



Ricerca di Sistema elettrico

Metodologia di analisi degli apporti solari nel
bilancio energetico degli edifici in funzione
della risposta angolare della riflettanza solare
dei componenti di involucro opaco

Roberto de Lieto Vollaro, Emiliano Carnielo

METODOLOGIA DI ANALISI DEGLI APPORTI SOLARI NEL BILANCIO ENERGETICO DEGLI EDIFICI IN FUNZIONE DELLA RISPOSTA ANGOLARE DELLA RIFLETTANZA SOLARE DEI COMPONENTI DI INVOLUCRO OPACO

Roberto de Lieto Vollaro, Emiliano Carnielo (Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria, Sezione Ingegneria Meccanica Industriale)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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

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

Obiettivo: Sviluppo , sperimentazione e caratterizzazione di materiali innovativi (cool material)

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Analisi degli apporti solari nel bilancio energetico degli edifici in funzione della risposta angolare della riflettanza solare dei componenti di involucro opaco"*

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Univ. Sapienza Roma Tre: Roberto De Lieto Vollaro

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 NOMENCLATURA.....	6
3 METODOLOGIA.....	6
4 ANALISI SPERIMENTALE.....	7
4.1 MATERIALI TESTATI.....	7
4.2 ANALISI DIREZIONALE DELLA RIFLESSIONE.....	9
4.2.1 <i>Note teoriche</i>	9
4.2.2 <i>Descrizione dello strumento di misura</i>	11
4.2.3 <i>Risultati</i>	12
4.3 ANALISI SPETTROFOTOMETRICA.....	14
4.3.1 <i>Descrizione dello strumento di misura</i>	14
4.3.2 <i>Risultati</i>	16
5 ANALISI NUMERICA.....	18
5.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO.....	18
5.2 RISULTATI.....	19
6 CONCLUSIONI.....	21
7 BIBLIOGRAFIA.....	22

Sommario

I materiali utilizzati per la costruzione di edifici e per la pavimentazione stradale sono generalmente caratterizzati da una riflessione della radiazione solare di tipo diffuso. Questa caratteristica permette di considerare i loro valori di riflettanza, e quindi di assorbanza, praticamente costanti al variare dell'angolo di incidenza di un fascio luminoso che li colpisce. D'altra parte questa assunzione non è valida per materiali che presentano riflessioni regolari (speculari) che seguono la legge teorica di Fresnel, come per esempio vetri o superfici lucidate, nei quali il potere di riflessione del materiale è strettamente dipendente dall'angolo di incidenza.

I "cool material" sono materiali innovativi, generalmente usati come rivestimento per gli edifici, caratterizzati da un'elevata riflettanza solare e da un'elevata emissività termica. Riflettere la maggior parte della radiazione solare significa creare dei profili di temperatura superficiale nell'arco della giornata sensibilmente più bassi rispetto a quelli che generalmente sono misurati per i materiali convenzionali. Per questo motivo essi rappresentano un'efficiente soluzione sia per diminuire la temperatura all'interno degli edifici migliorando il comfort, sia, come dimostrato da alcuni studi, per mitigare la temperatura dell'ambiente esterno, se utilizzati su scala urbana come tinte per asfalti e calcestruzzi. I suddetti "cool material" possono presentare un comportamento intermedio di riflessione con componenti diffuse e regolari dato che spesso sono realizzati con superfici lisce al fine di aumentare il loro potere di riflessione globale. In tal caso si rende necessaria una caratterizzazione completa delle loro proprietà superficiali che comprenda oltre alle analisi spettrofotometriche anche analisi goniofotometriche per individuare la forma della riflettanza direzionale e per valutare, quindi, la presenza di componenti regolari di riflessione che potrebbero creare problemi di abbagliamento e discomfort visivo rendendo difficoltosa l'integrazione dei suddetti materiali per usi su scala di edificio e urbana.

Questo studio è mirato a dimostrare la dipendenza della riflettanza solare dall'angolo di incidenza tramite analisi sperimentali. I campioni selezionati per la sperimentazione in laboratorio sono relativi a quattro materiali tipicamente usati per il rivestimento dei tetti con superfici che vanno da una finitura molto scabra ad una molto liscia. Sono state condotte analisi goniofotometriche qualitative volte a valutare la distribuzione angolare del potere di riflessione attraverso la misura del coefficiente di luminanza/radianza o BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) e analisi spettrali. Quest'ultima tipologia di misurazioni è stata condotta attraverso un banco ottico sperimentale equipaggiato con una sfera integratrice di 75 cm di diametro necessaria per la misura della riflettanza spettrale di materiali con componenti diffuse a diversi angoli di incidenza del fascio generato dalla sorgente luminosa.

A partire dai risultati sperimentali è stato possibile costruire una funzione matematica mediante interpolazione "spline" che collegasse il valore di riflettanza solare all'angolo di incidenza. La suddetta funzione è stata poi inserita all'interno di un software dinamico di modellizzazione energetica al fine di calcolare alcuni parametri fisici delle superfici esterne (carichi solari e flussi energetici di dispersione) di un edificio di riferimento posto a tre diverse latitudini relative a tre città italiane: Milano, Roma e Palermo. Si è poi proceduto a confrontare i risultati ottenuti dall'analisi numerica con quelli ottenuti con il metodo semplificato, presente nella maggior parte dei software di calcolo energetico, che considera la riflettanza di un materiale indipendente dall'angolo di incidenza (materiale con riflessione lambertiana e quindi perfettamente diffondente). Il confronto dei risultati ha dimostrato come il metodo di calcolo che considera la riflettanza costante sovrastimi il potere di assorbimento solare delle superfici. I carichi solari, ottenuti con il metodo a riflettanza dipendente dall'angolo di incidenza introdotto in questo studio, risultano essere, in alcuni casi, anche inferiori del 17% rispetto al metodo di calcolo a riflettanza costante e sono state rilevate variazioni dei flussi di dispersione termica maggiori del 7% per superfici con esposizione sud ed orizzontali.

Il metodo proposto ha quindi messo in evidenza i limiti relativi al calcolo degli apporti solari dei modelli termo-fisici generalmente utilizzati per condurre analisi energetiche su scala di edificio.

1 Introduzione

L'influenza che l'ambiente urbano ha sul clima gioca un ruolo importante nello sviluppo di obiettivi sostenibili. Si stima, infatti, che dal 2030 circa 4/5 della popolazione europea vivrà in aree urbane [1]. Questo esponenziale sviluppo delle aree urbane associato al global warming si tradurrà in ondate di calore più frequenti e di durata maggiore.

I cool material, che siano bianchi o colorati, sono caratterizzati da un'elevata riflettanza nello spettro dell'infrarosso vicino. Essi sono una tecnica ampiamente testata per applicazioni sull'involucro edilizio con risultati soddisfacenti ai fini della diminuzione delle temperature delle superfici esterne (data l'elevata riflettanza solare), come dimostrato da diverse analisi sia numeriche [2-6] che sperimentali [7-15]. Questi materiali però, se utilizzati su scala urbana come tinte per asfalti o calcestruzzi possono contribuire a mitigare la temperatura dell'ambiente dato il basso valore di temperatura superficiale che si traduce in un minor scambio termico per convezione con l'aria [16-18].

I benefici derivanti dai cool material dipendono da due proprietà fisiche delle superfici: la riflettanza solare (tipicamente indicata con ρ_e) che rappresenta l'abilità del materiale a riflettere la radiazione globale incidente e l'emissività termica (indicata con ϵ) definita come l'abilità di una superficie di emettere il calore assorbito. Elevati valori di queste proprietà, in particolare della riflettanza solare, permettono al materiale di rimanere "freddo" anche se sottoposto ad elevati carichi solari con profili di temperatura superficiale giornaliera sensibilmente minori rispetto a quelli dei materiali convenzionali, riducendo il calore rilasciato sia in ambienti interni che esterni.

La riflettanza solare è generalmente espressa in termini globali come il rapporto tra la radiazione globale (regolare + diffusa) riflessa da una superficie e la radiazione globale incidente (diretta + diffusa) su di essa. Nonostante ciò, per calcoli accurati e per un maggior livello di dettaglio della caratterizzazione ottica e solare di una superficie è importante riuscire ad individuare e misurare separatamente le componenti diffuse e regolari di riflessione attraverso un'analisi goniofotometrica. Essa si realizza attraverso una misura della distribuzione spaziale del coefficiente di luminanza/radianza "q", indicato anche come BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function) [19, 20]. Le proprietà direzionali della riflessione e della trasmissione ottica sono state investigate in alcuni studi mirati a valutare le performance nello spettro visibile di sistemi di vetratura convenzionali e avanzati [21-23].

Anche per quanto riguarda i materiali opachi l'investigazione delle proprietà direzionali può essere rilevante in particolare per quelli che presentano superfici lisce come spesso accade per i cool material. Queste proprietà, infatti, potrebbero avere un impatto sensibile sul comfort termico e visivo (problemi di abbagliamento).

