

**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



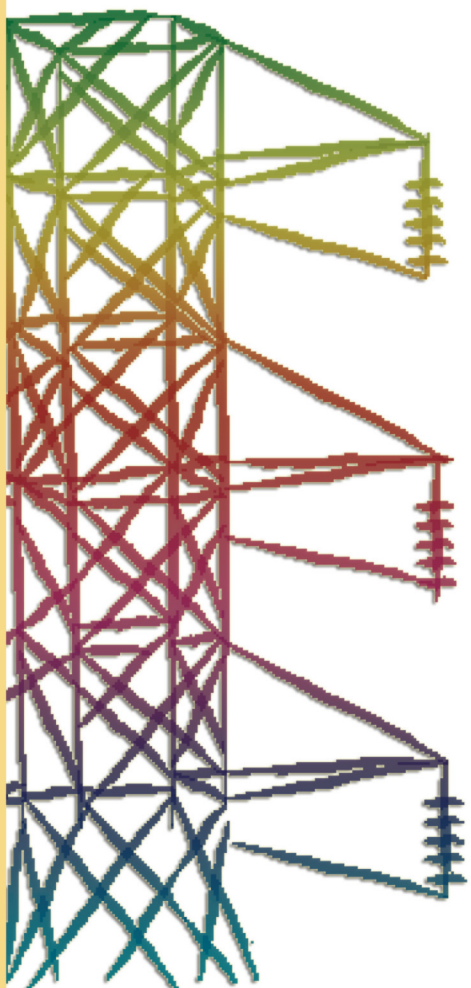
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermanti**

**Michele Zinzi**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e  
sistemi schermanti

*Michele Zinzi*

## CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DI MATERIALI TRASPARENTI INNOVATIVI E SISTEMI SCHERMANTI

Michele Zinzi (ENEA)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione.

Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Marco Citterio, ENEA

Questo documento è un estratto di un'ampia attività sviluppata da ENEA con Stazione Sperimentale del Vetro, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Istituto per le Tecnologie della Costruzione del CNR. Gli autori dei rapporti tecnici, di cui questo documento è una sintesi, sono: A. Bellazzi, N. Bo, A. D'Este, A. Daneo, L. Danza, P. Iacomussi, I. C. Maffè, G. Melani, Meroni, M. C. Pollastro, G. Rossi, G. Scialpi.



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e  
sistemi schermanti

*Michele Zinzi*

## CARATTERIZZAZIONE E VALUTAZIONE DI MATERIALI TRASPARENTI INNOVATIVI E SISTEMI SCHERMANTI

Michele Zinzi (ENEA)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione.

Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Marco Citterio, ENEA

Questo documento è un estratto di un'ampia attività sviluppata da ENEA con Stazione Sperimentale del Vetro, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Istituto per le Tecnologie della Costruzione del CNR. Gli autori dei rapporti tecnici, di cui questo documento è una sintesi, sono: A. Bellazzi, N. Bo, A. D'Este, A. Daneo, L. Danza, P. Iacomussi, I. C. Maffè, G. Melani, Meroni, M. C. Pollastro, G. Rossi, G. Scialpi.

## 1. Introduzione

I componenti trasparenti sono un elemento fondamentale dell'involucro edilizio, tra le varie funzioni svolgono: isolamento termico dell'edificio, regolano gli apporti solari, consentono di illuminare naturalmente l'edificio e garantiscono la relazione visiva dell'uomo con lo spazio esterno. L'innovazione tecnologica dei materiali è stata notevole negli ultimi decenni, con attenzione crescente per gli aspetti relativi alle prestazioni energetiche e luminose dei componenti. Questa necessità ha avuto una duplice origine: da una parte una maggiore attenzione per i problemi legati ai fenomeni energetici ed ambientali che incombono a livello planetario e globale, dall'altro alla constatazione che il massiccio uso di superfici vetrate, tipico di molta architettura del '900 era causa di enormi consumi energetici negli edifici e severa condizione di discomfort termico e luminoso per gli occupanti di tali edifici.

Il panorama dei sistemi trasparenti è oggi popolato da una serie di prodotti innovativi ad alte prestazioni, alcuni disponibili sul mercato, altri in fase avanzata di sviluppo. Contemporaneamente tecnologie ormai consolidate, quali i vetri a bassa emissività, vedono migliorare di continuo le proprie prestazioni. Attualmente si è in grado di realizzare vetri con emissività pari a 0.01 a fronte del valore di 0.89 del vetro standard o dello 0.3, tipico dei vetri basso emissivi prodotti fino a meno di 10 anni fa. Le principali innovazioni in materia di involucro trasparente si possono riassumere nei seguenti punti:

- Vetri ad elevato potere isolante. Tecnologia che si basa sull'uso di aerogel e *geoemtric media*, ovvero strutture estruse trasparenti in polycarbonato o polimetilmetacrilato, da inserire nell'intercapedine del classico vetrocamera. Questi prodotti sono caratterizzati da valori molto bassi di trasmittanza termica (paragonabili a quelli di strutture opache) ed elevati guadagni solari e trasmissione luminosa.
- Vetri cromogenici. Tecnologia altamente innovativa che consente di variare la colorazione del vetro e modificarne, di conseguenza le caratteristiche luminose e solari. La transizione da uno stato chiaro ad uno colorato, incluse le transizioni intermedie, possono essere attivate da: impulsi elettrici, temperatura, radiazione solare. La tecnologia più avanzata è quella elettrocromica, già presente sul mercato dell'edilizia anche se con costi molto elevati.
- Sistemi di daylighting (illuminazione naturale). Si tratta di materiali e componenti in grado di intercettare la radiazione solare diretta ed indirizzarla all'esterno o, alternativamente, verso le zone più interne e meno luminose dell'edificio. Le tecnologie principali sono: vetri prismatici, film olografici, lamelle veneziane a profilo complesso con elevata riflessione luminosa.
- Sistemi schermanti. La tecnologia investe sia il materiale che il sistema di controllo. Per il secondo sono possibili soluzioni mobili integrate con sistemi BEMS o domotici con algoritmi dedicati all'efficientamento energetico dell'edificio ed al comfort visivo per gli utenti. I materiali utilizzati prevedono l'uso di superfici trattate con materiali basso emissivi per ridurre gli scambi termici e superfici ad elevata riflessione speculare per ottimizzare la funzione di redirectionamento della luce intercettata.
- Infissi. Tecnologia in continuo progresso soprattutto per profili metallici ed in PVC. La possibilità di realizzare profili cavi, fino a sette camere, consente di migliorare notevolmente il potere isolante. Anche i distanziatori di ultima generazione contribuiscono a limitare notevolmente gli scambi termici lungo il ponte termico infisso/componente vetrato.

Allo sviluppo tecnologico segue però un adeguamento piuttosto lento del parco normativo, attualmente non in grado di far fronte alla necessità di definire metodi e procedure standardizzate per il calcolo e la misura di sistemi trasparenti, tipo quelli presentati ai punti precedenti.

Ancora più lento è l'adeguamento del mercato a questa nuova disponibilità di tecnologia, sicuramente più onerosa ma in grado di migliorare notevolmente le prestazioni energetiche degli

edifici. Una maggiore sensibilità legata a quest'ultimo aspetto ha avuto la funzione di incrementare la penetrazione sul mercato in quei paesi, tipicamente Germania e Nord Europa, nei quali il problema è storicamente avvertito. Si avverte altrove la necessità di un quadro legislativo che regoli ed, eventualmente, supporti economicamente l'edilizia ed i materiali ad elevate prestazioni energetiche.

In questo documento si presentano gli aspetti legati alla caratterizzazione dei sistemi trasparenti e schermanti innovativi attraverso opportuni strumenti e procedure di misura. In particolare, si presentano i risultati su una serie di sistemi innovativi, che possono essere utilizzati dagli utenti come dati di input in strumenti di calcolo dedicati o come linee guida nella scelta dei sistemi trasparenti in relazione alle caratteristiche ed alla destinazione d'uso dell'edificio. È inoltre presentato lo sviluppo di un tool dedicato al calcolo delle proprietà luminose, solari e termiche di sistemi trasparenti integrati con elementi schermanti.

## **2. Il quadro normativo**

Le attuali norme tecniche nazionali in materia di caratterizzazione dei materiali trasparenti e dei componenti finestrati consistono generalmente nel recepimento delle principali norme europee ed internazionali (ISO). L'elenco seguente ne riporta le principali:

- UNI EN 410:2000 Vetro per edilizia - Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate.
- UNI EN 12898:2002 Vetro per edilizia - Determinazione dell'emissività
- UNI EN 673:2005 Vetro per edilizia - Determinazione della trasmittanza termica (valore U) - Metodo di calcolo
- UNI EN 13363-1:2008 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 1: Metodo semplificato
- UNI EN 13363-2:2006 Dispositivi di protezione solare in combinazione con vetrate - Calcolo della trasmittanza solare e luminosa - Parte 2: Metodo di calcolo dettagliato
- UNI EN 12207:2000 Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Classificazione
- UNI EN 1026:2001 Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Metodo di prova
- UNI EN 12412-2:2004 Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda – Telai
- UNI EN ISO 12567-1:2002 Isolamento termico di finestre e porte - Determinazione della trasmittanza termica con il metodo della camera calda - Finestre e porte complete
- UNI EN ISO 10077-1:2007 Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità
- UNI EN ISO 10077-2:2004 Prestazione termica di finestre, porte e chiusure - Calcolo della trasmittanza termica - Metodo numerico per i telai

Il quadro normativo nazionale ed internazionale, tuttavia ha ancora notevoli limitazioni per caratterizzazione fotometrica e termica di componenti complessi. Si ritiene fondamentale affrontare la normazione delle proprietà di questi materiali per via numerica o, qualora la complessità sia tale da non consentire lo sviluppo di modelli con validità generale, per via misura, avendo cura nel definire per ogni procedura ed apparato sperimentale i margini di errore della misura stessa.

L'analisi dei metodi di misura ha poi evidenziato come le norme non si aggiornino in funzione dell'attuale strumentazione da laboratorio, con lo svantaggio di avere forti limitazioni. Ad esempio

l'utilizzo delle sfere integratrici di grande diametro non è presa in considerazione, con limitazioni sulla complessità dei campioni da testare. Viceversa la norma sulle misure di emissività si basa su strumenti in grado di fare analisi fino a lunghezze d'onda che i moderni strumenti non raggiungono. In questo caso non adeguare la norma, seppure con opportuni accorgimenti, vincola i laboratori di misura a restare ancorati a strumentazione molto precisa ed accurata ma al di fuori degli attuali standard metrologici.

### 3. Analisi Spettrofotometrica

Metodo classico di valutazione delle proprietà ottiche e termiche dei materiali (coefficienti riflessione, trasmissione ed assorbimento), attraverso analisi spettrale alle varie lunghezze d'onda. Consiste nell'osservare, singole lunghezza d'onda di un raggio incidente un dato materiale provino, la quota parte del raggio incidente riflessa e la quota parte trasmessa (vedi le superfici trasparenti).

Gli spettrofotometri si suddividono in spettrofotometri che operano nel visibile, nell'ultravioletto e negli infrarossi vicini (NIR) e spettrofotometri che analizzano le radiazioni nel campo degli infrarossi lontani (emettitori ad incandescenza e recettori a termocoppia). Questi strumenti sono adatti per la misura della trasmittanza di materiali a comportamento prevalentemente speculare, ovvero senza diffusione della radiazione trasmessa. Mentre le misure di riflettanza possono essere eseguite su materiali diffondenti se lo spettrofotometro è accoppiato a sfere integratrici di piccolo diametro. Altro limite è la regolarità del materiale, che deve avere un passo minore del raggio incidente per garantire l'accuratezza della misura. La maggior parte degli spettrofotometri commerciali ha le sorgenti con raggio inferiore ad alcuni millimetri, questo limita molto la complessità geometrica e formale dei materiali da misurare. Questa attività è dedicata alle misure di elementi regolari come le lamelle per veneziane, materiale per il quale lo strumento consente un'elevata accuratezza di misura.

