

UNIVERSITA' DEGLI STUDI ROMA TRE



Dottorato di Ricerca in Ingegneria

Meccanica e Industriale

XXXI Ciclo

TESI DI DOTTORATO

## **Smart Materials for Smart Cities**

**Studio delle proprietà dei materiali ad elevata riflettanza solare adibiti al rivestimento d'involucro degli edifici in contesti urbani: caratterizzazione mediante analisi sperimentale e sviluppo di un modello numerico di simulazione**

*Tutor: Prof. Roberto De Lieto Vollaro*

*Coordinatore: Prof. Edoardo Bemporad*

*Autore: Luca Mauri*

Anno Accademico 2018/2019

**SOMMARIO**

Introduzione .....	5
1 Progresso ed energia: la città come centro di sviluppo tecnologico .....	8
1.1 Condizioni climatiche esterne e richieste di energia termica negli edifici .....	10
1.2 Dal generale al particolare: nozioni di termofisica dell'edificio .....	11
2 L'isola di calore urbana (UHI) .....	14
2.1 Tecniche di mitigazione dell'isola di calore .....	19
2.2 Il canyon urbano .....	21
3 La radiazione solare .....	24
3.1 Nozioni di geometria solare .....	26
3.2 Radiazione solare su superficie comunque orientata .....	29
4 Proprietà superficiali dei comuni materiali da costruzione .....	35
4.1 Legge di Lambert .....	35
5 Lo spazio urbano e i mutui inter-scambi radiativi tra gli edifici .....	37
5.1 Teoria: i fattori di Gebhart .....	37
5.2 Confronto mediante analisi numerica tra i carichi solari sulle facciate di un edificio inserito in un canyon urbano e un edificio identico isolato .....	38
5.2.1 Validazione del modello .....	39
5.2.2 Modello di simulazione .....	41
5.2.3 Risultati delle simulazioni .....	42
5.3 Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici .....	45
5.3.1 Modello di simulazione .....	45
5.3.2 Risultati delle simulazioni .....	48
5.3.2.1 Analisi della radiazione solare assorbita .....	48
5.3.2.2 Fabbisogno di energia termica dell'edificio .....	51
6 Le principali grandezze fotometriche .....	56
6.1 Flusso luminoso .....	57

---

6.2	Intensità luminosa.....	57
6.3	Angolo solido .....	58
6.4	Luminanza .....	58
6.5	Illuminamento .....	60
6.6	Emetenza luminosa .....	60
7	I materiali retro-riflettenti.....	61
7.1	Tecnologie esistenti.....	61
7.2	Caratteristiche e potenzialità .....	64
8	Strumenti per la caratterizzazione della risposta ottica dei materiali .....	65
8.1	La BT(R)DF .....	65
8.1.1	Campi di applicazione .....	68
8.2	Coefficienti di riflessione, trasmissione e assorbimento .....	68
8.3	Il Goniometro del LIFT .....	69
8.3.1	Procedimento di misura .....	71
8.4	Lo spettrofotometro del LIFT.....	72
9	Campagna di misure sperimentali in laboratorio.....	75
9.1	Campioni analizzati.....	75
9.1.1	Spectralon .....	75
9.1.2	Vernice retro-riflettente alle sfere di vetro .....	75
9.1.3	Guaina bituminosa retro-riflettente.....	76
9.1.4	Vernice al quarzo e vernice cool .....	77
9.2	Risultati delle misure.....	77
9.2.1	Premessa .....	77
9.2.2	Diagrammi polari Spectralon.....	79
9.2.3	Diagrammi polari tinta Retro-Riflettente.....	80
9.2.4	Diagrammi polari guaina bituminosa retro-riflettente .....	83
9.2.5	Diagrammi polari vernice al quarzo e vernice cool.....	83
9.3	Calcolo dell'energia riflessa.....	85

---

---

9.4	Misura dell'energia incidente .....	87
9.5	Coefficienti di riflessione .....	88
9.6	Misure nei laboratori dell'INRIM .....	90
9.6.1	Configurazione setup .....	90
9.6.2	Risultati delle misure e confronto con i dati ottenuti al LIFT .....	92
9.7	Risultati Spettrofotometria LIFT .....	94
10	Modello numerico per materiali retroriflettenti .....	96
10.1	Riflettanza emisferica: modello analitico .....	96
10.2	Carichi solari sulle facciate di un edificio isolato .....	97
10.2.1	Modello di simulazione .....	97
10.2.2	Risultati delle simulazioni .....	100
10.2.3	Considerazioni .....	102
10.2.1	Riflettanza direzionale: modello analitico .....	102
10.3	Carichi solari sulle facciate di un edificio inserito in un canyon urbano .....	103
10.3.1	Fattori di vista corretti .....	105
10.3.2	Modello analitico del campione di materiale Guaina RR.....	106
10.3.3	Fattori di vista: confronto Lambertiano – RR.....	107
10.4	Codice Matlab per il calcolo dei carichi solari in un canyon .....	113
10.5	Risultati dell'analisi numerica effettuata mediante codice Matlab .....	117
10.5.1	Confronto Matlab – TRNSYS .....	117
10.5.2	Confronto materiale lambertiano – materiale RR.....	121
11	Campagna di misure sperimentali su modelli di canyon urbani in scala .....	125
11.1	La catena di misura.....	126
11.1.1	Scelta del sensore.....	127
11.1.2	I fotodiodi .....	127
11.1.3	Modalità operative del fotodiodo.....	130
11.1.4	Sensibilità spettrale dei fotodiodi .....	132
11.1.5	Il fotodiodo Osram SFH 229 .....	133

---

---

11.1.6	Scelta del circuito di condizionamento.....	134
11.1.7	Ricostruzione in laboratorio caratteristica sensore .....	138
11.1.8	Scelte progettuali per il sistema di housing dei sensori.....	139
11.1.9	Sistema di attenuazione .....	141
11.1.10	Determinazione dell'incertezza di misura.....	145
11.1.11	Sistema di visualizzazione e salvataggi dati .....	146
11.2	Misure e calibrazione .....	149
11.2.1	Determinazione dell'algoritmo di calibrazione .....	149
11.2.2	Risultati sperimentali.....	151
11.2.3	Determinazione dell'albedo.....	152
11.3	Apparato sperimentale I: canyon in scala all'esterno.....	152
11.3.1	Risultati delle misure con vernici lambertiane .....	154
11.3.2	Risultati delle misure con vernice RR alle sfere di vetro .....	157
11.4	Apparato sperimentale II: canyon in scala in laboratorio.....	162
12	Conclusioni .....	167
13	Bibliografia .....	169

## INTRODUZIONE

Il fenomeno dell'isola di calore urbana (UHI) è uno dei più studiati negli ultimi anni. Il suo effetto è associato al verificarsi di temperature dell'aria più elevate nelle città rispetto alle aree rurali e suburbane. Dal momento che questo fenomeno influenza profondamente il microclima urbano, avendo ricadute sul comfort termo-igrometrico esterno e sui fabbisogni di energia degli edifici, negli ultimi anni sono state proposte diverse tecniche di mitigazione al fine di ridurre gli effetti. Per fare ciò è però necessario conoscere bene i motivi che danno vita al fenomeno. Se si considera il tessuto urbano, i parametri che concorrono a determinarne il bilancio energetico sono riconducibili ai seguenti: temperatura e umidità dell'aria, direzione e intensità del vento, entità della radiazione solare. Le scelte progettuali in fase di pianificazione urbanistica possono influire profondamente sull'intensità del fenomeno UHI, intensificandolo in alcuni casi, minimizzandone gli effetti in altri. Poiché le città, sebbene costituiscano un vero e proprio prodotto della civiltà moderna, sono difficilmente riprogettabili ex novo, almeno per ciò che concerne la configurazione, le contromisure principali adottate per fronteggiare il fenomeno dell'UHI ricadono sulla scelta delle proprietà ottico-radiative dei materiali da costruzione. Difatti, tra le soluzioni scelte per mitigare il fenomeno dell'isola di calore urbana, l'adozione di materiali innovativi per l'involucro edilizio, tra i quali i materiali ad elevata riflettanza e i *cool materials* rappresentano soluzioni oramai piuttosto diffuse. Questi materiali sono caratterizzati da alta riflettanza solare (elevata capacità di riflettere la radiazione incidente solare) e alta emissività termica (elevata capacità di riemettere energia nella lunghezza d'onda dell'infrarosso lontano).

Negli ultimi anni però, è cresciuto l'interesse da parte dei ricercatori per un nuovo tipo di materiali, chiamati materiali retroriflettenti (RR), dato il loro potenziale di ridurre i carichi solari sugli involucri edilizi e di conseguenza la quantità di radiazione solare intrappolata all'interno del tessuto urbano. La maggior parte dei materiali da costruzione, inclusi i materiali ad elevata riflettanza e i *cool materials*, hanno una riflettanza solare costante e un comportamento, per ciò che concerne la modalità di riflessione nello spazio della radiazione incidente, perfettamente diffusivo (*lambertiano*). I materiali retroriflettenti invece presentano una dipendenza angolare della loro risposta ottico-radiativa, sia per quanto riguarda il valore della riflettanza solare sia per quanto riguarda le direzioni prevalenti di riflessione. Ciò è dovuto alla particolare conformazione superficiale che consente di riflettere la maggior parte della radiazione solare diretta nella stessa direzione di incidenza, ovvero verso la volta celeste. Grazie a questa loro peculiarità che comporta una diminuzione delle inter-riflessioni mutue tra le superfici costituenti il tessuto urbano, i carichi solari assumono valori inferiori rispetto al caso in cui vengono utilizzati i materiali da costruzione più comuni. Come conseguenza di questa

diminuzione dei carichi solari superficiali, anche la temperatura dell'aria all'interno degli spazi urbani esterni assume valori inferiori con significativi vantaggi sul comfort termico e sul fabbisogno di energia per il raffrescamento degli edifici. In quest'ottica la caratterizzazione della risposta ottico-radiativa è uno step necessario per la conoscenza del comportamento dei materiali RR dal momento che la modalità con cui interagiscono con l'ambiente circostante, in ambito urbano, è fondamentale. Lo spazio urbano esterno che è stato preso come modello di riferimento per lo studio effettuato nell'ambito di questa tesi è il canyon urbano. Esso costituisce, nella sua semplicità, la configurazione urbana in cui il fenomeno dell'UHI trova la sua esacerbazione, a causa dei meccanismi di scambi mutui di energia radiativa che vengono ad instaurarsi tra le superfici che costituiscono i suoi confini. Inoltre, esso rappresenta una tipologia di configurazione urbana fortemente diffusa nei contesti in cui è presente un'elevata urbanizzazione.

L'obiettivo di questo lavoro è la valutazione del potenziale dei materiali retroriflettenti adibiti al rivestimento d'involucro degli edifici inseriti in contesti densamente urbanizzati, valutato in termini di riduzione dei carichi solari sulle superfici costituenti le facciate esterne degli edifici e le pavimentazioni in un canyon urbano. Le fasi del lavoro di studio si sono sviluppate sia in ambito sperimentale sia numerico. Per ciò che concerne la caratterizzazione della risposta qualitativa (direzioni di riflessione nello spazio tridimensionale) e quantitativa (riflettanza) dei materiali RR, è stato utilizzato l'apparato sperimentale presente nel laboratorio LIFT dell'Università di Roma Tre. Difatti, mediante il goniometro in assetto goniorelettometrico è stato possibile andare a studiare vari campioni di materiali, tra cui i materiali RR ed è stato possibile formulare, partendo dai dati ottenuti, una modellizzazione numerica che approssimasse il loro comportamento nello spettro della radiazione visibile. Per caratterizzazione si intende la determinazione della riflettanza e la distribuzione spaziale della radiazione riflessa. A valle di questa caratterizzazione, è stato implementato in ambiente Matlab un software per la determinazione dei carichi solari in un canyon urbano basandosi sulla teoria dei fattori di Gebhart. Questa teoria è adatta a modellizzare i materiali lambertiani ma nell'ambito di questo lavoro è stata rimodulata affinché si adattasse a descrivere anche il comportamento dei materiali RR. In tal modo è stato possibile sviluppare un modello di simulazione numerica per tener conto degli effetti delle inter-riflessioni multiple (nel campo delle radiazioni visibili) tra le superfici costituenti un canyon urbano quando siano adottati materiali di rivestimento RR. L'ultima fase, anche essa sperimentale, è consistita nella progettazione e messa in opera di un setup costituito da due canyon urbani in scala disposti negli spazi esterni dell'Università Roma Tre. Il setup prevede l'utilizzo di sensori appositamente progettati atti a rilevare la radiazione entrante e la radiazione riflessa attraverso la frontiera superiore del canyon urbano (canopy layer) in modo da

poter valutare energeticamente i vantaggi associati all'utilizzo di smart materials per gli involucri edilizi in termini di riduzione dell'energia radiante intrappolata a livello di tessuto urbano. La coppia di canyon a disposizione permette infatti un confronto parallelo tra configurazione RR e configurazione lambertiana in cui l'utilizzo delle tinte è previsto solo sulle superfici verticali corrispondenti alle facciate degli edifici. I dati sperimentali ottenuti dal setup sono in linea con i risultati ottenuti in letteratura e forniscono un'indicazione preliminare sulle potenzialità dell'utilizzo dei materiali RR in ambito urbano al fine di contrastare il fenomeno dell'UHI e il conseguente aumento del fabbisogno energetico nelle città.



# 1 PROGRESSO ED ENERGIA: LA CITTÀ COME CENTRO DI SVILUPPO TECNOLOGICO

Il concetto di progresso nella civiltà contemporanea va di pari passo con il tema dell'energia. Nell'arco dello scorso secolo, il modello di sviluppo economico adottato a livello mondiale ha portato milioni di persone a spostarsi dalle campagne verso le città, innescando un processo di urbanizzazione intensiva che è tuttora in corso. Nel 1920 gli individui che vivevano nelle città erano circa 600 milioni mentre nel 1986 erano saliti a circa 2 miliardi. Nei primi anni del secolo XX secolo, solo il 14% della popolazione mondiale viveva nelle città mentre mezzo secolo dopo, nel 1950, circa il 30% si era insediato in un'area urbana (Santamouris, et al. 2001). Oggi, il 60% dell'umanità vive nelle città ed esistono almeno 283 città che ospitano più di un milione di abitanti. Le stime mostrano che le popolazioni urbane costituiranno oltre l'80% della popolazione mondiale nel 2100. Le città occupano soltanto in 2% della superficie terrestre eppure ospitano la metà degli abitanti del pianeta, consumano il 70% dell'energia prodotta a livello globale e generano circa il 75% delle emissioni di gas serra (Ferrari, G. F. 2018). Inoltre, i dati dimostrano che la ricchezza nasce nelle grandi città: il 75% del Pil mondiale viene prodotto nelle aree urbane e la percentuale crescerà all'86% nel 2030 (McKinsey Global Institute 2015).

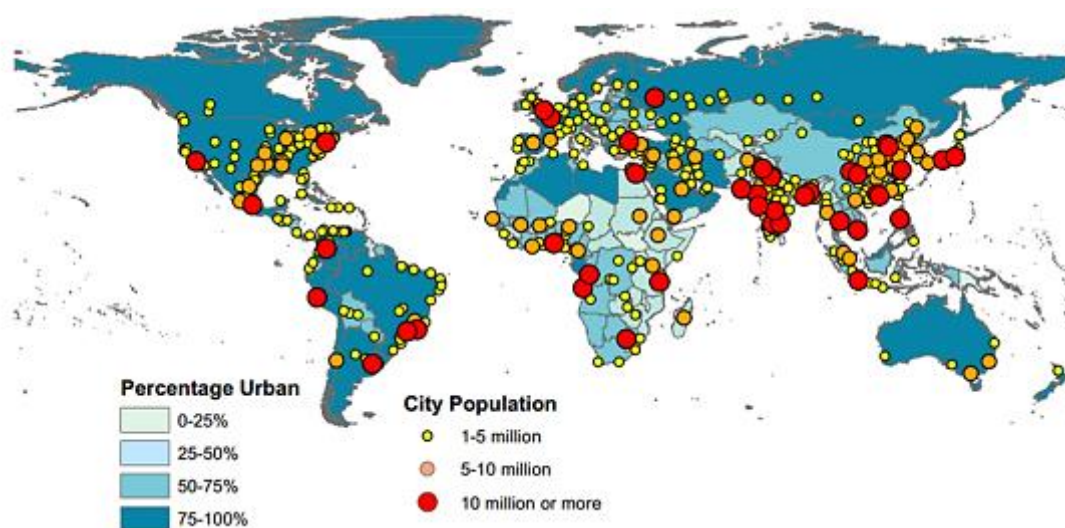


Figura 1.1 - Previsioni dei tassi di urbanizzazione nazionale e delle popolazioni urbane al 2030

Risulta quindi innegabile che la città rappresenti il centro dell'avanzamento sociale e tecnologico della società civile e in essa tutte le attività sono pensate per il raggiungimento di nuovi obiettivi comuni. La strada verso la città del futuro richiede di rispondere a sfide tecnologiche sempre più stimolanti il cui superamento necessita di un fattore fondamentale: la disponibilità di energia. Già in un recente passato è stato dimostrato l'impatto dell'urbanizzazione sul consumo di energia: un aumento della popolazione urbana dell'1% aumenta il consumo di energia del 2,2% (Jones, B. G.

1992). Negli anni in cui il saldo tra domanda e offerta di energia non costituiva un problema i combustibili fossili hanno assunto il ruolo di risorsa imprescindibile per spingere verso nuovi orizzonti i programmi di sviluppo dell'umanità. Dal momento in cui la crescita demografica globale, le dinamiche geopolitiche nonché gli effetti negativi sull'ambiente hanno cominciato a far cambiare idea sull'utilizzo dei combustibili fossili, il ricorso a forme di approvvigionamento di energia da fonti rinnovabili e all'efficienza energetica hanno assunto sempre più valore. L'efficienza energetica, nella sua accezione moderna, non va però intesa come mero indice della bontà di un singolo sistema ma va ripensata allargando il concetto a sistemi integrati. Efficienza di un sistema integrato non significa solo massimizzare l'efficienza dei singoli sistemi ma ottimizzare il funzionamento organico dell'insieme dei sistemi integrati. Purtroppo, nella frenetica corsa al progresso si è trascurato che la città stessa è un prodotto di questa corsa e come ogni prodotto necessita di una progettazione adeguata. L'insieme di infrastrutture, edifici, impianti, trasporti e altri servizi cittadini devono poter dialogare come elementi costituenti una rete virtuosa in modo da minimizzare il loro impatto energetico. Solo negli ultimi decenni si è insistito sul concetto di *smart city* o città intelligente, che non è altro che l'accezione moderna del concetto utopico di città ideale. Si tratta di un insieme di strategie di pianificazione urbanistica tese all'ottimizzazione e all'innovazione dei servizi così da mettere in relazione le infrastrutture materiali delle città con il capitale umano, intellettuale e sociale di chi le abita grazie all'impiego diffuso delle nuove tecnologie della comunicazione, della mobilità, dell'ambiente e dell'efficienza energetica, per migliorare la qualità della vita e soddisfare le esigenze di cittadini, imprese e istituzioni (Figura 1.1).

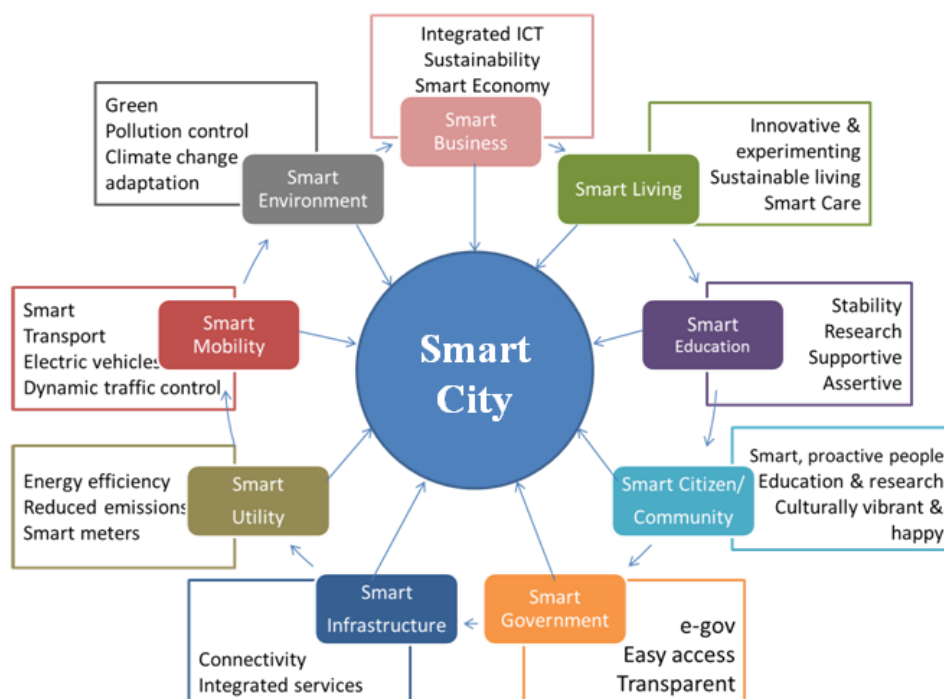


Figura 1.2 - Il concetto di Smart City: mappa concettuale

Questo concetto di *smart city* include chiaramente anche gli aspetti strettamente legati al settore dell'energia. Tenendo presente che il cittadino medio europeo spende l'80% della sua vita all'interno degli edifici, essi costituiscono una voce importante del consumo energetico nelle città. Per aver un'idea più chiara, gli edifici residenziali e commerciali sono responsabili, rispettivamente, di circa il 25% e il 15% del consumo finale di energia nell'Unione Europea. Gli usi finali per i quali l'energia viene consumata all'interno degli edifici possono essere organizzati in quattro categorie: sistema di illuminazione, sistemi di riscaldamento e raffrescamento degli ambienti, impianti di telecomunicazione/speciali e altri carichi elettrici sporadici (in inglese noti come *plug loads*). Poiché nell'ambito di questo lavoro l'interesse è orientato allo studio dei parametri esterni che influenzano i fabbisogni energetici degli edifici, una trattazione più specifica è proposta nella sezione seguente.

### 1.1 Condizioni climatiche esterne e richieste di energia termica negli edifici

La connessione primaria tra le condizioni atmosferiche esterne e l'uso di energia negli edifici è il ruolo che la temperatura ambientale gioca nell'influenzare i carichi di riscaldamento e raffreddamento. Una rappresentazione generalizzata di questa relazione per i servizi energetici nelle città è illustrata nella Figura 1.3.

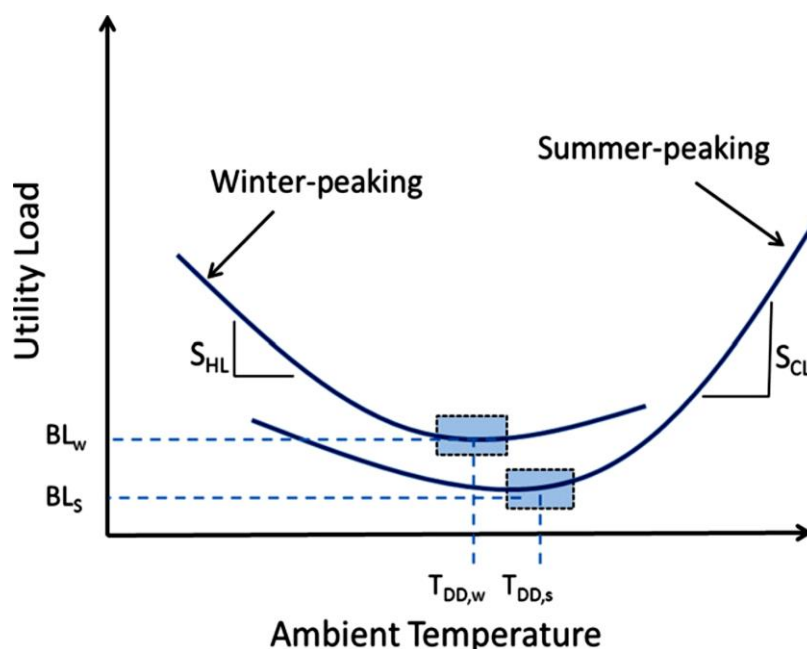


Figura 1.3 - Profilo del consumo di energia in funzione della temperatura dell'aria esterna.

