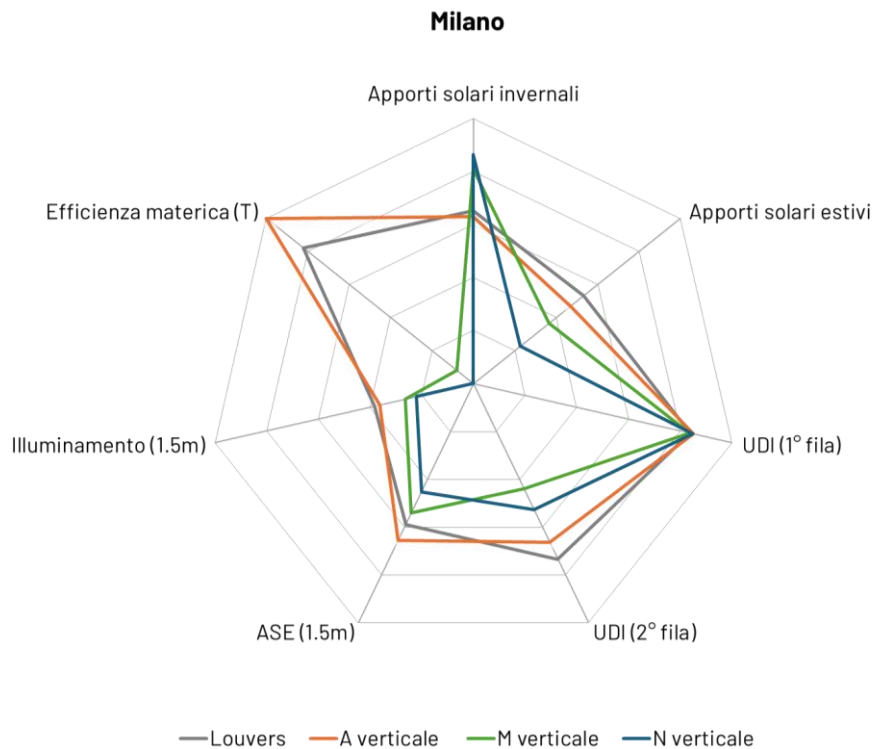


Figura 23 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Milano.

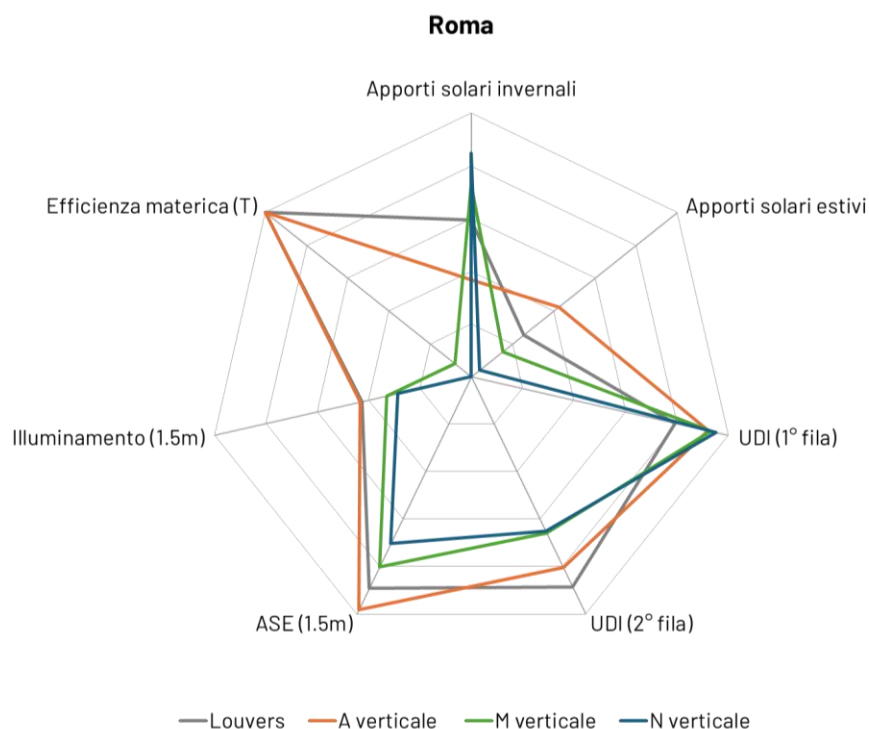


Figura 24 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Roma.