Le misure di riflettanza spettrale emisferica con angolo di incidenza di 5° 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, vedi figura 1. 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 a raffreddamento Peltier per l'intervallo NIR) le cui caratteristiche dichiarate dal costruttore sono:

- accuratezza in lunghezza d'onda:  $\pm 0.08$  nm;
- accuratezza fotometrica:  $\pm 0.08$  T(%) ad assorbanza = 1,  $\pm 0.05$  T(%) ad assorbanza = 0.5;
- stabilità dello zero: 0.00046 T per ora.

Come riferimento per le misure di riflettanza è stata utilizzata una piastrella di ceramica bianca (SRM2019) la cui riflettanza è certificata dal NBS (ora NIST). Le curve ottenute sono state rese "assolute" utilizzando la formula

$$\rho_{\text{ass}}(\lambda) = \frac{\rho_{\text{mis}}(\lambda) - \text{zero}(\lambda)}{\text{std}_{\text{mis}}(\lambda) - \text{zero}(\lambda)} \text{std}_{\text{ass}}(\lambda)$$

essendo:

- $\rho_{\text{mis}}(\lambda)$  è la curva di riflettanza spettrale del campione sotto analisi;
- $\text{zero}(\lambda)$  è la curva spettrale misurata in assenza del campione per tenere conto della straylight;
- $\text{std}_{\text{mis}}(\lambda)$  è la curva di riflettanza spettrale del campione di ceramica SRM2019;
- $\text{std}_{\text{ass}}(\lambda)$  è la curva di riflettanza spettrale del campione di ceramica SRM2019 certificata da NIST.



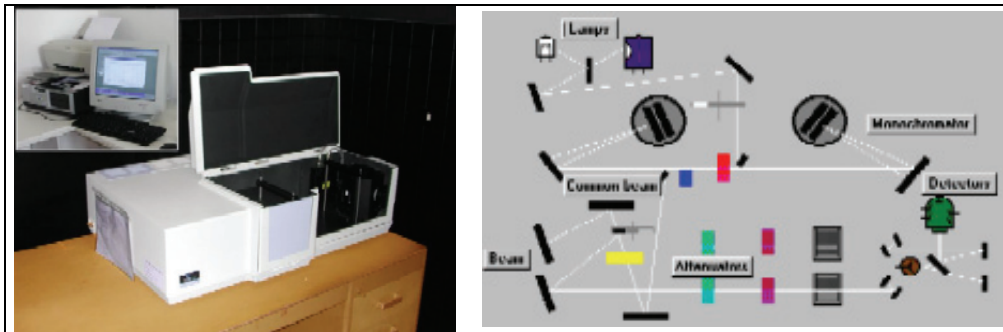


Figura 1. Immagine e schema ottico dello spettrofotometro Perkin Elmer 900

La calibrazione in lunghezza d'onda dello spettrofotometro nell'intervallo visibile è stata verificata con l'apposito filtro certificato NBS (SRM2010). L'accuratezza fotometrica dello spettrofotometro nell'intervallo visibile è stata verificata con gli appositi filtri certificati SIT (SRM 930D).

Poiché i materiali sotto analisi presentavano caratteristiche diffondenti lo spettrofotometro era equipaggiato con un accessorio a sfera integratrice PELA1500. 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 di materiali con caratteristiche diffondenti non troppo marcate.

Le misure sono state eseguite utilizzando i seguenti parametri di scansione:

- slit width: (UV-vis) 2 nm, NIR (servo mode)
- gain: 1
- tempo di integrazione: 0.52 s
- velocità di scansione: 107 nm/min (UV-vis), 115 nm/min (NIR)
- passo di lettura: 1 nm

I dati ottenuti sono stati elaborati seguendo le procedure di calcolo specificate nella norma EN 410: 1998 "*Glass in building – Determination of luminous and solar characteristics of glazing*" per determinare il fattore di riflessione luminosa ed il fattore di riflessione energetica e il fattore solare del componente.

I materiali testati sono lamelle in alluminio con eventuali trattamenti i database sono disponibili presso ENEA e SSV su richiesta. Le lamelle standard sono a comportamento prevalentemente diffondente e con le due facce identiche. Sono poi stati analizzati campioni più complessi, con diverse finiture superficiali e con le due facce differenti. Il lato convesso ha il compito di diffondere la luce in interno e può avere comportamento diffondente o regolare, i valori di riflettanza luminosa sono maggiori rispetto al lato concavo. Quest'ultimo è a comportamento prevalentemente diffondente per evitare fenomeni di abbagliamento per gli utenti. Per i campioni che presentavano le due facce diverse tra loro la misura è ripetuta per entrambe le facce e separate nelle componenti diffusa e totale. La figura 2 è esemplificativa, infatti la riflettanza luminosa del lato convesso è 82.6%, di cui solo il 5.6% non è a comportamento speculare. Il lato convesso ha una riflettanza del 27.6% e la componente diretta è solo 1%. È importante notare che la componente diffusa del lato speculare ha una banda di errore non trascurabile, infatti la curvatura della lamella ha reso critico il posizionamento della stessa nello strumento in quanto il raggio riflesso subiva delle deviazioni che non sempre consentivano di misurare accuratamente la componente diretta della radiazione riflessa.

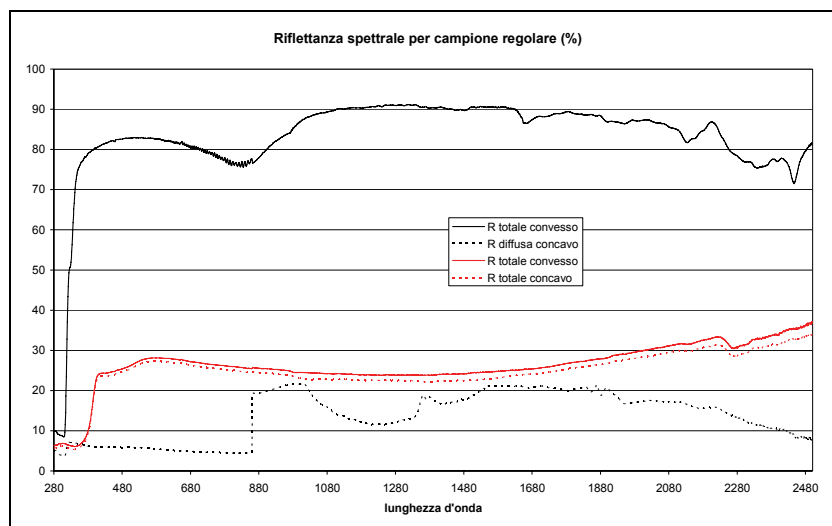


Figura 2. Curve spettrali del campione a comportamento speculare

I risultati di questo studio sono particolarmente importanti nell'applicazione di software complessi per il calcolo delle prestazioni energetiche ed illuminotecniche degli edifici equipaggiati con sistemi schermanti. In questo caso conoscere il comportamento dei materiali in modo accurato è un input fondamentale per la corretta esecuzione dell'analisi.

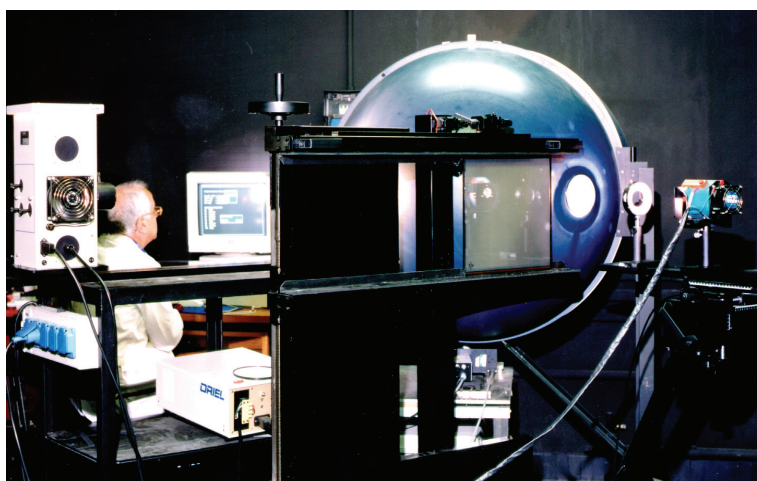


Fig.3 Apparato sperimentale CATRAM

#### 4. Fotometria di componenti trasparenti complessi

CATRAM (Characterisation of Advanced TRAsparent Materials) è l'apparato sperimentale per la misura dei parametri ottici di materiali trasparenti innovativi, presso l'ENEA, figura 3. Materiali a notevole complessità geometrica e strutturale che non sono caratterizzabili con i classici spettrofotometri, ma necessitano di apparati di notevoli dimensioni in grado di controllare tali complessità. Il componente principale è una sfera integrante (realizzata da Labsphere) con diametro di 100 centimetri. La sfera è realizzata in alluminio ed ha il rivestimento interno in Spectrafloat (composto essenzialmente di solfato di bario), che garantisce un coefficiente di riflessione del 97-98% nel intervallo visibile (380-780 nanometri) e superiore all'80% nel resto dell'intervallo solare, quest'ultimo valore è piuttosto basso.

La sfera è provvista di diverse porte indicate nella tabella 1 e facenti riferimento alla figura 4, necessarie per una corretta esecuzione delle misure. La *sample port* ha diametro variabile,

inizialmente era di 12.5 centimetri, successivamente la sfera è stata modificata ed ora sono disponibili diversi diametri di 12.5, 20, 25 e 30 centimetri. Questa configurazione consente una elevata flessibilità del sistema, poiché la scelta della porta è conseguenza delle caratteristiche del campione da provare; ovviamente maggiore è il diametro, maggiore è l'allontanamento dalla configurazione ideale, ma in caso di materiali complessi è un compromesso da accettare per una maggiore attendibilità dei risultati.