Le curve riportate riguardano i carichi di picco associati ai sistemi energetici a servizio degli edifici nella stagione invernale e in estate. Le sensibilità del carico di raffreddamento e di riscaldamento,

rispettivamente SCL e SHL, indicano la velocità alla quale il consumo di energia aumenta con la temperatura dell'aria in estate o diminuisce con la temperatura in inverno. La forma a U di queste curve dimostra il ruolo invertito della temperatura dell'aria ambiente in inverno rispetto all'estate. Rivela anche che durante le stagioni intermedie (zone ombreggiate) il consumo di energia dell'edificio raggiunge un valore minimo che può essere considerato come il carico di base indipendente dal clima (BL). Le regioni ombreggiate indicano intervalli di temperatura oltre i quali i carichi di utilità sono relativamente insensibili alle variazioni della temperatura ambiente. Queste regioni sono centrate su temperature di soglia nominali rispettivamente per le utenze di picco invernale ed estivo,  $T_{DD,w}$  e  $T_{DD,s}$ . Per semplificare il rapporto tra temperatura ambiente e carichi di picco degli edifici, gli analisti energetici hanno utilizzato due parametri che caratterizzano le temperature ambientali in una città in relazione alla domanda di riscaldamento e raffreddamento. Questi parametri sono i gradi giorno (DD in inglese) di riscaldamento e raffreddamento (HDD e CDD, rispettivamente). Sono definiti in modo tale da tenere conto del fatto che la richiesta di riscaldamento nella maggior parte delle città si avvicina a zero per temperature dell'aria ambiente superiori a una certa soglia (THDD) e la domanda di raffreddamento si avvicina a zero per temperature dell'aria ambiente al di sotto di una soglia di raffreddamento (TCDD).

$$CDD = \sum \frac{1}{2} [(T - T_{CDD}) + |(T - T_{CDD})|] \quad (1.1)$$

$$HDD = \sum \frac{1}{2} [(T - T_{HDD}) + |(T - T_{HDD})|] \quad (1.2)$$

Il primo e il secondo termine sul lato destro di ciascuna di queste equazioni differiscono solo per l'uso di valori assoluti per i secondi termini. Pertanto, la forma di queste espressioni non comporta alcun incremento del calcolo dei gradi giorno per i periodi in cui la temperatura ambiente è più calda o più fredda rispetto alle temperature di soglia dell'HDD o del CDD, rispettivamente. Queste espressioni dovrebbero essere valutate utilizzando dati di temperatura orari, sebbene in molti casi vengano utilizzati dati di temperatura media giornaliera. I valori effettivi delle temperature di soglia variano da città a città, in parte a causa dell'acclimatazione delle popolazioni a temperature calde o fredde, e in parte a causa delle differenze nelle caratteristiche dell'edificio.

## *1.2 Dal generale al particolare: nozioni di termofisica dell'edificio*

Il fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento è generalmente legato dall'obiettivo di mantenere gli ambienti interni entro un intervallo confortevole di temperatura e umidità. In assenza di sistemi per il controllo della temperatura, le condizioni interne variano in risposta a molteplici fattori. In primo luogo, i carichi interni dovuti alle apparecchiature disperdono calore sensibile all'interno dell'edificio.

Questo calore di scarto riscalda l'aria e le temperature superficiali interne. Come regola generale, ogni joule di energia consumata all'interno dell'edificio genera un joule di calore residuo all'interno dell'edificio. Come funzione diretta del metabolismo umano, gli occupanti all'interno di un edificio sono un'altra fonte di calore. Questa perdita di calore metabolica varia da individuo a individuo e in funzione delle attività ma in generale ogni occupante umano introduce mediamente tra i 75 e i 100 W di riscaldamento. Questi apporti interni gratuiti associati all'uso delle apparecchiature e all'occupazione da parte di persone, tuttavia, sono talvolta superati dagli apporti provenienti dall'ambiente esterno. La radiazione solare è uno dei carichi esterni più significativi di un edificio, in particolare nella stagione estiva. A seconda della latitudine, il picco del flusso radiante solare incidente su un edificio può arrivare fino a  $1100 \text{ W/m}^2$  in estate. Si tenga presente che nella stagione invernale, atto 100 il fabbisogno di energia termica per riscaldamento, il 28% di esso è coperto dagli apporti solari (Figura 1.4).

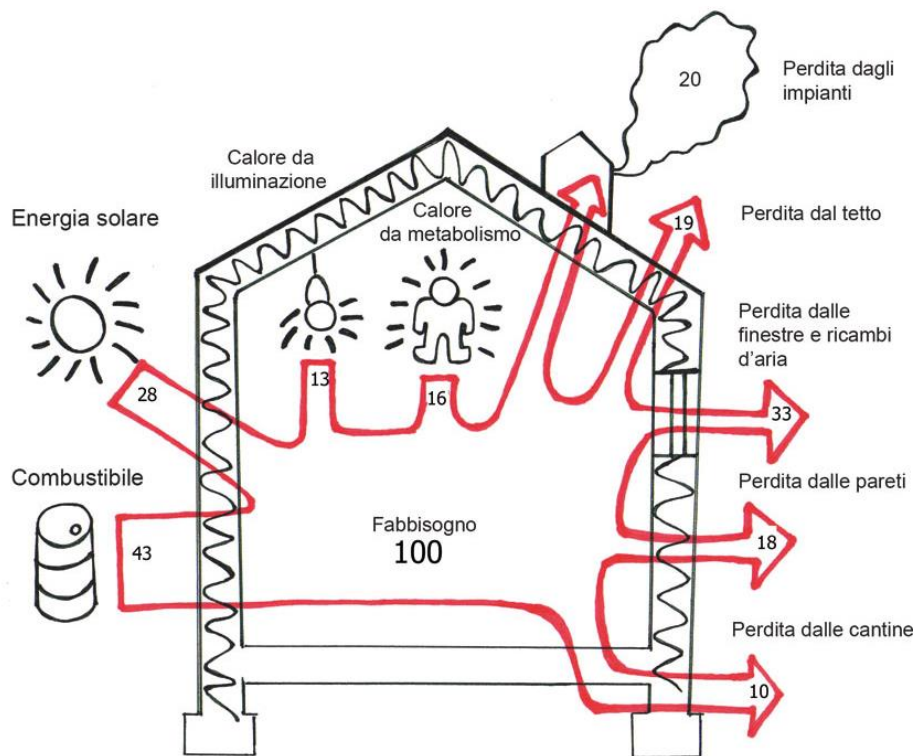


Figura 1.4 - Bilancio termico di in edificio (stagione invernale)

Questo carico radiativo a onde corte sull'edificio penetra nell'involucro dell'edificio attraverso due percorsi. Alcuni tipi di radiazioni passano direttamente attraverso le finestre. A seconda della tipologia e delle prestazioni delle finestre la percentuale di radiazione solare che attraversa l'involucro edilizio attraverso il componente trasparente può variare da un minimo di 25% per una buona finestra a doppio vetro con un rivestimento riflettente fino a un 85% per una finestra con vetro singolo. Le finestre sono in genere il principale elemento d'involucro attraverso il quale i guadagni di calore

dovuti alla radiazione solare e le dispersioni per trasmissione hanno luogo. Ciò è dovuto sia alla trasmissività relativa delle finestre alla radiazione solare sia ai rapporti generalmente elevati tra superficie finestrata e parete esterna (le finestre sono generalmente il 30-50% della superficie della parete). Inoltre, la radiazione solare si combina con la convezione influenzando la trasmissione del calore per conduzione attraverso le superfici opache dell'involucro edilizio. Questa componente di trasmissione per conduzione attraverso involucro è in genere meno significativa rispetto ai guadagni solari attraverso le finestre, ma può assumere un peso specifico a seconda del livello di isolamento degli edifici e della qualità e della superficie relativa delle finestre. L'ultimo elemento di dispersione che a volte viene trascurato è il trasporto di calore e umidità attraverso l'involucro direttamente attraverso lo scambio d'aria associato alla ventilazione degli ambienti. In realtà, un certo tasso di ricambio con l'aria esterna è necessario per mantenere una buona qualità dell'aria, ma solitamente le dispersioni di calore per infiltrazione d'aria attraverso l'involucro dell'edificio risultano essere maggiori del necessario. Ciò è particolarmente vero nelle strutture residenziali in cui un tasso di infiltrazione tipico può raggiungere tassi dell'ordine di 1-3 ricambi d'aria all'ora. Anche negli edifici con involucri edilizi con elevata tenuta all'aria i tassi di infiltrazione possono essere ancora maggiore di 0.2 ricambi d'aria all'ora. Questi involontari scambi d'aria tra l'ambiente interno ed esterno comportano dispersioni di calore sensibile e latente attraverso l'involucro dell'edificio.

## 2 L'ISOLA DI CALORE URBANA (UHI)

Come accennato nelle sezioni precedenti l'uso dell'energia negli edifici è inestricabilmente collegato al sistema climatico urbano e non solamente alle caratteristiche intrinseche dell'edificio. Si può tranquillamente affermare che la produzione e il consumo di energia influenzano e sono influenzati dal clima urbano in modo complesso. Ad esempio, il fabbisogno di energia elettrica per il sistema di illuminazione dipende, oltre che alla tipologia di involucro edilizio, dalla morfologia urbana e in particolar modo al rapporto tra altezza degli edifici e larghezza delle strade. Questo rapporto, noto come *aspect ratio* ( $H/W$ ), è importante anche per quanto riguarda le condizioni termo-igrometriche esterne. Modelli descrittivi del microclima urbano in cui si tiene in conto dell'influenza della morfologia urbana furono sviluppati alla fine degli anni '70 (Oke, T. R. 1977) e nei primi anni '80 (Landsberg, E. H. 1981). Secondo Oke, lo spazio aereo sopra la città è composto dallo *urban air canopy* il cui limite superiore coincide con i tetti degli edifici urbani più alti e dalla *urban air dome* immediatamente superiore allo urban air canopy layer. Le condizioni climatiche in un dato punto all'interno dello urban air canopy sono determinate dalla natura delle costruzioni e in particolare dalla morfologia, dai tipi di materiali e delle loro proprietà. Il limite superiore della urban air dome varia da una zona all'altra a causa delle altezze variabili degli edifici e della velocità del vento. La definizione rigorosa della urban air dome è definita come "quella porzione dello strato limite planetario le cui caratteristiche sono influenzate dalla presenza di un'area urbana al di sotto del suo limite inferiore" (Oke, T. R. 1976).

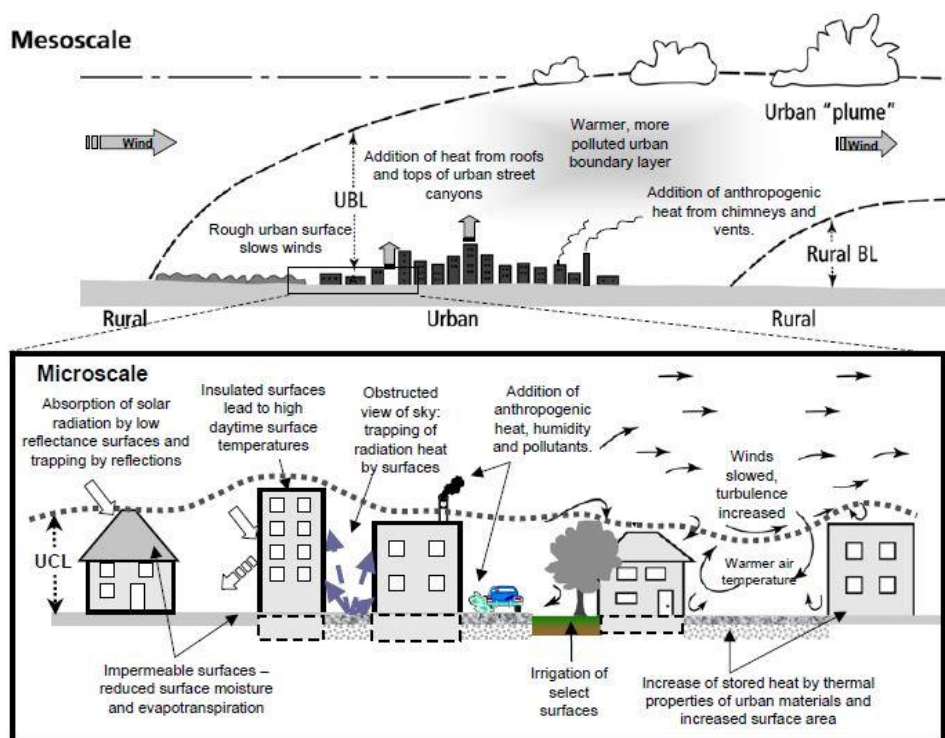


Figura 2.1 – Le scale di influenza del micro-clima urbano

La distribuzione delle temperature nelle aree urbane è fortemente influenzata dal budget radiativo sul tessuto urbano. Infatti, la radiazione solare incidente sulle superfici viene assorbita e trasformata in calore sensibile. La maggior parte di essa incide sui tetti e sulle facciate degli edifici e solamente una piccola quota raggiunge il livello stradale. Le suddette superfici emettono radiazione ad onda lunga verso il cielo, disperdendo in parte la radiazione solare assorbita. L'entità di questa dispersione però dipende dal fattore di vista tra le superfici e la volta celeste. Il saldo tra guadagni dovuti alla radiazione solare e dispersione di calore per irraggiamento determina le condizioni di equilibrio termico nelle aree urbane. Dal momento che la dispersione dovuta a perdite per irraggiamento verso la volta celeste è minore nelle aree urbane rispetto alle zone suburbane e rurali, le temperature risultano più alte. Questo meccanismo contribuisce a generare un fenomeno ormai ben noto tra i ricercatori denominato *Urban Heat Island* (UHI) che risulta tanto più intenso quanto più è elevato il tasso di urbanizzazione.

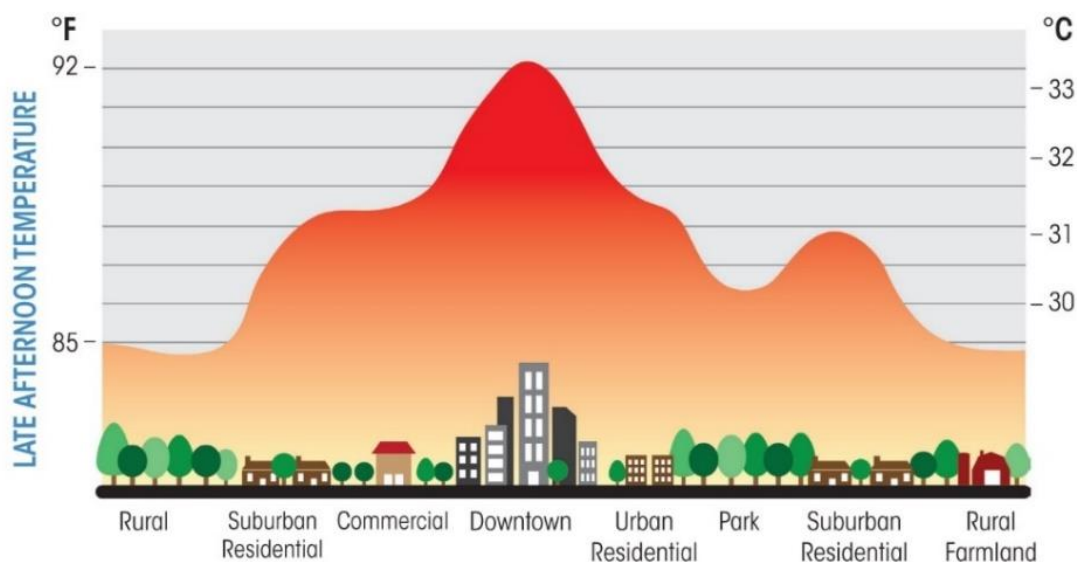


Figura 2.2 - Andamento delle temperature dovuto al fenomeno dell'UHI

I fattori che concorrono a determinare il fenomeno dell'UHI sono molteplici e si possono sintetizzare nei seguenti punti (Oke, et al. 1991):

- La configurazione urbanistica ostacola le dispersioni di calore per irraggiamento verso la volta celeste a causa degli interscambi radiativi tra gli edifici e del basso valore del fattore di vista del cielo;
- La configurazione urbanistica e le proprietà di riflessione dei materiali possono incrementare le inter-riflessioni multiple, facendo aumentare i carichi solari effettivi sulle superfici costituenti il tessuto urbano;
- Le proprietà termofisiche dei materiali da costruzione possono contribuire ad accumulare calore nel tessuto urbano;



- Il calore prodotto e rilasciato dalle attività antropiche contribuisce ad aumentare l'UHI;
- L'effetto serra dovuto all'elevata concentrazione di agenti inquinanti impedisce la dispersione del calore verso la volta celeste;
- La mancanza di aree verdi impedisce di sfruttare il calore latente di evaporazione per far abbassare la temperatura del microclima urbano;
- La presenza degli edifici impedisce al vento la rimozione di calore dal tessuto urbano per scambio convettivo e riduce il tasso di ricambio delle masse d'aria a livello stradale.

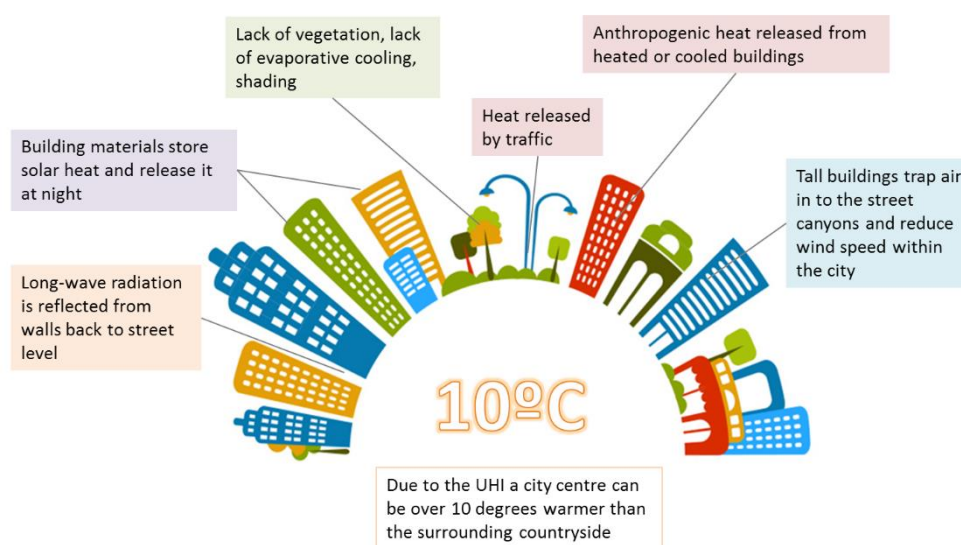


Figura 2.3 - Le cause del fenomeno UHI

Occorre distinguere due tipi diversi di isole di calore, a seconda di quali sono le temperature misurate nell'area urbana e nelle aree non urbane circostanti:

- *L'isola di calore superficiale o epidermica*: durante le giornate estive con cielo limpido, il sole riscalda le superfici orizzontali urbane, come le pavimentazioni stradali o i tetti degli edifici: queste superfici, normalmente di basso o nullo contenuto d'acqua (che impedisce un raffreddamento per evaporazione), se direttamente esposte, raggiungono temperature tra i 27 e i 50°C superiori rispetto alla temperatura dell'aria dando luogo al fenomeno dell'UHI di superficie (surface UHI – SUHI). Il fenomeno dell'isola di calore di superficie richiede dunque una quantificazione in termini di differenza di temperatura cosiddetta epidermica. Questa è generalmente più marcata durante il giorno: il  $\Delta T$  epidermico, in questo caso, raggiunge valori di media giornaliera di circa 10-15°C. Durante la notte, il  $\Delta T$  non supera i 5-10°C.

- *L'isola di calore atmosferica*, che si divide ulteriormente in:
  - Isola di calore dello strato della copertura urbana (urban canopy layer UCL), come differenza di temperatura dell'aria vicina alla superficie, al di sotto dell'altezza media degli edifici;
  - Isola di calore dello strato limite urbano (urban boundary layer, UBL), come differenza di temperatura dell'aria al di sopra dell'altezza media degli edifici, fino alla quota in cui la conformazione urbana non influenza più le caratteristiche atmosferiche.

L'isola di calore dello strato della copertura urbana è sicuramente la manifestazione del fenomeno maggiormente osservata e studiata in quanto esercita la propria influenza laddove la popolazione vive. Per questo motivo, molto spesso, parlando di isola di calore urbana, non si accenna neppure alle suddivisioni di cui sopra, dando per scontato che l'interesse sia rivolto al solo strato limite urbano. L'isola di calore atmosferica mostra i propri effetti all'interno di un campo di variazione molto inferiore all'isola di calore di superficie: su base annua, nelle grandi città, la temperatura dell'aria mantiene valori da 1 a 3°C superiori a quelli dell'aria delle zone rurali. Nei picchi estivi, ma anche durante la stagione invernale in cui il fattore predominante diviene il calore di origine antropogenica, la questione è diversa e l'intensità del fenomeno può raggiungere i 10°C.

L'isola di calore atmosferica si può estendere in verticale fino alla quota di diverse centinaia di metri e, in orizzontale, sottovento alla città, può arrivare a decine di chilometri di distanza (si tratta del cosiddetto "pennacchio urbano", urban plume). Essa è caratterizzata da aria più turbolenta, più calda, più secca e più inquinata. Lo strato rimescolato assume sopra la città una forma a cupola e può essere di qualche centinaio di metri più spesso rispetto alle aree rurali. Nel tardo pomeriggio ed in serata l'isola di calore atmosferica si sviluppa gradualmente, fino a raggiungere la sua massima intensità durante la notte. Mentre le aree rurali circostanti si raffreddano per irraggiamento e lo strato superficiale si stabilizza, sviluppando un'inversione termica, l'area urbana, a causa della propria temperatura e degli elementi di rugosità (gli edifici), conserva una turbolenza residua che attenua o annulla la stabilità atmosferica degli strati più bassi, dando vita ad una sorta di strato rimescolato notturno. Mentre nelle aree rurali l'inversione termica si sviluppa subito dopo il tramonto a partire dalla superficie, nelle aree urbane l'inversione si sviluppa 2-4 ore dopo il tramonto, a quote più elevate; nelle ore successive lo spessore dello strato di inversione cresce, mentre si assottiglia lo strato rimescolato notturno. Misure effettuate nella città di Londra hanno mostrato una temperatura dell'aria notturna fino a 7 K più alta di quella misurata fuori città (Watkins, et al. 2002). Il riscaldamento globale e le ondate di calore durante la stagione estiva (Fischer e Schär 2009) possono far aumentare ulteriormente la temperatura nelle aree urbane riducendo significativamente il potenziale di

raffrescamento associato alla ventilazione passiva notturna (*free cooling*) nei climi temperati. Analisi mediante una campagna sperimentale durata tre anni sono state effettuate su questi aspetti temporali dell'isola di calore urbano di Vancouver. Su base annuale, l'UHI è al suo massimo a metà della notte e il suo minimo è a metà pomeriggio (Runnals e Oke 2000). L'incremento delle temperature medie

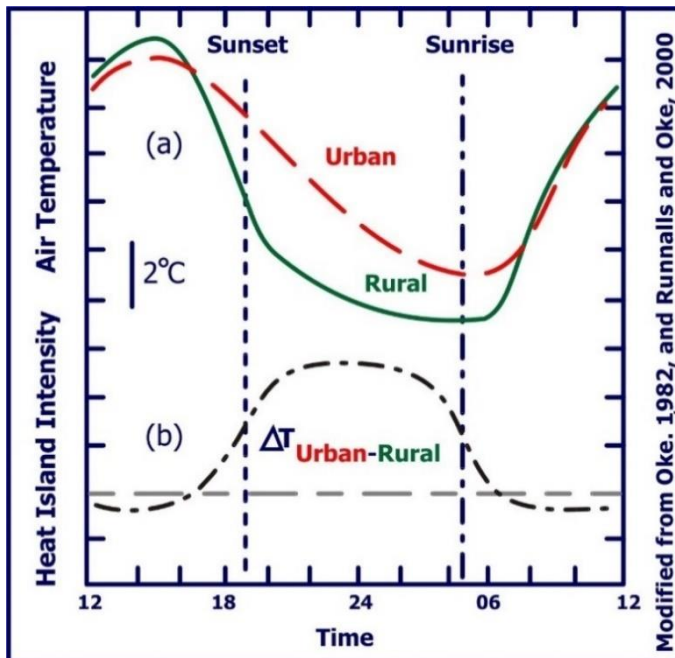


Figura 2.4 - Temperature dell'aria e intensità dell'UHI notturno a Vancouver.

si ripercuote sui fabbisogni energetici come già dimostrato da studi effettuati nei primi anni '90. Negli Stati Uniti furono condotti diversi studi che hanno permesso di correlare l'isola di calore urbana e il consumo di energia: per le città con una popolazione superiore a 100.000 il carico di picco dell'elettricità aumenta dell'1,5-2% per ogni incremento di temperatura di 1 °C (Akbari, et al. 1992). Tenendo conto del fatto che le temperature urbane durante i pomeriggi estivi negli Stati Uniti sono aumentate del 2-4 °C negli ultimi 50 anni, si può ipotizzare che dal 3 all'8% dell'attuale fabbisogno di elettricità urbana venga utilizzato solamente per compensare

l'effetto isola di calore. Gli impatti energetici dell'UHI sono stati approfonditi e studiati anche in Europa. Lo studio condotto da (Santamouris, et al. 2001) ha portato al calcolo dei gradi-ora di raffreddamento all'interno della città di Atene. I gradi-ora sono utili per stimare l'entità del carico di riscaldamento o raffreddamento richiesto alle macchine per il condizionamento dell'aria. Ne risulta che il numero di gradi-ora del centro della città è circa doppio rispetto alle zone circostanti. In particolare, verso mezzogiorno, nella zona centrale di Atene (dove l'intensità media dell'isola di calore supera i 10 K) il numero di gradi-ora di raffreddamento è circa 385 mentre nelle zone suburbane è di circa 132. Lo studio ha riscontrato un carico di raffreddamento del centro città circa doppio rispetto alle zone limitrofe, corrispondente al calcolo dei gradi-ora.