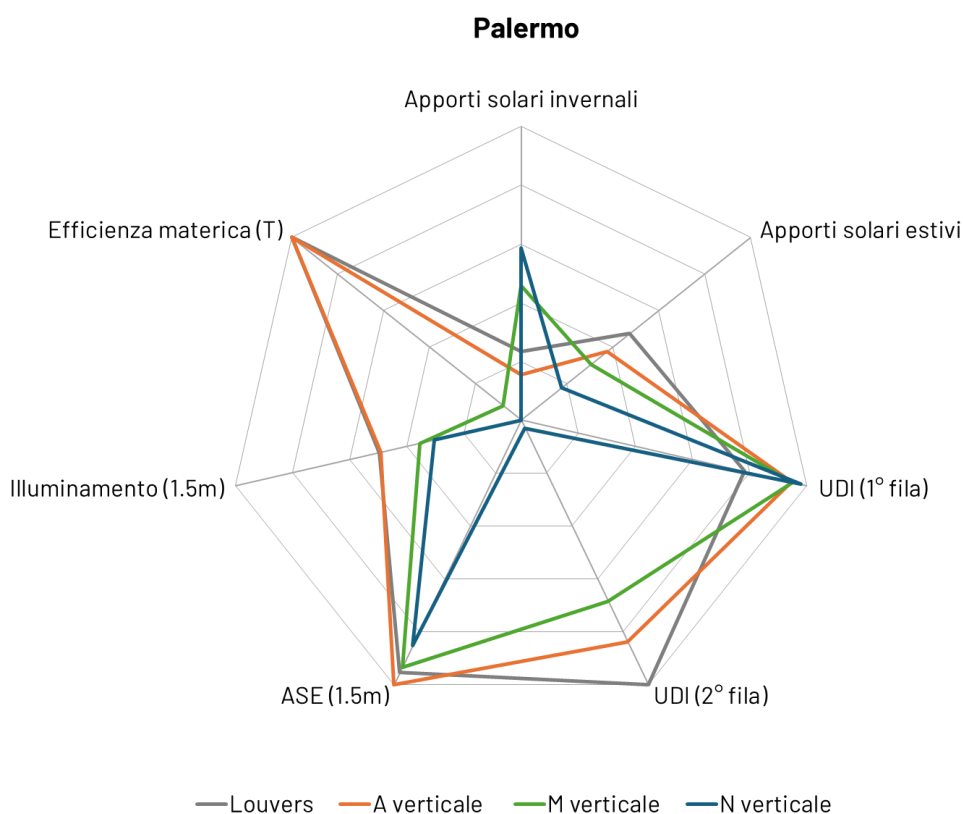


Figura 25 - Grafico radar per le configurazioni con schermatura a louvers, campione A, M ed N verticali fissi per Palermo.

## 7.8 Definizione dei sistemi di movimentazione

La ricerca è stata condotta in base alle tecnologie più diffuse presenti sul mercato, alle soluzioni architettoniche eccezionali in ambito di schermature solari e a meccanismi alternativi per la movimentazione di pannelli/lastre in settori diversi da quello edilizio (es.

design interni, automobilistico). Non sono stati presi in considerazione eventuali sistemi non compatibili con i campioni oggetto di studio.