La radiazione solare varia la sua intensità durante il giorno. Essa, come anticipato prima, può essere suddivisa in due componenti, una diffusa ed una diretta, in percentuali che variano in base all'ora e alla latitudine. Mentre la componente diffusa colpisce sempre una superficie da ogni direzione, la componente diretta la colpisce variando il suo angolo di incidenza durante il giorno. La maggior parte dei modelli termofisici utilizzati per l'analisi energetica degli edifici tiene conto della distribuzione geometrica delle due componenti solari, ma considera costante la riflettanza delle superfici ad ogni angolo in cui la radiazione diretta incide su di esse. Ciò equivale ad assumere le superfici come perfettamente diffondenti o lambertiane (distribuzione costante della radianza emisferica ad ogni angolo di incidenza). Questo assunto potrebbe non risultare valido per alcuni materiali che presentano riflessioni miste con componenti regolari rilevanti dipendenti dall'angolo di incidenza (secondo la legge di Fresnel), sottostimando in questo modo il loro potere di riflessione e, di conseguenza, sovrastimando gli apporti solari.

Questo report riporta lo studio della dipendenza angolare della riflettanza per alcuni campioni di materiali tipicamente utilizzati per il rivestimento del tetto degli edifici.

2 Nomenclatura

Simbolo	Quantità	[Unità SI]
<i>A</i>	Area	[m ²]
<i>E</i>	Irradianza - Illuminamento	[W/m ²] - [cd·sr/m ²]
<i>L</i>	Radianza - Luminanza	[W/m ² ·sr] - [cd/m ²]
<i>q</i>	Coefficiente di radianza - luminanza	[1/sr]
<i>e</i>	Emissività	[-]
<i>α</i>	Assorbanza	[-]
<i>ε</i>	Angolo di incidenza - riflessione	[°]
<i>φ</i>	Angolo azimutale	[°]
<i>Φ</i>	Flusso radiante	[W]
<i>ρ</i>	Riflettanza	[-]
<i>Ω</i>	Angolo solido	[sr]
Pedici		
<i>b</i>	Diretto	
<i>d</i>	Diffuso	
<i>e</i>	Solare	
<i>i</i>	Elemento infinitesimo	
<i>r</i>	Riflesso	
<i>tot</i>	Totale	
<i>1</i>	Incidence half-plane	
<i>2</i>	Reflection half-plane	

3 Metodologia

I carichi solari che interessano una superficie comunque orientata si ottengono moltiplicando il valore dell'irradianza solare incidente sulla superficie per il valore dell'assorbanza solare della superficie stessa. Quest'ultima rappresenta il complemento ad uno della riflettanza solare come espresso nella seguente equazione 1:

$$= (1 - \rho_e) \alpha_e \quad (1)$$

L'espressione che governa i carichi solari su una superficie nella maggior parte dei modelli termo-fisici è riportata la seguente equazione 2:

$$Q_{SL} = I_b \cdot (1 - \rho_e) + I_d \cdot (1 - \rho_e) = (I_b + I_d) \cdot (1 - \rho_e) = I_g \cdot (1 - \rho_e) \quad (2)$$

Essa considera implicitamente che la superficie sia lambertiana, perfettamente diffondente, con una riflettanza che non varia con l'angolo di incidenza della radiazione solare diretta. Il metodo riportato nel report permette di considerare i carichi solari non solo in funzione dell'intensità dell'irradianza solare globale, ma anche in funzione del potere di riflessione della superficie interessata variabile con l'angolo di incidenza. Per questo motivo sono stati introdotti due tipi di riflettanze. La prima, indicata con $\rho_{b-tot}(\vartheta)$, è la riflettanza direzionale emisferica che dipende dall'angolo, ottenuta dall'interpolazione dei dati sperimentali

ottenuti con misure spettrofotometriche a diversi angoli di incidenza. Essa è correlata alla radiazione solare diretta che è la componente solare che colpisce le superfici con angoli di incidenza variabili. La seconda componente di riflettanza è quella costante, indicata con ρ_{d-d} , ottenuta dalla media integrale della prima calcolata tra 0 e 90 gradi, come si vede nell'equazione 4. Essa è correlata all'irradianza solare diffusa che colpisce una superficie da ogni direzione. La precedente espressione dei carichi solari viene quindi modificata come riportato nell'espressione 3.

$$Q_{SL}(\theta) = I_b \cdot [1 - \rho_{b-tot}(\theta)] + I_d \cdot (1 - \rho_{d-d}) \quad (3)$$

Con

$$\rho_{d-d} = \frac{1}{90} \int_0^{90} \rho_{b-tot}(\theta) \cdot d\theta \quad (4)$$

Misure ottiche e solari (sia direzionali che spettrali) sono state condotte su quattro campioni di materiali di rivestimento delle coperture a differenti angoli di incidenza. I risultati sono stati usati per ricavare una correlazione tra l'angolo di incidenza e la riflettanza in forma di equazione. Quest'ultima è stata inserita in un software di calcolo energetico, il TRNSYS al fine di confrontare i valori di diversi parametri energetici relativi ai componenti dell'involucro edilizio ottenuti applicando il metodo a riflettanza dipendente dall'angolo precedentemente descritto e il metodo semplificato presente di default nel software a riflettanza costante. Da questo momento in poi il primo metodo verrà indentificato con l'acronimo MRV (Metodo a Riflettanza Variabile) e il secondo metodo con l'acronimo MS (Metodo Semplificato).

4 Analisi sperimentale

4.1 Materiali testati

I materiali scelti per l'analisi sperimentale sono quattro tipici materiali da costruzione utilizzati per il rivestimento dei tetti con finitura superficiale diversa per esaminare come essa influenzi la forma della riflettanza direzionale emisferica. Di seguito sarà riportata una breve descrizione di ogni singolo campione accompagnata da una immagine della superficie.

MEMBRANA 1: è una membrana flessibile poliolefinica con una finitura superficiale ruvida (Figura 1).

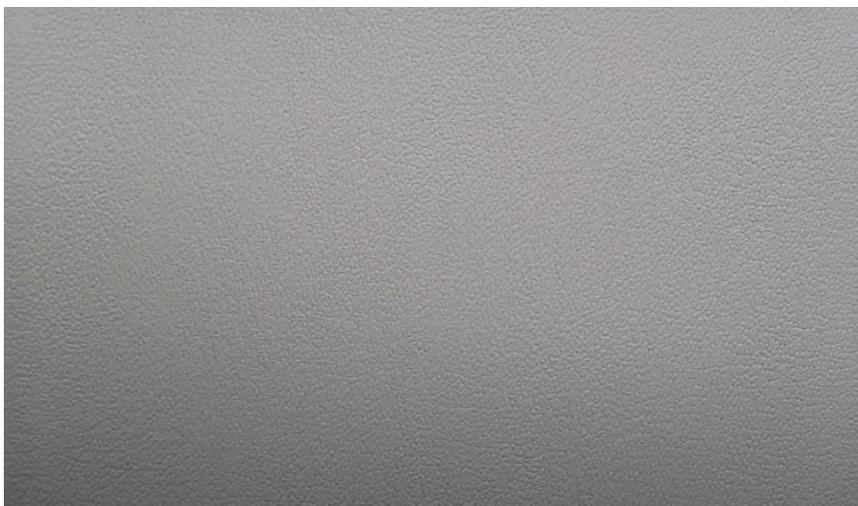


Figura 1. Membrana 1 poliolefinica

MEMBRANA 2: è una membrana in PVC dal colore grigio chiaro che presenta una superficie caratterizzata da un motivo a rombi con finitura liscia (Figura 2).



Figura 2. Membrana 2 in PVC

MATTONELLA: è una mattonella di colore beige di ceramica con venature tipo marmo. La superficie presenta una finitura liscia (Figura 3).



Figura 3. Mattonella di ceramica

GUAINA BITUMINOSA: è una guaina sabbiata di colore grigio scuro. La presenza di granuli di ghiaia di piccole dimensioni determina una ruvidità elevata (Figura 4).



Figura 4. Guaina bituminosa

4.2 Analisi direzionale della riflessione

4.2.1 Note teoriche

La valutazione delle direzioni preferenziali di riflessione richiede una caratterizzazione fotometrica/radiometrica generalmente ottenuta tramite la misura del coefficiente di luminanza/radianza “q” spesso indicato come BRDF (Bi-directional Reflectance Distribution Function).

La correlazione teorica tra il coefficiente di luminanza/radianza e la riflettanza direzionale emisferica può essere calcolato come segue, facendo riferimento al paragrafo 2 “Nomenclatura” e alla Figura 5 per la simbologia usata. Sia dA un elemento infinitesimo della superficie di un materiale e dL_i la radianza incidente sull’elemento. Il flusso radiante incidente su dA è:

$$d^2\Phi_i = dL_i \cdot dA \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot d\Omega_1 \quad (5)$$

dove $d\Omega_1$ è l’angolo solido nel quale è confinata la radianza dL_i . L’irradianza così prodotta su dA è:

$$dE_i = \frac{d^2\Phi_i}{dA} = dL_i \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot d\Omega_1 \quad (6)$$

La radiazione riflessa da dA nelle varie direzioni può essere espressa tramite la radianza riflessa L_r , che generalmente presenta differenti valori per direzioni differenti. Il coefficiente di radianza “q” è definito come il rapporto tra la radianza riflessa e l’irradianza prodotta dal materiale:

$$q_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \frac{dL_{r,\varepsilon_2}(\varphi)}{dE_{i,\varepsilon_1}} = \frac{dL_{r,\varepsilon_2}(\varphi)}{dL_{i,\varepsilon_1} \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot d\Omega_1} \quad (7)$$