L'effetto UHI non solo influenza la richiesta di energia per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici, ma ha anche un impatto sul comfort termo-igrometrico e sulla salute delle persone che vivono nelle aree urbane (Moonen, et al. 2012). Infatti, gli effetti dell'isola di calore sulla qualità dell'aria possono essere rilevanti. La presenza di uno strato turbolento rimescolato, che si verifica soprattutto nelle ore notturne, sovrastato da un'inversione termica in quota, diluisce l'effetto locale delle emissioni inquinanti distribuendole in tutta l'area urbana; questo meccanismo però può così favorire

le reazioni chimiche che danno luogo alla formazione di particolato secondario. Inoltre, quando di notte gli inquinanti raggiungono lo strato turbolento sopra la città, vengono rapidamente rimescolati fino alla superficie. Le circolazioni indotte dall'isola di calore possono richiamare dalla campagna aria più pulita, ma possono anche far convergere verso il centro l'aria inquinata di aree industriali o arterie stradali periferiche.

Alcuni studi condotti nella regione di Parigi (Sarrat, et al. 2006), hanno confermato quanto sopra investigando circa l'impatto dell'UHI notturna e diurna sull'inquinamento atmosferico. Lo studio si è rivolto principalmente agli inquinanti locali di tipo primario e secondario, in particolare ai livelli di ozono troposferico e di ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), rilevando come la presenza e la distribuzione spaziale degli inquinanti fosse direttamente correlata all'aumento di turbolenza indotta dalle circolazioni di cui sopra. (Stathopoulou, Cartalis e Nektarios 2006) hanno dimostrato come ad Atene le concentrazioni di ozono troposferico siano fortemente correlate alle temperature. Parallelamente, i loro studi hanno mostrato come l'andamento della concentrazione di inquinante segua le variazioni di temperatura, in particolare durante il giorno in cui l'ozono troposferico raggiunge i livelli più elevati.

## *2.1 Tecniche di mitigazione dell'isola di calore*

L'interesse nei confronti del fenomeno dell'UHI, mosso da questioni relative al risparmio energetico e al benessere termo-igrometrico degli spazi esterni, ha contribuito a promuovere lo sviluppo di strategie per ridurre gli effetti. Dal momento che l'origine dello squilibrio termico urbano è la modifica del bilancio energetico a livello di tessuto urbano, le azioni di mitigazione devono influire sui termini di questo bilancio e avvicinarli ai valori che si verificano nelle aree rurali.

In particolare, gli interventi dovrebbero:

- ridurre il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana, tramite modifica della geometria urbana e attraverso l'utilizzo di materiali con maggior resistenza termica;
- ridurre la radiazione netta assorbita, aumentando l'albedo delle superfici e modificando la geometria degli edifici;
- trasformare parte del flusso di calore sensibile in flusso di calore latente, aumentando la permeabilità delle superfici e la presenza di vegetazione;
- ridurre il flusso di calore antropogenico, limitando i consumi di energia elettrica, diminuendo il traffico veicolare e migliorando l'efficienza energetica.

Alcune di queste azioni non sono concretamente realizzabili in città esistenti, come ad esempio l'aumento dello sky view factor attraverso la modifica della geometria urbana, mentre sono

sicuramente tutti elementi da prendere in considerazione durante la pianificazione urbana e la costruzione di nuovi edifici. Il miglioramento di una situazione esistente non deve essere tuttavia effettuato attraverso l'attuazione di tutti gli interventi possibili, poiché ogni isola di calore ha caratteristiche proprie ed è determinata da molteplici cause, che contribuiscono a generarne gli effetti in maniera differente nelle diverse città. Non esiste quindi una "ricetta" universale per la mitigazione dell'effetto dell'UHI e alcune azioni si potrebbero rivelare inefficaci o addirittura controproducenti se applicate senza aver considerato le specificità locali. Pur non dimenticando la precedente osservazione, è possibile affermare che tra le tecniche di mitigazione quelle che generalmente sembrano produrre risultati migliori sono l'aumento della vegetazione e l'utilizzo di materiali in grado di riflettere una maggior quota di radiazione solare. Ad esempio, (Akbari, H.; Konopacki, S. 2005) stima che la temperatura estiva massima di Los Angeles si abbasserebbe di 2-3 K se venissero piantati 3 alberi per ogni casa e se i 2/3 della superficie urbana incrementasse il proprio albedo.

Le strategie di mitigazione maggiormente adottate comportano quindi la modifica del bilancio energetico delle superfici urbane tramite incremento dell'albedo dei materiali e aumento dei processi di evapotraspirazione. Questi cambiamenti dell'ambiente urbano possono essere relativamente semplici da ottenere e procurano due tipologie di benefici: diretti e indiretti. Gli effetti diretti riguardano gli edifici sui quali sono stati effettuati gli interventi; la minore temperatura delle superfici delle abitazioni consente di ridurre la necessità di energia elettrica per la climatizzazione e un conseguente risparmio economico. Ma se le azioni di mitigazione vengono effettuate da molte strutture, le numerose riduzioni di temperatura locale e la riduzione di emissioni di calore antropogenico provocano una diminuzione della temperatura di tutta la città: tale evento è un beneficio indiretto perché contribuisce al risparmio energetico di ogni singola abitazione.

La riduzione dei consumi energetici ottenibile è un vantaggio per l'intera collettività poiché permette sia di limitare la potenza elettrica di picco sia di migliorare la qualità dell'aria. La minor domanda di energia provoca infatti una minor emissione di inquinanti e di gas serra, dal momento che gran parte dell'energia elettrica è prodotta da combustibili fossili. Le minori temperature cittadine diminuiscono poi la formazione di smog fotochimico, prodotto in seguito a reazioni che coinvolgono gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) e i composti organici volatili (VOC), emessi da molti processi naturali o antropici. Infine, la presenza di vegetazione riduce in modo diretto l'anidride carbonica atmosferica attraverso il processo di fotosintesi, anche se si stima che la riduzione indiretta, dovuta al risparmio energetico, sia maggiormente significativa. Le tecniche di mitigazione considerate maggiormente efficaci nel contrastare il fenomeno dell'isola di calore urbana sono le seguenti:

- Cool roofs;
- Cool pavements;

- Green areas;
- Green roofs.

Le prime due tecniche implicano l'utilizzo di materiali o dei rivestimenti cool in grado di riflettere gran parte della radiazione solare e di riemettere calore nel range dell'infrarosso lontano, mentre le ultime due sfruttano la riduzione del calore sensibile sia tramite l'aumento del flusso di calore latente sia grazie all'aumento dell'ombreggiamento prodotto dalle piante.

## 2.2 *Il canyon urbano*

Come precedentemente trattato, l'insieme degli edifici è in grado di influenzare le caratteristiche dinamiche e termiche delle masse d'aria all'interno di una zona urbanizzata; tali caratteristiche sono legate al numero, dimensioni e distanza degli edifici. La caratterizzazione meteorologica di un ambiente urbano può presentare notevoli difficoltà in funzione delle complessità naturali dovute al dispiegarsi del tessuto urbano in una zona collinare o montuosa oppure costiera; a ciò si aggiunge la complessità propria della configurazione topografica dell'ambiente urbano, comprensiva di strade fiancheggiate da edifici, piazze in cui confluiscono più strade, aree verdi ed aree attraversate da flussi di traffico consistenti accanto a zone con traffico diffuso.

Le città sono sorgenti antropogeniche di calore e inquinamento, come dimostrano diversi studi che hanno attribuito all'urbanizzazione cambiamenti radicali nelle caratteristiche radiative, termodinamiche e aerodinamiche della superficie rispetto a quelle delle zone rurali circostanti. In particolare, risultano modificati parametri meteorologici quali: temperatura superficiale, umidità, precipitazioni, nebbia, qualità dell'aria, altezza dello strato di rimescolamento e profilo di vento. È dimostrato, inoltre, che le pareti degli edifici e le superfici stradali, funzionando come elementi riflettenti la radiazione solare, determinando il rimbalzo della componente radiativa e l'accentuazione degli effetti complessivi sulle pareti stesse, sul terreno e sul volume d'aria interposto.

La presenza di un edificio o di un gruppo di edifici, oltre a determinare interazioni tra superficie ed atmosfera nel campo della temperatura e umidità, ha un impatto di tipo aerodinamico soprattutto nelle situazioni a ventilazione sostenuta, in cui la superficie discontinua delle aree costruite accresce la turbolenza ed i vortici, determinando effetti d'incanalamento. L'edificio costituisce quindi un vero e proprio ostacolo che le correnti possono superare o aggirare, con modalità di moto turbolento o laminare, in funzione dell'interazione tra le proprietà del flusso e le caratteristiche dell'edificio. Si tratta, dunque, di un fenomeno caratterizzato dalla velocità delle correnti e dalla stabilità dell'aria nello strato più prossimo alla superficie, ma anche dalla forma dell'ostacolo (secondo una sezione perpendicolare alle correnti) e dalla sua altezza. Se il flusso d'aria supera l'ostacolo scavalcandolo, la brusca discontinuità dell'orientamento della superficie provoca la formazione di vortici ad asse

orizzontale, sopravento e sottovento all'ostacolo. In altri casi (forte stabilità e non eccessiva velocità della corrente) la corrente d'aria che incontra l'ostacolo viene "divisa" dall'edificio: le correnti, oltrepassandolo, si rinforzano sui suoi fianchi. In questo caso, sottovento all'ostacolo, si possono formare vortici ad asse verticale, una sorta di "scia" dell'edificio nel fluido in movimento.

Il canyon urbano (Nunez e Oke 1977), che rappresenta idealmente la configurazione topologica più rappresentativa di un'area densamente urbanizzata, consiste nella combinazione di due superfici verticali e di una orizzontale ed è formato tipicamente da due edifici adiacenti e da una strada situata tra di essi.

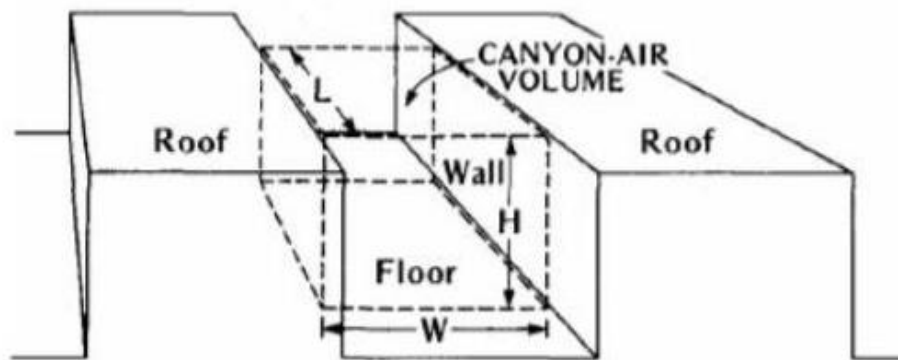


Figura 2.5 - Rappresentazione semplificata di un canyon urbano

La geometria del canyon influenza il bilancio energetico urbano in vari modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio, influenza l'ingresso e l'uscita della radiazione solare, determina un'interazione tra le superfici che lo compongono, limita la capacità di dispersione della radiazione infrarossa ad onda lunga e limita la turbolenza dell'aria.

Naturalmente non tutti i canyon urbani influenzano allo stesso modo i suddetti scambi energetici e, di conseguenza, le temperature. I parametri più significativi per la caratterizzazione della geometria dei canyon sono:

- L'orientamento rispetto ai punti cardinali;
- Il rapporto  $H/W$  tra l'altezza e la larghezza della struttura: questo parametro descrive quanto gli edifici siano densamente spazati rispetto alla loro altezza (valori crescenti del rapporto indicano una diminuzione della porzione di cielo visibile dall'interno del canyon). In un'area a media densità edilizia (rapporto  $H/W$  di circa 1), la maggior parte della radiazione riflessa incide su altri edifici o sul suolo e viene infine assorbita dal suolo o dalle zone in prossimità di esso. Nell'area ad alta densità (rapporto  $H/W$  di circa 4 o più), la maggior parte dell'assorbimento si concentra molto al di sopra del livello del suolo. Di conseguenza il tasso di radiazione che raggiunge il suolo, e che riscalda l'aria vicino ad esso, è minore che nel caso della media densità.

- Il rapporto  $L/H$  tra la lunghezza e l'altezza della struttura. In base a questo parametro è possibile distinguere i vari tipi di canyon:
  - $L/H = 1 \rightarrow$  canyon regolare;
  - $L/H \geq 2 \rightarrow$  canyon profondo;
  - $L/H \cong 3 \rightarrow$  canyon corto;
  - $L/H \cong 5 \rightarrow$  canyon medio;
  - $L/H \cong 7 \rightarrow$  canyon lungo;

È possibile effettuare un'ulteriore distinzione considerando la conformazione degli edifici su ciascun lato della sezione stradale: se le due schiere presentano pressoché la stessa altezza media, il canyon è classificabile come simmetrico; viceversa, differenze di altezza significative tra i due lati di edifici individuano un canyon asimmetrico. La lunghezza  $L$  del canyon e il rapporto  $L/H$ , inoltre, divengono parametri rilevanti per l'analisi della dispersione degli inquinanti all'interno dell'arco stradale; incrementi nel rapporto  $L/H$ , infatti, limitano lo scambio di massa alle estremità del canyon, provocando una stagnazione degli inquinanti emessi sia dal traffico veicolare che caratterizza il canyon, sia dai sistemi di riscaldamento delle abitazioni. Per di più, se il canyon urbano presenta anche un elevato rapporto  $H/W$ , l'effetto di ritenzione degli inquinanti all'interno del canyon viene amplificato.

I rapporti  $H/W$  e  $L/H$  divengono poi significativi se si fa riferimento alla realtà degli agglomerati urbani italiani e, in particolare, agli assetti dei centri storici: in molti casi, infatti, a causa della compattezza del tessuto urbano, i canyon possono presentare rapporti  $H/W$  superiori a 3 e valori del rapporto  $L/H$  maggiori di 15. Tale parametro tuttavia è inadatto per descrivere efficacemente la grande varietà delle situazioni urbane.



### 3 LA RADIAZIONE SOLARE

Dal momento che il peso della radiazione solare incidente sul tessuto urbano costituisce una voce fondamentale per la determinazione del budget energetico, risulta necessario introdurre le nozioni riguardanti le caratteristiche dell'energia raggiante che la Terra riceve dalla sua stella. L'energia elettromagnetica emanata dal Sole occupa uno spettro di frequenze molto vasto, che va dai dannosi raggi ultravioletti (200 nm di lunghezza d'onda) sino al profondo infrarosso (2500 nm), passando ovviamente per la luce visibile (da 400 a 700 nm). L'irradianza spettrale del Sole è di conseguenza assimilabile a quella di un corpo nero posto ad una temperatura di 5250 °C, ma l'atmosfera terrestre blocca completamente o attenua alcune porzioni dello spettro, introducendo diverse bande di assorbimento che modificano l'andamento dell'irradianza spettrale solare. Una di queste schermature la si ha ad esempio per le radiazioni a lunghezza d'onda più basse, rendendo possibile la vita sulla Terra.

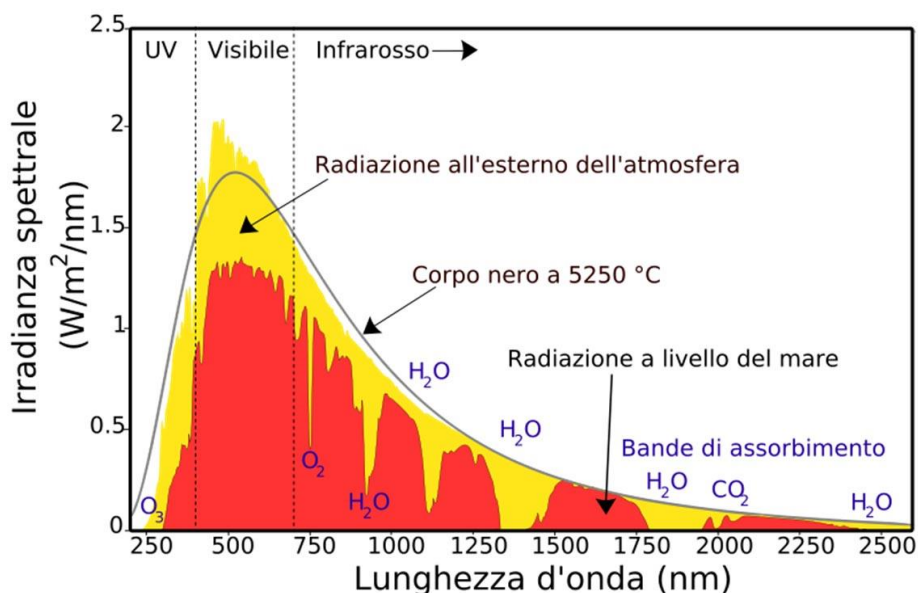


Figura 3.1 - Spettro della radiazione solare

In particolare, la radiazione solare è composta parte dall'ultravioletto, parte dal visibile e parte dall'infrarosso, secondo tale suddivisione:

- 0.2 – 0.38  $\mu\text{m}$ : ultravioletto (6.8 % dell'energia totale)
- 0.38 – 0.78  $\mu\text{m}$ : visibile (47.6 %)
- 0.78 – 10  $\mu\text{m}$ : infrarosso (45.6%)

Fuori dall'atmosfera terrestre, il bilancio di potenza ricevuta dal sole si aggira intorno a 1367 W/m<sup>2</sup>. Tale valore di irraggiamento (extraterrestre) si riferisce alla cosiddetta costante solare ( $G_{sc}$ ), ovvero il valore di radiazione solare, per unità di area, ricevuta su una superficie normale alla direzione Sole-

Terra quando quest'ultima si trova ad una distanza media dalla stella. A causa però dell'eccentricità dell'orbita terrestre, questa densità di potenza può variare fino ad un massimo del 3% durante l'anno.

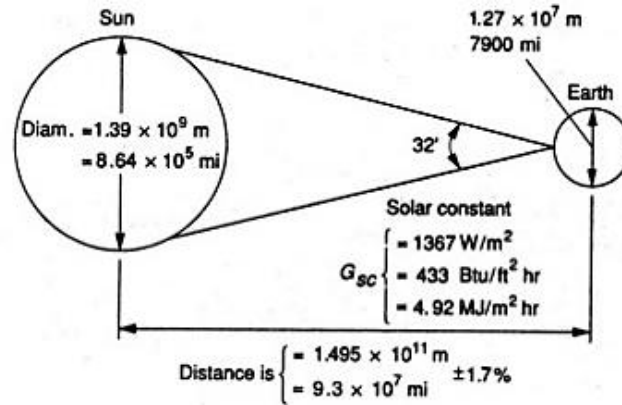


Figura 3.2 - Geometria Terra-Sole

La questione si complica considerevolmente nel momento in cui la luce penetra all'interno dell'atmosfera. Nel bilancio energetico solare bisogna infatti tenere in conto che parte della radiazione viene da quest'ultima riflessa, assorbita, diffusa e trasmessa, giungendo sulla superficie terrestre con una intensità sensibile alla nuvolosità, all'umidità, alla temperatura, alla pressione atmosferica ed al livello di inquinamento.

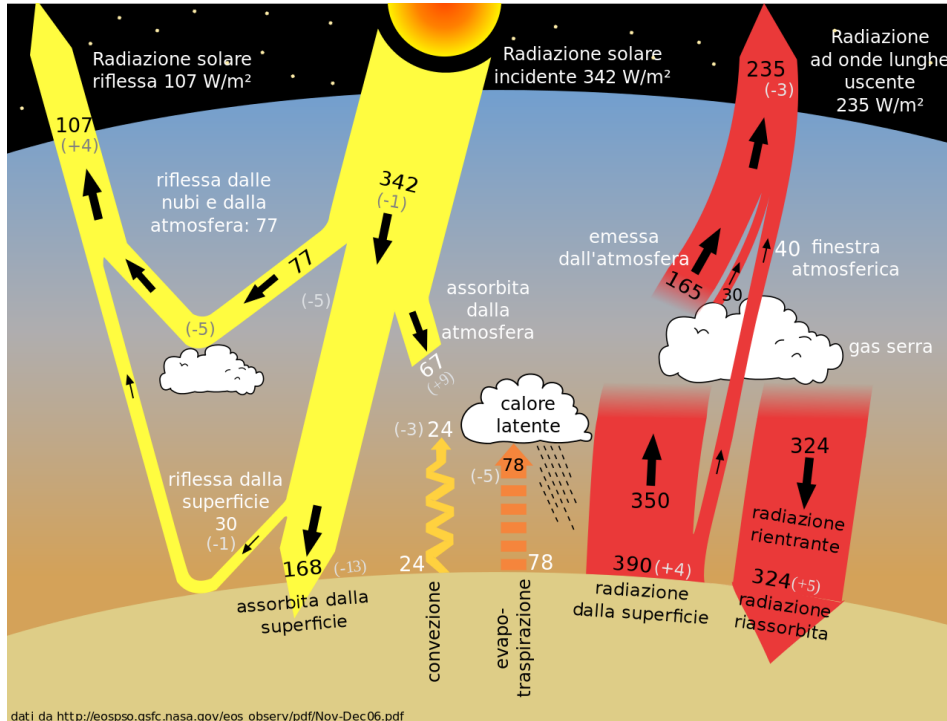


Figura 3.3 – Il budget radiativo dell'atmosfera terrestre

Tutti questi fattori sono molto difficili da considerare e sono variabili nel tempo e con la località presa in considerazione. Perciò, prima di affrontare questi argomenti è bene introdurre qualche nozione

sulla geometria solare che permette di stimare, a prescindere dai suddetti fattori, la radiazione solare incidente su superficie orizzontale, a livello del mare.

### 3.1 Nozioni di geometria solare

La natura dell'energia irradiata dal sole nello spazio è determinata dalla sua struttura, e l'intensità con cui questa energia giunge sulla terra è funzione della geometria del sistema terra-sole. La posizione del sole nel cielo è espressa in termini di altezza solare  $\beta$  e di azimut solare  $\Psi$ . Questi angoli dipendono dalla latitudine della località  $\phi$ , dalla declinazione solare  $\delta$  e dell'ora solare apparente, espressa come angolo orario  $\omega$ .

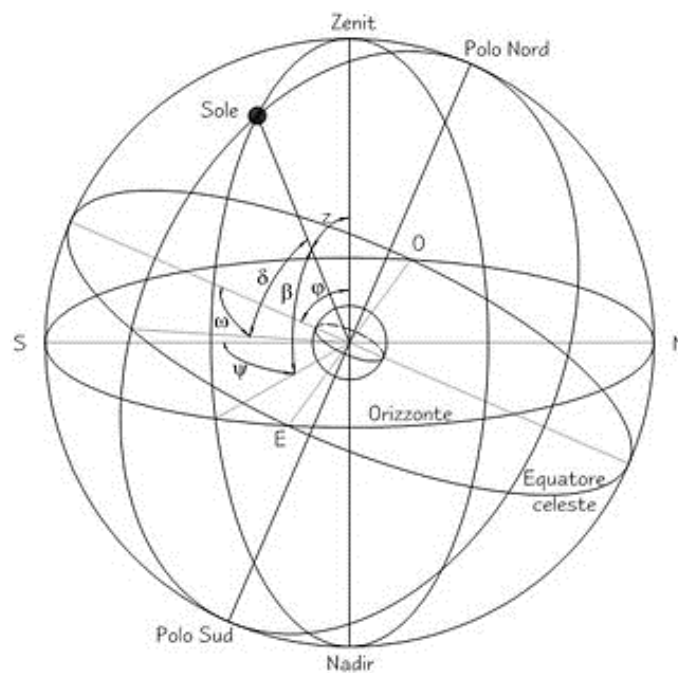


Figura 3.4 - Parametri della geometria Terra-Sole

Si definisce  $\delta$ , angolo di declinazione solare, l'angolo formato dalla congiungente centro della terra-centro del sole con in piano equatoriale. Il suo valore varia continuamente, ma, con buona approssimazione, si può considerare costante nell'arco del singolo giorno. Nel corso dell'anno oscilla tra  $+23.45$  e  $-23.45$ , in corrispondenza, rispettivamente, del solstizio d'estate (21 o 22 giugno) e del solstizio d'inverno (21 o 22 dicembre). Agli equinozi (20 o 21 marzo e 22 o 23 settembre), quando la durata del giorno uguaglia quella della notte,  $\delta$  vale 0.

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (N + 284) \right] \quad (3.1)$$

In cui  $N$  rappresenta il numero progressivo del giorno considerato (ad esempio, per il 30 dicembre si ha  $N=364$ ), rappresenta principalmente il parametro necessario ad individuare il giorno specifico cui ci si riferisce.