### 7.8.1 Movimenti

Sono state individuate tre macrocategorie di movimenti:

<b>Cd.</b>	<b>Macrocategoria</b>	<b>Descrizione</b>
TR	Traslazioni	Pure traslazioni in una singola direzione
RO	Rotazioni	Pure rotazioni intorno un asse singolo
MM	Movimenti Multipli	Combinazione di traslazioni e rotazioni

Tabella 8 - Tabella macrocategorie movimentazioni. Con movimentazioni si intendono uno o un gruppo di movimenti che hanno lo scopo di regolare la posizione del pannello schermante rispetto all'infisso e la conseguente esposizione alla radiazione solare. Possono essere di apertura totale o parziale, automatici o manuali.

Sono state definite delle sottocategorie in base alla direzione dell'asse di riferimento e alla posizione dell'asse di rotazione rispetto il pannello schermante. I movimenti multipli sono stati divisi in base alle combinazioni di spostamenti di rotazione e di traslazione.

<b>Cd.</b>	<b>Cd.x</b>	<b>Cd.x.x</b>	<b>Descrizione</b>
TR	TR1	-	Traslazioni lungo asse X
	TR2	-	Traslazioni lungo asse Y
	TR3	-	Traslazioni lungo asse Z
RO	R01	R01.1	Rotazioni con asse cernierato centrato orizzontale (asse X)
		R01.2	Rotazione con asse cernierato centrato verticale (asse Y)
	R02	R02.1	Rotazione con asse cernierato laterale orizzontale (asse X)
		R02.2	Rotazione con asse cernierato laterale verticale (asse Y)
	R03	R03.1	Rotazione con asse cernierato esterno orizzontale (asse X)
		R03.2	Rotazione con asse cernierato esterno verticale (asse Y)
MM	MM1	MM1.1	Movimento a libro (gruppi di 3 cerniere) lungo asse X
		MM1.2	Movimento a libro (gruppi di 3 cerniere) lungo asse Y
	MM2	MM2.1	Doppia rotazione con asse orizzontale (asse X)
		MM2.2	Doppia rotazione con asse verticale (asse Y)
	MM3	MM3.1	Rotazione con asse lungo X e Traslazione lungo Z
		MM3.2	Rotazione con asse lungo Y e Traslazione lungo Z

Tabella 9 – Tabella sottocategorie movimentazioni

In ogni sottocategoria è possibile avere più modalità di apertura e chiusura del sistema in base alla direzione di spostamento lungo lo stesso asse al numero di pannelli e alla loro disposizione.

Per ogni sistema individuato sono state definite e riportate nelle schede:

- **Esposizione consigliata:** Per la tipologia di componente, abbinata al sistema di movimentazione (Orientamento SUD o EST/OVEST) per massimizzare l'efficacia del sistema schermante.
- **Flessibilità alla Latitudine:** Adattabilità del sistema rispetto alla latitudine del luogo in cui è installato. Si fa riferimento alle latitudini del Nord/Centro/Sud Italia.
- **Complessità del sistema:** Grado di complessità rispetto all'installazione, alla distribuzione dei carichi portati, al numero di componenti, ai gradi di vincolo e di libertà. La complessità va da 1 (bassa) a 3 (alta).

Nell' **All. A - Cap. 3** sono riportate le schede delle movimentazioni con illustrazioni grafiche esemplificative.

### 7.8.2 Meccanismi

In seguito, sono stati definiti i principali meccanismi di movimentazione compatibili con gli spostamenti come da [paragrafo 7.8.1](#).

Si fa eccezione per le movimentazioni MM2 ed MM3, in quanto sono state considerate plausibili ma non funzionali agli scopi del progetto e perché richiedono una modellazione in dettaglio secondo il caso di applicazione.

I meccanismi individuati sono stati schematizzati nelle loro componenti principali e ipotizzati staticamente per poter definire le diverse macrocategorie come da tabella seguente.