Dove le direzioni di incidenza e riflessione sono individuate dai rispettivi angoli riportati nei pedici dopo la virgola (Figura 5). La riflettanza (rapporto tra il flusso radiante riflesso e quello incidente) può essere calcolata come segue:

$$\rho_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \frac{d\Phi_{r,\varepsilon_2}}{d\Phi_{i,\varepsilon_1}} \quad (8)$$

dato che:

$$d^2\Phi_{i,\varepsilon_1} = dL_{i,\varepsilon_1} \cdot dA \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot d\Omega_1 \quad (9)$$

$$d^2\Phi_{r,\varepsilon_2} = dL_{r,\varepsilon_2} \cdot dA \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot d\Omega_2 \quad (10)$$

si ottiene

$$\rho_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = \frac{dL_{r,\varepsilon_2}}{dL_{i,\varepsilon_1} \cdot \cos \varepsilon_1 \cdot d\Omega_1} \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot d\Omega_2 \quad (11)$$

E infine:

$$\rho_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} = q_{\varepsilon_1/\varepsilon_2} \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot d\Omega_2 \quad (12)$$

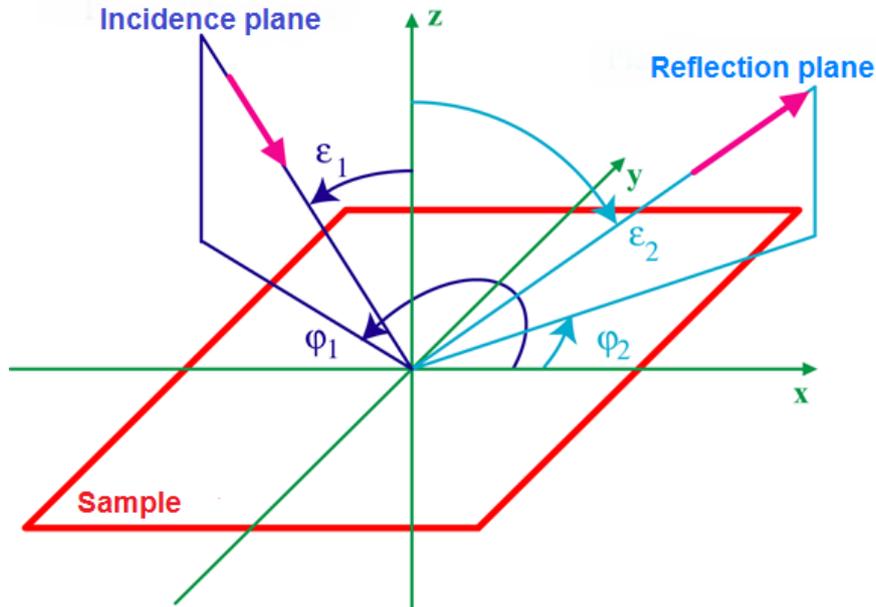


Figura 5. Distribuzione geometrica dei fasci luminosi e riflessi

Partendo dai valori di riflettanza direzionale è possibile calcolare il fattore di riflessione direzionale emisferico, per un angolo di incidenza ε_1 , integrando la precedente equazione nel volume di riflessione delimitato dall'angolo di riflessione ε_2 e dall'angolo azimutale φ_2 :

$$\rho_{\varepsilon_1,tot} = \int_{\varphi_2=0}^{2\pi} \int_{\varepsilon_2=0}^{\pi/2} q(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi_1, \varphi_2) \cdot \cos \varepsilon_2 \cdot \sin \varepsilon_2 d\varepsilon_2 \cdot d\varphi_2 \quad (13)$$

4.2.2 Descrizione dello strumento di misura

Lo strumento utilizzato per l'analisi direzionale della riflessione, riportato in Figura 6, è un goniometro sperimentale messo a disposizione dall'INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) [24].

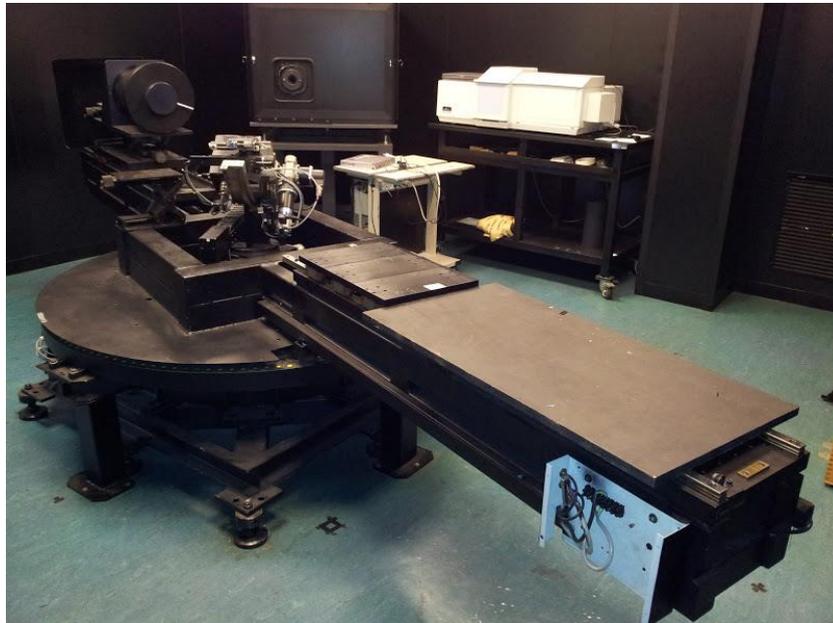


Figura 6. Goniometro

Esso è costituito dalle seguenti parti:

- Una lampada al tungsteno con potenza regolabile da 250 a 1000 Watt;
- Un luminanzometro digitale composto da un sensore CCD (Charge Couple Device), un dispositivo in grado di acquisire una immagine della scena di misura e da un filtro calibrato sulla curva di sensibilità dell'occhio umano $V(\lambda)$;
- Una movimentazione meccanica garantita da otto motori elettrici passo-passo. La figura 7 mostra una rappresentazione schematica dei movimenti del goniometro: quattro lineari (1, 2, 3 e 6) e quattro circolari (0, 4, 5 e 7).

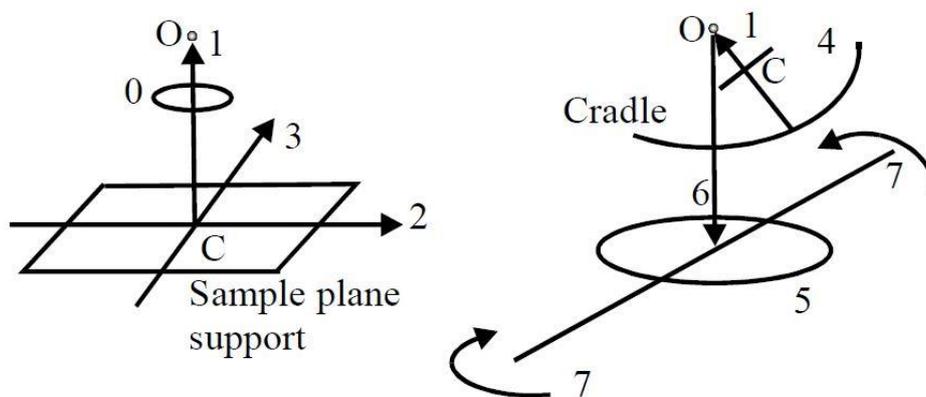


Figura 7. Movimenti del goniometro lineari (1, 2, 3 e 6) e circolari (0, 4, 5 e 7)

Il movimento 1 sposta il campione lungo una direzione normale al piano di posizionamento per ottenere il giusto allineamento della superficie del campione e il centro di misura (correzione dello spessore).

I movimenti 2 e 3 spostano il campione nelle altre due direzioni per consentire il centraggio con la sorgente.

Il movimento 6 solleva e abbassa il campione per consentire la commutazione della misura dal campione al riferimento.

Il movimento 0 permette di ruotare il campione intorno alla normale della sua superficie.

Il movimento 4 permette di inclinare il campione secondo un angolo compreso tra 0° e 100° rispetto al piano orizzontale.

Il movimento 5 ruota l'intero porta campione lungo un asse perpendicolare al piano di rotazione del sensore.

Il movimento 7 ruota l'intero banco ottico sul quale è installato il sensore.

La risoluzione angolare dello strumento è 2° con un'incertezza di misura di 0.01°. Il diametro del fascio della sorgente può essere variato da pochi millimetri fino ad un massimo di 10 cm.

4.2.3 Risultati

Sono state eseguite misure del coefficiente di radianza solo su un piano normale alla superficie del campione poiché lo scopo è stato solo quello di valutare qualitativamente la forma della riflessione in questo piano al fine di individuare la presenza di direzioni preferenziali di riflessione. La valutazione del valore di riflettanza è stata affidata all'analisi spettrale i cui risultati verranno analizzati in seguito.

I test sono stati condotti a diversi angoli di incidenza tra sorgente luminosa e campioni: 8°, 30°, 45° e 60° (gli angoli sono misurati a partire dalla normale alla superficie del campione). L'incidenza ad 8° rappresenta la condizione di misura "near normal" che si riscontra negli strumenti commerciali per l'analisi spettrale. Non si sono potute effettuare misure con angoli di incidenza superiori a 60° per problemi legati al setup di misura.

Nelle Figure 8, 9, 10 e 11 sono riportate le riflettanze direzionali calcolate a partire dai valori del coefficiente di luminanza "q" per i quattro materiali testati. Le riflettanze sono state normalizzate ad 1 secondo il valore massimo ottenuto dalle misure per i quattro angoli di incidenza.