L'angolo orario  $\omega$ , rappresenta l'angolo formato dal piano meridiano (che contiene, cioè, l'asse terrestre) passante per il sole con il piano meridiano passante per l'osservatore posto nel sito relativamente al quale si eseguono i calcoli, nell'ora e nel giorno considerati. Vale 0 a mezzogiorno e varia di 15 ogni ora, assumendo valori positivi al mattino e negativi al pomeriggio (ad esempio, alle ore 10 si ha  $\omega = 30$ , alle ore 13 si ha  $\omega = 15$ ). Un particolare valore dell'angolo orario è rappresentato da  $\omega_s$ , angolo orario al sorgente del sole, simmetrico di quello al tramonto, che si calcola tramite la relazione:

$$\omega_s = \sin^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (3.2)$$

Una volta definito  $\omega_s$ , il suo valore può essere utilizzato per calcolare D, la lunghezza espressa in ore del giorno in questione, e cioè l'intervallo temporale che separa l'alba dal tramonto:

$$D = \frac{2 \omega_s}{15} \quad (3.3)$$

L'angolo di altezza o elevazione solare  $\beta$  rappresenta uno dei due parametri principali atti a definire il moto apparente del sole relativamente ad una specifica località. È rappresentato dall'angolo formato dalla congiungente sole-terra nel sito in oggetto (questa retta può essere immaginata come un singolo raggio di luce che colpisce il punto in cui si trova l'osservatore) con il piano orizzontale. Il suo valore si può calcolare utilizzando la formula:

$$\beta = \cos^{-1}(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \varphi \sin \delta) \quad (3.4)$$

Il valore dell'altezza solare massima giornaliera si verifica ogni giorno alle ore 12 (mezzogiorno); durante l'arco di un anno l'altezza solare massima giornaliera ha il suo apice durante il solstizio d'estate ed il suo minimo durante il solstizio d'inverno. A seconda della diversa localizzazione geografica del sito in esame, l'altezza solare massima e minima a mezzogiorno si determina come:

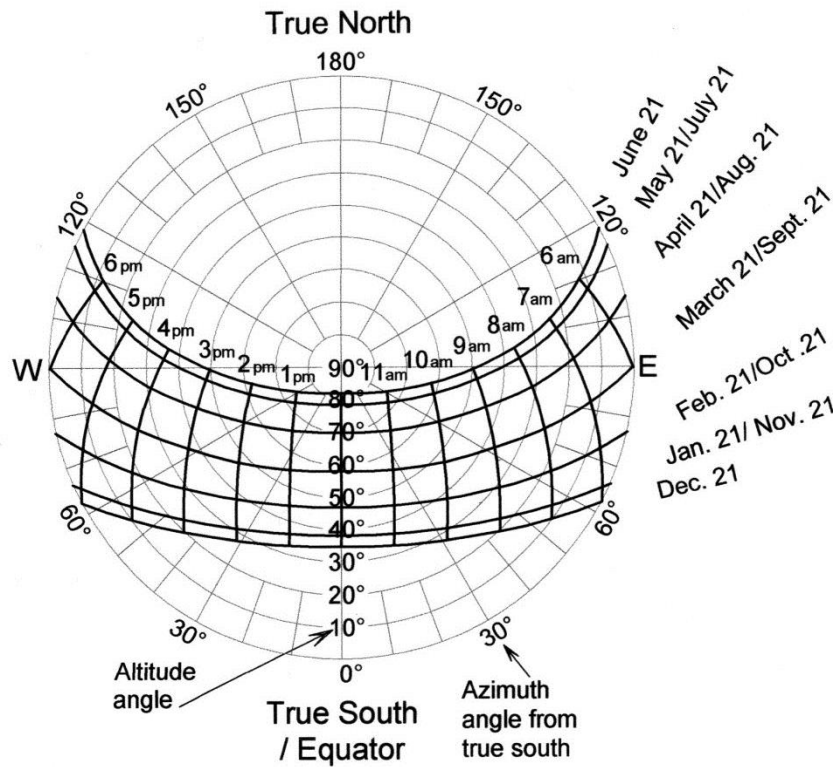
$$\beta_{max} = (90 - \varphi) + 23.45^\circ \quad (3.5)$$

$$\beta_{min} = (90 - \varphi) - 23.45^\circ \quad (3.6)$$

Si definisce angolo di azimut solare o azimut l'angolo formato dalla proiezione sul piano orizzontale dalla retta passante per il sole e il punto in esame sulla superficie terrestre con il semiasse Sud. Questo è il secondo dei due parametri fondamentali per la definizione del moto apparente del Sole. In corrispondenza dell'asse Sud il valore dell'angolo è  $0^\circ$ , mentre assume valori positivi verso Est e negativi verso Ovest. Il calcolo di questo parametro è determinato come:

$$\alpha = \cos^{-1}(\sin \beta \sin \varphi - \sin \delta \cos \beta \cos \varphi) \quad (3.7)$$

I parametri appena definiti, altezza solare e azimut, sono la base per tracciare i diagrammi polari o mappe solari, ovvero strumenti che, tramite cerchi concentrici ( $\beta$ ) e raggi ( $\alpha$ ) di una circonferenza, rappresentano il moto apparente del Sole durante un anno ad una latitudine caratteristica. L'immagine successiva rappresenta una mappa solare che fa riferimento ad una latitudine di 32° nord.



**Sun Path Diagram, 32° N Latitude**

*Figura 3.5 - Mappa solare caratteristica per latitudine 32° nord*

Si definisce angolo zenitale l'angolo complementare all'angolo di altezza solare ( $\beta$ ), ovvero l'angolo formato tra il semiasse perpendicolare alla superficie terrestre del punto in cui ci si trova e la retta passante per il medesimo punto ed il Sole.

Il calcolo di questo parametro è determinato come:

$$\theta_z = 90^\circ - \beta = 90^\circ - \cos^{-1}(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \varphi \sin \delta) \quad (3.8)$$

L'angolo d'incidenza della radiazione solare su di una superficie è quello formato dalla direzione di propagazione dei raggi solari con la retta normale alla superficie stessa. Per quanto riguarda la componente diretta, il suo valore è dato dalla seguente formula:

$$\theta = \cos^{-1}[\cos \beta \cos(\alpha - \gamma) \sin \Psi + \sin \beta \cos \Psi] \quad (3.9)$$

L'immagine successiva rappresenta in modo schematico i parametri appena descritti, fornendo una visione semplificativa d'insieme di tutti gli aspetti che è necessario considerare per studiare l'azione della radiazione solare su una superficie.

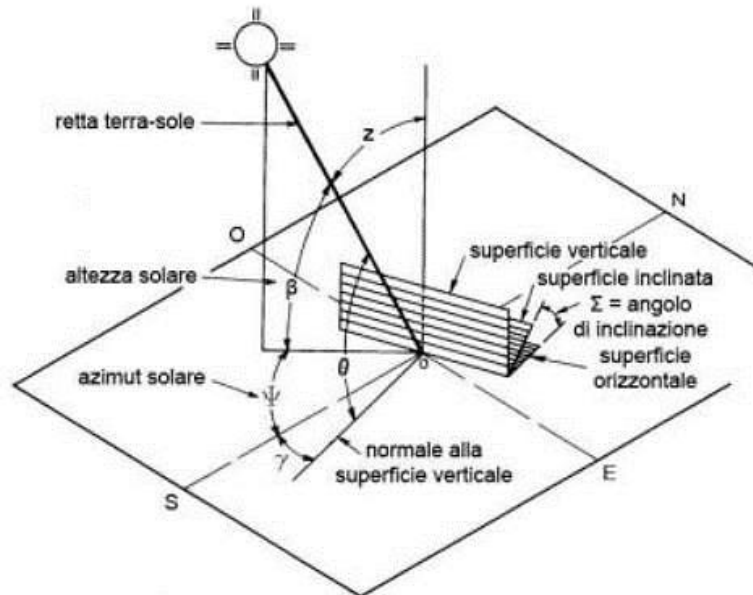


Figura 3.6 - Parametri di geometria solare per superfici comunque orientate

### 3.2 Radiazione solare su superficie comunque orientata

Nel corso degli anni sono stati sviluppati diversi metodi di calcolo basate sulla correzione dei valori di radiazione diretta e di radiazione diffusa inerenti al piano orizzontale. La relazione con la quale è possibile determinare l'incidenza della radiazione solare su di un piano orientato e inclinato è data dalla seguente formula:

$$H_{\psi} = H_b \times R_b + H_d \times R_d + \rho \times H \times \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3.10)$$

$H_{\psi}$  = radiazione globale su piano inclinato;

$H$  = radiazione globale su piano orizzontale;

$H_b$  = radiazione diretta su piano orizzontale;

$H_d$  = radiazione diffusa sul piano orizzontale;

$\psi$  = angolo d'inclinazione della superficie in esame rispetto all'orizzontale;

$R_b$  = rapporto tra la radiazione diretta incidente sulla superficie in esame e quella incidente sull'orizzontale;

$R_d$  = rapporto tra la radiazione diffusa incidente sulla superficie in esame e quella incidente sull'orizzontale;

$\rho$  = valore dell'albedo dell'ambiente circostante.

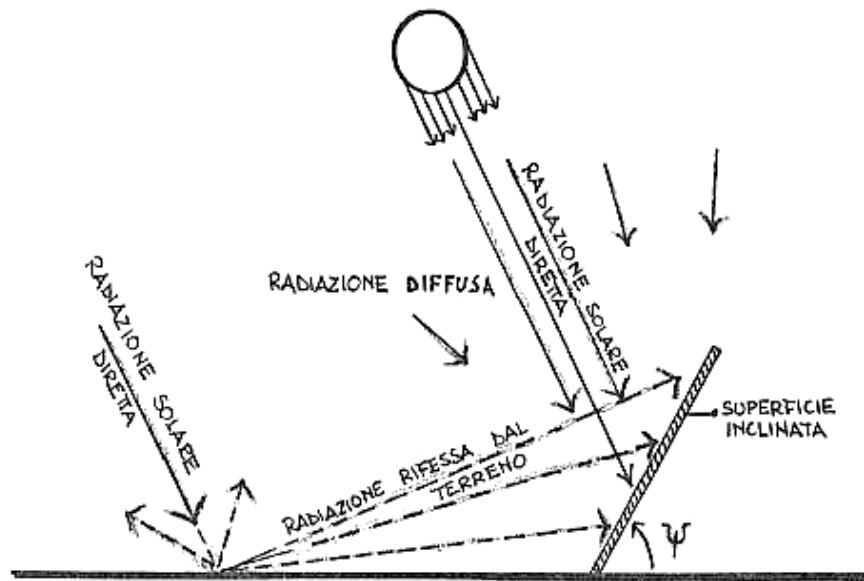


Figura 3.7 - Componenti della radiazione solare incidenti su superficie comunque orientata

La relazione matematica appena descritta tiene in considerazione la radiazione diretta, la radiazione diffusa e la radiazione riflessa, ovvero le tre componenti fondamentali di cui si compone la radiazione globale incidente su un piano inclinato. L'applicazione del modello matematico, come si può notare, prevede il ribaltamento sul piano in esame delle componenti di radiazione incidente sul piano orizzontale tramite dei fattori derivati dalla geometria solare, o dalla giacitura del piano dei pannelli rispetto all'orizzontale. Ora è necessario specificare i diversi fattori che compongono l'equazione, precisando che alcuni sono direttamente desumibili dalla geometria solare, altri invece sono il frutto degli studi di vari ricercatori e sono adottabili in relazione al luogo dove sono state effettuate tali ricerche.

Il parametro  $R_b$  rappresenta il rapporto tra la radiazione diretta incidente sulla superficie in esame e quella incidente sull'orizzontale. Il suo valore, poiché derivato da un'analisi vettoriale, è determinato su base geometrica ed è espresso come:

$$R_b = \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z} \quad (3.11)$$

Dove  $\theta_t$  rappresenta l'angolo di inclinazione della direzione della radiazione solare diretta rispetto alla normale alla superficie e  $\theta_z$  rappresenta l'angolo di inclinazione del piano inclinato rispetto alla normale al piano orizzontale. Il parametro  $\rho$  rappresenta il coefficiente di albedo il quale indica le condizioni al contorno del luogo, in termini di coefficiente di riflessione medio.

Per poter determinare  $H_\psi$  restano ancora da definire la radiazione diretta e diffusa sul piano orizzontale, perché, come detto in precedenza, i dati a disposizione relativi alla ricostruzione fatta,

riportano solo la radiazione globale oraria sul piano orizzontale (H). Si rende quindi necessario adottare dei modelli matematici che stimino la quantità di una delle due componenti. La totalità dei modelli, sviluppati nel corso degli anni da numerosi ricercatori in differenti località del mondo, si basa sulla stima della radiazione diffusa; per sottrazione dalla radiazione globale, si determina quindi la componente diretta come:

$$H_b = H - H_d \quad (3.12)$$

H = radiazione globale su piano orizzontale;

H<sub>b</sub> = radiazione diretta su piano orizzontale;

H<sub>d</sub> = radiazione diffusa sul piano orizzontale;

L'origine comune di tutti questi modelli è rappresentata dagli studi effettuati da Ångström (Ångström 1924), nei quali s'indagava su come riuscire a prevedere la media mensile della radiazione globale giornaliera sul piano orizzontale. Gli studi di Ångström furono in seguito migliorati negli anni successivi; molti ricercatori applicarono i loro studi in diverse località del mondo ed individuarono i coefficienti (a, b) più opportuni per determinare la radiazione globale oraria media sull'orizzontale, la cui relazione empirica è riportata di seguito:

$$H_{med} = H_{0,med} \times \left[ a + b \times \left( \frac{d}{D} \right) \right] \quad (3.13)$$

H<sub>med</sub> = radiazione globale oraria media sull'orizzontale;

H<sub>0 med</sub> = radiazione globale oraria media extraterrestre sull'orizzontale;

d = media mensile delle ore di luce solare;

D = lunghezza del giorno considerato;

a = coefficiente;

b = coefficiente.

Il valore della radiazione globale oraria media extraterrestre sull'orizzontale  $H_{0,med}$  (in W/m<sup>2</sup>), è espressa mediante i parametri della geometria solare nella forma seguente:

$$H_{0,med} = \left( \frac{24}{\pi} \right) \times G_{sc} \times \left[ 1 + 0.033 \times \cos \left( \frac{360 \times N}{365} \right) \right] \times \left[ \cos \varphi \times \cos \delta \sin \omega_s + \left( \frac{2 \times \pi \times \omega_s}{360} \right) \times \sin \varphi \times \sin \delta \right] \quad (3.14)$$

H<sub>0,med</sub> = radiazione globale oraria media extraterrestre sull'orizzontale;

G<sub>sc</sub> = costante solare = 1367 W/m<sup>2</sup>;



$N$  = numero progressivo del giorno dell'anno;

$\varphi$  = latitudine del sito;

$\delta$  = angolo di declinazione solare;

$\omega_s$  = angolo del sorgere del sole.

Con il passare del tempo e l'evolversi dell'interesse in merito alla radiazione solare, si è venuto a creare un crescente sviluppo di modelli di calcolo, allo scopo di stimare la radiazione solare in modo più preciso: tali modelli si basano sul clearness index ( $K_t$ ), ovvero il rapporto fra la radiazione globale incidente sul piano orizzontale terrestre e la radiazione globale extraterrestre sull'orizzontale, definito come:

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (3.15)$$

$H$  = radiazione globale sul piano orizzontale terrestre;

$H_0$  = radiazione globale extraterrestre sull'orizzontale.

Nel caso in cui la radiazione globale sul piano orizzontale sia massima, il  $K_t$  che ne conseguirà sarà il massimo che si possa avere nelle condizioni considerate. A seconda delle diverse variabili che possono modificare l'intensità della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre, è possibile trovarsi nelle differenti condizioni definite come:

$$H = H_{max} \quad oppure \quad H = a \times H_{max} \quad (3.16)$$

Nel secondo caso, il più frequente alle nostre latitudini, il fattore "a" rappresenta una percentuale che riduce il valore della radiazione globale massima, ed è definito come:

$$a = \frac{H}{H_{max}} \% \quad (3.17)$$

Il clearness index ( $K_t$ ) che ne deriva sarà massimo nel caso di  $H = H_{max}$  e diminuirà al diminuire del fattore "a". A seconda del tipo di calcolo che s'intende compiere, il clearness index ( $K_t$ ) può essere definito in modo annuale, mensile, giornaliero od orario.

I primi studi per correlare il  $K_t$  con la quantità di radiazione incidente su di una superficie, sono stati effettuati da Liu e Jordan (Liu e Jordan 1960), che sono da considerarsi i capostipiti di tutti gli studi compiuti successivamente. Liu e Jordan mettono in relazione il valore di  $K_t$  con il rapporto fra la radiazione diffusa e la radiazione globale extraterrestre incidente sull'orizzontale, evidenziando, in questo modo, la presenza di un legame fra la porzione di radiazione diffusa e la radiazione globale incidente sulla superficie terrestre. Lo studio è stato realizzato utilizzando i dati raccolti negli Stati

Uniti d'America nelle stazioni di Hump Mountain e Blue Hill, evidenziando che, in una determinata area geografica, ad una costante quantità percentuale di radiazione diffusa rispetto alla radiazione globale, è possibile assegnare un corrispondente valore di  $K_t$ . Il diagramma successivo evidenzia la relazione definita da Liu e Jordan fra il  $K_t$  e la percentuale di radiazione diffusa rispetto alla radiazione extraterrestre. Il risultato che tutti gli algoritmi producono fa riferimento alla frazione di energia diffusa rispetto alla globale ( $R_d$ ), espressa come:

$$f_d = \frac{H_d}{H} \quad (3.18)$$

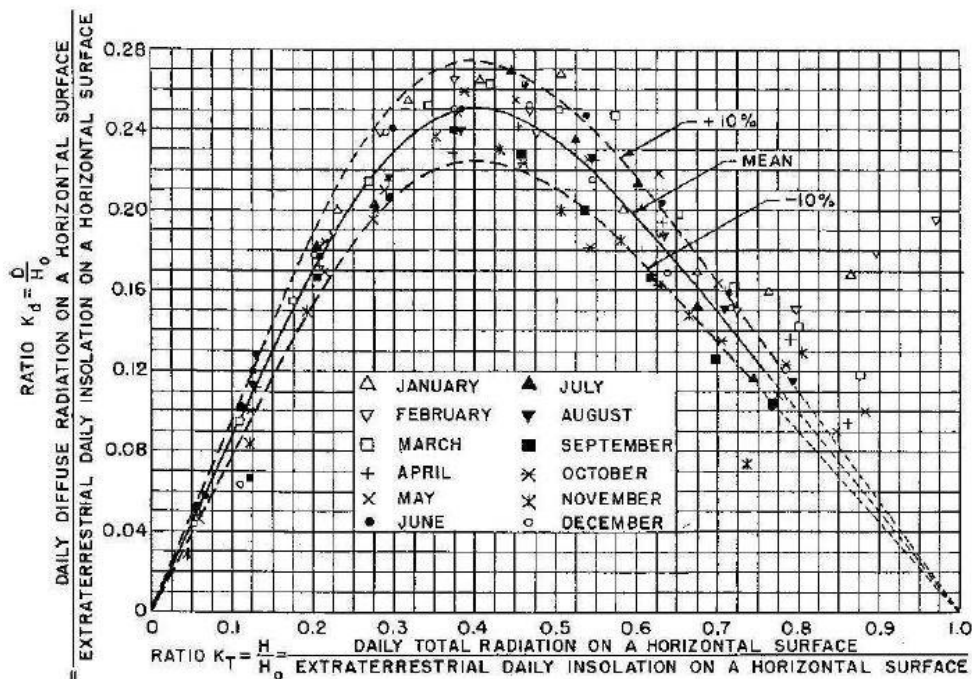


Figura 3.8 - Relazione e distribuzione caratteristica (1) della radiazione solare diretta, diffusa e globale

Questo coefficiente di divisione può essere utilizzato sia su base oraria che su base giornaliera, per determinare quale percentuale dell'energia globale che incide sulla superficie di riferimento, è sotto forma di radiazione diffusa. Avendo quindi a disposizione dati di radiazione globale sul piano orizzontale, tramite questi metodi di calcolo è relativamente semplice risalire alle sue due componenti principali, diretta e diffusa. Gli studi che hanno portato alla formulazione dei diversi modelli di calcolo sopracitati evidenziano quello che intuitivamente si poteva già immaginare; la distribuzione cartesiana dei valori di radiazione diffusa rispetto alla totale, riferiti al piano orizzontale ed il clearness index, danno origine ad una funzione matematica simile, indipendentemente dalla localizzazione geografica: essa dimostra come a valori elevati di  $K_t$  corrisponda una bassa quantità di radiazione diffusa rispetto alla globale, e come a bassi valori di  $K_t$  corrisponda un'alta quantità di radiazione diffusa rispetto alla globale. Si evidenzia quindi una proporzionalità di tipo inverso fra i due parametri, che può essere rappresentata con il diagramma seguente.

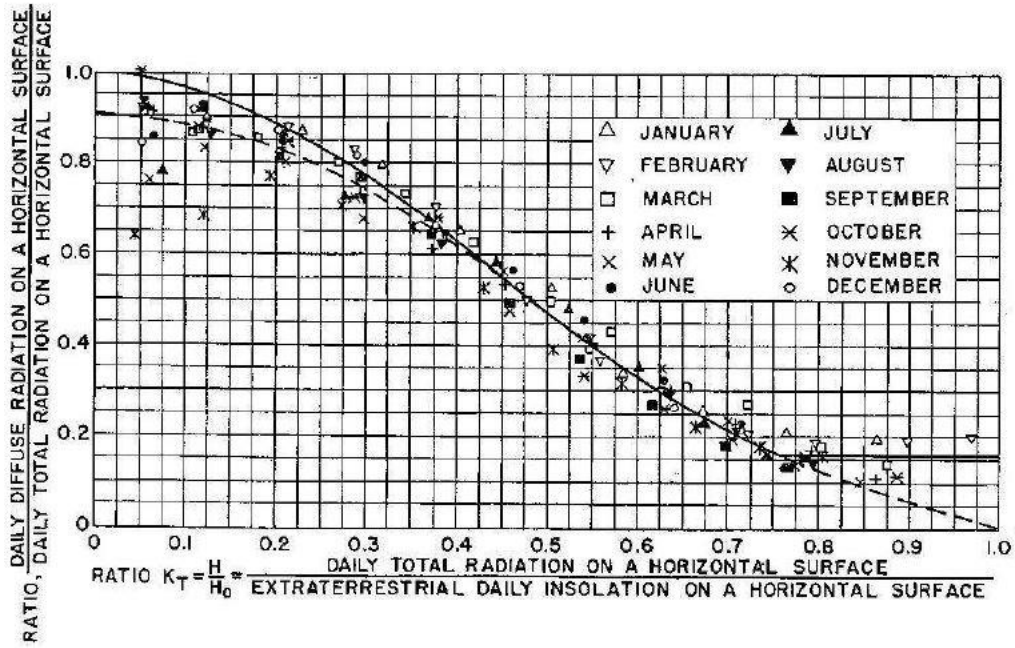


Figura 3.9 - Relazione e distribuzione caratteristica (2) della radiazione solare diretta, diffusa e globale

## 4 PROPRIETÀ SUPERFICIALI DEI COMUNI MATERIALI DA COSTRUZIONE

In questo breve capitolo si vogliono richiamare le relazioni che intercorrono tra le principali grandezze fotometriche e le proprietà superficiali dei materiali. In genere i materiali possono essere distinti in opachi e semitrasparenti. Bisogna sottolineare che il termine semitrasparente viene utilizzato in quanto se un fascio di luce incide su una superficie di un materiale considerato trasparente, questo non viene trasmesso per intero: parte dell'energia verrà riflessa, la percentuale riflessa/trasmessa varia ovviamente in base alle caratteristiche del materiale stesso.

Quando un fascio di luce monocromatica di lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) o policromatica incide su una superficie e viene riflesso, la componente spettrale riflessa varia a seconda delle caratteristiche chimiche del materiale mentre la distribuzione spaziale del fascio riflesso dipende dal trattamento superficiale del materiale stesso.

A seconda del trattamento superficiale del materiale si ha riflessione speculare, diffusa, retroriflettente o mista: in caso di riflessione speculare il raggio di luce incidente viene riflesso in una direzione con angolo di incidenza uguale a quello di riflessione, in caso di materiale retroriflettente il raggio di luce incidente viene riflesso principalmente nella direzione di incidenza.

Si possono osservare superfici perfettamente diffondenti (a), puramente speculari (b), difficilmente si osservano superfici prettamente retro-riflettenti (d); comunemente è più facile trovare superfici dal comportamento misto (c) ed (e).

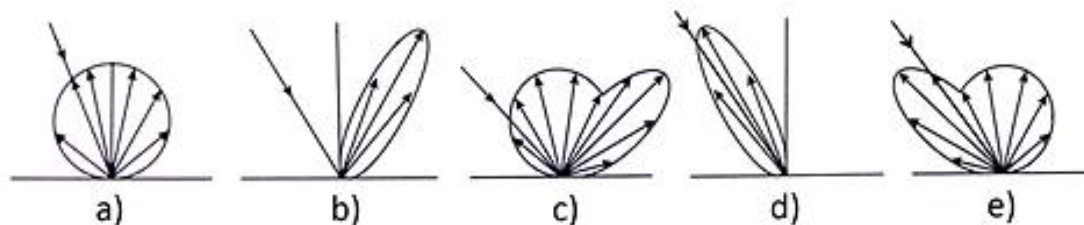


Figura 4.1 - a) lambertiano, b) speculare, c) speculare-diffusivo, d) retro-riflettente, e) misto retro-riflettente

### 4.1 Legge di Lambert

Data una superficie  $S$  di area  $A$ , se su di essa la  $R$  (radianza) è uniforme e la  $L$  (luminanza) è uniforme e indipendente dalla direzione di osservazione, tale superficie è detta perfettamente diffondente o Lambertiana (Lambert 1760). Ciò che caratterizza una superficie perfettamente diffondente è la distribuzione delle luminanze che risulta indipendente dall'angolo di osservazione, o meglio, la luminanza emessa o riflessa è uguale per ogni angolo di osservazione.