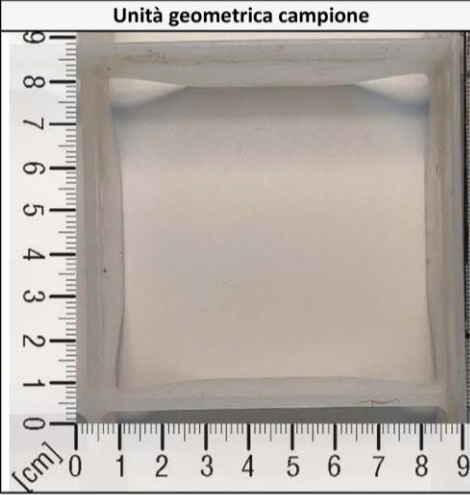

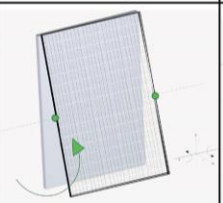
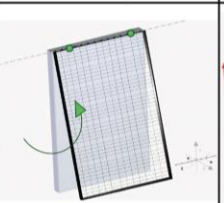
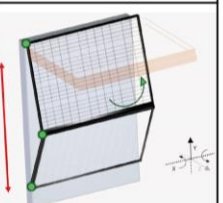
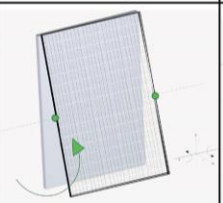
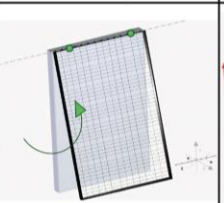
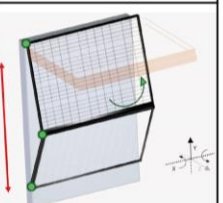
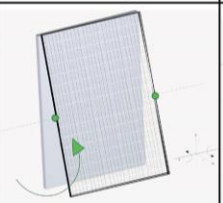
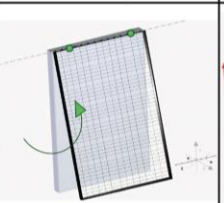
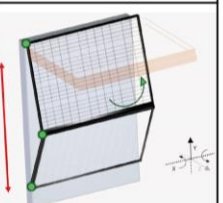
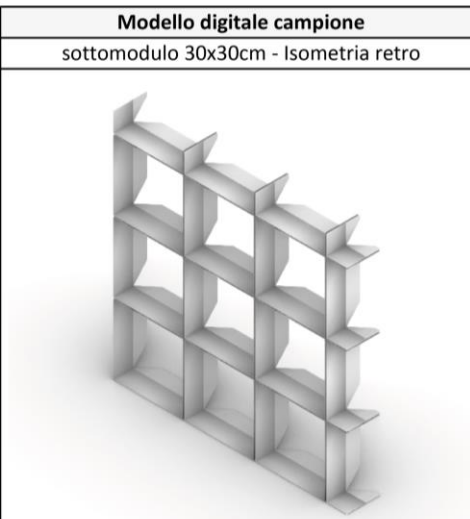
<b>Cd.</b>	<b>Nome Meccanismo</b>	<b>Descrizione</b>	<b>Componente Motrice</b>
m.A	Attuatore Lineare	Attuatore lineare elettrico cernierato al pannello schermate e all'infisso	Attuatore lineare elettrico
m.B	Attuatore Lineare e Trasmissione	Attuatore lineare cernierato all'infisso e collegato al pannello schermate tramite un elemento di trasmissione degli spostamenti	Attuatore lineare elettrico
m.C	Braccio e Carrello	Braccio motorizzato collegato al pannello schermante tramite vincolo a carrello	Braccio motorizzato
m.D	Carrello Diretto	Vincolo a carrello collegato a pannello schermante e messo in moto da un sistema di trasmissione degli spostamenti messo in moto da un motore a step	Motore a step
m.E	Carrello Articolato	Meccanismo formato da bracci, carrelli e cerniere con configurazione a pantografo o a libro in fase di movimento del pannello schermante o di chiusura/apertura dello stesso. Messo in moto da motore a step, elemento di trasmissione e carrello.	Motore a step

Tabella 10 - Tabella dei sistemi funzionali. Per ogni sistema funzionale è stata individuata la componente motrice ed è stato riportato un riassunto delle relative proprietà tecniche minime e massime in base alle tecnologie presenti sul mercato compatibili con l'ambito di applicazione.