Tabella 1 Descrizione delle porte della sfera integrante

Porta	Rif.	D [cm]	Descrizione
Sample port	7	12.5-30	Porta attraverso la quale il raggio, emesso dalla sorgente entra all'interno della sfera.
Detection port	6	5	Porta attraverso la quale il sistema di rilevamento <i>raccoglie</i> l'energia all'interno della sfera
Auxiliary port	8	5	Porta utilizzata per applicare il metodo di misura della porta ausiliaria

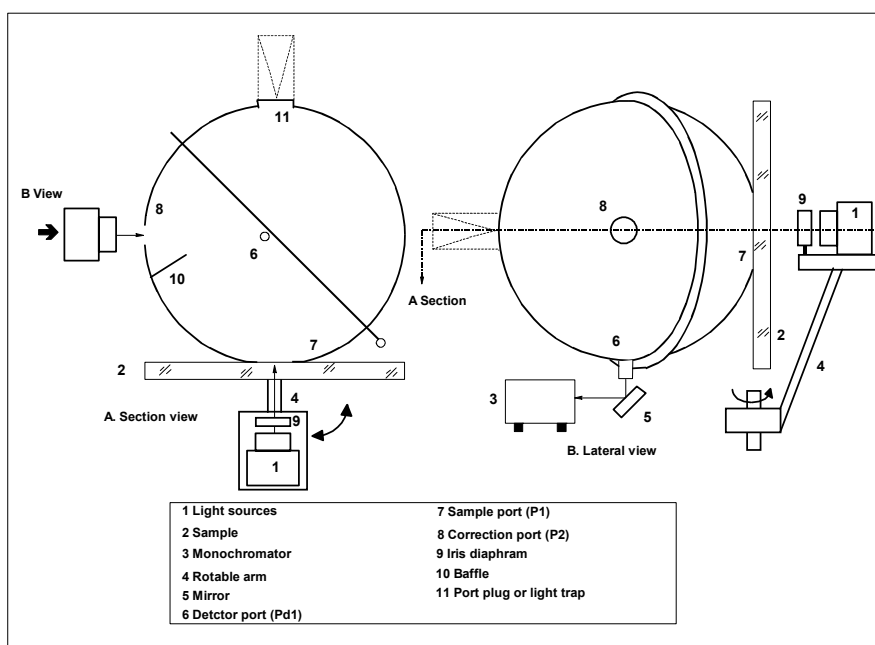


Figura 4 Schema di CATRAM, per misure con campione esterno

Facendo ancora riferimento alla Fig. 4 sono descritte le altre parti dell'apparato. La sorgente luminosa è montata su un braccio mobile per misure ad incidenza non normale, questa soluzione dà la possibilità di spostare la sorgente con libertà di movimento su 3 assi, in modo da avere il raggio sempre centrato sul campione. L'angolo di incidenza massimo dipende dalla complessità del campione, per vetri convenzionale si arriva a 70°, per quelli più complessi a 50-60. Infine il campione (con dimensioni variabili da 15×15 a 100×100 centimetri) è montato su una struttura mobile e maneggevole, per rapidi inserimenti e rimozioni dello stesso. In alcune prove i campioni sono posti all'interno, inseriti in un sostegno telescopico rotabile, in modo da variare l'inclinazione del materiale rispetto alla porta d'ingresso.

Due sorgenti luminose sono usate per l'esecuzione delle misure:

- Lampada ad arco di xenon, con potenza di 300 W, per prove nello spettro visibile.
- Lampada alogena al quarzo, con potenza di 1000 W, per prove nell'infrarosso vicino.

La parte di ricezione del segnale è stato implementata con il radiometro Oriel Instruments, sistema con rivelatori in silicio, per lo spettro visibile, ed in solfato di piombo, per l'infrarosso, fornisce una serie di vantaggi che fondamentalmente si possono riassumere nei seguenti punti:

- Il sistema *lock-in amplifier* con *chopper* consente di modulare la sorgente luminosa che è poi filtrata dal radiometro, in tal modo è eliminata la restante radiazione, migliorando il rapporto segnale/rumore. Oltre al vantaggio della precisione della misura, vi è quello di non eseguire le misure nell'oscurità e di dover misurare ogni volta il livello di buio.
- La meccanica del sistema consente ad un'unità compatta di investigare tutto lo spettro solare, passando da un sensore all'altro in modo automatico, in corrispondenza di un lunghezza d'onda fissata. In questo modo si generano automaticamente le curve per tutto l'intervallo solare (380-2200 nanometri, oltre esistono problemi di segnale che influenzano negativamente la misura).

CATRAM è un apparato di grande flessibilità con il quale possono effettuare diversi tipi di misura, descritti a seguire. E' importante ricordare che le misure con questa sfera integrante sono del tipo "a raggio singolo", ciò significa che ogni misura richiede due letture da parte del sistema: una sul riferimento ed una sul campione in accordo con il tipo di misura.

Oltre alle misure, vengono fatte tutte le elaborazioni del caso attraverso un software dedicato: selezionare l'intervallo di misura da salvare, scegliere il passo d'onda per le letture, passare dai valori spettrali a quelli integrati, con i diversi spettri standardizzati dalle norme internazionali. La corretta esecuzione delle misure richiede alcune precauzioni, una è quella relativa alla diffusione dell'energia incidente da parte del materiale di rivestimento. Le altre sono:

- La radiazione trasmessa dal materiale deve essere totalmente raccolta all'interno della sfera, quindi non ci devono essere *fughe* di energia attraverso le pareti laterali del materiale in prova.
- E' necessario schermare la porta dove sono posti i sensori per evitare che, con campioni con caratteristiche diffondenti, l'energia trasmessa direttamente sia persa attraverso la porta stessa.
- Le discontinuità della sfera devono essere ridotte al minimo, per non allontanarsi troppo dalla situazione ideale. In questo caso va trovata una situazione di compromesso, tra la sfericità del sistema e le dimensioni da assegnare alle porte per avere dei risultati accurati.

Le misure di trasmissione luminosa sui campioni complessi sono di tipo spettrale e direzionale (cioè ad angolo incidenza variabile), la grandezza misurata è di tipo emisferico. In questo tipo di misura il campione è montato sulla *sample port* e, con questa configurazione, l'energia presente all'interno della sfera  $E_{s1}$  è quella trasmessa dal materiale. La trasmittanza è ottenuta dividendo questo valore per quello di riferimento  $E_{x1}$ , ottenuto con il raggio entrante direttamente nella sfera senza campione.

La misura così eseguita presenta un errore significativo, in quanto la presenza/assenza del campione nelle due successive letture altera la riflettività media della sfera. L'errore è rimosso applicando il metodo della lampada ausiliaria: da un'ulteriore porta si illumina la sfera con e senza il campione ( $E_{s2}$  e  $E_{x2}$  rispettivamente), si ottiene così una curva minore di uno che, moltiplicata per la trasmittanza diretta, consente di determinare quella effettiva. La funzione della trasmittanza spettrale assume, quindi la forma seguente,:

$$\tau(\lambda) = \tau_{nc}(\lambda) \cdot CF(\lambda) = \frac{E_{s1}(\lambda)}{E_{x1}(\lambda)} \cdot \frac{E_{x2}(\lambda)}{E_{s2}(\lambda)}$$

Nell'ambito delle attività sono state eseguite delle misure su campioni complessi, di seguito elencati. Le misure sono state eseguite con una porta da 20 centimetri e con un raggio incidente variabile in funzione delle caratteristiche del campione. I materiali testati sono:

- S1 Doppio vetro 4-25-4 millimetri. L'intercapedine contiene aerogel granulare nanoporoso e diffondente. Il materiale ha elevate capacità in termini di isolamento termico e distribuzione della luce naturale.
- S2 Doppio vetro 4-16-4 millimetri. L'intercapedine contiene un pacchetto trasparente isolante realizzato con capillari tralucanti a giacitura orizzontale coperto su entrambi i lati con un foglio in fibra di vetro. Il materiale ha elevate capacità in termini di isolamento termico e distribuzione della luce naturale.
- S3 Come S2 ma senza fogli in fibra di vetro. Il materiale ha elevate capacità in termini di isolamento termico e distribuzione della luce naturale, anche se mantiene delle direttrici di trasmissione luminosa preferenziali.
- S4 Doppio vetro 4-30-4 millimetri. L'intercapedine contiene delle lamelle con profilo irregolare fisse ed opportunamente distanziate. Le lamelle selettive sono a comportamento speculare con profilo tridimensionale al fine di realizzare il miglior compromesso tra controllo solare ed illuminazione naturale diffusa. Il componente è generalmente progettato in funzione delle caratteristiche climatiche e dello spazio interno. Il profilo è tale da consentire un ingresso di radiazione solare più elevato in inverno e minore d'estate.
- S5/6 Doppio vetro 4-30-4 millimetri L'intercapedine contiene delle lamelle con profilo irregolare fisse ed opportunamente distanziate. Il profilo delle lamelle è tale che: a) a bassi angoli di incidenza, parte della radiazione incidente è re direzionata verso il soffitto della stanza; b) ad elevati angoli di incidenza la radiazione è riflessa direttamente all'esterno. S6 è una variante di S5, avendo la prima un piccolo elemento verticale sulla parte interna del profilo che schermo parte della radiazione trasmessa dalla porzione concava di profilo.

S1, S2 and S3 sono prevalentemente dei materiali con funzione di diffusione della luce, S4, S5 ed S6 hanno funzione di redirezione della luce stessa. In figura 5 e 6 si riportano le misure spettrali ed angolari dei campioni misurati. Si noti che per i materiali a lamelle appare indicato eseguire misure di trasmittanza diffusa, poiché la misura diretta un dato che ha deve essere integrato con altri misure nel momento in cui si raggiunge l'angolo di cut-off.

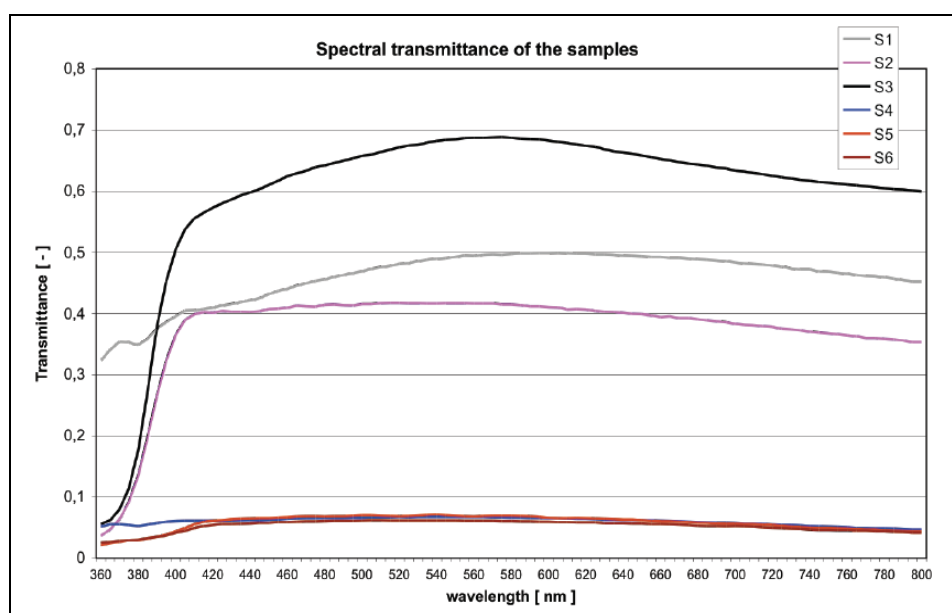


Figura 5 Trasmittanza spettrale dei campioni selezionati

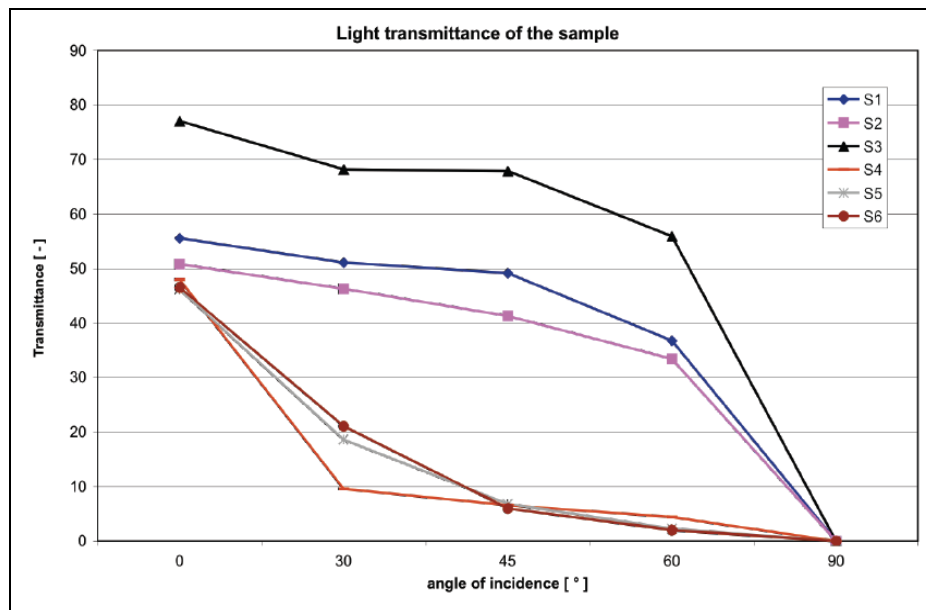


Figura 6 Trasmittanza angolare dei campioni selezionati

Le attività di fotometria hanno evidenziato al necessità di implementare le potenzialità del laboratorio. Per completare il range di prove disponibili è stata acquisita una nuova sfera integratrice con diametro di 75 centimetri e rivestimento interno in Spectralon, con valori di riflettanza oltre il 90% su tutto lo spettro solare (visibile ed infrarosso vicino). La nuova sfera può essere poi utilizzata come sorgente secondaria per eseguire misure con illuminamento diffuso, molto utili per la caratterizzazione di sistemi schermanti. È stato infine acquisito un simulatore solare per eseguire prove integrate sullo spettro solare, per compiere con più rapidità indagini preliminari senza essere costretti ad eseguire sempre misure spettrali. Il nuovo set up sperimentale sarà testato durante il 2009 ed utilizzato per le nuove campagne di misura.