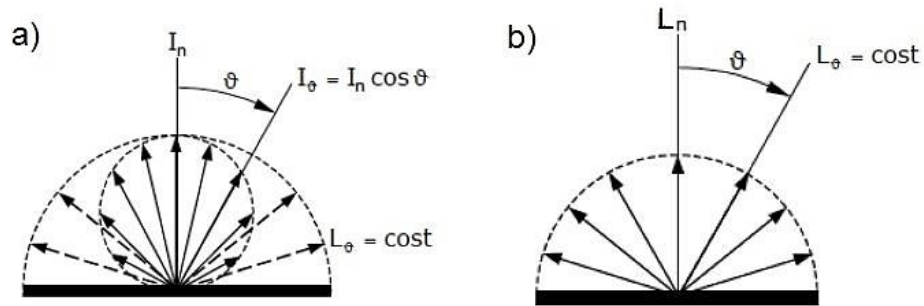


Figura 4.2 - Rappresentazione di un materiale lambertiano

Se un raggio di luce incide su una superficie lambertiana, questo viene riflesso con un'indicatrice di emissione sferica e le intensità luminose emesse sono proporzionali al coseno dell'angolo ( $\Theta$ ) compreso tra questa direzione e la normale al piano:

$$I_\theta = I_n \cos \theta \quad (4.1)$$

Pertanto, ricordando la definizione di luminanza:

$$L_v(\theta) = \frac{I_n \cos \theta}{A \cos \theta} \quad (4.2)$$

## 5 LO SPAZIO URBANO E I MUTUI INTER-SCAMBI RADIATIVI TRA GLI EDIFICI

In questo capitolo viene introdotto lo strumento numerico principale che ha dato linfa al lavoro presentato in questa tesi e viene sfruttato per un'analisi numerica sull'influenza delle inter-riflessioni in un canyon urbano sul fabbisogno di energia degli edifici (Allegrini, Dorer e Carmeliet 2016). L'ambiente urbano presente subito al di sotto della frontiera definita dai tetti degli edifici (canopy layer) costituisce uno spazio in cui gli scambi energetici mutui tra superfici costituenti il tessuto cittadino avvengono principalmente mediante due meccanismi: lo scambio convettivo e lo scambio radiativo. Questi meccanismi, come già accennato, influenzano quindi sia aspetti che riguardano il comfort termo-igrometrico sia il fabbisogno energetico degli edifici, proprio perché vanno a influire sui bilanci di energia che concorrono a determinare la temperatura negli spazi esterni.

### 5.1 Teoria: i fattori di Gebhart

La radiazione solare che incide sulle superfici opache costituenti il tessuto urbano, in parte viene assorbita, innalzando così la temperatura superficiale, in parte viene riflessa. Le modalità di riflessione nello spazio costituente l'ambiente urbano, considerati i più comuni materiali da costruzione utilizzati in edilizia, sono considerate prettamente diffuse. La radiazione globale diffusa, cioè la radiazione solare diffusa del cielo e la frazione diffusa della radiazione solare diretta riflessa, è distribuita sulle superfici che compongono il canyon stradale utilizzando la teoria dei fattori di Gebhart (Gebhart 1961). Essi sono fondamentalmente dei fattori di vista corretti per considerare le inter-riflessioni multiple diffuse tra superfici, e sono definiti come:

$$G_{ij} = \frac{\text{Radiazione assorbita da } A_j \text{ originariamente emessa da } A_i}{\text{Radiazione totale emessa/riflessa da } A_i} \quad (5.1)$$

dove  $i$  e  $j$  sono due superfici e  $A_i$  e  $A_j$  sono aree superficiali di  $i$  e  $j$ , rispettivamente.

Questa teoria divide lo spettro della radiazione elettromagnetica principalmente in due bande: distingueremo perciò le radiazioni in radiazione ad onda corta (200-3000 nm) e in radiazione ad onda lunga o termica (3000-10.000 nm). In effetti, è stato dimostrato (Weber, R.; et al. 1999) che i fattori Gebhart possono essere usati per tutte le bande spettrali. Nell'ambito di questo lavoro, "radiazione solare" e "radiazione ad onda corta" saranno considerati sinonimi. Quindi, per quanto riguarda la radiazione ad onda lunga in uno spazio semichiuso, valgono le seguenti relazioni:

$$G_{ij} = (I - F_{ij}\rho_j)^{-1} F_{ij}\varepsilon_j \quad (5.2)$$

$$Q_{l,j} = A_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \sum_{i=1}^n A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 G_{ij} \quad (5.3)$$

in cui  $Q_l$  è il flusso radiativo ad onda lunga,  $\epsilon$  è l'emissività delle superfici,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann e  $T$  è la temperatura superficiale. Così come per la radiazione ad onda lunga, un'espressione analoga è valida per la radiazione ad onda corta:

$$G_{ij} = (I - F_{ij}\rho_j)^{-1} F_{ij}(I - \rho_j) \quad (5.4)$$

$$Q_{s,j} = A_j(1 - \rho_j)R_{s,j} + \sum_{i=1}^n A_i G_{ij}\rho_i R_{s,i} \quad (5.5)$$

dove  $G_{ij}$  è la matrice dei fattori di Gebhart,  $I$  è la matrice identità,  $F_{ij}$  è la matrice dei fattori di vista tra le superfici,  $\rho$  è la riflettanza delle superfici,  $n$  è il numero delle superfici.,  $Q_s$  è il flusso radiativo ad onda corta,  $A$  è l'area delle superfici e  $R_s$  è il carico solare sulla superficie. La relazione (36) evidenzia che il flusso radiativo sulle superfici di uno spazio chiuso (o semichiuso) è incrementato dalla componente inter-riflessa tra le superfici che costituiscono la frontiera dello spazio stesso. Partendo dalla teoria dei fattori di Gebhart sono state effettuate delle analisi numeriche mediante un software BES (Building Energy Simulation) il cui scopo è stato quello di determinare il contributo dovuto ai fenomeni di inter-riflessione multipla nei canyon urbani sui carichi solari e sui fabbisogni energetici degli edifici.

## *5.2 Confronto mediante analisi numerica tra i carichi solari sulle facciate di un edificio inserito in un canyon urbano e un edificio identico isolato*

Il software BES utilizzato per eseguire le simulazioni numeriche è TRNSYS 17 (Klein, S. A. 2010), con cui è possibile modellizzare edifici multi-zona in 3D in grado di riprodurre il comportamento dinamico di un edificio con time-step di massimo un'ora. Le simulazioni energetiche degli edifici vengono solitamente eseguite per edifici isolati (stand-alone), utilizzando dati meteorologici mediati generati da misurazioni effettuate da stazioni meteorologiche situate in aree suburbane. Oramai in molti codici di simulazione è possibile tener conto dell'effetto, sull'edificio studiato, degli ombreggiamenti dovuti agli edifici circostanti. Questi codici però non tengono conto delle inter-riflessioni nel campo radiativo tra edifici che vengono a generarsi in contesto urbano. Lo scopo dell'analisi è stato quello di valutare in che modo la presenza di riflessioni multiple tra edifici influenza i carichi solari sulle facciate degli edifici inseriti in canyon urbani in estate e in inverno, rispetto allo stesso edificio isolato. A tale scopo, è utilizzato il software TRNSYS, che permette di considerare le inter-riflessioni tra edifici adottando il metodo della "falsa zona". Con questo software è stato possibile modellizzare lo spazio esterno del canyon come una zona interna; in tal modo TRNSYS sfrutta il modello di calcolo di radiazione dettagliato che considera le riflessioni multiple tra superfici. Questa falsa zona deve avere bordi trasparenti e permeabili (superfici virtuali), per

collegare il canyon con l'ambiente esterno. Questi strati virtuali costituiti di aria sono infatti trasparenti alle radiazioni a onda corta, pertanto non costituiscono un ostacolo all'ingresso o all'uscita della radiazione ad onda corta.

Per la suddetta analisi numerica è stato scelto un canyon urbano con tre differenti proporzioni ( $H/W = 0.5, 1$  e  $2$ ) e due diversi orientamenti (N-S e W-E). Sono state valutate le temperature superficiali delle pareti, lo scambio di calore per irraggiamento su entrambe le facciate all'interno del canyon e infine le richieste di energia degli edifici in estate e in inverno. Quindi tutti questi valori sono stati confrontati con quelli relativi a un edificio indipendente.

### 5.2.1 Validazione del modello

Per la validazione del modello di simulazione numerica è stato effettuato un confronto con i dati sperimentali ottenuti dalle misure di Djedjig et al. (Djedjig, Bozonnet e Belarbi 2015), in cui sono stati presentati i risultati ottenuti da una campagna di misure effettuata su un canyon urbano in scala. Il setup sperimentale con cui sono stati ottenuti i suddetti dati consiste in 2 serbatoi vuoti in cemento ciascuno rappresentante un edificio di lunghezza 5 m, altezza 1.3 m e profondità 1.12 m. La Figura 5.1 mostra uno schema semplificato del setup (a) e la modellizzazione 3D effettuata per TRNSYS (b). L'aspect ratio ( $H/W$ ) del canyon in scala (1:10) è uguale a 1.2.

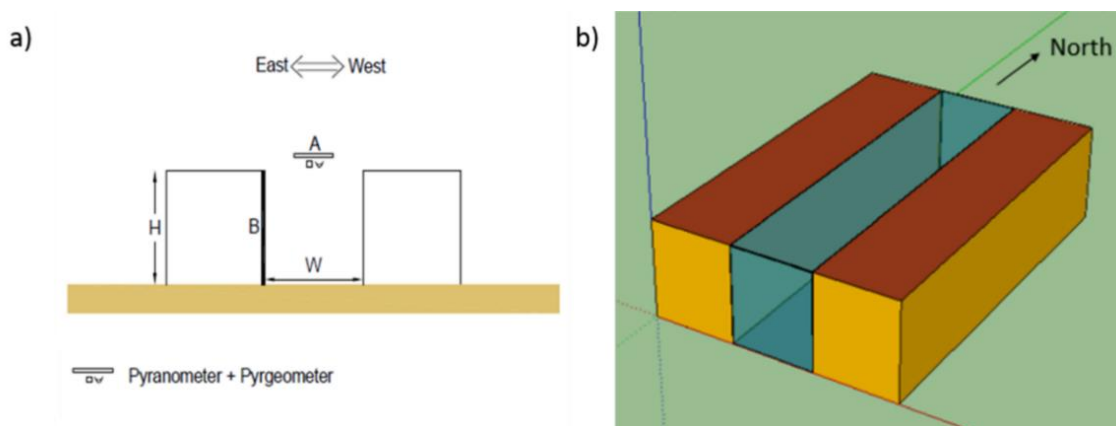


Figura 5.1 - (a) Configurazione del setup e (b) modello 3D per la simulazione in TRNSYS.

Attraverso Sketchup è stata riprodotta la configurazione 3D del setup sperimentale modellizzando un canyon in scala identico a quello di Djedjig et al. (Djedjig, Bozonnet e Belarbi 2015) con asse Nord-Sud, con le facciate orientate Est-Ovest. I valori della riflettanza delle superfici costituenti il canyon in scala, utilizzati in TRNSYS, sono gli stessi del setup sperimentale e sono riportati in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 - Caratteristiche delle superfici del canyon in scala.

Elemento	Materiale	Spessore	$\rho$
Facciata, tetto	Cemento	0.05	0.64
Pavimentazione	Ceramica	0.1	0.36



Le misure effettuate da Djedjig et al. (Djedjig, Bozonnet e Belarbi 2015) riguardano i giorni che vanno dal 20 al 22 agosto. In Figura 5.2 sono riportati gli andamenti della radiazione solare incidente su superficie orizzontale nel sito in cui è stato implementato il setup (La Rochelle, Francia). I valori sono stati confrontati con quelli presenti nell'archivio dei dati meteo di TRNSYS il quale presenta un file meteo tipo della suddetta località. Riscontrata la corrispondenza, è stato utilizzato il file meteo presente nel software per effettuare le simulazioni.

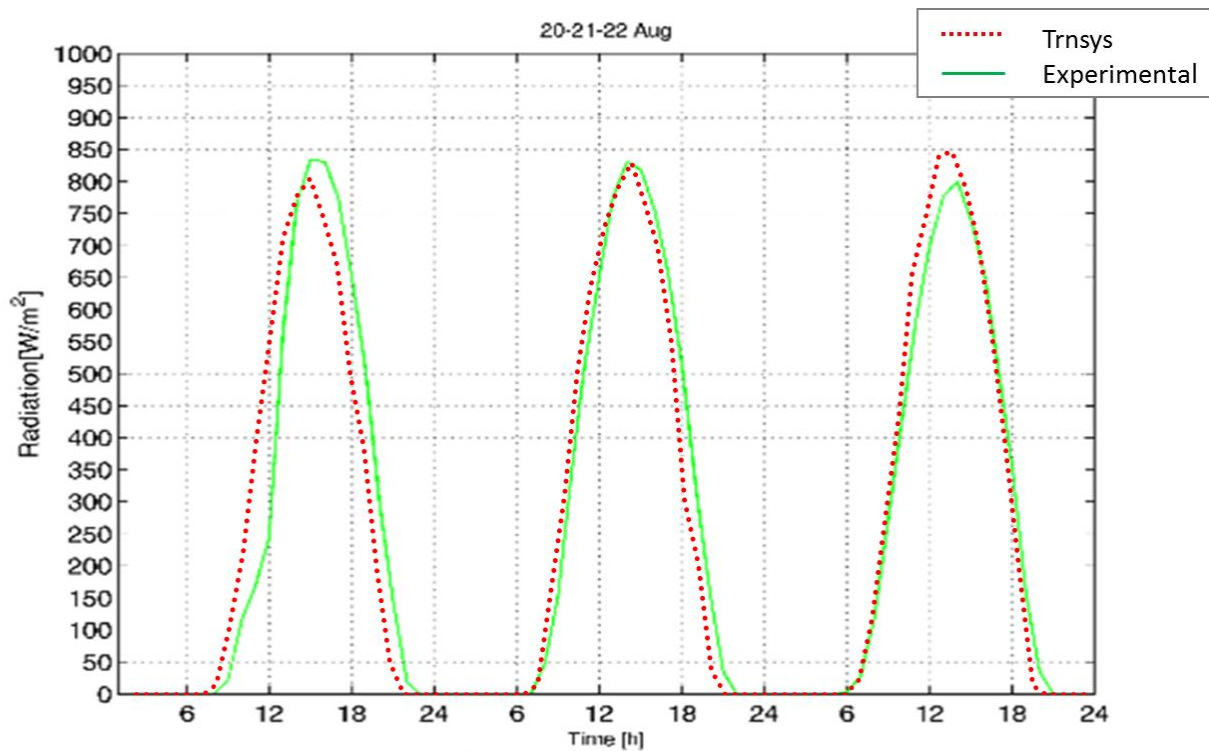


Figura 5.2 – Radiazione solare incidente su piano orizzontale misurata nel sito del setup sperimentale.

La radiazione solare riflessa dalle superfici è stata misurata mediante un piranometro rivolto verso il canyon, posto in prossimità del centro canopy layer (come evidenziato in Figura 5.1a). Per come è impostato il modello di simulazione in TRNSYS, siamo in grado di ottenere la radiazione solare riflessa dal canyon attraverso il canopy layer e questo ci permette di conoscere la stessa grandezza ottenuta mediante il piranometro. La seguente Figura 5.3 mostra la corrispondenza tra i dati sperimentali forniti dal piranometro e i risultati numerici ottenuti con TRNSYS, per i giorni del 20, 21 e 22 agosto. Appare evidente la buona approssimazione tra i risultati delle simulazioni numeriche e i valori sperimentali ottenuti nel lavoro di Djedjig et al. (Djedjig, Bozonnet e Belarbi 2015). Ciò dimostra che il modello a “falsa zona” impostato in TRNSYS simula abbastanza fedelmente i mutui scambi radiativi nel campo delle radiazioni shortwave all'interno del canyon.

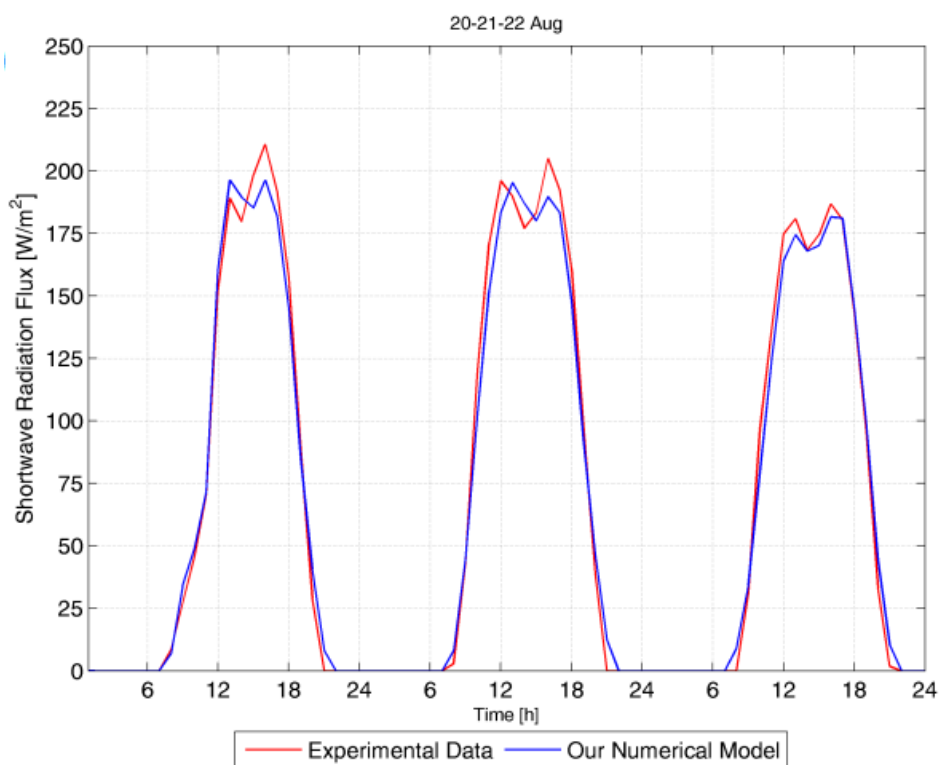


Figura 5.3 – Andamento della radiazione riflessa misurata in situ e ottenuta mediante simulazione numerica.

### 5.2.2 Modello di simulazione

Le simulazioni sono state effettuate modellizzando un edificio circondato da due canyon sui lati lunghi (street canyon building, SCB) con diversi valori di aspect ratio ( $H/W=0.5, 1$  e  $2$ ) e un modello di edificio isolato (stand-alone building, SAB). La Figura 5.4 mostra l'edificio nelle sue configurazioni stand-alone (a sx) e nel suo contesto urbano (edificio centrale a dx), fiancheggiato da due canyon stradali con  $H/W = 1$ .

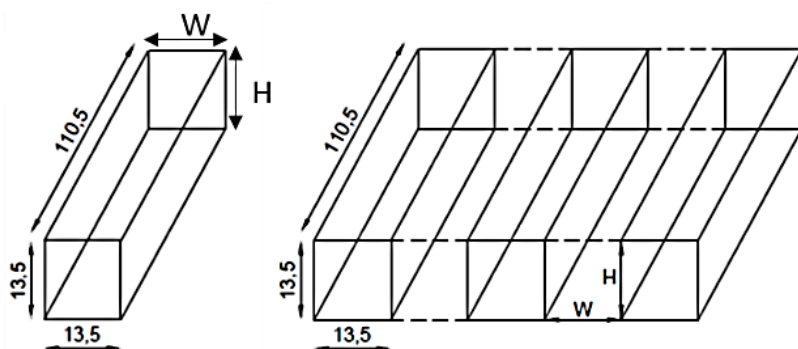


Figura 5.4 - Caratteristiche geometriche degli edifici e dei canyon urbani

Nell'impostare le simulazioni, si è deciso di adottare due orientamenti principali per i canyon: N-S (edificio che mostra ai canyon le facciate ovest ed est) ed E-W (edificio che mostra ai canyon le facciate nord e sud). Per quanto riguarda le caratteristiche dell'edificio studiato, la lunghezza è di 110.5 m, poiché uno degli scopi era quello di rappresentare un edificio lungo con appartamenti

adiacenti simili ma anche per ridurre al minimo gli effetti delle condizioni al contorno sui lati corti dell'edificio. Sia l'altezza che la larghezza dell'edificio sono 13.5 m. Per quanto riguarda la superficie vetrata su ciascuna facciata di ciascun lato lungo principale essa è pari al 50%. L'edificio SCB di cui si analizzano i risultati è quindi fiancheggiato da altre due file di edifici identici ad esso identici. Le caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti costituenti le superfici del canyon urbano sono riportati nella seguente Tabella 5.2. Per quanto riguarda i dati climatici sono stati considerati quelli di Roma.

Tabella 5.2 - Caratteristiche delle superfici costituenti il canyon urbano.

Elementi	Spessore (m)	g	$\alpha$
Muri	0.44		0.6
Coperture	0.37		0.6
Pavimentazione	0.54		0.6
Finestre	-	0.6	

### 5.2.3 Risultati delle simulazioni

I grafici della radiazione solare assorbita sono presentati come valori normalizzati rispetto alla radiazione assorbita dalle facciate dell'edificio isolato (SAB). I primi due grafici si riferiscono al canyon con asse orientato W-E, durante la stagione estiva. Osservando gli andamenti della radiazione solare normalizzata assorbita dalla parete Sud (Figura 5.5a), si nota che nelle ore del mattino e della sera, l'edificio inserito nel canyon con  $H/W = 0.5$  riceve e assorbe più radiazioni del caso dell'edificio SAB. Guardando la curva magenta ( $H/W = 2$ ), che rappresenta il canyon più stretto, e confrontandolo con altre configurazioni, è evidente che poiché la facciata è più ombreggiata rispetto alle altre dai raggi diretti del sole, viene assorbita meno radiazione. Per quanto riguarda la parete nord, nella Figura 5.5b, si verificano tre picchi di radiazione solare diretta (linea tratteggiata verde). Due picchi relativi alle 6.00 e alle 18.00 a causa delle radiazioni dirette che la facciata nord riceve all'alba e al tramonto. Il picco più alto della radiazione solare si verifica sulla parete Nord dell'edificio situata nel canyon urbano con rapporto  $H/W = 0.5$ , anziché sulla facciata con lo stesso orientamento dell'edificio SAB, come ci si poteva aspettare. Ciò è spiegato dal fatto che la larghezza del canyon con  $H/W=0.5$  consente l'ingresso di più radiazione solare all'interno del canyon, a causa della sua geometria. In questo caso, l'energia raggianti che incide sulla parete Sud, maggiore rispetto ai casi  $H/W=1$  e  $H/W=2$  alimenta il fenomeno dell'intrappolamento radiativo. Pertanto, il fenomeno che rende più elevato il picco della radiazione solare sulla parete Nord, nel caso di  $H/W = 0.5$ , è dovuto alla percentuale di radiazione inter-riflessa.

Osservando le Figura 5.5c e Figura 5.5d, corrispondenti alla stagione invernale, si notano subito le somiglianze con gli andamenti dei carichi solari delle diverse configurazioni urbane considerate nel

caso estivo. I valori di picco della radiazione solare assorbita, a partire dalla facciata Sud dell'edificio SAB nella Figura 5.5c, sono superiori ai valori corrispondenti della stagione estiva ( $250 \text{ W/m}^2$  contro  $350 \text{ W/m}^2$ ). Per la facciata Nord (Figura 5.5d), dal momento che le ore di irradiazione sono minori, stavolta le curve hanno una forma perfettamente a campana (il sole sorge intorno alle 9:00 e tramonta alle 18:00). Ciò comporta, per la facciata Nord, assenza di picchi relativi massimi associati alla radiazione diretta dell'alba e del tramonto, che si verificano invece nella stagione estiva.

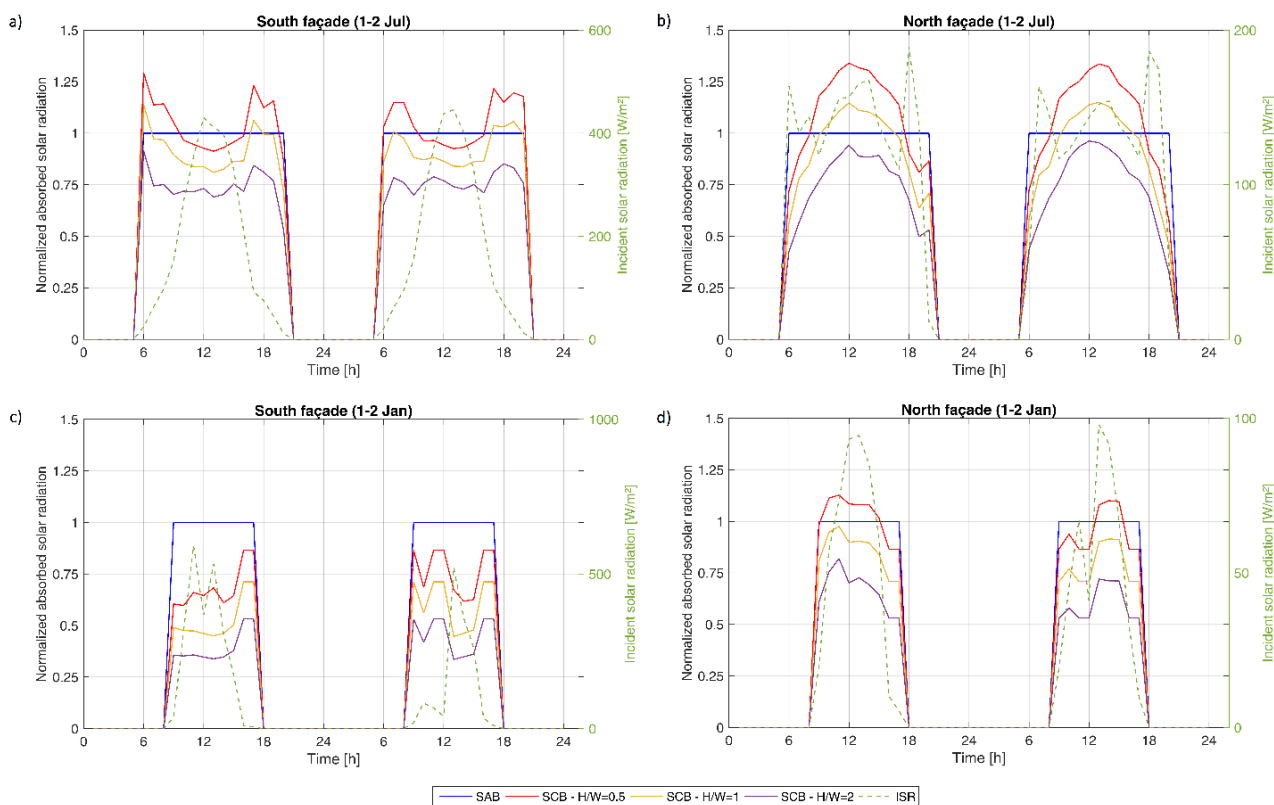


Figura 5.5 – Radiazione solare normalizzata sulle facciate Sud (a) e Nord (b) durante la stagione estiva e sulle facciate Sud (c) e Nord (d) durante la stagione invernale.