Nell' **Allegato A Cap 4** vengono riportate le schede funzionali con relativa tabella riassuntiva e una legenda dei diversi schemi statici considerati.

## 7.9 Schede Prodotto

Si riporta a titolo esemplificativo la scheda prodotto per la mesh A, mentre le restanti schede prodotto possono essere visionate in **Allegato A Cap. 5**.

SCHEDA PRODOTTO	Mesh plastica A	CODICE CAMPIONE																									
		A	pg.A1																								
<p><b>Descrizione</b></p> <p>Griglia a celle quadrate 89x89mm tridimensionale. Lo spessore massimo del materiale plastico è di 2mm, mentre lo spessore del campione massima è 43mm. La percentuale di vuoto su pieno è 96%</p>		<p><b>Unità geometrica campione</b></p> 																									
<p><b>Materiale</b> HDPE</p> <p><b>Colore</b> Bianco</p> <p><b>Fornitura</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Modulo tipico</td> <td>50x20cm, 13x20cm</td> </tr> <tr> <td>Dimensione massima</td> <td>50x20cm</td> </tr> </table>				Modulo tipico	50x20cm, 13x20cm	Dimensione massima	50x20cm																				
Modulo tipico	50x20cm, 13x20cm																										
Dimensione massima	50x20cm																										
<p><b>Settore di appartenenza</b> Ristorazione</p> <p><b>Applicazione corrente</b></p>		<p><b>Modello digitale campione</b> sottomodulo 30x30cm - Prospettiva fronte</p> 																									
<p><b>Potenzialità applicative come schermatura solare</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Posizione</th> <th>Esterno</th> <th>Interno</th> <th>Intercapedine</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>x</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>Configurazione statica di base</th> <td>Parallela</td> <td>Perpendicolare</td> <td>Lamella</td> </tr> <tr> <td></td> <td>x</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p><b>Movimentazioni consigliate</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>RO1 singolo</th> <th>RO2 singolo</th> <th>MM1 singolo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>*altre movimentazioni adattabili al campione si trovano nelle Schede Movimentazioni</p>				Posizione	Esterno	Interno	Intercapedine		x			Configurazione statica di base	Parallela	Perpendicolare	Lamella		x			RO1 singolo	RO2 singolo	MM1 singolo					
Posizione	Esterno	Interno	Intercapedine																								
	x																										
Configurazione statica di base	Parallela	Perpendicolare	Lamella																								
	x																										
RO1 singolo	RO2 singolo	MM1 singolo																									
																											