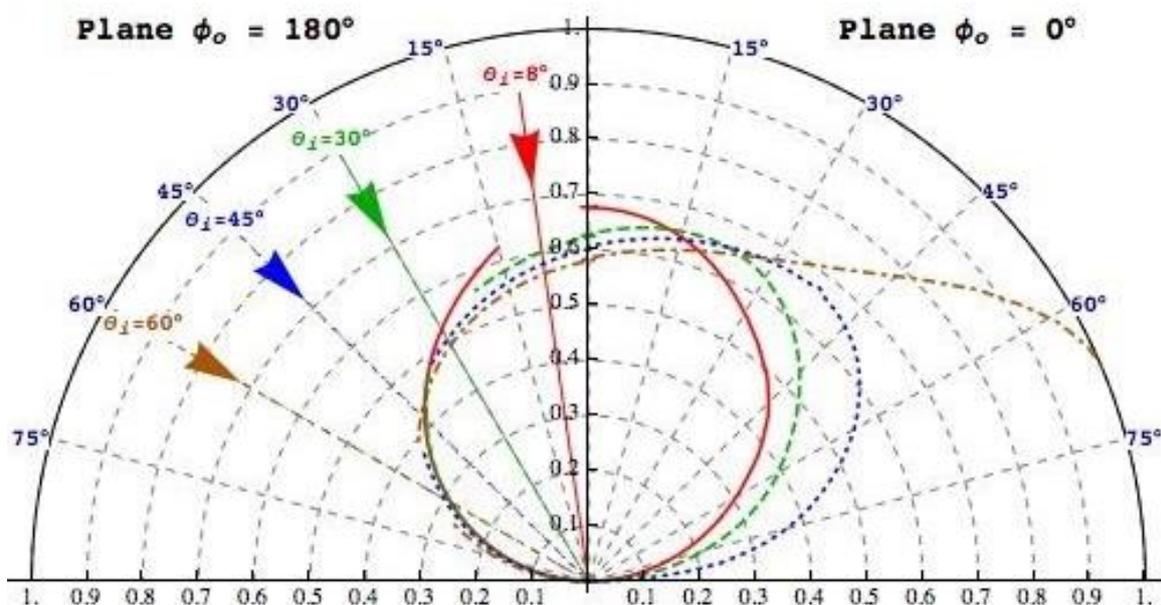


Figura 8. Forma della riflettanza direzionale relativa nel piano di misura della MEMBRANA 1 (ruvida)

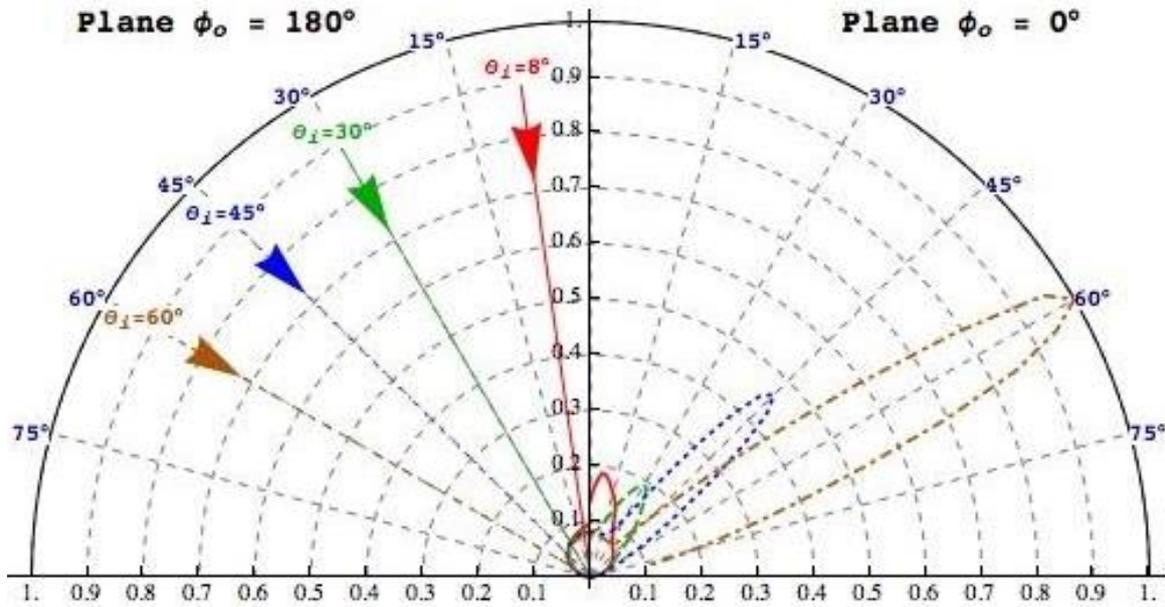


Figura 9. Forma della riflettanza direzionale relativa nel piano di misura della MEMBRANA 2 (liscia)

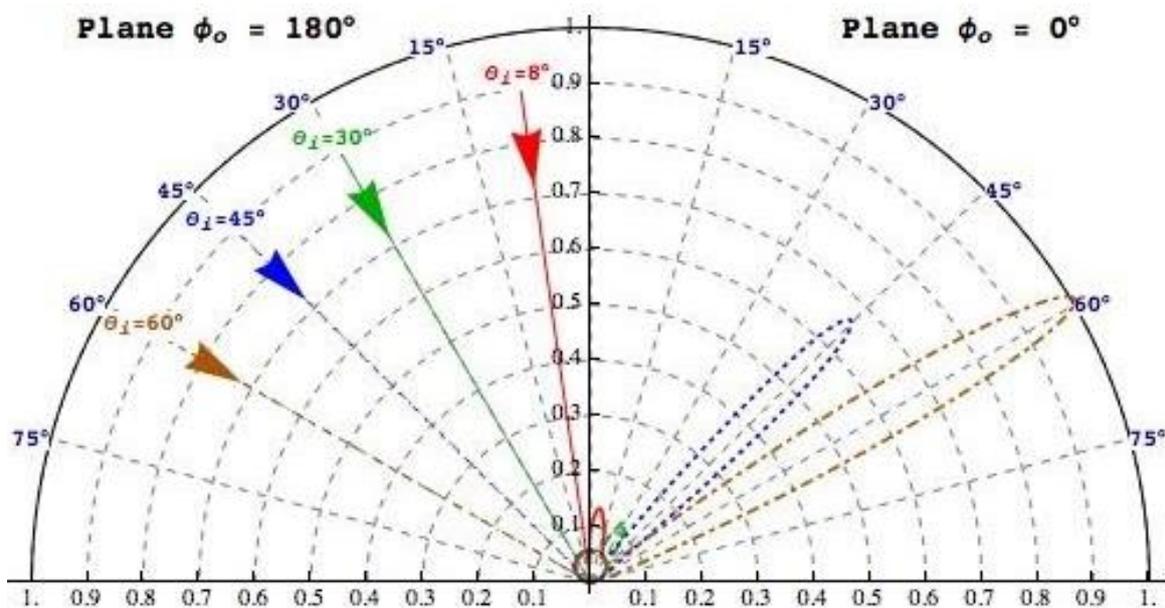


Figura 10. Forma della riflettanza direzionale relativa nel piano di misura della MATTONELLA (liscia)

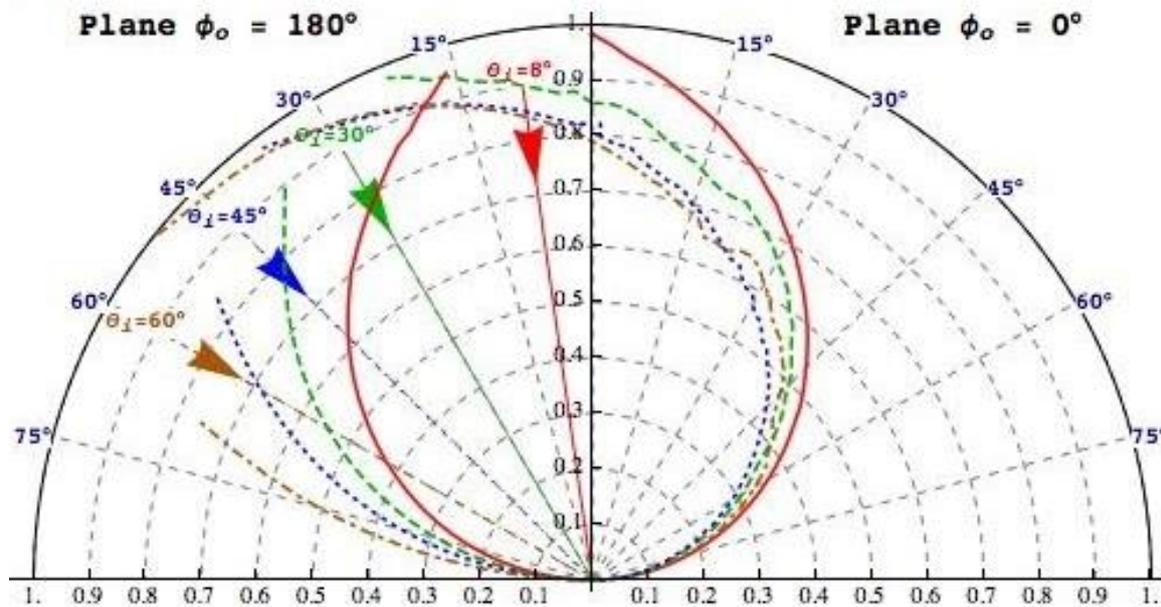


Figura 11. Forma della riflettanza direzionale relativa nel piano di misura della GUAINA BITUMINOSA (ruvida)

La forma della riflessione rilevata per i campioni dalla superficie ruvida, ovvero la Membrana 1 e la Guaina bituminosa sono quasi circolari e, data l'omogeneità della loro superficie, è ipotizzabile una forma di riflessione quasi sferica se si estendesse la misura a tutti gli angoli azimutali. La riflessione di questi campioni è diffusa non presentando componenti regolari. È interessante notare come la riflessione del campione di Guaina bituminosa si presenti principalmente nel semipiano di incidenza (a differenza degli altri campioni). Ciò è dovuto alla forte irregolarità e differenziazione morfologica dei granuli di cui è costituita la sua superficie.