## 5. Goniometria

La goniometria si occupa di investigare non solo quanta radiazione è riflessa/trasmessa da un materiale investito da un fascio luminoso, ma anche come questa radiazione è distribuita ai vari angoli di uscita. Si tratta di analisi complesse ma di grande utilità per comprendere come sistemi innovativi siano un grado ottimizzare la luce naturale da loro filtrata. sistema di misura per la caratterizzazione goniometrica dei materiali è composto da:

- Sorgente di illuminazione in postazione fissa, controllata dal computer;
- Sistema goniometrico dotato di 7 sistemi motorizzati controllati da computer;
- Rilevatore fotometrico digitale posizionato su uno degli assi mobili del goniometro.

La sorgente illuminante è una lampada a incandescenza controllata in corrente continua che realizza l'illuminante CIE standard A. Per assicurare la stabilità del flusso emesso durante l'intera misurazione, che può durare anche alcuni giorni, la temperatura di colore e la luminanza della sorgente sono costantemente controllate. La sorgente è anche dotata di un otturatore automatico in grado di ridurre il tempo di esposizione del campione alla luce fino a 0,2 ms, in questo modo viene pesato con precisione il flusso luminoso incidente sul campione. Sebbene la dinamica del rilevatore sia molto elevata, questa potrebbe essere non sufficiente: infatti, una caratterizzazione direzionale completa di un campione potrebbe richiedere l'uso di tempi di esposizione variabili su una gamma da 1 a 104.

L'INRIM (precedentemente IEN) ha recentemente rinnovato completamente il proprio goniofotometro per l'analisi dei materiali. Il nuovo strumento è completamente controllato dal computer e assicura accuratezze di posizionamento. Il sistema goniometrico è costituito da:

- Banco ottico di 4 m di lunghezza, alle cui estremità è installato il rilevatore, rotante rispetto all'asse verticale dello strumento;
- Sistema rotante rispetto all'asse verticale dello strumento su cui è installata una culla meccanica il cui centro di rotazione è coincidente con l'asse di rotazione del banco ottico e del sistema rotante;
- Sistema di posizionamento a 3 assi del campione dotato di un ulteriore sistema rotante installati sulla culla.

Grazie a questo sistema di movimenti multipli, il campione può essere illuminato (dalla sorgente fissa) e osservato (dal rilevatore sul banco ottico rotante) praticamente da qualsiasi direzione nello spazio. Per le misurazioni in riflessione gli unici angoli morti corrispondono a quando il rivelatore eclissa la sorgente. Per le misurazioni in trasmissione gli angoli morti sono correlati alle caratteristiche fisiche del campione che possono limitarne la movimentazione.

Il rilevatore utilizzato è una matrice CCD (1024 x 1024 pixel con la più alta dinamica sul mercato), dotato di un obiettivo telecentrico di 30 cm di diametro, figura 7. Un CCD è in grado di misurare la luminanza se viene utilizzato associato con una lente. La disponibilità di un grande numero di pixel su un unico chip permette l'esclusivo vantaggio di effettuare un'analisi superficiale dei materiali: ad ogni pixel è associata una zona della superficie del campione. Inoltre, il CCD è un dispositivo a integrazione (il conteggio in uscita è proporzionale al livello di luminanza della campo inquadrato moltiplicato per il tempo di esposizione). Questa caratteristica permette di raggiungere dinamiche elevate e di migliorare le incertezze di misurazione: due caratteristiche chiave in questa applicazione.

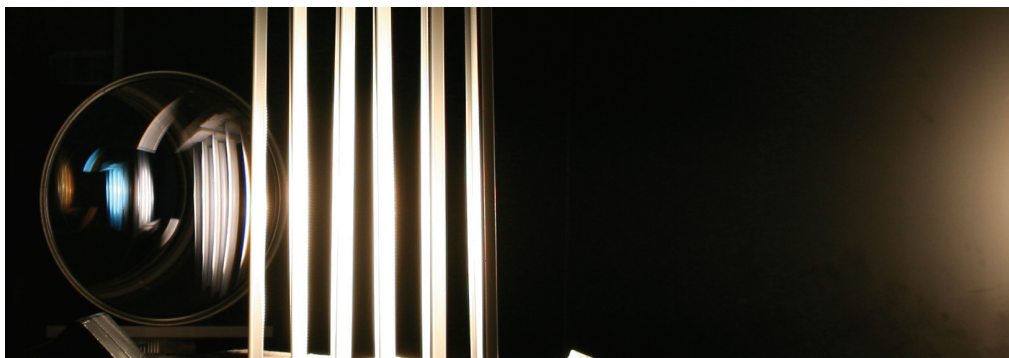


Figura 7 obiettivo telecentrico del goniofotometro

La grandezza fisica misurata è stata la funzione di distribuzione bidimensionale della trasmittanza (bi-directional transmittance distribution function of the sample, BTDF), chiamata anche *coefficiente di luminanza*  $q$  845-04-71 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** ]. Questo parametro è definito come il rapporto tra la luminanza trasmessa in una direzione e l'illuminamento incidente:

$$q(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi_1, \varphi_2) = \frac{L(\varepsilon_2, \varphi_2)}{E(\varepsilon_1, \varphi_1)} [sr^{-1}]$$

dove:

$L(\varepsilon_2, \varphi_2)$  la luminanza misurata nella direzione di osservazione  $(\varepsilon_2, \varphi_2)$ ;

$E(\epsilon_1, \varphi_1)$  l'illuminamento incidente

Utilizzando un sensore CCD quale rivelatore, è possibile applicare una procedura relativa in cui non è necessario utilizzare sensori tarati in unità SI assolute. Il coefficiente  $q$  diviene il rapporto tra i tempi di esposizione e il conteggio dei pixel, relativi alla misurazione della sorgente e del campione, moltiplicati per una costante geometrica:

$$q(\epsilon_1, \epsilon_2, \varphi_1, \varphi_2) = G \frac{C_2 T_1}{C_1 T_2}$$

dove:

$C$  e  $T$  sono le letture dei pixel e  $I$  tempi di esposizione quando il rivelatore CCD misura, per il pedice 2, la luminanza trasmessa dal campione nella direzione  $(\epsilon_2, \varphi_2)$  e, per il pedice 1, la luminanza della sorgente nella direzione  $(\epsilon_1, \varphi_1)$ ;

$G$  è una costante geometrica.

I dati goniometrici identificano come il materiale ripartisce la radiazione solare incidente all'interno dell'edificio, sono dati di estremo interesse per quanto riguarda la progettazione energetica dell'intero edificio, ma impiccano la gestione di una mole rilevante di informazioni, a cui corrispondono tempo e costi di misura rilevanti.

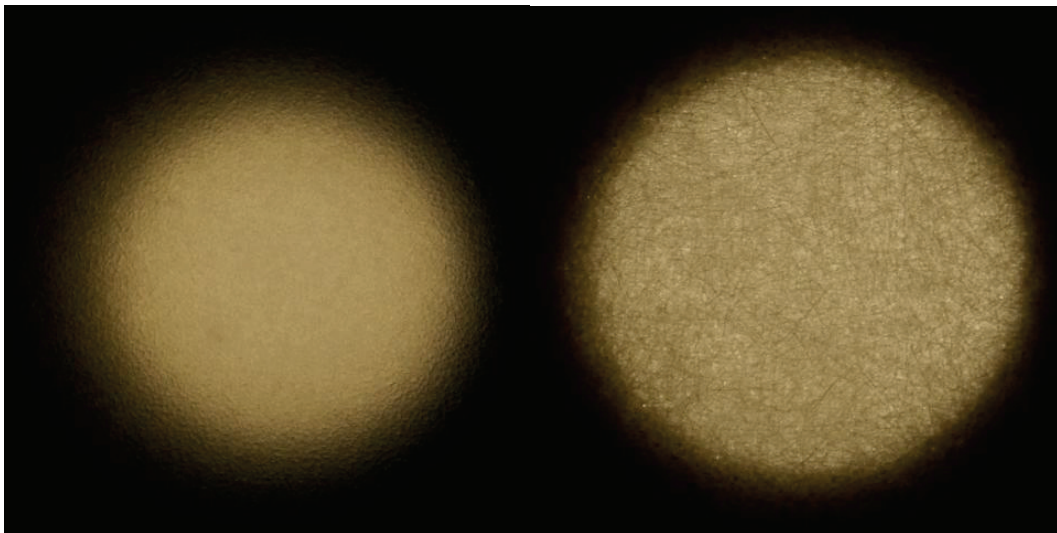


Figura 8 Campioni diffondenti illuminati dalla sorgente luminosa

I campioni testati sono i medesimi del paragrafo precedente. S1 ed S2 illuminati dal fascio della sorgente luminosa sono fotografati in figura 8. In figura 9 sono presentate le curve di trasmissione luminosa bidirezionale dei campioni misurati. Seguono la numerazione di cui sopra, partendo in sequenza dall'alto a sinistra.

I grafici presentano l'andamento della trasmissione luminosa in funzione dell'angolo di uscita dal campione. Sono normalizzati rispetto al valore massimo, indipendentemente dal valore di luminanza secondo quella direzione. Nel diagramma polare la radiazione è in scala logaritmica, sono infatti individuati 3 cerchi principali pari a 1, valore massimo, 0.1 e 0.01. Dall'analisi si evince l'eccellente comportamento dell'aerogel S1 nel diffondere la radiazione trasmessa. Un buon comportamento è manifestato da S2, sistema a capillari fon fogli diffondenti in fibra di vetro. L'assenza del foglio diffondente, fa guadagnare al vetro una forte direzionalità, come si evince dal grafico di S3.