La Figura 5.6a e la Figura 5.6b riportano i grafici della radiazione solare assorbita dalle facciate Ovest ed Est, nella stagione estiva, vale a dire il caso del canyon con un asse orientato da Nord a Sud. Confrontando le curve della radiazione solare assorbita delle facciate Ovest ed Est, la dipendenza diretta dalla posizione del sole spicca immediatamente. Pertanto, poiché la radiazione su una superficie orientata in qualsiasi direzione è composta da una parte diretta, una diffusa e una parte riflessa, la radiazione diretta è il principale parametro di guida. Questo è il motivo per cui i picchi di radiazione sono spostati a sinistra per la facciata est, come nella Figura 5.6b, nelle ore precedenti al mezzogiorno, e sono spostati a destra per la facciata ovest, nelle ore pomeridiane (Fig 6.6a). In questo caso, poiché le tendenze orarie sono guidate dalla radiazione diretta che influenza alternativamente le facciate, maggiore è la quantità di radiazione che entra nel canyon, maggiore è la radiazione sulle facciate. Pertanto, a partire dalla configurazione SAB, l'andamento della radiazione solare assorbita diminuisce gradualmente, da  $H/W = 0.5$  fino a  $H/W = 2$ . Le stesse considerazioni valgono anche per

la stagione invernale, in quanto è evidente l'andamento di Figura 5.6c e Figura 5.6d, in cui è evidente la durata più breve della giornata.

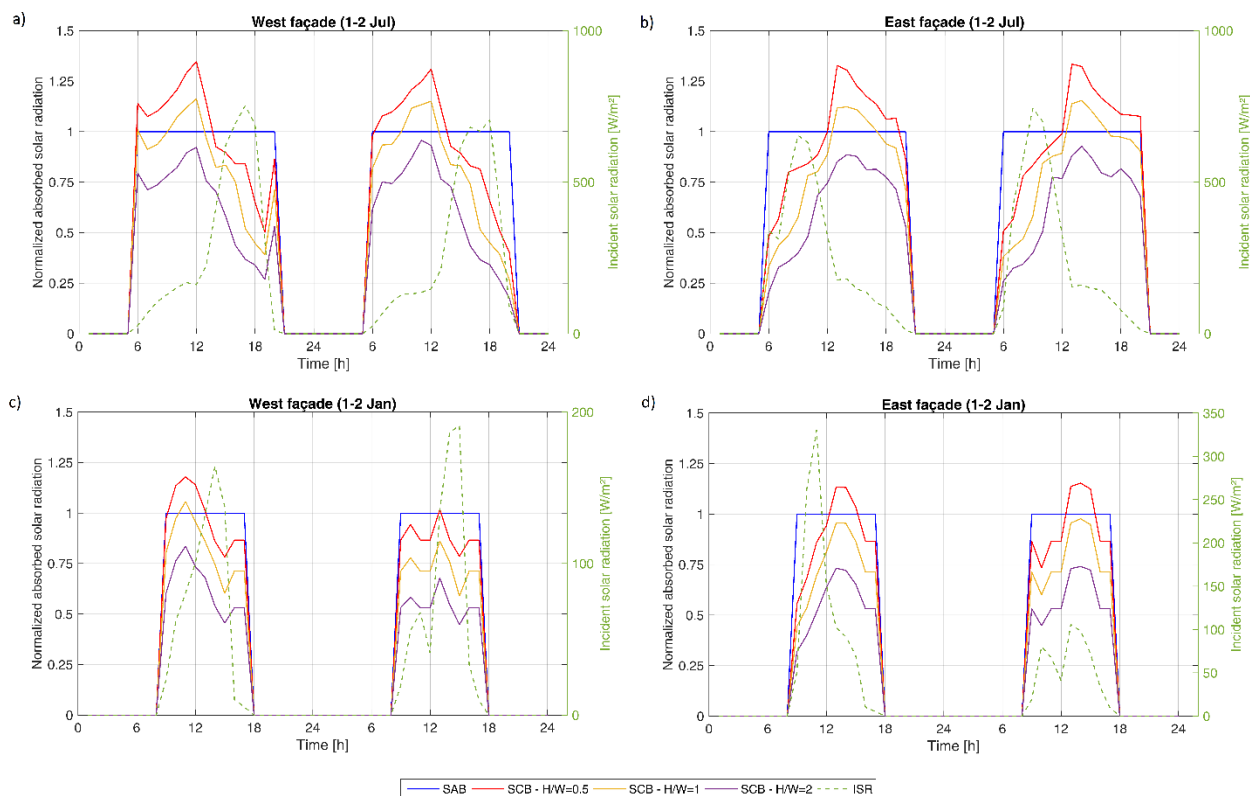


Figura 5.6 - Radiazione solare normalizzata sulle facciate Ovest (a) ed Est (b) durante la stagione estiva e sulle facciate Ovest (c) ed Est (d) durante la stagione invernale.

I dati presentati dimostrano come le inter-riflessioni mutue nel campo della radiazione ad onda corta tra le superfici del canyon urbano non sono trascurabili, soprattutto per determinate configurazioni di aspect ratio ( $H/W=0.5$  e  $1$ ). In particolare, nella stagione estiva, in determinate fasce orarie del giorno, le inter-riflessioni possono determinare un aumento dei carichi solari sull'involucro edilizio fino al 25-30% (Figura 5.5a e Figura 5.5b, Figura 5.6a e Figura 5.6b), rispetto al caso di edificio isolato. Ciò sta a dimostrare che il contributo delle inter-riflessioni mutue per ciò che riguarda la modellizzazione energetica degli spazi urbani non è trascurabile, se l'obiettivo è quello di trovare soluzioni al fenomeno dell'UHI.

Il passo successivo è stato quello di determinare il peso di questo incremento di carichi solari sull'involucro edilizio dovuto alla presenza delle inter-riflessioni, in termini di variazione del carico termico degli edifici. Nella prossima sezione è stata effettuata un'analisi di sensitività al variare dell'albedo superficiale delle facciate degli edifici, con l'obiettivo di trovare una relazione tra inter-riflessioni e fabbisogni energetici degli edifici.

### *5.3 Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici*

Come visto in precedenza, a causa del fatto che il l'ambiente costituente il canyon urbano introduce inter-riflessioni multiple, la radiazione solare effettivamente assorbita dagli elementi opachi dell'involucro degli edifici è più alta rispetto ad un edificio inserito in un canyon in cui sono considerati solo i fenomeni di ombreggiamento dovuti alla geometria terra sole e a quella del canyon. Si è deciso di eseguire un confronto numerico tra queste due condizioni in funzione dei parametri principali come l'aspect ratio, l'orientamento del canyon, il rapporto tra superfici trasparenti/opache e il fattore di assorbimento solare. L'obiettivo è quello di determinare come questi parametri influenzino le inter-riflessioni all'interno di un canyon urbano e come questo si ripercuota sul fabbisogno di energia termica degli edifici.

È stato scelto un canyon urbano con tre diversi valori di aspect ratio ( $H/W = 0,5, 1$  e  $2$ ), con due diversi orientamenti (N-S e W-E), con due valori dei rapporti superfici trasparenti/opache ( $A_{gl} / A_{op} = 0.5$  e  $0.25$ ) e 4 valori del fattore di assorbimento solare delle superfici dell'involucro ( $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ). Sono stati analizzati i picchi e i valori medi della radiazione solare assorbita sulle pareti esterne dell'edificio centrale e la radiazione assorbita da esse nell'arco delle stagioni estiva ed invernale. Infine, è stata valutata l'influenza delle mutue riflessioni della radiazione ad onde corte sul fabbisogno di energia termica dell'edificio, confrontando i risultati con un caso di riferimento senza inter-riflessioni.

I risultati dello studio possono contribuire a quantificare il peso delle inter-riflessioni della radiazione solare sui consumi di energia termica previsti dai software di simulazione energetica degli edifici che considerano solo i fattori di ombreggiamento sulle facciate. Considerando che sono stati riscontrati aumenti nella domanda di raffrescamento fino al 35%, il modello numerico sottolinea l'importanza di considerare le mutue riflessioni all'interno dell'ambiente urbano per una valutazione accurata delle richieste di energia termica degli edifici inseriti nel loro contesto reale. Grazie a questi risultati, in fase di pianificazione urbanistica, i progettisti possono considerare gli effetti energetici associati alla presenza delle inter-riflessioni adottando soluzioni per ottimizzare le condizioni ambientali degli spazi urbani esterni, mediante l'utilizzo di materiali da costruzione per involucro edilizio avanzati o mediante una progettazione urbana ottimizzata. I dettagli sulle condizioni imposte per le simulazioni numeriche in questo studio sono riportati nella prossima sezione.

#### *5.3.1 Modello di simulazione*

I risultati dell'analisi numerica effettuata mediante il software TRNSYS riguardano l'edificio centrale, fiancheggiato dai due canyon urbani, costituito da 3 piani ciascuno di  $180 \text{ m}^2$ . La geometria

degli edifici e dei canyon è la stessa dell'analisi effettuata nel paragrafo precedente. In questo caso però il confronto è interno allo stesso modello di simulazione. Ciò che cambia è la presenza o meno delle inter-riflessioni tra le superfici del canyon urbano.

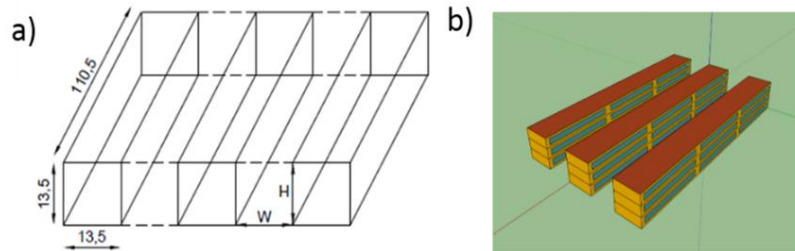


Figura 5.7 - Geometria e vista 3D del canyon urbano simulato.

Le caratteristiche dell'edificio analizzato, per ciò che riguarda l'involucro, sono riportate in Tabella 5.3. In questo caso sono stati riportate anche i valori di trasmittanza termica in quanto influenzano il fabbisogno energetico. L'analisi di sensitività non ha però riguardato il suddetto parametro che è stato imposto pari al valore minimo di legge per la località scelta.

Tabella 5.3 - Principali caratteristiche degli elementi d'involucro

Elemento	Thickness (m)	U (W/m <sup>2</sup> K)
Muro	0.44	0.36
Tetto	0.37	0.32
Pavimento	0.54	0.34
Finestre	-	1.40

Gli apporti di calore interni dovuti al sistema di illuminazione, ai dispositivi elettrici, agli utenti sono stati impostati per una destinazione d'uso residenziale. Gli apporti riportati nella Tabella 5.4 sono relativi alla superficie netta del pavimento. La presenza degli utenti è considerata per 24 ore al giorno. La schedula di utilizzo dei dispositivi elettrici è impostata su "on" dalle 8.00 alle 24.00 mentre per le luci è impostato "on" dalle 17.00 alle 24.00. Il tasso di ventilazione naturale giornaliera è di 0.3 vol/h, mentre il tasso di infiltrazione dell'involucro è pari a 0.2 vol/h mentre durante la notte viene imposto solo il tasso di infiltrazione. Sono stati utilizzati come input per le simulazioni con TRNSYS i dati meteorologici presenti in archivio per la città di Roma dove il periodo di riscaldamento è imposto di legge dal 1° novembre al 15 aprile mentre la lunghezza del periodo di raffrescamento non è sottoposto ad alcuna prescrizione di legge.

Pertanto, i carichi di raffrescamento e di riscaldamento sono stati determinati considerando le temperature dell'aria ambiente nell'edificio imposte a 20 °C durante l'inverno e a 26 °C durante l'estate. Il fabbisogno di raffrescamento è calcolato ogniqualvolta la temperatura dell'aria nell'edificio sale al di sopra dei 26 °C.

Tabella 5.4 - Valori specifici degli apporti di calore interni

	Persone ( $W/m^2$ )	Apparecchiature ( $W/m^2$ )	Illuminazione ( $W/m^2$ )
Radiativi	1.51	0.35	3.5
Convettivi	3.01	1.05	1.5

Poiché l'obiettivo dello studio è la valutazione dell'influenza delle sole inter-riflessioni nel campo shortwave sulla domanda di energia termica dell'edificio, i fenomeni di scambio termico dovuti ad irraggiamento (radiazioni ad onda lunga) hanno dovuto essere disattivati: è stato quindi necessario impostare l'emissività delle superfici pari a 0. La radiazione assorbita ad onda corta contribuisce, nel bilancio dell'energia termica, ad aumentare le temperature delle superfici (in funzione del fattore di assorbimento, delle condizioni di scambio convettivo liminare e dell'entità del fenomeno di scambio termico per conduzione attraverso l'involucro). Quindi, lo scambio termico per irraggiamento dipende dal bilancio superficiale dovuto alla radiazione shortwave. Quindi, il fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici è una funzione delle temperature delle superfici dell'involucro, che è influenzato anche dal meccanismo dello scambio di calore per irraggiamento.

Pertanto, è stato necessario nascondere, inattivando la modellizzazione numerica, l'influenza dello scambio di calore per irraggiamento (che comprende inter-riflessioni mutue) sulla domanda di energia termica dell'edificio. Questo approccio è necessario poiché lo scopo finale del lavoro è la valutazione dell'impatto delle sole inter-riflessioni multiple nel campo shortwave sulle richieste di energia termica dell'edificio. Impostando il modello in questo modo, le dispersioni di calore dovute all'irraggiamento verso il cielo e verso le altre superfici sono state disattivate. In tal modo, il metodo della falsa zona fornisce la possibilità di indagare l'influenza dell'inter-riflessione nel campo delle radiazioni ad onde corte come confronto con un modello senza inter-riflessione.

Il modello senza inter-riflessione è un modello in cui gli elementi dell'involucro edilizio in fase di studio non ricevono alcun riflesso dalle superfici circostanti. Significa che tutte le superfici del canyon che circondano l'edificio hanno un fattore di assorbimento della radiazione pari ad 1: questo modello è denominato Inter\_OFF. Quindi, in questo modello, variando i fattori di assorbimento delle superfici dell'involucro dell'edificio oggetto di studio, gli unici effetti dovuti alle radiazioni sono quelli dell'assorbimento solare a onda corta (il cui valore cambia da  $\alpha = 0.2$  a  $\alpha = 0.8$ ) decrementato dei fattori di ombreggiamento. Il modello denominato Inter\_ON è il modello in cui sono presenti le inter-riflessioni multiple nel campo delle radiazioni ad onda corta. In questo modello, il valore dei fattori di assorbimento della pavimentazione stradale del canyon è costante ( $\alpha = 0.8$ ) mentre i fattori di assorbimento delle facciate degli edifici del canyon cambiano da  $\alpha = 0.2$  a  $\alpha = 0.8$ .

La logica seguita per le simulazioni è riportata nello schema in Figura 5.8 dove viene evidenziato che l'analisi di sensibilità eseguita per indagare l'influenza delle mutue riflessioni sulla domanda di



energia dell'edificio è stata effettuata variando l'aspect ratio del canyon ( $H/W=0.5, 1$  e  $2$ ), l'orientamento della strada (N-S e W-E), il rapporto superfici trasparenti e opache ( $A_{gl}/A_{op}=0.5$  e  $0.25$ ) e, ovviamente, il coefficiente di assorbimento della radiazione solare (da  $\alpha = 0.2$  a  $0.8$ ).

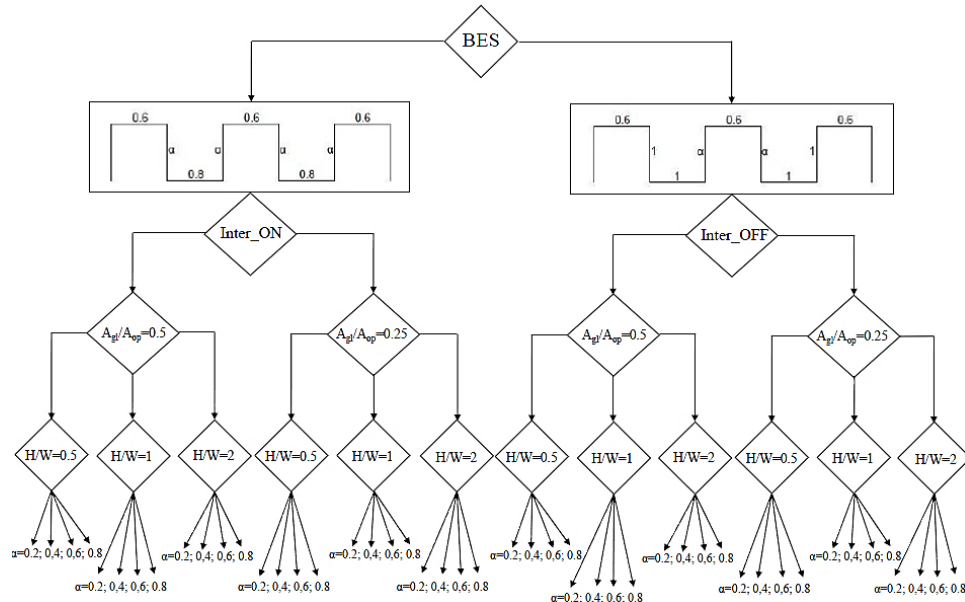


Figura 5.8 - Schema delle simulazioni in funzione dei parametri utilizzati per l'analisi di sensibilità

### 5.3.2 Risultati delle simulazioni

I risultati sono mostrati distinguendo tra stagione estiva ed invernale e sono organizzati come segue:

- variazione percentuale tra fabbisogno di raffrescamento e riscaldamento dell'edificio nel modello Inter\_ON rispetto al modello Inter\_OFF;
- quantità totale di energia solare assorbita rispetto ai casi Inter\_ON e Inter\_OFF sia in estate che in inverno

È importante sottolineare che i valori di radiazione assorbita ottenuti sono valori specifici medi orari e si riferiscono solo al campo della radiazione a onda corta.

#### 5.3.2.1 Analisi della radiazione solare assorbita

Partiamo analizzando le differenze percentuali tra l'energia solare assorbita nel caso Inter\_ON rispetto al caso Inter\_OFF, avendo definito  $\Delta Sol. Rad_{\%}$  come segue:

$$\Delta Sol. Rad_{\%} = \left( \frac{|Inter\_OFF - Inter\_ON|}{Inter\_OFF} \right) \times 100 \quad (5.6)$$

In generale, osservando la Tabella 5.5 e Tabella 5.6 si può affermare che:

- Poiché il fattore di assorbimento solare  $\alpha$  aumenta, in tutte le configurazioni, un valore più elevato di radiazione viene assorbito dalle pareti dell'edificio per il caso

Inter\_ON rispetto a Inter\_OFF. Essendo  $\rho = 1-\alpha$ , questo fatto è dovuto ad una maggiore quantità di radiazioni riflesse all'interno del canyon all'aumentare di  $\rho$ ;

- Per valori maggiori di H/W, in tutti i casi, vi è un incremento di radiazione solare assorbita nel caso Inter\_ON. Infatti, essendo il canyon urbano più stretto, il fenomeno dell'intrappolamento radiativo, al netto della minore radiazione entrante, assume un peso maggiore;
- Nel caso del canyon con assi orientati S-N, le facciate est e ovest dell'edificio di fronte al canyon urbano, subiscono un simile aumento dell'assorbimento di radiazione solare, a causa della loro esposizione simmetrica rispetto al percorso solare giornaliero;
- Per il canyon con assi orientati W-E, la facciata nord è più influenzata dalle inter-riflessioni rispetto a quella sud, poiché, per la sua particolare esposizione, riceve principalmente radiazione diffusa e riflessa;
- La presenza di una superficie vetrata più piccola implica una superficie opaca più ampia che riflette la radiazione: questo spiega perché la radiazione assorbita dalle superfici dell'involucro dell'edificio di fronte al canyon è maggiore nel caso  $A_{gl}/A_{op} = 0.25$  rispetto al caso  $A_{gl}/A_{op} = 0.5$ .

Tabella 5.5 – Variazione percentuale (%) della radiazione solare assorbita tra i casi Inter\_ON e Inter\_OFF per la stagione invernale.

		Canyon orientation							
		S-N				W-E			
		West		East		South		North	
		Building façades		Building façades		Building façades		Building façades	
		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$	
H/W=0.5	$\alpha=0.2$	20.0	20.3	26.4	27.0	7.8	49.0	10.1	73.2
	$\alpha=0.4$	17.2	17.5	21.8	22.3	6.7	40.3	8.2	58.1
	$\alpha=0.6$	14.6	14.8	17.6	17.9	5.7	31.8	6.6	43.6
	$\alpha=0.8$	12.1	12.2	13.6	13.8	4.8	23.7	5.2	29.7
H/W=1	$\alpha=0.2$	28.9	29.4	43.2	43.6	11.8	71.7	18.1	117.9
	$\alpha=0.4$	22.5	22.9	31.9	32.2	8.8	54.5	12.6	86.7
	$\alpha=0.6$	16.8	17.0	22.3	22.6	6.4	38.5	8.3	58.7
	$\alpha=0.8$	11.6	11.7	14.1	14.2	4.3	23.3	5.0	33.2
H/W=2	$\alpha=0.2$	46.6	47.5	73.1	73.9	21.2	121.3	35.3	179.9
	$\alpha=0.4$	32.9	33.5	48.4	48.9	14.0	86.6	21.5	119.6
	$\alpha=0.6$	21.6	22.0	29.9	30.2	8.5	56.5	12.0	72.8
	$\alpha=0.8$	12.2	12.4	15.5	15.7	4.4	29.6	5.5	34.0

Nella Tabella 5.6, relativa alla stagione estiva, si nota un aumento dell'intensità delle inter-riflessioni per le facciate sud. La ragione di ciò è dovuta a una minore radiazione incidente su queste facciate a causa dell'angolo solare zenitale più piccolo.

In effetti, la radiazione assorbita da queste superfici è più bassa e il peso delle inter-riflessioni multiple all'interno del canyon è di conseguenza più alto. Inoltre, le facciate Nord ricevono meno radiazioni riflesse dalle superfici Sud (57% per  $H/W=0.5$ ,  $A_{gl}/A_{op}=0.25$  rispetto al 73.2%).

Tabella 5.6 - Variazione percentuale (%) della radiazione solare assorbita tra i casi *Inter\_ON* e *Inter\_OFF* per la stagione estiva.

		Canyon orientation							
		S-N				W-E			
		West		East		West		East	
		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$	
H/W=0.5	$\alpha=0.2$	21.5	21.6	28.0	28.3	19.4	43.3	23.8	57.0
	$\alpha=0.4$	18.7	18.8	23.3	23.6	17.6	38.3	20.6	48.5
	$\alpha=0.6$	16.1	16.1	19.0	19.2	15.8	33.4	17.8	40.4
	$\alpha=0.8$	13.5	13.5	14.9	15.1	14.2	28.8	15.2	32.7
H/W=1	$\alpha=0.2$	30.1	30.5	44.2	44.6	22.2	58.8	30.9	90.1
	$\alpha=0.4$	23.6	23.9	32.8	33.1	18.0	47.1	23.5	68.9
	$\alpha=0.6$	17.8	18.0	23.2	23.4	14.3	36.4	17.3	50.3
	$\alpha=0.8$	12.5	12.7	14.9	15.0	11.1	26.4	12.4	33.6
H/W=2	$\alpha=0.2$	47.8	47.8	74.1	74.2	31.3	89.1	46.4	124.7
	$\alpha=0.4$	33.9	33.9	49.1	49.2	22.0	64.7	29.9	81.9
	$\alpha=0.6$	22.4	22.4	30.5	30.5	14.7	44.0	18.3	49.2
	$\alpha=0.8$	12.8	12.8	16.0	16.0	9.0	25.8	10.0	22.7

Tabella 5.7 - Valori della radiazione solare assorbita (in  $MJ/m^2$ ) nei casi *Inter\_ON* e *Inter\_OFF* durante la stagione invernale.