Per i campioni dalla superficie liscia, ovvero la Membrana 2 e la Mattonella è stata rilevata una componente regolare di riflessione molto pronunciata, fortemente dipendente dall'angolo di incidenza e in posizione simmetrica alla direzione di incidenza rispetto all'asse normale al campione. I valori di riflettanza direzionale misurati nel picco della componente regolare a 60° sono anche 10 volte superiori rispetto a quelli ottenuti per 8° di incidenza. Il campione di mattonella presenta un picco di riflessione regolare 20 volte superiore rispetto al picco della componente diffusa.

4.3 Analisi spettrofotometrica

4.3.1 Descrizione dello strumento di misura

Le analisi spettrali sui campioni sono state condotte per mezzo di una installazione sperimentale situata presso i laboratori dell'ENEA Casaccia [25]. Lo strumento è composto dai seguenti elementi:

- Una lampada al tungsteno con potenza regolabile dai 250 ai 1000 Watt (Figura 12). Il diametro del raggio collimato può essere modulato attraverso un diaframma in funzione della tipologia di misura. Generalmente i diametri del fascio sono compresi tra i 4 e i 10 centimetri;
- Una sfera integratrice con un diametro di 75 centimetri composta da un involucro di alluminio e rivestita internamente di Spectralon, un materiale con una riflettività superiore al 95% nell'intero spettro solare (300-2500 nanometri). Sulla sfera sono presenti diverse porte al fine di poter compiere misure di riflettanza, trasmittanza ed assorbanza;
- Il sistema di rilevamento è costituito da tre array spettrometrici e da 3 sensori: NMOS che copre uno spettro compreso tra i 250 e i 1000 nanometri (dispersione 1,4 nm/pixel); InGaAs che copre uno spettro

compreso tra i 900 e i 1700 nanometri (dispersione 3,125 nm/pixel); ExtInGaAs che copre uno spettro compreso tra i 1600 e i 2500 nanometri (dispersione 3,52 nm/pixel).

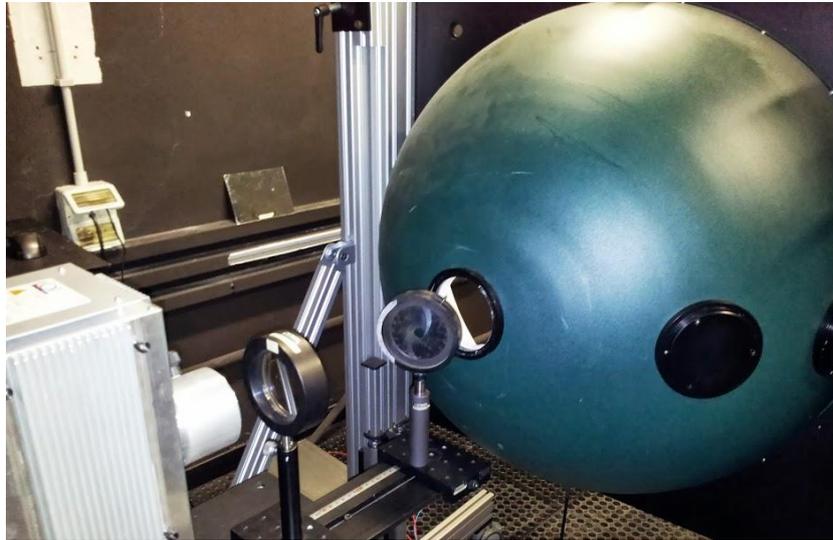


Figura 12. Lampada al tungsteno, lente a focale lunga, diaframma e sfera integratrice con porta di ingresso per le misure in riflettanza

Una caratterizzazione ottica che comprenda una variazione dell'angolo di incidenza del fascio luminoso sulla superficie del campione non è tipicamente realizzabile con spettrofotometri di tipo commerciale. Una sfera integratrice di grandi dimensioni consente invece di eseguire misure spettrali a diversi angoli di incidenza.

La riflettanza spettrale ad angoli di incidenza variabili si misura secondo la seguente procedura: il diametro della porta di ingresso è di 7,5 centimetri e quello del fascio di luce è di 6 centimetri. Una volta entrato dalla porta di ingresso il fascio colpisce il campione posizionato al centro della sfera grazie ad un porta-campione ancorato ad un braccio che può ruotare potendo così variare l'angolo di incidenza (Figura 13). La misura dell'energia riflessa dal campione alle varie lunghezze d'onda è rapportata a quella che si ottiene da un campione di riferimento in Spectralon di cui è nota e certificata la curva spettrale. Il risultato di questo rapporto è la curva di riflettanza spettrale del campione.



Figura 13. Campione posizionato al centro della sfera sul braccio rotante

Per problemi legati alla geometria del banco ottico, non è possibile eseguire misure con angoli di incidenza superiori a 75°. Come mostrato nella Figura 14, ad elevati angoli di incidenza, l'impronta del fascio sul campione è molto allungata oltrepassando il bordo del campione stesso e alterando in questo modo la misura. Per poter effettuare le misure in queste condizioni si procede traslando la sorgente e diminuendo la dimensione del fascio penalizzando però in questo modo la quantità di energia in ingresso, ottenendo un segnale meno pulito di quello che si ottiene a bassi angoli di incidenza.

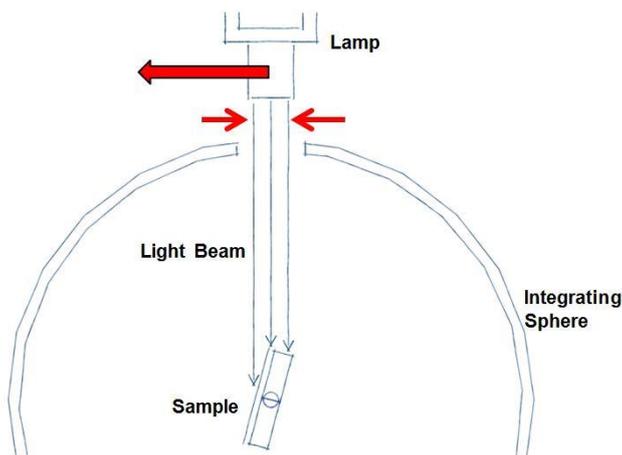


Figura 14. Condizioni di misura a 75° gradi di incidenza

4.3.2 Risultati

La riflettanza spettrale dei campioni è stata misurata per cinque angoli di incidenza: 8°, 30°, 45°, 60°, 75°. Lo spettro di misura è compreso tra i 380 e i 1700 nanometri pari al 92.7% dell'intero spettro solare.

La Figura 15 riporta l'andamento spettrale della riflettanza per i cinque angoli di incidenza del campione denominato "Membrana 2" (membrana in PVC dalla finitura superficiale liscia). Si nota come il responso spettrale sia sensibilmente influenzato dall'angolo di incidenza. È interessante notare come gli andamenti siano paralleli traslando verso l'alto per angoli crescenti. Per angoli di 8° e 30° gli andamenti sono quasi sovrapposti discostandosi progressivamente all'aumentare dell'angolo. A 75° la curva è più irregolare per i motivi enunciati precedentemente.

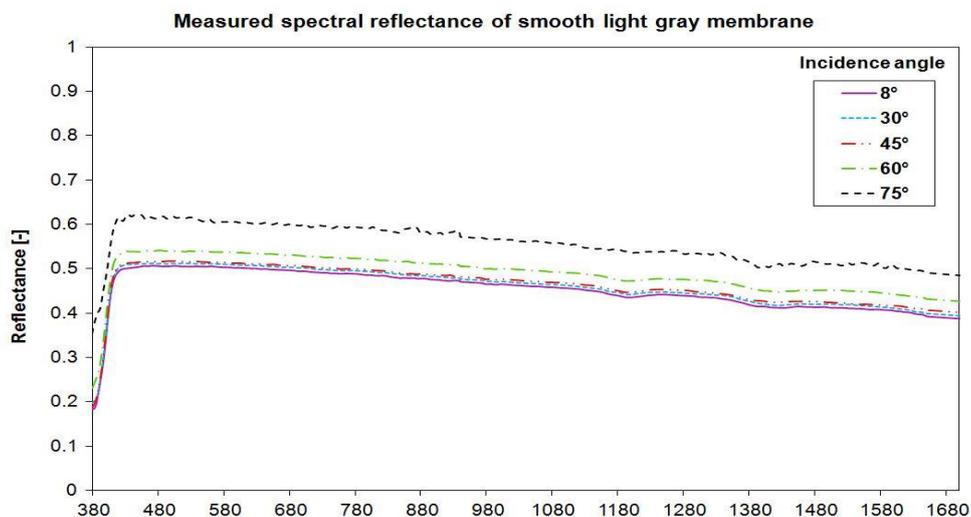


Figura 15. Riflettanza spettrale per i cinque angoli di incidenza del fascio sul campione MEMBRANA 2