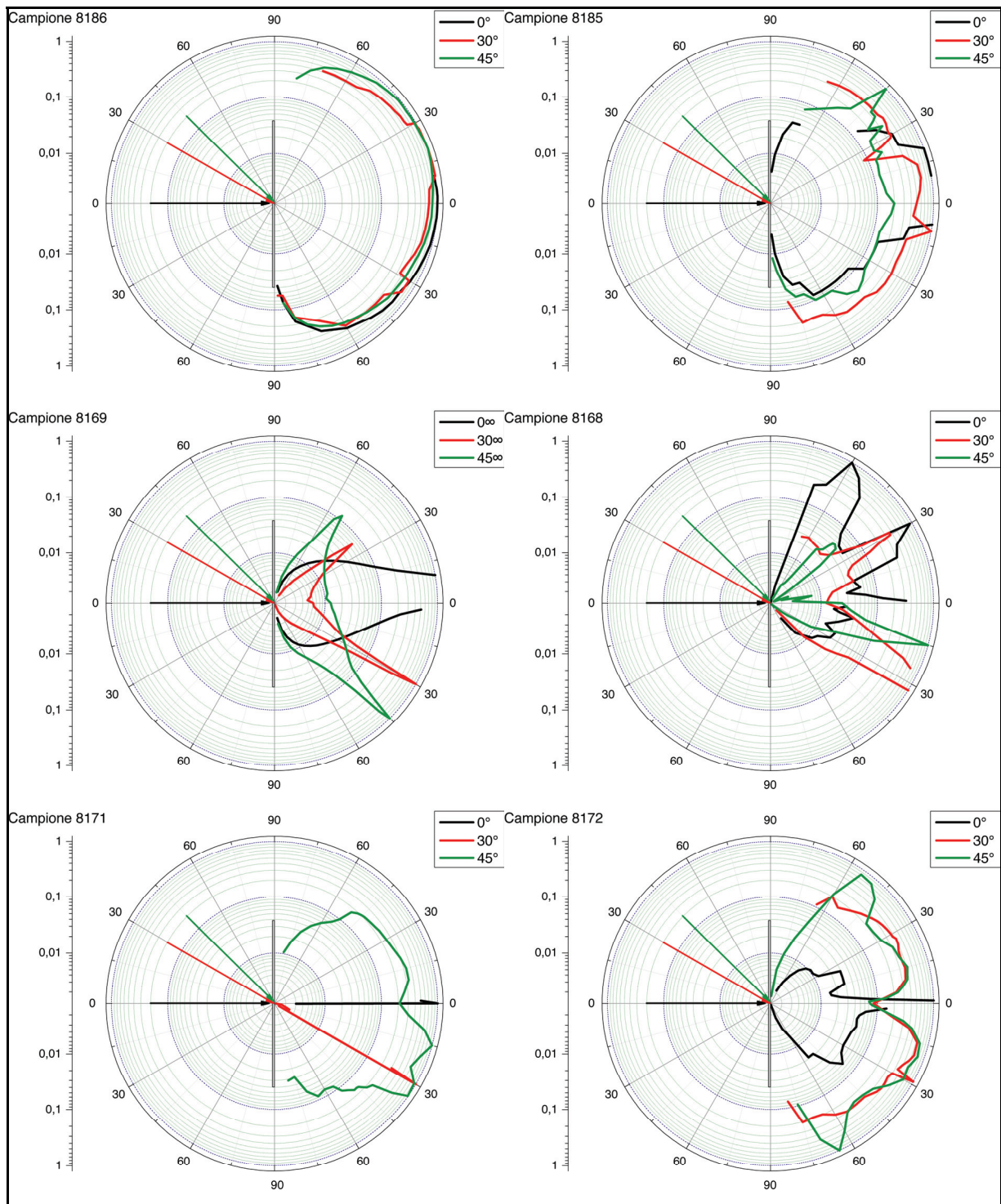


Figura 9 Distribuzione bidirezionale della trasmissione luminosa dei materiali testati

S4 ed S6 presentano delle notevoli direzionalità legate all'angolo di incidenza della radiazione ed alla geometria delle lamelle. S5 ha forte direzionalità fin quando esiste una componente di luce diretta, a 45° presenta invece una buona diffusione della radiazione trasmessa..

Si noti come in alcuni casi le curve presentino dei buchi. Si tratta di un problema di misura, legato alla saturazione del rivelatore, esposto per tempi eccessivamente lunghi alla radiazione, con conseguenze anche nel definire le curve di trasmissione bidirezionale normalizzate rispetto ai massimi. Questo aspetto evidenzia la necessità di adeguare la strumentazione disponibili per questo

tipo di misure al fine di avere dei dati completi. I risultati numerici non sono presentati in questo rapporto ma disponibili su richiesta.

## 6. Calorimetria di sistemi complessi

L'apparecchiatura e la metodologia utilizzate per l'esecuzione della misura, denominata camera calda con anello di guardia, sono conformi alla norma UNI EN 12412-2:2004 “*Thermal performance of windows, doors and shutters. Determination of thermal transmittance by hot box method. Part 2: Frames*” ed alla norma UNI EN ISO 8990:1999 “*Isolamento termico - Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario - Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia*”. Si compone di due celle, una calda (dimensioni: altezza 2,50 m, larghezza 2,60 m, profondità 1,50 m) e una fredda (dimensioni: altezza 2,50 m, larghezza 2,60 m, profondità 0,65 m), simulanti gli ambienti interno ed esterno. All'interno della cella calda è posta una cella, definita di misura, di dimensioni più contenute (altezza 1,84 m, larghezza 1,43 m, profondità 0,76 m), come schematizzato in figura 10. Il campione in prova è integrato in un apposito telaio posto tra la cella calda e la cella fredda. Le superfici interne delle celle hanno un'emissività maggiore di 0.8. Il pannello di supporto è costituito da polistirene espanso, spessore 10 cm, densità 30 kg/m<sup>3</sup>.

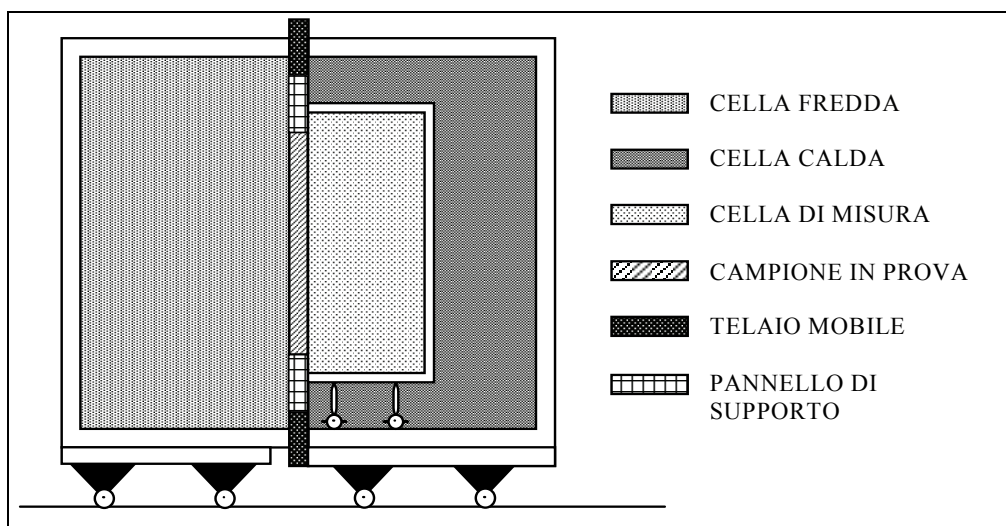


Figura 10. Schema della camera calda con anello di guardia

L'assetto sperimentale prevede di posizionare il campione in prova, tra le celle calda e fredda; la cella di “misura” determina la sezione di cui effettivamente viene misurata la trasmittanza. Viene imposta una differenza di temperatura tra la cella calda e la fredda, mentre la cella di misura viene mantenuta alla stessa temperatura della cella calda. In questo modo vengono minimizzate le dispersioni laterali e la potenza termica che in regime stazionario viene immessa nella cella di misura, può essere considerata come quella che attraverserà la sezione sottesa dalla cella di misura. I fenomeni di conduzione laterale parallela alla superficie del campione sono posti sotto controllo dalla possibilità di disporre della sezione di guardia determinata dalla cella calda e di misura.

La superficie di misura del campione è stata ridotta mediante il posizionamento di strisce in polistirolo, in modo da coprire, sia dal lato caldo che dal lato freddo, un bordo di circa 3 cm per i vetri 1 e 2 e di circa 10 cm per il vetro 3. A regime sono stati misurati:

- la temperatura media dell'aria nella cella di misura  $\theta_{ci}$  [°C]
- la temperatura media dell'aria nella cella fredda  $\theta_{ce}$  [°C]

- la temperatura media della superficie calda del pannello di riempimento (*infill*)  $\theta_{ini}$  [°C]
- la temperatura media della superficie fredda del pannello di riempimento (*infill*)  $\theta_{ine}$  [°C]
- la temperatura media della superficie calda del pannello di supporto  $\theta_{si,sur}$  [°C]
- la temperatura media della superficie fredda del pannello di supporto  $\theta_{se,sur}$  [°C]
- la temperatura della superficie calda del bordo del pannello di supporto  $\theta_{si,p}$  [°C]
- la temperatura della superficie fredda del bordo del pannello di supporto  $\theta_{se,p}$  [°C]
- la temperatura media della superficie calda del pannello di irrigidimento  $\theta_{si,b}$  [°C]
- la temperatura media della superficie fredda del pannello di irrigidimento  $\theta_{se,b}$  [°C]
- la potenza termica immessa (flusso termico)  $\Phi$  [W]

Preliminarmente all'esecuzione della misura, è stata effettuata la calibrazione del dispositivo di prova mediante l'utilizzo di pannelli calibrati, come previsto dalla norma UNI EN 12412-2. In figura 11 si illustra il montaggio del campione da testare nell'apposito for praticato nel pannello di supporto: si notino gli elementi isolanti in polistirolo aggiuntivi per eliminare il contributo del bordo dalla misura di trasmittanza termica e il silicone per evitare infiltrazioni d'aria da una camera all'altra ed, al tempo stesso fissare integralmente il campione alla struttura di supporto. I contatti elettrici per orientare le lamelle sono, viceversa, lasciati in vista per potere variare la configurazione da una prova alla successiva.



Figura 11 Configurazione L3 Vista lato freddo

Relativamente alla determinazione della trasmittanza termica del campione in prova, si calcola la trasmittanza termica totale standardizzata  $U_{st}$ :

$$U_{st} = \frac{1}{\frac{1}{U_m} - R_{st} + R_{(st),st}}$$

dove:

$U_m$  [W/m<sup>2</sup>K] trasmittanza termica totale misurata calcolata in base all'equazione seguente;

$R_{s,t}$  [m<sup>2</sup>K/W] è la resistenza totale superficiale ricavata in base alla regressione di **Errore**.  
**L'origine riferimento non è stata trovata.;**

$R_{(s,t),st}$  [m<sup>2</sup>K/W] è il valore europeo standardizzato di resistenza termica superficiale, 0,17 m<sup>2</sup>K/W.

Il valore di trasmittanza termica totale misurato,  $U_m$ , espresso in W/m<sup>2</sup>K, viene calcolato in base alla seguente equazione:

$$U_m = \frac{q_{sp}}{\Delta\theta_n}$$

dove:

$q_{sp}$  è il flusso termico attraverso il campione, [W/m<sup>2</sup>];

$\Delta\theta_n$  è la differenza tra la temperatura dell'aria calda e la temperatura dell'aria fredda ad entrambi i lati del campione in prova [K], 4.

Questi dati si ricavano a altre equazioni non presentate in questo summary e disponibili in bibliografia su richiesta.

Tabella 2 Trasmittanza termica dei campioni testati

Posizione e tipo lamelle	U [W/m <sup>2</sup> K]
L1	2.02
L2	1.68
L3	1.71
L4	1.9

Questa strumentazione è stata utilizzata per verificare l'influenza di elementi schermanti ad elevate prestazioni sulla trasmittanza termica di un componente vetrato. Sono stati realizzati dei vetrocamere convenzionali con all'interno dei sistemi a lamelle veneziane orientabili. In particolare sono state realizzati due campioni: a) vetrocamera con lamelle standard in intercapedine; b) vetrocamera con lamelle trattate con finiture superficiali basso emissive in intercapedine. Questo implica una differenza di emissività della lamella da 0.9 a 0.3. In tabella 2 si riportano i valori della sperimentazione, tuttora in corso per valutare diverse condizioni di utilizzo. Le variabili testate sono:

- L1 veneziana con lamelle standard completamente chiusa;
- L2 veneziana con lamelle basso-emissive sul lato caldo della cella completamente chiusa;
- L3 veneziana con lamelle basso-emissive sul lato freddo della cella completamente chiusa;
- L4 veneziana con lamelle basso-emissive sul lato caldo della cella ad angolo di cut-off.