		Canyon orientation															
		S-N								W-E							
		West				East				South				North			
		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$		$A_{gl}/A_{op}=0.5$		$A_{gl}/A_{op}=0.25$	
	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	
H/W=0.5	$\alpha=0.2$	180.9	150.8	178.3	148.3	184.5	145.9	183.0	144.1	316.9	293.9	116.5	78.2	323.8	294.1	125.3	72.3
	$\alpha=0.4$	353.3	301.4	348.2	296.4	355.4	291.7	352.2	288.1	627.1	587.6	219.3	156.3	636.2	588.0	228.6	144.6
	$\alpha=0.6$	517.9	451.9	510.2	444.5	514.2	437.4	509.3	432.0	931.5	880.9	308.8	234.4	939.4	881.6	311.4	216.8
	$\alpha=0.8$	675.2	602.2	664.9	592.4	662.2	582.9	655.4	575.8	1230.2	1174.0	386.4	312.3	1235.5	1175.0	374.7	289.0
H/W=1	$\alpha=0.2$	159.8	123.9	158.6	122.6	164.5	114.9	163.9	114.1	250.0	223.6	116.2	67.6	252.4	213.7	126.4	58.0
	$\alpha=0.4$	303.2	247.4	300.9	244.8	302.8	229.5	301.5	228.0	486.0	446.5	208.8	135.1	480.8	426.9	216.4	115.9
	$\alpha=0.6$	432.8	370.6	429.2	366.8	420.8	343.9	418.7	341.7	711.4	668.9	280.2	202.4	692.8	639.7	275.8	173.7
	$\alpha=0.8$	550.6	493.5	545.6	488.3	522.6	458.1	519.8	455.1	928.8	890.6	332.3	269.4	894.4	852.0	308.2	231.4
H/W=2	$\alpha=0.2$	133.0	90.7	132.2	89.6	135.8	78.5	135.4	77.8	189.6	156.5	104.0	47.0	185.6	137.2	123.2	44.0
	$\alpha=0.4$	240.7	181.1	238.8	178.9	232.5	156.7	231.5	155.5	355.9	312.2	174.9	93.7	332.9	274.0	192.0	87.4
	$\alpha=0.6$	329.6	271.0	326.7	267.7	304.9	234.7	303.3	232.9	507.0	467.3	219.6	140.3	459.7	410.4	225.2	130.3
	$\alpha=0.8$	404.4	360.6	400.3	356.2	361.1	312.6	358.9	310.2	648.9	621.7	241.8	186.6	576.7	546.5	231.4	172.6

Tabella 5.8 - Valori della radiazione solare assorbita (in MJ/m<sup>2</sup>) nei casi Inter\_ON e Inter\_OFF durante la stagione estiva.

		Canyon orientation																					
		S-N								W-E													
		Building façades																					
		West				East				West				East				South				North	
		A <sub>gl</sub> /A <sub>op</sub> =0.5				A <sub>gl</sub> /A <sub>op</sub> =0.25				A <sub>gl</sub> /A <sub>op</sub> =0.5				A <sub>gl</sub> /A <sub>op</sub> =0.25									
		ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF						
H/W=0.5	α=0.2	275.0	226.2	273.0	224.5	283.4	221.4	282.4	220.2	272.0	227.8	171.5	119.7	276.2	223.2	177.7	113.2						
	α=0.4	536.9	452.2	533.1	448.9	545.9	442.7	543.8	440.1	535.4	455.4	330.8	239.3	538.2	446.2	336.0	226.3						
	α=0.6	786.9	678.0	781.3	673.0	789.7	663.7	786.4	659.9	790.9	682.8	478.6	358.7	788.0	669.1	476.4	339.3						
	α=0.8	1025.8	903.5	1018.3	897.0	1016.8	884.6	1012.2	879.5	1039.3	909.9	615.5	478.0	1027.3	891.7	600.3	452.2						
H/W=1	α=0.2	241.9	185.9	240.5	184.3	255.0	176.9	254.2	175.8	260.1	212.9	168.8	106.3	265.9	203.0	176.7	93.0						
	α=0.4	459.0	371.3	456.2	368.1	469.4	353.4	467.6	351.2	501.7	425.3	312.3	212.3	500.8	405.7	313.8	185.7						
	α=0.6	655.1	556.1	650.8	551.5	652.3	529.5	649.5	526.3	728.2	637.0	433.6	318.0	713.3	607.9	418.3	278.3						
	α=0.8	833.2	740.5	827.2	734.3	810.2	705.3	806.1	701.0	942.7	848.2	535.0	423.4	909.9	809.7	495.2	370.7						
H/W=2	α=0.2	199.8	135.2	199.8	135.2	210.4	120.8	210.4	120.8	219.2	167.0	151.2	80.0	232.8	159.1	184.8	82.2						
	α=0.4	361.2	269.8	361.2	269.8	360.0	241.4	359.9	241.2	406.6	333.2	262.9	159.6	412.8	317.7	297.3	163.4						
	α=0.6	494.2	403.8	494.3	403.8	471.8	361.6	471.6	361.4	572.3	498.8	344.0	238.9	563.0	475.9	363.3	243.5						
	α=0.8	605.9	537.2	606.0	537.2	558.5	481.5	558.3	481.2	723.3	663.6	399.9	317.8	696.9	633.6	395.7	322.6						

Nella Tabella 5.7 e nella Tabella 5.8 sono riportati i valori della radiazione solare assorbita per l'intero periodo corrispondente alla stagione estiva ed invernale. Questi valori sono quelli utilizzati per la determinazione delle variazioni percentuali tra i casi Inter\_ON e Inter\_OFF riportati nelle Tabella 5.5 e Tabella 5.6.

### 5.3.2.2 Fabbisogno di energia termica dell'edificio

Poiché lo scopo finale dello studio è quello di valutare l'impatto delle mutue riflessioni del canyon sul fabbisogno energetico degli edifici, in questa sezione vengono mostrati i grafici con i rapporti tra il fabbisogno di energia termica del caso Inter\_ON e quelli del caso Inter\_OFF. I dati riportati mostrano come il contributo delle inter-riflessioni influenzi il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento quando H/W e α variano. L'analisi viene eseguita per il canyon orientato W-E e S-N. Ogni coppia di grafici riguarda un valore specifico di A<sub>gl</sub>/A<sub>op</sub> come evidenziato in ciascuna didascalia. Figura 5.9a e Figura 5.9b riguardano i risultati di un edificio del canyon orientato S-N con A<sub>gl</sub>/A<sub>op</sub> = 0.5. In effetti, guardando Figura 5.9a i rapporti tra domanda di riscaldamento in Inter\_ON e Inter\_OFF, per H/W = 0.5, varia tra 0.937 e 0.947 mentre per H/W = 2, varia tra 0.935 e 0.98. In generale, per questa configurazione, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di riscaldamento varia di un valore compreso tra il -7% e il -2%. Continuando nell'analisi, Figura 5.9b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffrescamento in Inter\_ON e Inter\_OFF, per H/W = 0.5, varia tra 1.125 e

1.170 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 1.08 e 1.25. Quindi, per la configurazione  $H/W=2$ , l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffreddamento varia di un valore compreso tra + 8% e 25%.

La Figura 5.10a e Figura 5.10b riguardano i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato S-N con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$ . Guardando la Figura 5.10a i rapporti tra fabbisogno di riscaldamento in Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 0.944 e 0.962 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 0.94 e 0.984. Per questa configurazione, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di riscaldamento varia da un valore di -6.5% a -1.5%. La Figura 5.10b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffreddamento in Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 1.125 e 1.170 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 1.08 e 1.25. In generale, per la configurazione  $H/W=2$ , l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffreddamento varia di un valore compreso tra + 8% e 35%.

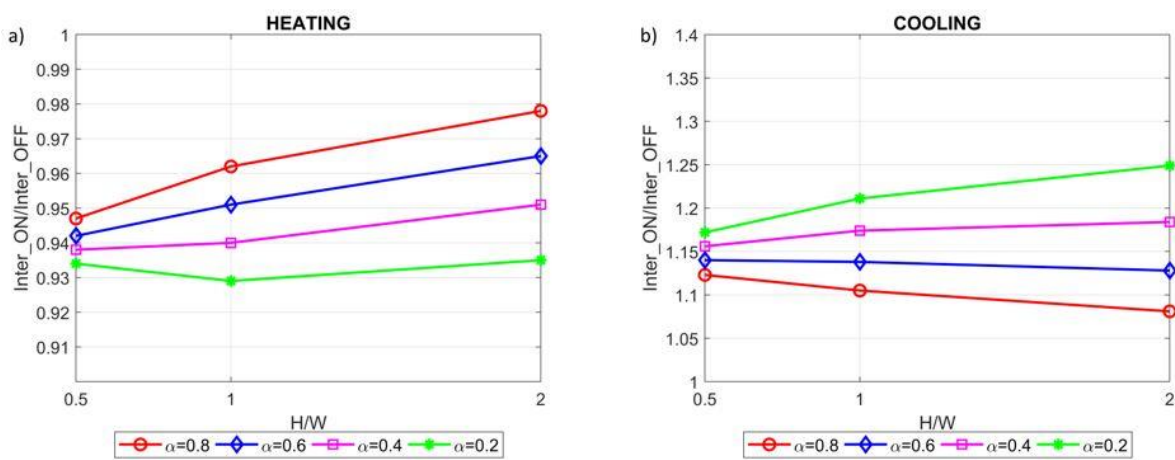


Figura 5.9 - Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter\_ON e Inter\_OFF: a) riscaldamento e b) raffreddamento, in funzione di  $H/W$ , con  $A_{gl}/A_{op}=0.5$  per il canyon orientato S-N.

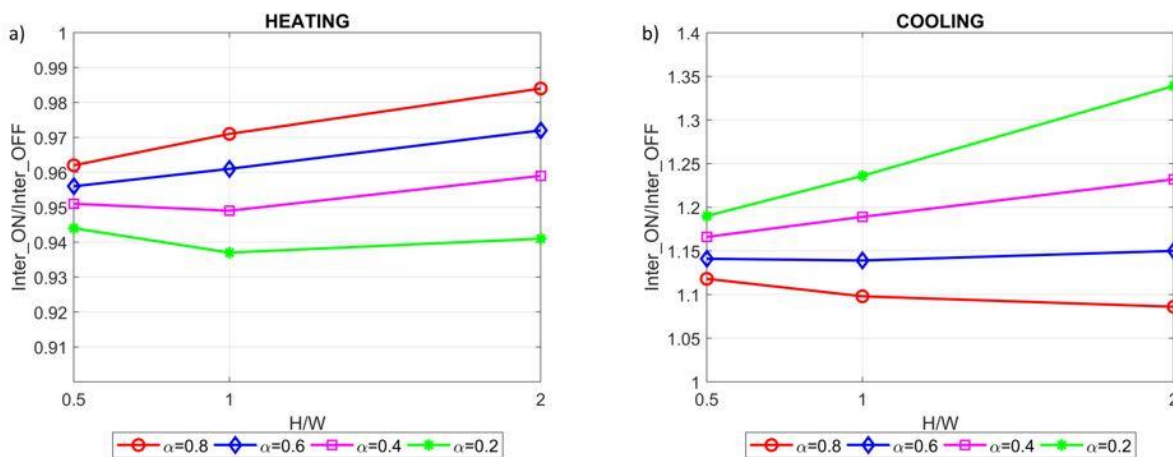


Figura 5.10 - Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter\_ON e Inter\_OFF: a) riscaldamento e b) raffreddamento, in funzione di  $H/W$ , con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$  per il canyon orientato S-N.

Le Figura 5.11a e Figura 5.11b riguardano i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato a W-E con  $A_{gl}/A_{op}=0.5$ .

Analizzando la Figura 5.11a i rapporti tra fabbisogno di riscaldamento tra caso Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 0.932 e 0.952 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 0.93 e 0.98. Per questa configurazione, l'impatto delle mutue riflessioni sulla domanda di riscaldamento varia da un valore compreso tra -7% e -2%. Ancora, la Figura 5.11b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffreddamento tra caso Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 1.18 e 1.23 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 1.08 e 1.25. Quindi, per la configurazione  $H/W=2$ , l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffreddamento varia da un valore compreso tra + 8% e 25%.

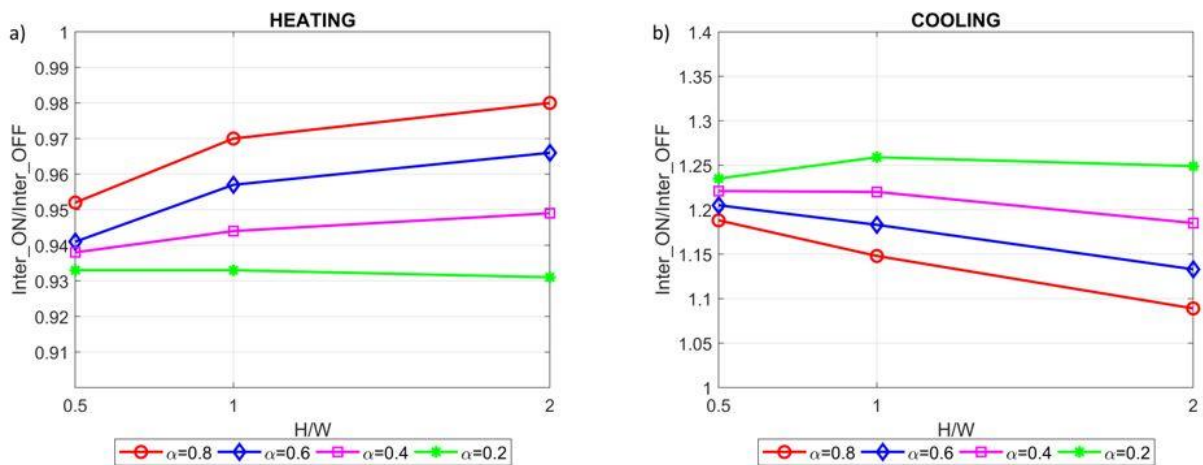


Figura 5.11 - Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter\_ON e Inter\_OFF: a) riscaldamento e b) raffreddamento, in funzione di  $H/W$ , con  $A_{gl}/A_{op}=0.5$  per il canyon orientato W-E.

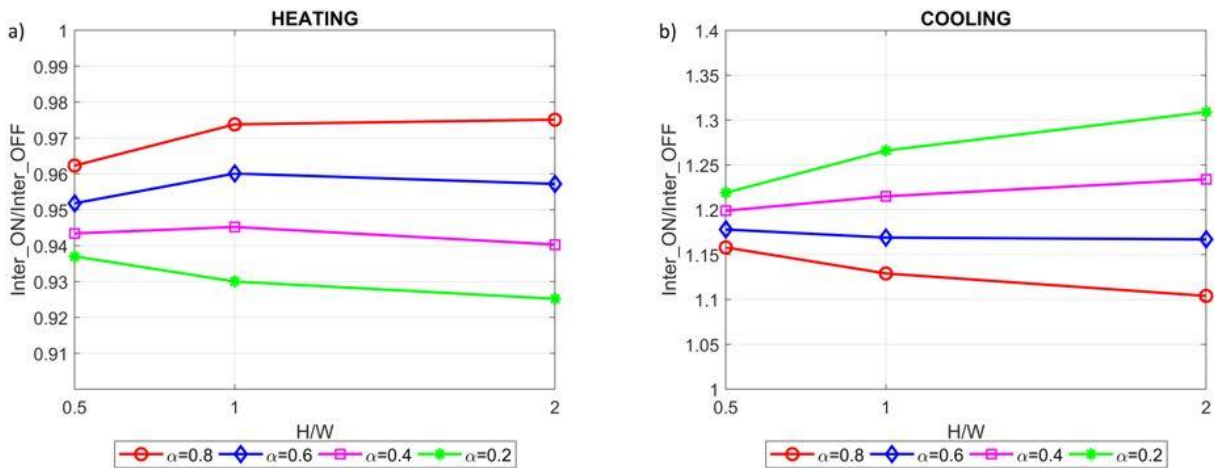


Figura 5.12 - Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter\_ON e Inter\_OFF: a) riscaldamento e b) raffreddamento, in funzione di  $H/W$ , con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$  per il canyon orientato W-E.

Figura 5.12a e Figura 5.12b riguardano i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato a W-E con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$ .

Guardando la Figura 5.12a tra fabbisogno di riscaldamento tra caso Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 0.937 e 0.962 mentre per  $H/W=2$ , varia tra 0.925 e 0.975. Per questa configurazione, l'impatto delle mutue riflessioni sulla domanda di riscaldamento varia di un valore

compreso tra -7,5% e -2,5%. La Figura 5.12b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffrescamento tra caso Inter\_ON e Inter\_OFF, per  $H/W=0.5$ , varia tra 1.17 e 1.22 mentre per  $H/W=2$ , tra 1.1 e 1.32. In generale, per la configurazione  $H/W=2$ , l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffrescamento varia di un valore compreso tra + 10% e 25%.

In generale, considerando tutti i risultati ottenuti dai diversi scenari, la presenza delle inter-riflessioni implica i seguenti importanti punti:

- aumento della domanda di raffrescamento fino al 35%, come mostrato nella Figura 5.10b, per il canyon stradale orientato S-N con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$ , per  $H/W=2$  e  $\alpha=0.2$ ;
- diminuzione nel fabbisogno di riscaldamento fino al 7.5%, per il canyon orientato S-N con  $A_{gl}/A_{op} = 0.25$ , per  $H/W=2$  e  $\alpha=0.8$ .
- più stretto è il canyon, più intenso è il fenomeno di intrappolamento radiativo: questo fatto influenza soprattutto la domanda di raffrescamento, fornendo aumenti molto più alti rispetto alla diminuzione del fabbisogno di riscaldamento.

Inoltre, osservando tutte le figure, è evidente che più alto è il rapporto  $H/W$ , più profonda è l'influenza delle inter-riflessioni per tutti i valori di assorbanza poiché l'edificio tende a comportarsi come un edificio isolato. Viceversa, con l'aumento di  $H/W$ , il valore di  $\alpha$  influenza progressivamente le richieste di energia termica. Un altro dato generico, osservando i grafici, è che per lo stesso rapporto  $H/W$  e  $\alpha$ , l'impatto delle inter-riflessioni sulla domanda di energia termica è maggiore nel modello con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$  rispetto al caso con  $A_{gl}/A_{op}=0.5$  (per entrambi gli orientamenti).

L'analisi eseguita mirava a indagare l'impatto della presenza delle inter-riflessioni multiple in un canyon urbano nel campo della radiazione ad onda corta sui fabbisogni di energia termica di un edificio inserito in un di canyon urbano.

Il confronto tra i risultati dei modelli Inter\_ON e Inter\_OFF ha mostrato un aumento del fabbisogno di raffrescamento fino al 35%, per il canyon orientato S-N con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$ , per  $H/W=2$  e  $\alpha = 0.8$  e una diminuzione di quello di riscaldamento fino al 7.5%, per canyon orientato W-E con  $A_{gl}/A_{op}=0.25$ , per  $H/W=2$  e  $\alpha=0.8$ . Quindi, è stato evidenziato che più stretto è il canyon, più intenso è il fenomeno dell'intrappolamento radiativo che porta ad aumenti nel fabbisogno di raffrescamento molto maggiori rispetto alla diminuzione del fabbisogno di riscaldamento. Un altro punto importante è che per lo stesso rapporto  $H/W$  e  $\alpha$ , l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di energia termica è maggiore nel modello con una superficie vetrata meno estesa sulla facciata.

Poiché le variazioni nei fabbisogni di energia termica dovute alle riflessioni a onda corta influenzano anche lo scambio di energia per irraggiamento tra gli edifici, i risultati di questa analisi non possono essere considerati direttamente applicabili alle situazioni del mondo reale ma piuttosto possono costituire una guida concettuale per comprendere gli effetti delle interazioni mutue nel campo delle

radiazioni a onda corta tra gli edifici. Tutti questi risultati suggeriscono che, nella progettazione di un nuovo edificio, le interazioni con l'ambiente circostante dovrebbero essere incluse come parametri di guida.



## 6 LE PRINCIPALI GRANDEZZE FOTOMETRICHE

Il termine luce si riferisce alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile dall'occhio umano, approssimativamente compresa tra 400 e 700 nm di lunghezza d'onda, ossia tra 790 e 435 THz di frequenza. Questo intervallo coincide con il centro della regione spettrale della luce emessa dal Sole che riesce ad arrivare al suolo attraverso l'atmosfera. I limiti dello spettro visibile all'occhio umano non sono uguali per tutte le persone, ma variano soggettivamente e possono raggiungere i 720 nanometri, avvicinandosi agli infrarossi, e i 380 nanometri avvicinandosi agli ultravioletti.

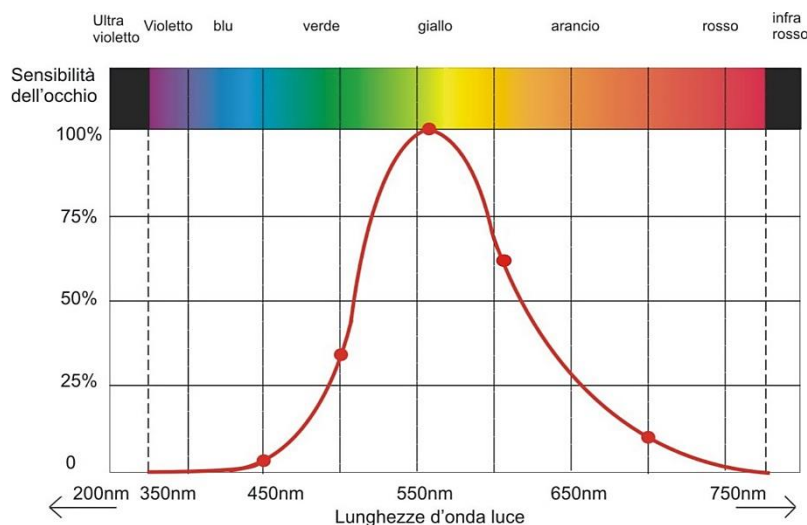


Figura 6.1 - Curva di sensibilità relativa dell'occhio

La presenza contemporanea di tutte le lunghezze d'onda visibili, in quantità proporzionali a quelle della luce solare, forma la luce bianca. La luce, come tutte le onde elettromagnetiche, interagisce con la materia. I fenomeni che più comunemente influenzano o impediscono la trasmissione della luce attraverso la materia sono: l'assorbimento, la diffusione (scattering), la riflessione speculare o diffusa, la rifrazione e la diffrazione. La riflessione diffusa da parte delle superfici, da sola o combinata con l'assorbimento, è il principale meccanismo attraverso il quale gli oggetti si rivelano ai nostri occhi, mentre la diffusione da parte dell'atmosfera è responsabile della luminosità del cielo.

Le grandezze fotometriche sono definite partendo dalle grandezze radiometriche tenendo conto della curva di sensibilità dell'occhio umano, che agisce come un fattore di peso. In altri termini, data una grandezza radiometrica  $A(\lambda)$  necessariamente spettrale, cioè costituita da un insieme di valori relativi a lunghezze d'onda diverse, come è appunto la radiazione solare, si deve valutare il seguente integrale:

$$A_v = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot A(\lambda) d\lambda \quad (6.1)$$

Per quantificare l'emissione luminosa in termini energetici si utilizzano le grandezze radiometriche (energetiche) mentre per quantificare l'emissione luminosa in termini di risposta del sistema visivo

umano si introducono le grandezze fotometriche. Tali grandezze sono definite a partire dalle grandezze radiometriche, mediante pesatura con la curva di risposta spettrale dell'occhio umano, ossia con la curva del fattore di visibilità relativa  $V(\lambda)$ .

### 6.1 *Flusso luminoso*

La prima grandezza che costituisce il cardine attorno al quale gravitano tutte le altre da essa derivate è rappresentata dal flusso luminoso, indicato con la lettera  $\Phi$ , misurato in lumen (lm) e a sua volta derivante dal flusso energetico pesato secondo l'azione che esso esercita sull'osservatore fotometrico di riferimento CIE. In altre parole, il flusso luminoso rappresenta l'energia, riferita alla sensibilità spettrale dell'occhio umano, irradiata nell'unità di tempo da una qualsiasi sorgente di luce. In particolare, per la visione fotopica esso è descritto dalla seguente relazione:

$$\Phi = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

$K_m$  è il valore massimo del coefficiente di visibilità di una radiazione, definito come rapporto tra il flusso luminoso e il flusso energetico, e assume per definizione un valore pari a 683 lm/W in corrispondenza alla lunghezza d'onda di massima sensibilità dell'occhio umano in condizioni di visione fotopica (555 nm);

$\Phi_e$  è il flusso energetico associato alla radiazione luminosa;

$V(\lambda)$  è il fattore spettrale di visibilità in condizioni fotopiche.

A seconda che il flusso luminoso emesso da una sorgente sia calcolato entro un angolo solido di ampiezza unitaria oppure entro una superficie di area unitaria si parla di intensità luminosa o di illuminamento.

### 6.2 *Intensità luminosa*

In generale una qualsiasi sorgente luminosa non irradia il proprio flusso in maniera uniforme in tutte le direzioni, ma lo fa con intensità diverse a seconda delle caratteristiche fotometriche per la quale essa è stata pensata. Tuttavia, se si immagina di circoscrivere una qualsiasi direzione di emissione, identificata da una semiretta che si estende nello spazio a partire dal centro della sorgente, con un cono che sottende un angolo solido unitario, si può affermare che il flusso luminoso contenuto al suo interno sia caratterizzato da una distribuzione pressoché uniforme. Premesso ciò, è possibile definire l'intensità luminosa (espressa in candele,  $cd$ ) di una sorgente in una data direzione come il rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla stessa entro l'elemento di angolo solido che si sviluppa attorno

alla direzione data e l'elemento di angolo solido  $d\Omega$  stesso misurato in steradiani, come espresso dalla seguente relazione:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (6.3)$$

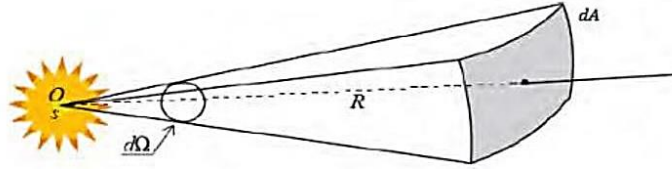


Figura 6.2 - Il concetto di intensità luminosa

### 6.3 Angolo solido

Un angolo solido è l'estensione 2D del concetto di angolo. Considerando una sfera centrata su di un punto  $p$  quale tracciamo una retta tangente al bordo di un oggetto visto da  $p$ . Ripetendo l'operazione per tutto il bordo dell'oggetto determiniamo sulla sfera un'area  $a$ . Il rapporto tra l'area  $a$  e la superficie totale della sfera è definito angolo solido. L'angolo solido si denota solitamente con  $\omega$  e si misura in steradiani. Se la sfera ha raggio unitario, la sua superficie è  $4\pi$  e l'angolo solido è  $\omega = a / 4\pi$ .