I valori integrati di riflettanza sono stati calcolati a partire dai valori spettrali seguendo la procedura contenuta nella norma ISO 9050:2003 [26]. Le Figure 16, 17, 18 e 19 mostrano l'evoluzione dei valori integrati di riflettanza con l'angolo. Questi valori hanno permesso di ottenere la funzione $\rho_{b-tot}(\vartheta)$ precedentemente descritta tramite il metodo di interpolazione spline cubica. A 90° di incidenza, corrispondenti ad un fascio luminoso parallelo alla superficie, la riflettanza è stata posta uguale ad 1 come condizione geometrica. L'aumento di riflettanza con l'angolo per i campioni con finitura superficiale liscia (Membrana 2 in Figura 17 e Mattonella in Figura 18) è molto più progressivo se confrontato con quello dei campioni con finitura ruvida. Ciò è dovuto all'elevata componente regolare di riflessione che risente della variazione angolare dell'incidenza. I campioni dalla finitura superficiale ruvida (Membrana 1 in Figura 16 e Guaina bituminosa in Figura 19) presentano una variazione meno sensibile della riflettanza in funzione dell'angolo di incidenza con un andamento pressoché orizzontale anche per angoli elevati a causa della componente regolare che risulta essere trascurabile come dimostrato dalle analisi goniofotometriche.

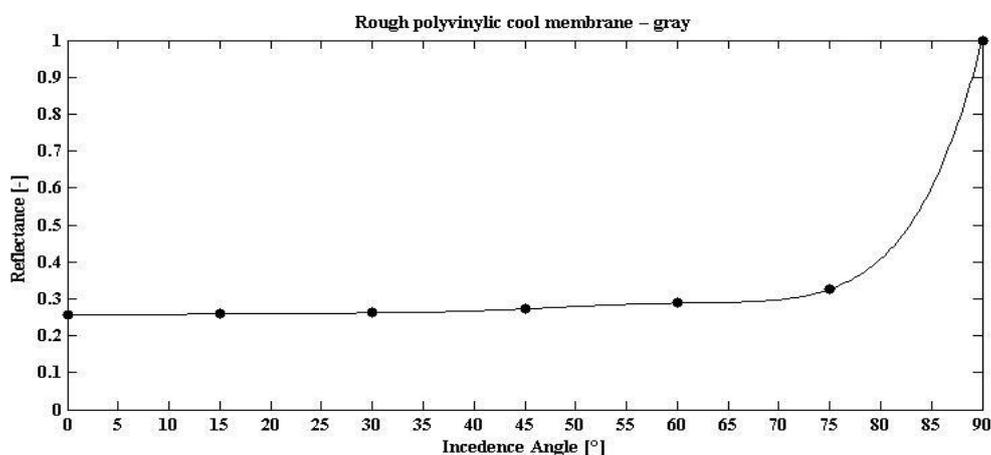


Figura 16. Interpolazione dei valori integrati di riflettanza per il campione MEMBRANA 1

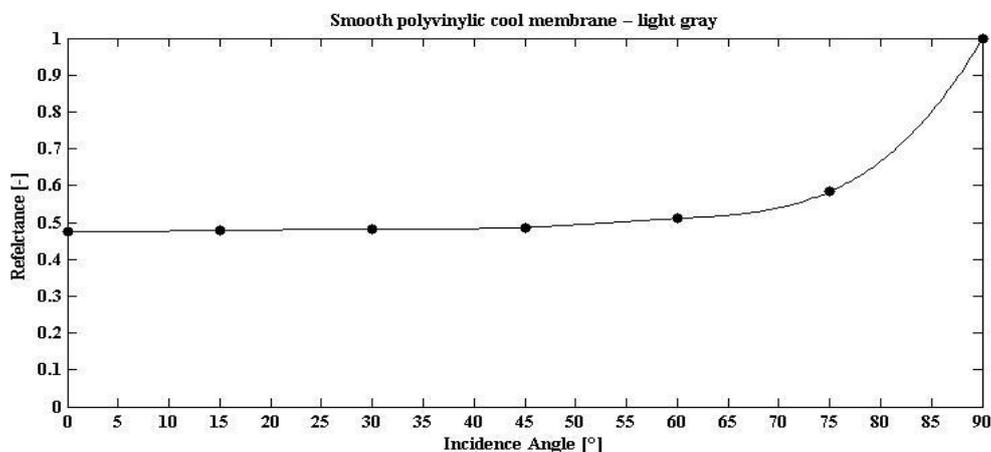


Figura 17. Interpolazione dei valori integrati di riflettanza per il campione MEMBRANA 2

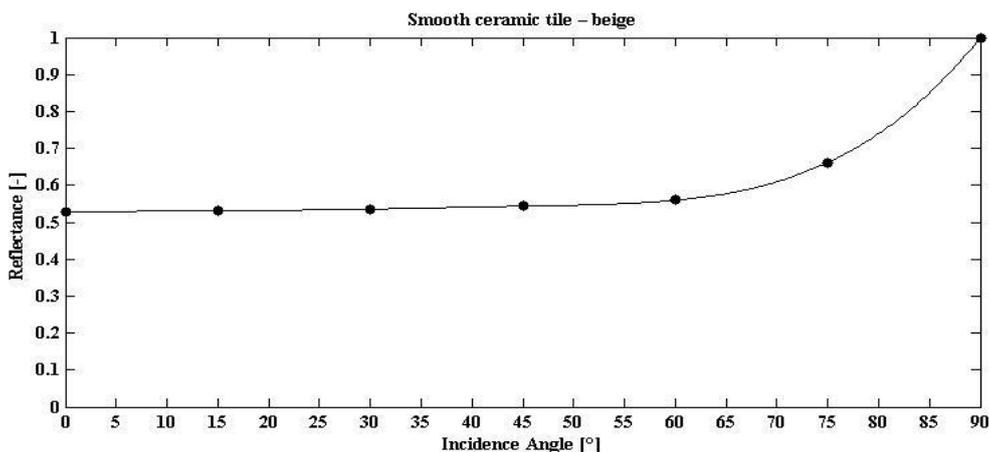


Figura 18. Interpolazione dei valori integrati di riflettanza per il campione MATTONELLA

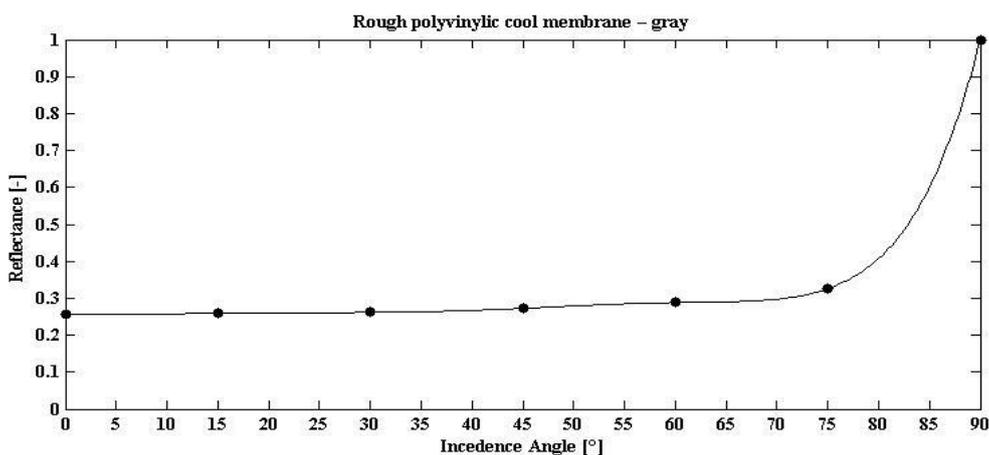


Figura 19. Interpolazione dei valori integrati di riflettanza per il campione GUAINA BITUMINOSA

5 Analisi numerica

5.1 Descrizione del modello di calcolo

Il software di analisi energetica utilizzato in questo studio è il TRNSYS [27]. Esso è un software ampiamente testato e calibrato basato su una serie di componenti collegati tra loro che rendono più semplice la modellizzazione del fenomeno. Questi componenti, o blocchi funzionali, sono chiamati “type” e sono compilati in linguaggio Fortran. Essi sono costituiti da elementi matematici utilizzati per simulare le performance di una parte di un sistema energetico: un edificio, un impianto o una componente di esso, etc. Le “type” sono collegate insieme per comporre l’intero progetto. Riassumendo il TRNSYS è un insieme di componenti energetici raggruppati intorno ad un motore di calcolo. Una sezione chiamata TRNBuild permette di progettare gli edifici e le loro proprietà termo-fisiche. Collegando poi la type edificio alla type dei dati meteo, il TRNSYS è in grado di calcolare i flussi termici che interessano la struttura.

La struttura presa come riferimento in questo studio non è un vero e proprio edificio, ma una serie di componenti opachi dell'involucro edilizio uniti a formare una test box con una pianta di 100 m². L'altezza delle pareti verticali è 4 m. In questo modo sono state considerate tutte le esposizioni principali (Nord, Sud, Est, Ovest, Orizzontale). La struttura è stata realizzata tenendo conto di due livelli di isolamento:

- Struttura non isolata: pareti verticali ed orizzontali con trasmittanza termica pari a 1 W/m²K (due strati di mattoni forati separati da una intercapedine d'aria);
- Struttura isolata: pareti verticali ed orizzontali con trasmittanza termica pari a 0,56 W/m²K (due strati di mattoni forati separati da un materiale isolante).