I risultati parziali di questa sperimentazione mostrano l'influenza delle veneziane in intercapedine sulla riduzione dei valori di trasmittanza termica del normale vetrocamera. Quello utilizzato in queste prove sarà testato nel 2009, ma i valori stimati sono di circa 2.7 W/m<sup>2</sup>K. È interessante notare che la posizione della faccia trattata con rivestimento basso emissivo non modifica significativamente la trasmittanza termica del componente. Mentre l'utilizzo di questi materiali rispetto alle lamelle standard porta ad una riduzione di U di circa il 17%. Cambiare l'angolo delle

lamelle dalla completa chiusura ad angolo di cut-off, ovvero l'angolo minimo oltre il quale non c'è visione diretta attraverso le lamelle ad incidenza normale al campione, aumenta la trasmittanza termica di circa il 10%.

## 7. Analisi illuminotecnica di campioni complessi in celle di prova

Le analisi sperimentali sul campo delle prestazioni termiche e illuminotecniche sono eseguite su sistemi di facciata installati in celle esterne opportunamente allestite, ipotizzando una tipica destinazione d'uso ufficio. Sono state utilizzate tre celle di prova opportunamente allestite di cui una è quella di riferimento (caso standard); le restanti due vengono utilizzate per testare soluzioni innovative. Le celle hanno dimensioni una dimensione di 2,80 m x 5 m x 2,80 m, con il lato minore rivolto verso sud, con leggero angolo di azimuth verso est. La struttura portante è in calcestruzzo armato ( $s = 10$  cm), a cui è stato applicato un isolamento esterno a cappotto ( $s = 5$  cm) ad eccezione della facciata sud che invece è interamente in polistirolo espanso ( $s = 10$  cm). Il prospetto sud di ogni cella presenta un foro per l'infisso di circa 3 m<sup>2</sup> (1,966 x 1,566 m) a 0,85 m da terra. Le pareti sono intonacate dall'esterno mentre all'interno viene predisposto uno strato di primer e di pittura del colore scelto: la tinteggiatura del soffitto è bianca (RAL 9010) mentre quella delle pareti è bianco grigiastro (RAL 9002). A causa delle forti irregolarità del soffitto il soffitto non appare completamente bianco.

Ogni serramento è costituito da quattro lastre con dimensioni differenti: le due lastre superiori hanno dimensioni 850 x 900 mm, mentre le due inferiori hanno dimensioni minori pari a 550 x 900 mm. Considerando lo spessore dei telai adottati (larghezza frontale di 71 mm per i telai perimetrali e 96 mm per le partizioni interne) e che ogni vetratura rientra nello spessore del telaio di 18 mm, la dimensione del foro sulla parete sud di ogni cella risulta di 1966 x 1566 mm. Gli schemi della cella sono presentati in figura 12.

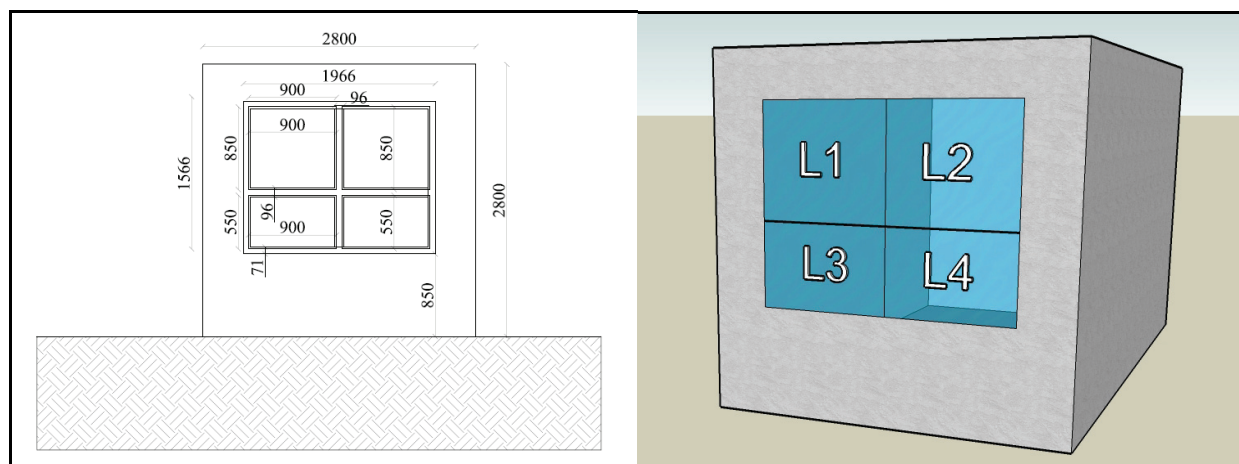


Figura 12 Prospetto sud di una cella di prova

La possibilità di utilizzare le medesime celle anche per sperimentazioni su sistemi di schermatura esterni ha portato a realizzare una struttura in legno di supporto con un eventuale cassonetto esterno in cui, come sopra descritto, potrebbe essere ospitata una veneziana.

Sono state individuate specifiche soluzioni statiche (configurazioni progettate in modo da soddisfare il più possibile le esigenze richieste per tutto l'arco dell'anno senza adeguarsi in modo automatico alle variazioni climatiche esterne) e soluzioni dinamiche (azionabili manualmente oppure automaticamente). Le seguenti configurazioni sono state testate:

- C0 Da L1 ad L4: vetrocamera basso-emissivo (trasmissione luminosa 80%) accoppiato ad una tenda diffondente convenzionale (trasmissione luminosa 12%). Sistema fisso: tutto aperto o tutto chiuso, secondo i tipici comportamenti degli utenti in ambiente lavorativo.
- C1 Da L1 ad L4: vetrocamera basso-emissivo (trasmissione luminosa 80%) accoppiato ad una tenda veneziana con lamelle speculari orientabili (vedi misure presentate in paragrafo 4). Sistema mobile, tenda sempre attiva con lamelle ad angolo di cut-off rispetto alla posizione del disco solare a mezzogiorno.
- C2 L1 e L2 equipaggiate con capillari diffondenti (vedi S2 al paragrafo 4, questo campione ha una trasmissione luminosa dichiarata del 36%). L3 ed L4 con vetrocamera basso-emissivo (trasmissione luminosa 80%). Sistema fisso.
- C3 L1 e L2 equipaggiate con sistemi a lamelle fisse in intercapedine (vedi S5 al paragrafo 4). L3 ed L4 con vetrocamera basso-emissivo (trasmissione luminosa 80%). Sistema fisso
- C4 L1 e L2 equipaggiate con sistemi elettrocromici allo stato solido (trasmissione luminosa stato chiaro 60% e stato colorato 3%). L3 ed L4 con vetrocamera basso-emissivo (trasmissione luminosa 80%). Sistema dinamico, vetro colorato con illuminamento sul primo sensore maggiore di 3 kLux e schiarito con illuminamento inferiore a 1 kLux.



Figura 13 Materiali trasparenti installati nelle celle di prova

Le installazioni di C0, C1, C3 e C4 sono presentate in figura 13. La campagna sperimentale è stata condotta in primavera, durante una serie di giorni a condizioni meteo variabili dal sereno alla pioggia. In ogni cella sono stati individuati quattro punti per le misure su piano orizzontale alla

distanza di 95 cm ciascuno (incluso il primo luxmetro dal vetro), su una linea retta in corrispondenza del punto medio della finestra, vedi figura 14. I sensori di illuminamento su piano orizzontale sono posizionati a quota 0,80 m (piano di lavoro). Le misure dell'illuminamento sono state registrate a intervalli di 6 minuti per tutto l'arco della giornata.

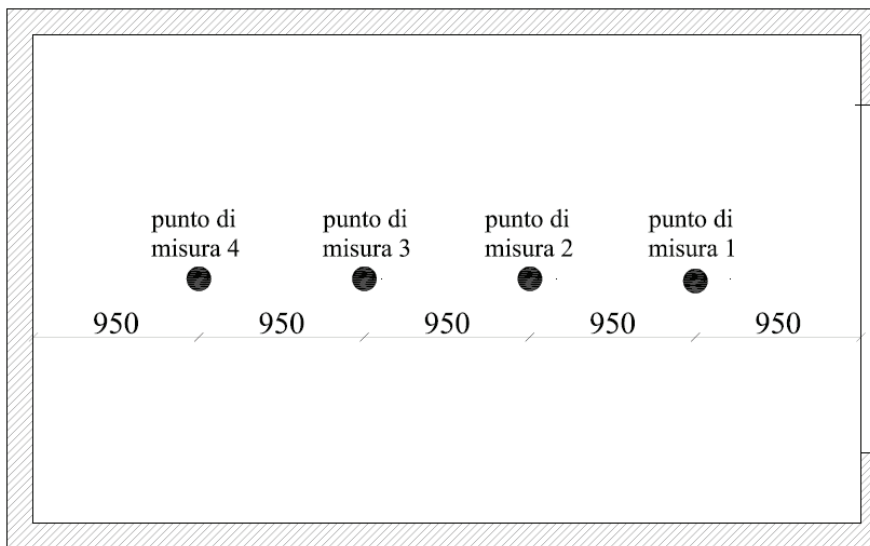


Figura 14 Pianta di una cella con posizione dei sensori di illuminamento

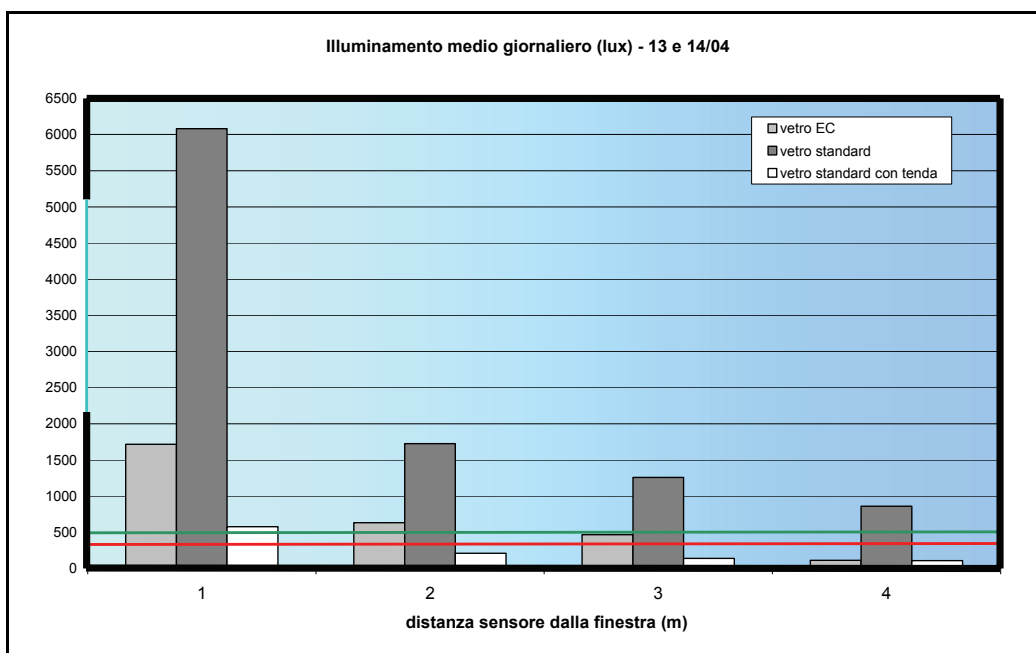


Figura 15 Illuminamento medio di C5 rispetto al vetro standard

Alcuni dei risultati più significativi dell'analisi sono presentati di seguito. Si tratta di un grafici e figure esemplificative, le analisi dettagliate sono disponibili a richiesta e pubblicate a altrove.