<p><b>Proprietà qualitative</b></p> <p>Legenda punteggi: ■ bassa, ■■ media, ■■■ alta</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Costo al m<sup>2</sup></td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Massa per unità di superficie</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Resistenza a trazione</td> <td>■■■</td> </tr> <tr> <td>Resistenza a flessione</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Reazione al fuoco</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Resistenza agli UV</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Resistenza allo sporco</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Permeabilità all'aria</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Permeabilità visiva**</td> <td>■■■</td> </tr> <tr> <td>Impatto visivo**</td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Resa architettonica per applicazioni in facciata**</td> <td>■■■</td> </tr> <tr> <td>Frazione riciclabile</td> <td>■■■</td> </tr> </tbody> </table> <p>**valutate con campione parallelo alla vetratura</p>				Costo al m <sup>2</sup>	■	Massa per unità di superficie	■	Resistenza a trazione	■■■	Resistenza a flessione	■	Reazione al fuoco	■	Resistenza agli UV	■	Resistenza allo sporco	■	Permeabilità all'aria	■	Permeabilità visiva**	■■■	Impatto visivo**	■	Resa architettonica per applicazioni in facciata**	■■■	Frazione riciclabile	■■■
Costo al m <sup>2</sup>	■																										
Massa per unità di superficie	■																										
Resistenza a trazione	■■■																										
Resistenza a flessione	■																										
Reazione al fuoco	■																										
Resistenza agli UV	■																										
Resistenza allo sporco	■																										
Permeabilità all'aria	■																										
Permeabilità visiva**	■■■																										
Impatto visivo**	■																										
Resa architettonica per applicazioni in facciata**	■■■																										
Frazione riciclabile	■■■																										
		<p><b>Modello digitale campione</b> sottomodulo 30x30cm - Isometria retro</p> 																									

Eventuali note: questo campione è stato caratterizzato nonostante non sia presente la scheda tecnica, perciò le proprietà relative al materiale non vengono riportate.

SCHEDA PRODOTTO	Mesh plastica A	CODICE CAMPIONE	pg.A2
		A	

Percentuale di vuoto su pieno modulo intero [%]	96	
Variazione della percentuale di vuoto su pieno [%]	6.3	
<p>Note: la misurazione è eseguita con area di riferimento di diametro 8cm centrata in 1. La variazione della percentuale di vuoto su pieno è calcolata considerando il modulo intero e le tre differenti aree rappresentate nell'immagine a destra.</p>		

Proprietà misurate							
Proprietà materiale costituente il campione				Proprietà del campione			
Proprietà solari		Proprietà luminose		Proprietà solari		Proprietà luminose	
$\tau_{e, mat}$ [%]	$\rho_{e, mat}$ [%]	$\tau_{v, mat}$ [%]	$\rho_{v, mat}$ [%]	$\tau_{e, camp}$ [%]	$\rho_{e, camp}$ [%]	$\tau_{v, camp}$ [%]	$\rho_{v, camp}$ [%]
53%	23%	50%	29%	83%	1%	91%	1%
Trasmittanza e Riflettanza UV-Vis-NIR (-) del materiale				Trasmittanza e Riflettanza Vis-NIR (-) del campione			

Proprietà simulate										
Trasmittanza luminosa con campione a Orizzontale e Verticale						Schermatura della volta con campione a 45° ed angolo di incidenza del raggio 30°				
Angolo di incidenza del raggio	[0°-5°]	[5°-15°]	[15°-25°]	[25°-35°]	[35°-45°]	[45°-55°]	[55°-65°]	[65°-75°]	[75°-90°]	Simmetrico
Campione	Orizzontale	94%	82%	65%	34%	9%	0%	0%	0%	yes
	Verticale	94%	82%	65%	34%	9%	0%	0%	0%	

Eventuali note:

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze per le attività all'interno dell' LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Zani, A., Speroni, A., Mainini, A.G., Zinzi, M., Caldas, L. and Poli, T. (2024), "Customized shading solutions for complex building façades: the potential of an innovative cement-textile composite material through a performance-based generative design", *Construction Innovation*, Vol. 24 No. 1, pp. 256-279. <https://doi.org/10.1108/CI-01-2023-0014>

Accettato l'abstract M. Zinzi, A.G. Mainini, G. Basso, A. Mohamed, E. Casolari, A. Speroni, "Plastic Meshes for Solar Control: Characterization, Optical Measurements, and Shading Efficiency" per la Conferenza 2025 Buildings XVI che si terrà dall' December 8-11, 2025, in Clearwater Beach, FL.

## 10 Eventi di disseminazione

Partecipazione al convegno “Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica” – Progetto 1.5 del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca Sistema Elettrico Nazionale. 28 Novembre 2024, Roma, Centro Congressi Frentani