Non sono state modellate finestre o altre aperture.

La temperatura interna è stata impostata ad un valore costante di 20 °C durante l'inverno e 26 °C durante l'estate.

Gli output dell'analisi numerica sono i carichi solari e i flussi termici di dispersione delle pareti. Per le simulazioni sono state scelte tre città italiane a tre latitudini diverse: Milano, Roma e Palermo. I dati climatici sono stati estratti dal database del WMO (World Meteorological Organization). Il calcolo è stato eseguito annualmente, ma sono stati processati solo i risultati ottenuti per la stagione invernale (dal 1 novembre al 28 febbraio) e quella estiva (dal 15 maggio al 15 settembre).

5.2 Risultati

La Tabella 1 presenta i valori dei carichi solari espressi in kWh/m² calcolati attraverso TRNSYS con il metodo MRV, ottenuto dall'interpolazione dei dati sperimentali di riflettanza a diversi angoli di incidenza del campione denominato "Mattonella" e con il metodo MS a riflettanza costante presente di default nel software. Nella Tabella 1 è riportata anche la variazione percentuale tra i due metodi.

I guadagni solari ottenuti secondo il metodo MRV sono più bassi di quelli ottenuti con MS per ogni orientamento e latitudine. La variazione percentuale più rilevante è 17% ottenuta per la latitudine di Palermo, durante l'estate per l'esposizione Sud.

Tabella 1. Carichi solari ottenuti con i metodi MRV e MS

		Carichi solari estivi [kWh/m ²]			Carichi solari invernali [kWh/m ²]		
		MRV	MS	Variazione %	MRV	MS	Variazione %
Milano	N	87.4	103.1	15.2	22.5	26.1	13.7
	S	167.7	195.6	14.2	91.9	99.5	7.6
	E	174.2	194.6	10.5	40.4	46.2	12.5
	O	175.5	196.1	10.5	39.7	45.5	12.7
	Oriz	307.4	339.7	9.5	60.1	70.4	14.8
Roma	N	90.2	107.2	15.9	29.0	33.6	13.7
	S	177.4	210.2	15.6	172.2	184.3	6.6
	E	201.7	224.8	10.3	66.9	76.2	12.1
	O	204.0	227.4	10.3	67.6	76.9	12.1
	Oriz	369.6	402.8	8.2	99.9	115.9	13.8
Palermo	N	92.1	110.0	16.3	33.2	38.4	13.7
	S	163.4	197.0	17.0	167.7	180.7	7.2
	E	203.2	226.9	10.4	71.2	81.1	12.2
	O	208.6	232.6	10.3	72.0	82.0	12.2
	Oriz	385.8	419.1	7.9	113.6	130.0	12.6

Nella Tabella 2 sono riportati i valori assoluti dei flussi termici calcolati per i due livelli di isolamento espressi in kWh/m². Un flusso termico positivo va dal muro all'ambiente interno, viceversa il segno meno durante l'inverno sta ad indicare che il flusso esce dalla zona termica verso il muro [...]. Di conseguenza i flussi termici ottenuti col metodo MRV sono minori durante l'estate e maggiori (in valore assoluto) durante l'inverno, rispetto a quelli calcolati col metodo MS.

Tabella 2. Flussi termici calcolati con i metodi MRV e MS

		Non isolata				Isolata			
		Flussi termici estivi [kWh/m ²]		Flussi termici invernali [kWh/m ²]		Flussi termici estivi [kWh/m ²]		Flussi termici invernali [kWh/m ²]	
		MRV	MS	MRV	MS	MRV	MS	MRV	MS
Milan	N	3.44	3.50	-45.51	-45.41	1.57	1.61	-25.60	-25.54
	S	5.43	5.88	-42.91	-42.67	2.54	2.76	-24.25	-24.11
	E	5.50	5.74	-44.83	-44.65	2.62	2.75	-25.24	-25.14
	W	5.83	6.09	-44.88	-44.70	2.72	2.85	-25.27	-25.17
	Hor	8.25	8.89	-45.84	-45.49	3.92	4.25	-25.72	-25.53
Rome	N	4.86	4.93	-28.74	-28.62	2.20	2.25	-16.24	-16.17
	S	7.59	8.23	-23.44	-23.07	3.56	3.90	-13.45	-13.24
	E	8.25	8.58	-27.30	-27.01	3.93	4.12	-15.49	-15.32
	W	8.62	8.95	-27.29	-27.01	4.07	4.26	-15.48	-15.32
	Hor	12.26	12.94	-28.40	-27.86	5.94	6.32	-16.03	-15.73
Palermo	N	7.21	7.26	-16.18	-16.05	3.26	3.31	-9.24	-9.15
	S	9.76	10.39	-11.74	-11.39	4.59	4.92	-6.86	-6.66
	E	11.17	11.46	-14.83	-14.55	5.33	5.49	-8.53	-8.36
	W	11.39	11.67	-14.86	-14.58	5.43	5.59	-8.53	-8.37
	Hor	15.76	16.39	-15.34	-14.82	7.69	8.03	-8.77	-8.48

Nelle Figure 20 e 21 è riportata, attraverso una rappresentazione ad istogrammi, la variazione percentuale dei flussi termici calcolati con il metodo MRV rispetto al metodo MS, rispettivamente per il caso non isolato e isolato. Come si può notare, i risultati per le due configurazioni di isolamento sono molto simili. Le variazioni percentuali ottenute per la stagione estiva sono di entità superiore rispetto a quelle invernali. I risultati più rilevanti riguardano le esposizioni Sud e Orizzontale, per entrambe le stagioni oggetto di studio, avendo registrato valori superiori al 7%.

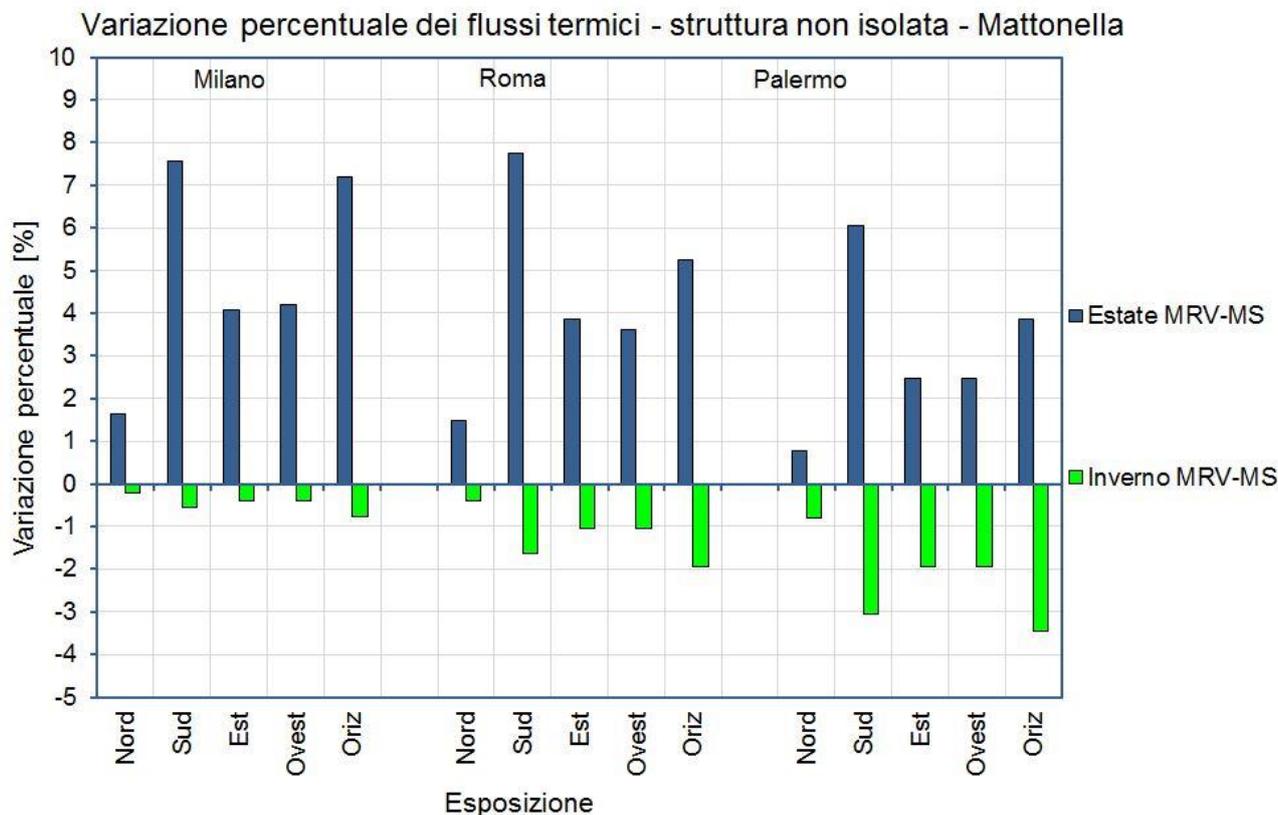


Figura 20. Variazioni percentuali dei flussi termici per la configurazione non isolata