La figura 15 riassume gli illuminamenti medi giornalieri, misurati in due giorni con cielo sereno, nei vari sensori riferiti a tre condizioni:

C5 (vetro EC in legenda riferito al 13/04/09) attivato secondo il controllo specificato sopra

C0 (vetro standard senza tenda in legenda riferito al 13/04/09)

C0 (vetro standard con tenda in legenda riferito al 14/04/09)

Il grafico evidenzia chiaramente come il vetro senza protezione solare consenta elevati livelli di illuminamento, che testimoniano tuttavia un'assoluta mancanza di controllo delle luminanze e, quindi, dell'abbagliamento. Infatti valori medi di 1.5 kLux a circa due metri dalla facciata, evidenziano un regime di luce naturale non consono alle attività standard indoor (abitazioni, ufficio, scuola, biblioteca, ecc.). Viceversa utilizzare la tenda, come normalmente avviene nelle giornate soleggiate riduce drasticamente il livelli di illuminamento, che raggiungono i 500 lux medi su base giornaliera solo sul primo sensore ad 1 metro dalla finestra. Per contro, i vetri elettrocromici, consentono di mitigare gli elevati livelli di illuminamento, garantendo valori adeguati di daylighting fino a 3 metri di distanza dalla facciata. In figura 16 sono presentati dai simili considerando per il campione C3. Le prestazioni sono decisamente migliori rispetto al vetro singolo, ma in alcune ore della giornata si raggiungono livelli piuttosto elevanti di illuminamento che richiedono l'utilizzo di protezioni solari aggiuntive. Nei giorni di pioggia, il vetro standard ha livelli decisamente più alti rispetto a C3, anche se questo ha dei livelli medie di illuminamento accettabili fino a quasi due metri dalla finestra. In condizioni di cielo coperto l'elettrocromico rimane nello stato chiaro ed ha dunque prestazioni illuminotecniche leggermente inferiori rispetto al vetro chiaro. Un dato interessante relativo al C3 è l'eccellente comportamento in termini di omogeneità dell'illuminamento in ambiente, questo aspetto è evidenziato in figura 16, dove si evince la capacità del componente di far diventare il soffitto come una vera e propria sorgente luminosa secondaria.

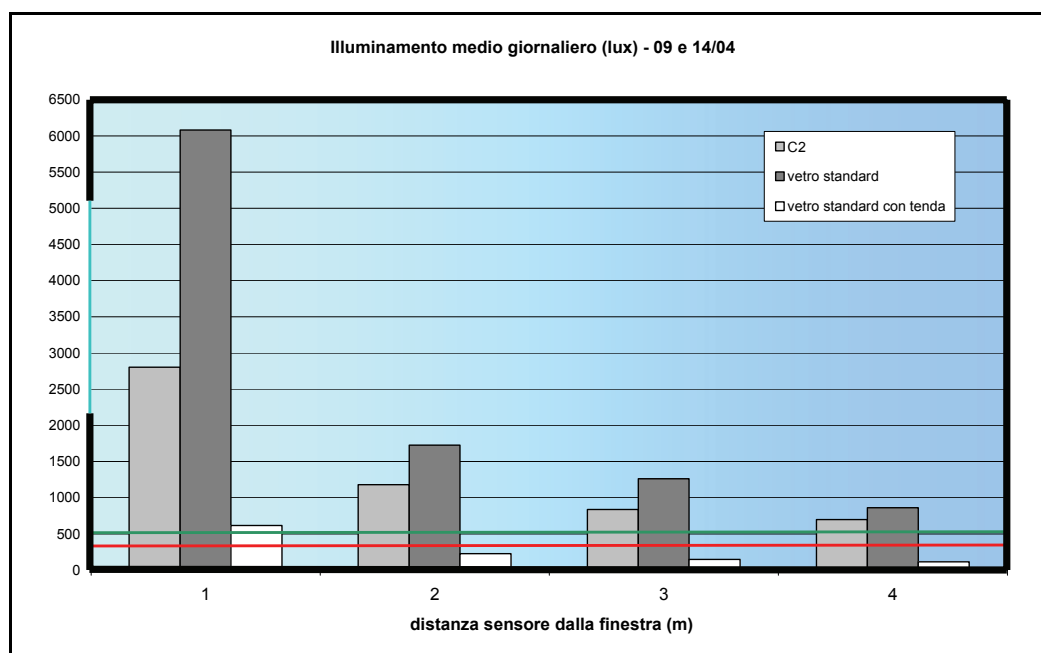


Figura 16 Illuminamento medio di C3 rispetto al vetro standard

Per quanto attiene le prestazioni di C1 e C2, in figura 17 si presentano in risultati in condizioni di cielo coperto comparati con C0 senza tenda. C1 non va considerato, poiché a cielo coperto la tenda veneziana riflettente sarà ritirata, per C2 si noti come in prossimità della finestra i valori medi di illuminamento siano accettabili, maggiori di 350 lux. In condizioni di cielo sereno, figura 18, C1 dimostra un'eccellente capacità di redirezionare la componente diretta della radiazione solare verso il soffitto e, quindi, di illuminare in modo diffuso l'ambiente. I valori medi in figura 18, evidenziano anche un controllo notevole in prossimità della finestra e, di conseguenza, la capacità di limitare le luminanze. Cosa che, al contrario, non si riesce ad ottenere con C2. Nonostante una trasmissione



luminosa intorno al 30% ed alle capacità diffondenti del materiale, i valori di illuminamento in prossimità della facciata sono molto elevati e, come dimostrato da analisi puntuali non presentate in questo sommario e disponibili su richiesta, il controllo delle luminanze non è garantito in diverse ore del giorno. Nella figura 18, i valori medi di C2 salgono intorno a 5 kLux, anche se la scala del diagramma tronca i valori superiori a 3 kLux.

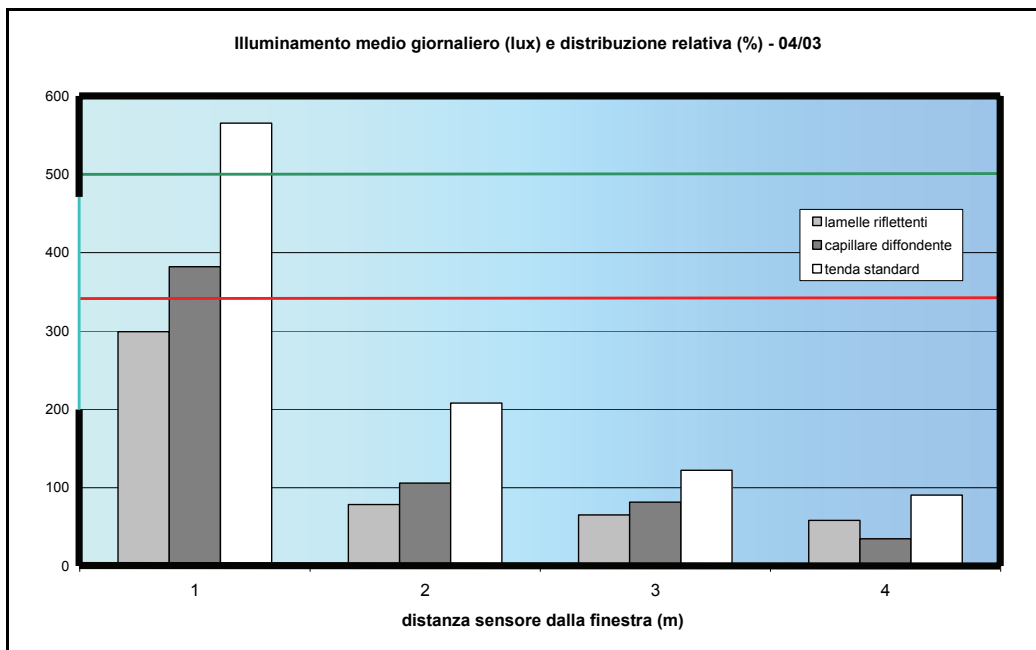


Figura 17 Illuminamento medio di C3 rispetto al vetro standard

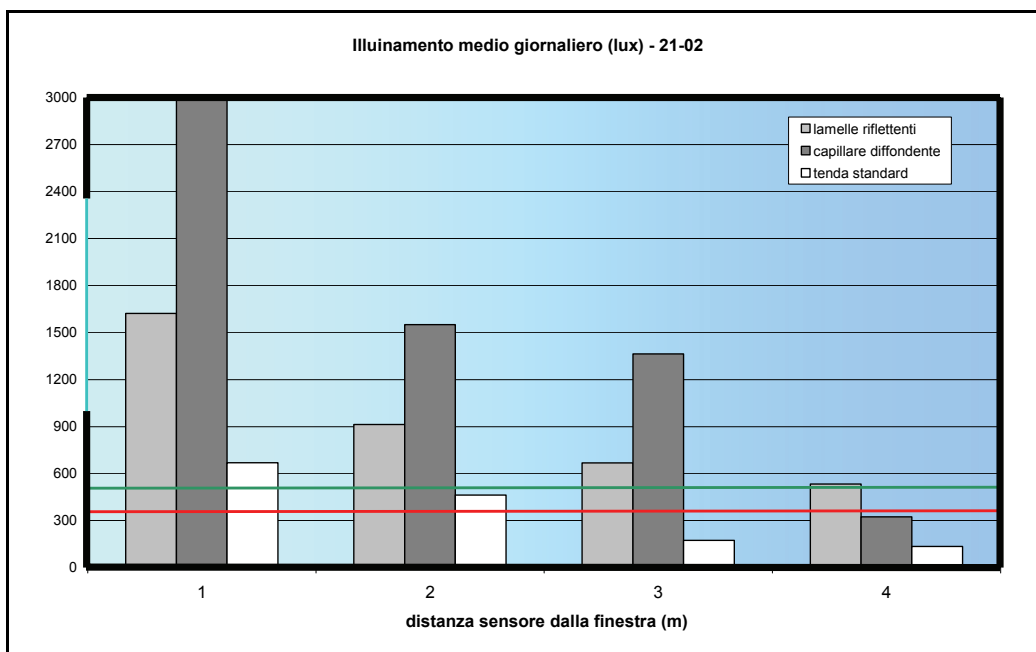


Figura 18 Illuminamento medio di C3 rispetto al vetro standard

I risultati di questa attività evidenziano tutte le potenzialità dei sistemi dinamici di ottimizzare le prestazioni illuminotecniche di ambienti illuminati in modo naturale. Sistemi fissi, riescono a fornire buone prestazioni in molte condizioni ma, talvolta, evidenziano dei limiti superabili solo con l'utilizzo di schermi aggiuntivi o con l'integrazione della luce artificiale. L'utilizzo di tende convenzionali, insieme ai tipici comportamenti degli utenti fanno sì che in condizioni di cielo non

coperto sia necessario con continuità attivare la luce artificiale per livelli insufficienti di illuminamento.

## **8. Sviluppo di uno strumento di calcolo per i sistemi trasparenti**

L'idea di base era la possibilità di realizzare uno strumento di calcolo per la verifica delle proprietà solari, luminose e termiche dei serramenti che realizzasse due condizioni fondamentali:

- Essere intuitivo e semplice nella gestione, affinché possa essere utilizzato anche da utenti non esperti. La rilevanza sempre maggiore del problema energetico in edilizia ha portato la necessità di affrontare questi problemi anche ad utenti non specializzati: si pensi ai periti agrari che possono essere abilitati alla figura di certificatore energetico per gli edifici, piuttosto che operatori nel campo dei serramenti, del vetro, dei sistemi ombreggianti.
- Implementare le norme di riferimento, ovvero alcune di quelle presentate al paragrafo 2, per i componenti di involucro trasparente.

Sono tuttavia sorti dei problemi di conflitto tra i due punti precedenti. Alcune delle norme in esame utilizzano i dati spettrali dei singoli materiali. Utilizzare input di questo tipo avrebbe però reso lo strumento pesante e meno gestibile dagli utenti. Per ovviare a questo problema si è deciso di mantenere gli algoritmi di calcolo delle norme, utilizzando per i valori integrati piuttosto che quelli spettrali. Questo può portare a delle variazioni sui risultati finali, variazioni contenute però in differenze accettabili, come verificato in un'ampia casistica di test di controllo.

Il tool consta di due moduli fondamentali: il calcolo della trasmittanza termica del componente finestrato ed il calcolo delle proprietà luminose e solari della parte trasparente integrata con elementi schermanti. Di seguito si illustrano le funzionalità principali dello strumento.

Il modulo serramento implementa il calcolo della trasmittanza termica secondo la norma UNI EN ISO 10077 parte 1, a partire dalla geometria del sistema, dalle caratteristiche termo fisiche dei materiali e da alcuni dati pre-calcolati. Il modello considera anche il contributo degli elementi di chiusura (avvolgibili e persiane) ed esegue il calcolo della trasmittanza termica in tre condizioni: senza chiusura, con chiusura e con chiusura temporanea. L'ultimo valore è quello definito trasmittanza termica corretta dalla norma UNI TS 11300 parte 1 ed è utilizzabile nel calcolo standardizzato del fabbisogno energetico degli edifici. Sono considerati due metodi operativi:

- Metodo semplificato. Dimensioni fisse del serramento e geometrie bloccate, lasciando solo la possibilità di variare percentualmente la dimensione del telaio.
- Metodo dettagliato. La geometria è liberamente definita dall'utente.

In figura 19 si presenta la schermata tipica del progetto finestra. Si riconoscono i pulsanti di selezione, i campi per i database di materiali disponibili e la finestra centrale con i campi per l'insirimento dei dati geometrici e termo fisici del serramento. Ulteriori database sono disponibili e vi si accede attraverso il pulsante con punto interrogativo a lato del campo di pertinenza.

Il secondo modulo consente il calcolo delle caratteristiche luminose ed energetiche dei componenti vetrati accoppiati ad elementi schermanti da inserire in esterno, interno ed in intercapedine. Per queste ultime sono anche considerate le possibilità di ventilazione naturale e forzata. La norma di riferimento usata per lo sviluppo del modello è la UNI EN 13363 parte 2, ovvero quella più accurata. Per quest'ultima è necessario implementare la norma ISO 150099, molto più complessa che richiede però un livello di conoscenza più approfondito. Il tool esegue anche il calcolo delle caratteristiche della sola parte vetrata secondo le norme di riferimento UNI EN 410 (caratteristiche luminose ed energetiche) e 673 (caratteristiche termiche), utilizzando però solo dati integrati. Una limitazione legata alla norma è la possibilità di considerare la radiazione attraverso il componente schermante solo di tipo diffuso, eliminando quindi la trasmissione diretta.

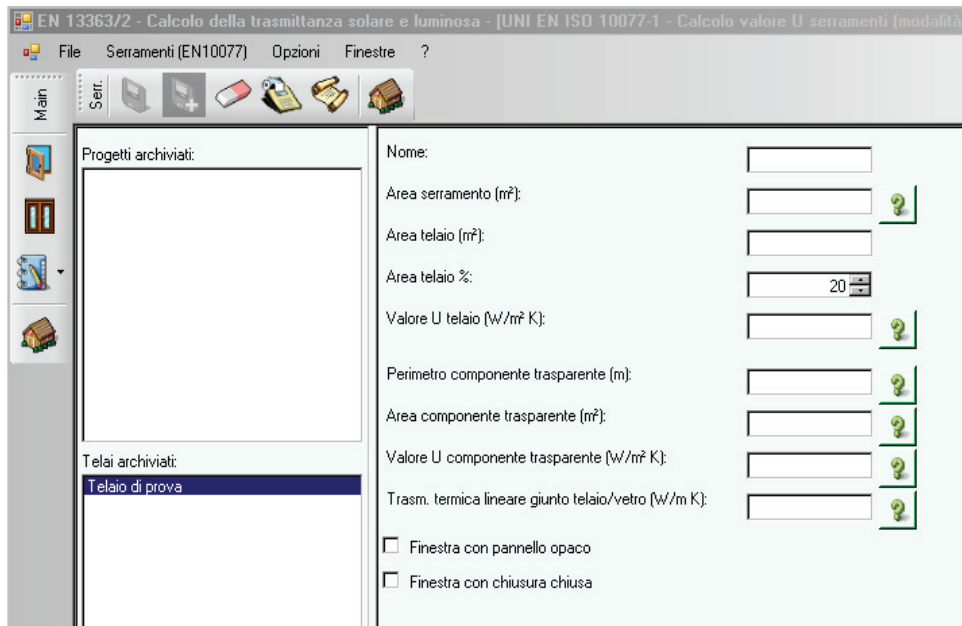


Figura 19 Schermata del tool – modulo serramento

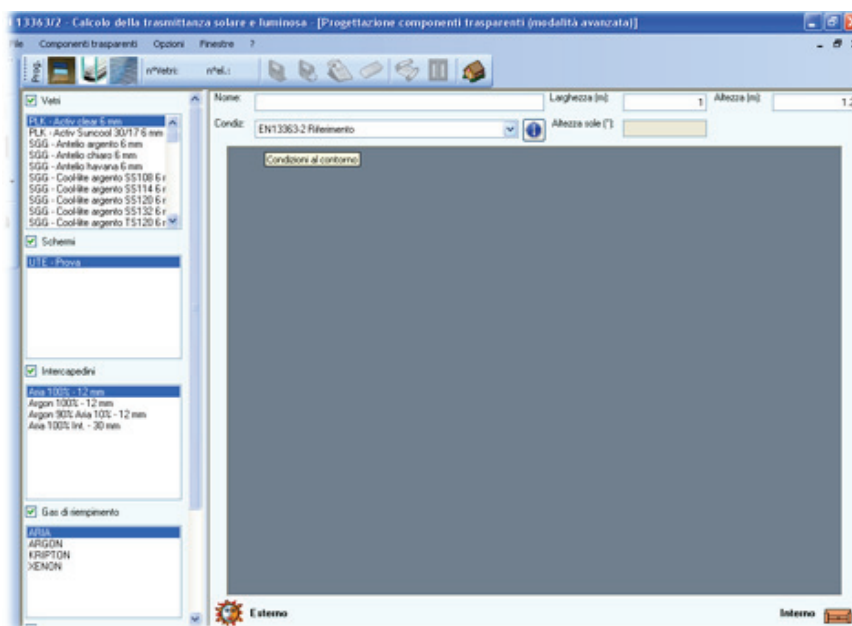


Figura 20 Schermata del tool – modulo sistema trasparente

Si è cercato di semplificare l'interfaccia quanto più possibile, la soluzione adottata è quella di associare un oggetto all'interno della schermata ad una tipologia di materiale. La schermata principale è presentata in figura 20. L'utente può selezionare un materiale nuovo attraverso un pulsante o semplicemente trascinarlo da un database di prodotti esistenti, i dati necessari per il calcolo sono quelli nei campi di ciascun oggetto, come presentato in figura 21. Questi ultimi sono:

- Elemento trasparente;
- Gas;
- Intercapedine;
- Elemento schermante;

- Progetto trasparente.

Una serie di valori sono inseriti nei database del programam, essi provengono da prodotti industriali, così come dichiarati in documenti di dominio pubblico, oppure da valori di riferimento suggeriti dalle norme di riferimento.

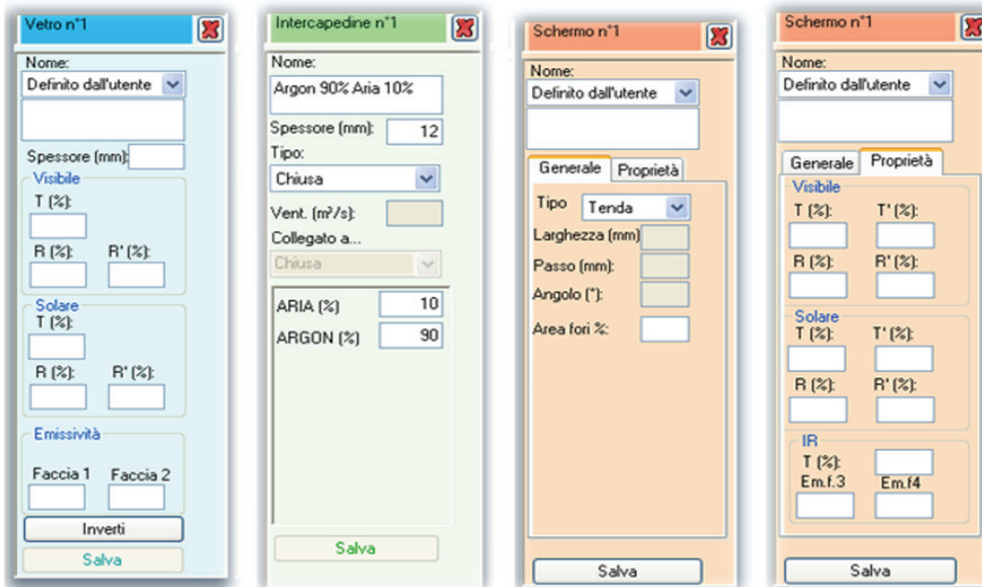


Figura 21 Schermata del tool – i dati dei materiali

Il tool esegue i calcoli soltanto se tutti i campi sono compilati in modo corretto, in caso contrario compaiono dei *warning* con riferimento ai campi mancanti.

La versione attuale dello strumento ha un piccolo report di misura, si veda la figura 22, nel quale sono inseriti le principali grandezze calcolate. Si noti che calcolando il fattore solare g con e senza schermi si forniscono all'utente i dati da utilizzare per il calcolo del fattore solare corretto secondo la norma UNI TS 11300. tale calcolo va eseguito su base mensile utilizzando dei coefficiente di utilizzo di default per mese ed esposizione della finestra secondo quanto definito dalla norma stessa.

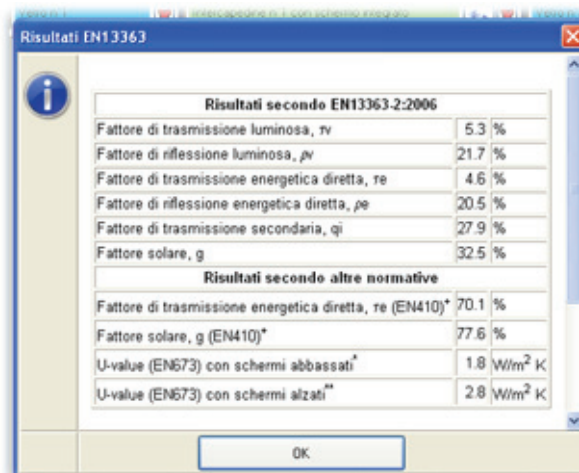


Figura 22 Schermata del tool – il report