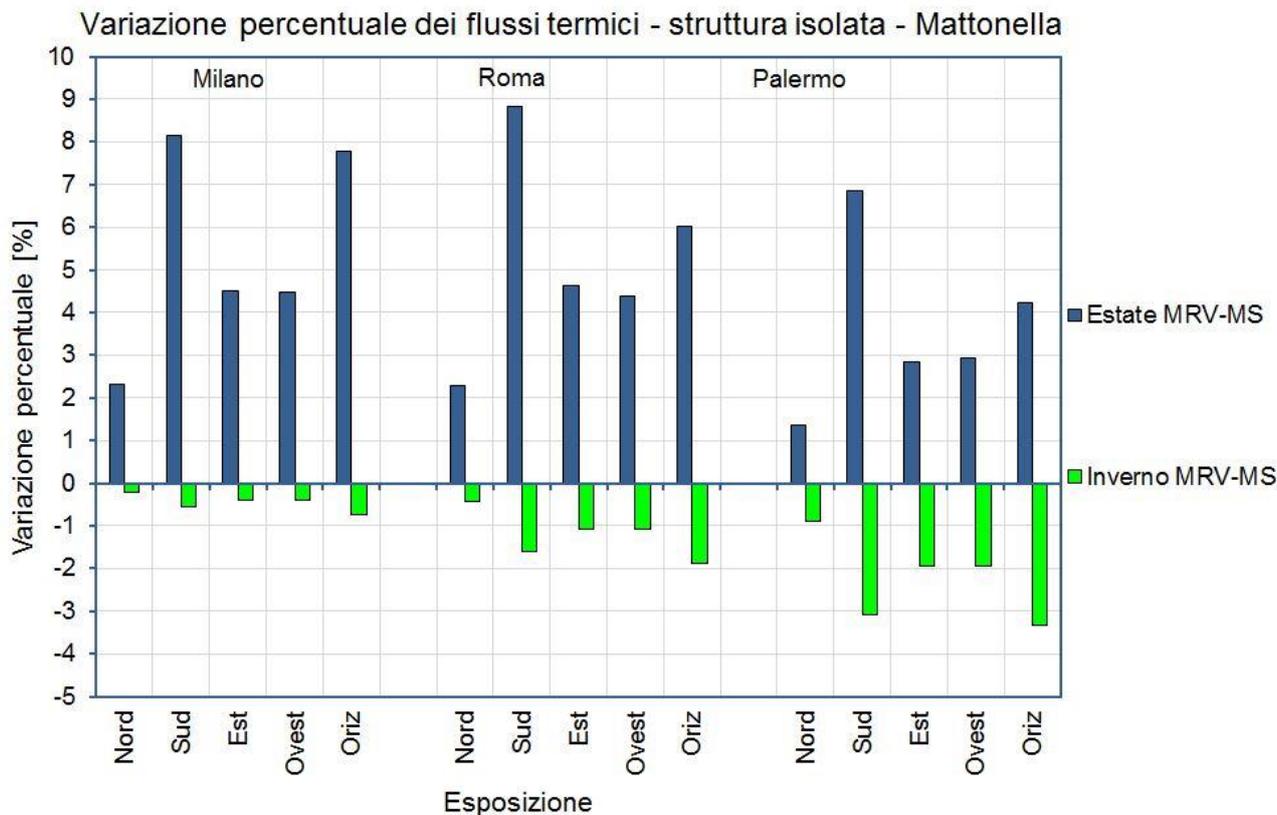


Figura 21. Variazioni percentuali dei flussi termici per la configurazione isolata

6 Conclusioni

La riflettanza solare dipende dall'angolo di incidenza con il quale la radiazione solare colpisce una superficie. Un'analisi sperimentale su dei campioni selezionati ha dimostrato questa dipendenza. In particolare i campioni con finitura superficiale liscia hanno mostrato una elevata sensibilità a modificare il loro potere di riflessione in funzione dell'angolo di incidenza.

È stata ricavata una funzione che collegasse la riflettanza all'angolo ed è stata utilizzata per calcolare accuratamente i carichi solari relativi ai componenti opachi di una struttura. Questo metodo è stato messo a confronto con il metodo semplificato a riflettanza costante generalmente utilizzato nei modelli termofisici di calcolo. Il software TRNSYS ha permesso di calcolare e mettere in evidenza le differenze tra i valori dei carichi solari e dei flussi termici ottenuti con entrambi i metodi.

I risultati ottenuti col metodo semplificato presente di default nel software mostra una sottostima del potere di riflessione dei materiali opachi e di conseguenza una sovrastima degli apporti solari. I flussi termici calcolati con il metodo a riflettanza costante sono superiori, durante l'estate, a quelli ottenuti con il metodo a riflettanza dipendente dall'angolo e viceversa sono inferiori (in valore assoluto) a durante l'inverno. La differenza percentuale tra i due metodi non è trascurabile per le esposizioni Sud e Orizzontali. I risultati sono simili per le tre latitudini considerate.

Il metodo di calcolo della riflettanza proposto in questo studio dimostra i limiti dei modelli termo-fisici generalmente usati per eseguire analisi energetiche. Il concetto espresso può essere esteso ai componenti trasparenti dell'edificio per l'ottimizzazione del calcolo del fattore solare.

Sviluppi futuri potrebbero riguardare una analisi energetica su scala di edificio più dettagliata al fine di valutare l'importanza di questo approccio differente nel calcolo della riflettanza e il suo impatto sul fabbisogno energetico dell'edificio.

7 Bibliografia

- [1] IEA. 2012. World energy outlook 2012. Geneva. International Energy Agency.
- [2] Akbari, H., Bretz, S., Kurn, D., & Hartford, H. (1997). Peak power and cooling energy savings of high albedo roofs. *Energy and Buildings*, 25, 117–126.
- [3] Christen, A., & Vogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*, 24, 1395–1421.
- [4] Suehrcke, H., Peterson, E. L., & Selby, N. (2008). Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Energy and Buildings*, 40, 2224–2235.
- [5] Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167–1174.
- [6] Zinzi, M. (2010). Cool materials and cool roofs: Potentialities in Mediterranean buildings. *Advances in Building Energy Research*, 4, 201–266.
- [7] Bozonnet, E., Doya, M., & Allard, F. (2011). Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Buildings*, 43(11), 3006–3012.
- [8] Carnielo, E., Fanchiotti, A., & Zinzi, M. (2011). Energy and comfort benefits of a cool roof application in a non-residential building belonging to Roma Tre University. *World Renewable Energy Congress*, 8–13 May, Linköping, Sweden.
- [9] Kolokotroni, M., Gowreesunker, B. L., & Giridharan, R. (2011). Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. *Energy and Buildings*, 67, 658–667.
- [10] Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S., & Vlissidis, A. (2011). Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion. *Energy and Buildings*, 55, 85–93.
- [11] Paolini, R., Zinzi, M., Poli, T., Carnielo, E., Fiori, M., & Mainini, A. G. (2013). Evolution over time of UVVIS- NIR reflectance of cool roofing materials in urban environments. 34th AIVC conference, 25–26 September, Athens, Greece.
- [12] Parker, D., Huang, J., Konopacki, S., Gartland, L., Sherwin, J., & Gu, L. (1998). Measured and simulated performance of reflective roofing systems in residential buildings. *ASHRAE Trans*, 104(1), 963–975.
- [13] Romeo, C., & Zinzi, M. (2011). Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, 67, 647–657.
- [14] Synnefa, A., Saliari, M., & Santamouris, M. (2012). Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. *Energy and Buildings*, 55, 7–15.
- [15] Zinzi, M., Carnielo, E., & Agnoli, S. (2012). Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application. *Energy and Buildings*, 50, 111–119.

- [16] Synnefa, A., T. Karlessi, N. Gaitani, M. Santamouris, D.N. Assimakopoulos, C. Papakatsikas. 2011 “Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate”. *Building and Environment* 46: 38-44.
- [17] Akbari, H., M. Pomerantz, H. Taha. 2001 “Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas”. *Solar Energy* 70 (3): 295-310.
- [18] Carnielo, E., Zinzi, M. 2013. “Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand”. *Building and Environment* 60: 56-65.
- [19] CIE 44. 1979. *Absolute Methods for Reflection Measurements*. Paris CIE
- [20] CIE 17.4 / CEI 50-845. 1987. *International Lighting Vocabulary*. Genève CIE
- [21] McNeil, A., C.J. Jonsson, D. Appelfeld, G. Ward, E.S. Lee. 2013. “A validation of a ray-tracing tool used to generate bi-directional scattering distribution functions for complex fenestration systems”. *Solar Energy* 98 (Part C): 404-414.
- [22] De Boer, J. 2006. “Modelling indoor illumination by complex fenestration systems based on bidirectional photometric data”. *Energy and Buildings* 38 (7): 849-868.
- [23] Andersen, M., J. de Boer. 2006. “Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems”. *Energy and Buildings* 38 (7): 836-848.
- [24] Rossi, G., Iacomussi, P. 2013. “Fotometria e goniofotometria di materiali da costruzione opachi”. Report Ricerca di Sistema Elettrico MSE-ENEA RdS/2013/157.
- [25] Maccari A., Zinzi M. Simplified algorithms for the Italian energy rating scheme for fenestration in residential buildings. *Solar Energy* 2000; (69 Suppl.) Nos. 1-6: 75-92.
- [26] ISO 9050. *Glass in building-Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors*; 2003.
- [27] TRNSYS 16; www.trnsys.com