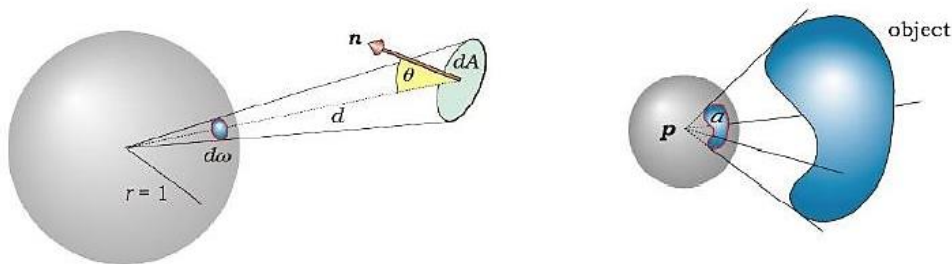


Figura 6.3 - Rappresentazione di angolo solido

Inoltre, se consideriamo  $n$  la normale di una superficie differenziale  $dA$  e  $\theta$  l'angolo tra la normale  $n$  e la linea che congiunge il centro della sfera con  $dA$ , fatta  $d$  è la distanza tra  $dA$  ed il centro della sfera allora definiamo l'angolo solido differenziale  $d\omega$  che è dato da:

$$d\omega = \frac{dA \cos \theta}{d^2} \quad (6.4)$$

### 6.4 Luminanza

Quando la superficie della sorgente è tale che la sorgente stessa non possa essere più considerata puntiforme, si introduce la luminanza che è la grandezza fotometrica che esprime l'intensità luminosa di una superficie, così come appare all'osservatore.

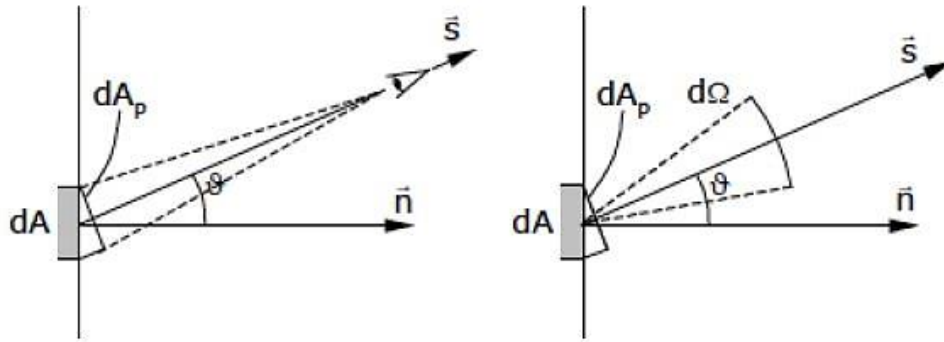


Figura 6.4 - Rappresentazione del concetto di luminanza

Si definisce luminanza  $L$  di un elemento di una superficie emittente in una direzione  $\vartheta$ , il rapporto fra l'intensità luminosa emessa nella direzione considerata e l'area dell'elemento stesso proiettata sopra un piano perpendicolare alla direzione  $\vartheta$ .

$$L_v(\theta) = \frac{d^2\Phi_v(\theta)}{dA \cdot d\omega \cdot \cos \theta} \quad (6.5)$$

$L_v$  = luminanza della superficie nella direzione individuata dal vettore  $\vec{S}$  formante un angolo  $\vartheta$  con la normale  $n$ ;

- $d\omega$  = angolo solido infinitesimo centrato nella direzione  $\vec{S}$ ;
- $dA$  = area infinitesima della superficie;
- $dA_p = dA \cos \vartheta$  = proiezione dell'area infinitesima  $dA$  sul piano normale alla direzione  $s$  e coincide con l'area apparente della superficie che si vede dal punto di osservazione;
- $d\phi_v$  = flusso luminoso infinitesimo emesso dalla superficie  $dA$  entro l'angolo solido infinitesimo  $d\omega$ ;

Essa è una grandezza vettoriale e l'unità di misura è il *nit* ( $cd/m^2$ ). Una sorgente estesa, piana ed uniforme ha una luminanza di  $1 \text{ cd}/m^2$  quando ha un'area di  $1 \text{ m}^2$  ed emette un'intensità luminosa di  $1 \text{ cd}$ . La luminanza di una superficie in una determinata direzione corrisponde quindi alla quantità di flusso luminoso emesso dall'area apparente unitaria nell'angolo solido unitario centrato in quella direzione. In termini di intensità luminosa si ha:

$$L_v = \frac{dI}{dA_p} = \frac{dI}{dA \cos \theta} \quad (6.6)$$

La luminanza è indipendente dalla distanza di una sorgente estesa uniforme, perché l'area osservata aumenta con la distanza, compensando la riduzione di intensità.

## 6.5 Illuminamento

Le sensazioni visive prodotte su una superficie illuminata possono essere classificate mediante l'illuminamento che è una grandezza scalare ed esprime la quantità di flusso luminoso incidente su una superficie e proveniente da tutte le direzioni. Si definisce illuminamento, espresso in lux ( $lm/m^2$ ) la quantità:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (6.7)$$

$E$  = illuminamento della superficie;

$dA$  = area infinitesima della superficie illuminata;

$d\phi$  = flusso luminoso infinitesimo incidente sulla superficie infinitesima  $dA$  proveniente da tutte le direzioni.

L'unità di misura è il *lux*, ( $lm/m^2$ ) e corrisponde all'illuminamento prodotto da un flusso di 1 *lumen* distribuito in modo uniforme su una superficie di 1  $m^2$ . Con opportune sostituzioni, si può ricavare che l'illuminamento è anche esprimibile come:

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2} \quad (6.8)$$

La relazione mostra che l'illuminamento di una superficie è direttamente proporzionale all'intensità luminosa emessa dalla sorgente nella direzione della superficie e inversamente proporzionale al quadrato della distanza  $d$  della superficie dalla sorgente. Inoltre, esso dipende anche dall'angolo che la normale alla superficie forma con la direzione di illuminamento.

## 6.6 Emettenza luminosa

L'*emettenza luminosa* ( $M_v$ ) ha la stessa espressione dell'illuminamento ma è data invece dal rapporto tra il flusso luminoso e l'area della superficie che lo emette. Si misura anch'essa in lux ed è esprimibile mediante la relazione seguente:

$$M_v = \frac{d\Phi}{dA} \quad (6.9)$$

Ad esempio, se una superficie è caratterizzata da un coefficiente di riflessione  $\rho$ , è sottoposta ad un illuminamento  $E$ , la sua emettenza sarà data da:  $M_v = E \cdot \rho$ .

## 7 I MATERIALI RETRO-RIFLETTENTI

### 7.1 Tecnologie esistenti

Con retroriflettenza si intende il termine tecnico che definisce il fenomeno fisico per cui la maggior parte della luce incidente su una superficie viene inviata nuovamente nella direzione di provenienza. Per quanto riguarda i materiali RR esistenti, la loro struttura è approssimativamente classificata in due tipi:

- Sistemi monocomponenti, ottenuti con serie di prismi triedri trirettangoli (si tratta di uno spigolo di un cubo): la luce colpisce la prima faccia del prisma e viene riflessa, per riflessione interna totale, sulla seconda faccia che, per lo stesso fenomeno, la riflette sulla terza; da questa viene rinvio verso la sorgente che lo ha emesso. L'angolo di riflessione dipende dalle caratteristiche di rifrazione del materiale.

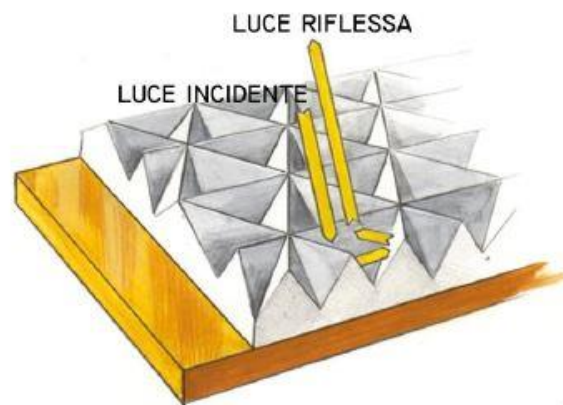


Figura 7.1 - Modalità di riflessione materiali RR monocomponenti

- Sistemi ottici elementari bicomponenti, composti da microsfere di vetro e da specchi alluminizzati concavi, posizionati dietro alla microsfera, concentrici con questa e con raggio di curvatura pari alla lunghezza focale della lente (microsfera): il fascio di luce viene rifratto dalla sfera di vetro (con percorsi angolati dipendenti dalle caratteristiche ottiche del vetro e dell'aria) e successivamente riflesso dalla superficie riflettente concava; successivamente riattraversa la sfera, subendo un nuovo fenomeno di rifrazione, e quindi viene rinvio verso la sorgente che lo ha emesso.

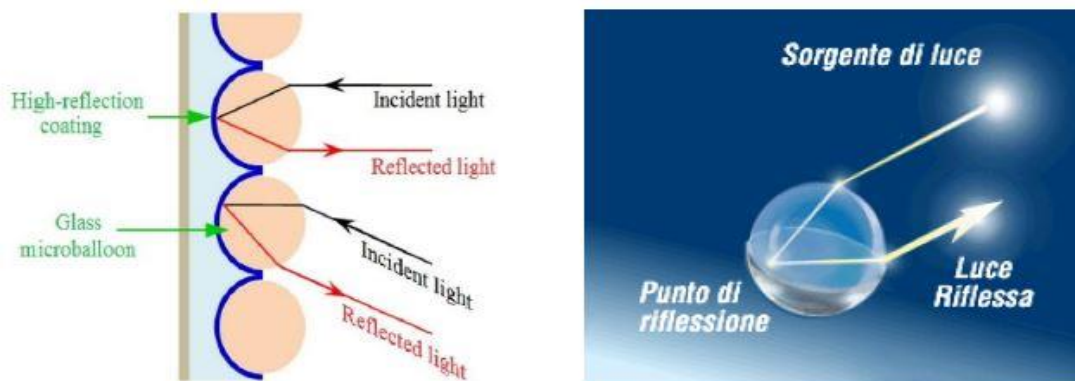


Figura 7.2 - Modalità di riflessione nei materiali RR con sistemi ottici elementari bicomponenti

A differenza delle tinte RR a microsferi di vetro, che hanno come componente prevalente di riflessione della luce quella retroriflettente, i materiali RR monocomponenti hanno, nella propria caratteristica di riflessione, sia componente speculare sia retroriflettente.

I sistemi monocomponenti sono otticamente più efficienti ma sono più “fragili” in quanto estremamente sensibili alla geometria dei microprismi: una deformazione, anche minima, dei prismi comporta un notevole scadimento della retroriflettenza. Nello stesso modo l’impiego di materiale diverso (anche se apparentemente simile), ma con indici di rifrazione diverso, richiederebbe una differente geometria dei prismi. Un esempio di tali prodotti, in uso da moltissimi anni, sono i catarifrangenti presenti sulle biciclette, autoveicoli e paracarri; più recentemente sono stati sviluppati anche per l’impiego sulla segnaletica stradale verticale, per il vestiario e per la livrea ad alta visibilità dei veicoli.

I sistemi a microsferi sono stati i primi ad essere sviluppati, traendo spunto dagli occhi dei felini e, nel corso degli anni hanno dato origine a prodotti molto specialistici, molto resistenti e di impiego molto flessibile. Solitamente, il pigmento alto riflettente della tinta, nei sistemi a microsferi, riveste la parte inferiore di esse, in modo tale che la luce solare possa essere riflessa nella direzione opposta da due rifrazioni sul bordo delle microsferi e da una o più riflessioni sul rivestimento riflettente; indipendentemente dalla direzione di provenienza della radiazione luminosa incidente. Tali particelle sferiche possono essere definite mediante cinque caratteristiche:

- l’indice di rifrazione;
- percentuale massima ponderata di microsferi di vetro difettose;
- granulometria;
- contenuto di sostanze pericolose;
- resistenza agli agenti chimici.

L’operazione di applicazione delle microsferi di vetro risulta essere particolarmente delicata poiché è necessario garantire un adeguato inserimento delle microsferi, evitando situazioni in cui esse risultino eccessivamente o non sufficientemente immerse nella pittura. Nello specifico, il grado di

affondamento nel prodotto segnaletico deve essere compreso tra il 55% ed il 60% del loro diametro. Un affondamento inferiore al 55%, pur consentendo in parte la retroriflessione, espone il sistema ottico ad una più rapida asportazione da parte dei veicoli, mentre un affondamento superiore al 60% conduce ad una limitazione della retroriflettenza, la quale risulta completamente compromessa nel caso in cui l'affondamento superi l'85%. Il fenomeno considerato viene adeguatamente spiegato osservando che la superficie attiva della microsfera, ovvero la superficie che consente la retroriflessione, è limitata alla parte immersa, che costituisce l'interfaccia tra il vetro ed il prodotto che circonda la parte emisferica della microsfera e che funge da superficie riflettente.

Molti segnali autostradali retroriflettenti e segni di corsia usano la tecnologia a perle di vetro. Invece di spargere semplicemente la luce, come fanno i normali pigmenti di pittura, esse invertono la luce e la riflettono nella stessa direzione di incidenza. Le proprietà dei materiali rifrangenti vengono definite valutando:

- l'angolo di illuminazione (o di incidenza):  $\beta$
- l'angolo di divergenza:  $\alpha$
- il coefficiente areico di intensità luminosa ( $R'$ )
- la luminanza
- la riflettanza

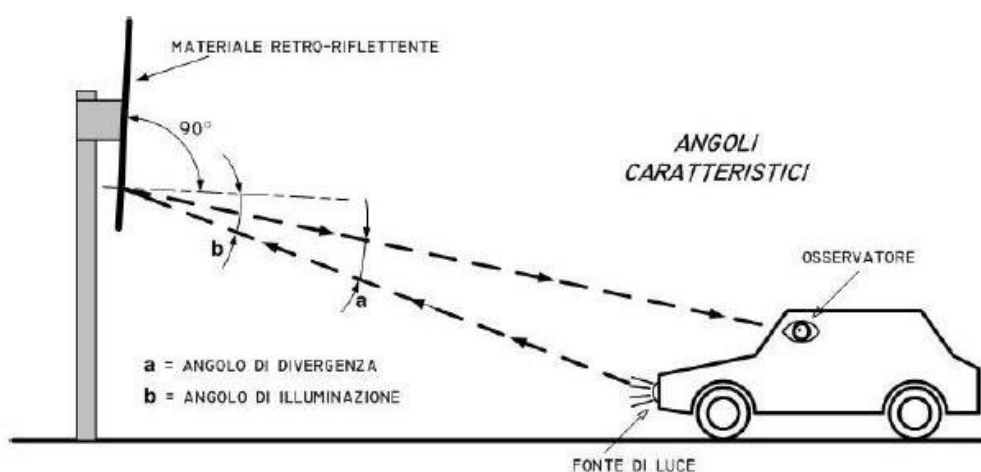


Figura 7.3 - Angoli caratteristici per materiali rifrangenti

Dove l'angolo di illuminazione ( $\beta$ ) è l'angolo compreso tra il fascio di luce incidente e la direzione perpendicolare alla superficie del materiale rifrangente, e l'angolo di divergenza ( $\alpha$ ) è l'angolo compreso tra il fascio di luce incidente sulla superficie del materiale e la retta che congiunge il punto di incidenza ed il punto di osservazione.

Attualmente, i materiali RR sono impiegati per vari scopi di sicurezza, come segnaletica stradale, indumenti da lavoro e applicazioni per la sicurezza del traffico, e non sono commercialmente disponibili per l'uso come rivestimenti per edifici urbani.



L'intento di questo lavoro è quello di fornire risultati numerici e sperimentali utili per la comprensione delle potenzialità dell'utilizzo di materiali RR, in forma di pittura, concepito per rivestire facciate di edifici urbani. L'elevato valore di riflettanza dei materiali RR e la loro particolare modalità di riflessione, prevalentemente nella direzione di incidenza, li rendono interessanti per applicazioni in edilizia, come contromisura al fenomeno dell'UHI. I risultati disponibili in letteratura si riferiscono sempre ai materiali RR commerciali esistenti, nati per affrontare altri tipi di applicazioni. Negli ultimi anni diversi studi hanno dimostrato che l'uso di materiali appropriati sull'involucro dell'edificio può avere effetti positivi sulla mitigazione del fenomeno dell'UHI e sul miglioramento della qualità dell'aria esterna e delle condizioni di comfort. L'obiettivo specifico della ricerca è di studiare il beneficio che può essere ottenuto dall'applicazione di nuovi materiali retroriflettenti (RR) sugli involucri di edifici inseriti in canyon urbani.

## 7.2 Caratteristiche e potenzialità

I materiali RR hanno le seguenti caratteristiche: il valore della riflettanza, invece di rimanere costante, cresce all'aumentare dell'angolo di incidenza della radiazione solare e la direzione prevalente di riflessione della radiazione diretta è la stessa dell'incidente. I materiali comuni da costruzione, come già accennato, non hanno direzioni prevalenti di riflessione della radiazione incidente. Premesso ciò, le peculiarità dei materiali RR si possono sintetizzare come segue:

$$\vec{\rho}_{\theta} = F(\theta_{inc}) \quad (7.1)$$

Come vedremo in seguito, l'utilizzo dei materiali RR come rivestimento di involucro può tradursi in una diminuzione dei carichi solari sull'edificio e in una riduzione del fenomeno dell'intrappolamento radiativo all'interno del tessuto urbano.

Si consideri ad esempio una facciata di un edificio di una città dell'emisfero boreale con orientamento Sud. Nelle stagioni estive, in cui i carichi solari costituiscono un problema per gli edifici e per il comfort termico degli spazi urbani, nelle ore in cui il sole è più alto, l'angolo di incidenza della radiazione solare diretta assume valori che vanno da 75° (Europa Mediterranea) a 60° (Europa Continentale). In tal modo si può sfruttare la dipendenza della riflettanza dei materiali RR per far sì che i carichi solari sugli edifici, e più in generale sulle superfici delle strutture opache costituenti il tessuto urbano, siano minori in estate rispetto all'inverno. Si tenga presente infatti che in inverno, nelle stesse ore centrali del giorno, gli angoli di incidenza diminuiscono fino a 30° (Europa Mediterranea) e 10° (Europa Continentale). In questa prospettiva una modellizzazione numerica dei materiali RR assume un'importanza primaria per una stima corretta dei guadagni solari dell'involucro negli edifici.

## 8 STRUMENTI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA RISPOSTA OTTICA DEI MATERIALI

Misurare le proprietà spettrali, ottiche e bidirezionali è compito di dispositivi generalmente indicati con il nome di Goniofotometri. Si tratta di dispositivi che possono misurare le caratteristiche delle onde trasmesse o riflesse da oggetti e materiali. Goniospettrometro è un termine a volte usato per descrivere i dispositivi che possono anche misurare le proprietà dipendenti dalle lunghezze d'onda della radiazione incidente. I Goniofotometri sono stati ampiamente utilizzati per studiare le proprietà ottiche di lampade e apparecchi di illuminazione, manti stradali e texture, e materiali naturali come il legno. Essi sono sempre più utilizzati per valutare le proprietà ottiche bidirezionali dei materiali e dei componenti dei sistemi di finestratura. Gli spettrofotometri possono supportare le analisi goniofotometriche e gonio-reflettometriche qualora non si abbia a disposizione un Goniospettrometro. In questo capitolo verranno esaminati gli strumenti analitici e la strumentazione necessaria a caratterizzare la risposta ottica dei materiali.

### 8.1 La $BT(R)DF$

La maggior parte dei goniofotometri misurano la luminanza (o radianza) trasmessa o riflessa, relativa a una data direzione di illuminamento (o irradianza) incidente in una data direzione su un campione di interesse (CIE 1998). I dati misurati dai goniofotometri si riassumono in una funzione chiamata Funzione di Distribuzione Bidirezionale della Trasmissione (o Riflessione),  $(BT(R)DF)$ . La BRDF si riferisce ai materiali opachi mentre la BTDF ai materiali trasparenti. La Commission Internationale de l'Eclairage la definisce come "quoziente della luminanza del mezzo sull'illuminamento sul mezzo" (CIE 1977), dove i risultati di luminanza dipendono dalle caratteristiche di riflessione e/o trasmissione del materiale.

La funzione  $BT(R)DF$  in unità radiometriche può essere definita come il quoziente della radianza spettrale proveniente dal campione, sull'irradianza spettrale sul campione. In generale, la funzione spettrale  $BT(R)DF$  dipende da due angoli di incidenza, due angoli di riflessione, lunghezza d'onda e polarizzazione della radiazione sorgente.

Matematicamente, questi  $BT(R)DF$  può essere descritta come segue:

$$BT(R)DF_e(\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}, \theta_i, \varphi_i, \sigma, \lambda) = \frac{L_e(\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}, \theta_i, \varphi_i, \sigma, \lambda)}{E_e(\theta_i, \sigma, \lambda)} \quad (8.1)$$

$\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}$  sono le coordinate angolari rispetto allo zenith e all'azimuth della radiazione riflessa (o trasmessa);

$\sigma, \lambda$  sono la polarizzazione e la lunghezza d'onda della radiazione;

$\theta_i, \varphi_i$  sono gli angoli di incidenza della radiazione incidente che illumina il campione;

$L_e$  rappresenta la Radianza della luce riflessa (o trasmessa), dove il pedice  $e$  sta a denotare una quantità radiometrica;

$E_e$  è l'Irradianza della sorgente sul campione.

Questa BT(R)DF esprime la quantità di radiazione che viene reindirizzata come radianza spettrale in una direzione particolare e in funzione della lunghezza d'onda e polarizzazione della sorgente. Nel corso della trattazione per semplicità supponiamo che la radiazione incidente sul campione non sia polarizzata. La BT(R)DF in corrispondenza di un determinato angolo viene anche chiamata col nome di coefficiente di radianza  $q$  ( $\text{sr}^{-1}$ ).

Si può definire una BT(R)DF quasi spettrale il quoziente della radianza totale proveniente da un campione in un intervallo di lunghezza d'onda finito, sull'irradianza totale incidente sul campione nello stesso intervallo. La BT(R)DF considerata su tutte le lunghezze d'onda è totalmente indipendente dal tipo di radiazione della sorgente, e dipende dalle proprietà del materiale o del sistema preso in esame, mentre la funzione quasi-spettrale BT(R)DF sopra definita, dipende dalla radiazione della sorgente, e può essere diversa in determinati intervalli di lunghezza d'onda a seconda dell'irradiazione sul campione. Questo ultimo concetto può anche essere esteso alle funzioni BT(R)DF fotometriche, definite come la luminanza totale di un campione in un intervallo di lunghezza d'onda finito, sull'illuminamento totale sul campione nello stesso intervallo. La BT(R)DF fotometrica definita dalla CIE, su tutto l'arco dello spettro del visibile, rappresenta il caso limite della BT(R)DF quasi-spettrale, dove l'intervallo di lunghezza d'onda considerato, comprende tutte le lunghezze d'onda rilevanti per le quantità fotometriche.

Qualsiasi BT(R)DF, che sia essa fotometrica o radiometrica, quando è integrata su molteplici lunghezze d'onda (comprese le BT(R)DF quasi-spettrali integrate su tutto lo spettro visibile), si limita a descrivere le proprietà di trasmissione o riflessione di un materiale ad una radiazione con uno spettro particolare. Questa limitazione è dovuta al fatto che, senza conoscere le reali proprietà spettrali di trasmissione bidirezionale di un campione, non si può stabilire in quale zona dello spettro il campione trasmetterà o rifletterà la radiazione più o meno intensamente a seconda del tipo di sorgente (e quindi di spettro di radiazione) per via delle sue proprietà. Molti Goniometri misurano solo la funzione fotometrica della BT(R)DF, come definita dalla CIE, la quale può essere descritta matematicamente come segue:

$$BT(R)DF_v(\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}, \theta_i, \varphi_i) = \frac{L_v(\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}, \theta_i, \varphi_i)}{E_v(\theta_i)} \quad (8.2)$$

$\theta_{t(r)}, \varphi_{t(r)}$  sono le coordinate angolari rispetto allo zenith e all'azimuth della radiazione riflessa (o trasmessa).

$\theta_i, \varphi_i$  sono gli angoli di incidenza della radiazione incidente che illumina il campione.

$L_v$  rappresenta la Luminanza della luce riflessa (o trasmessa), dove il pedice v sta a denotare una quantità fotometrica

$E_v$  è l'illuminamento sul campione dovuto alla radiazione incidente.

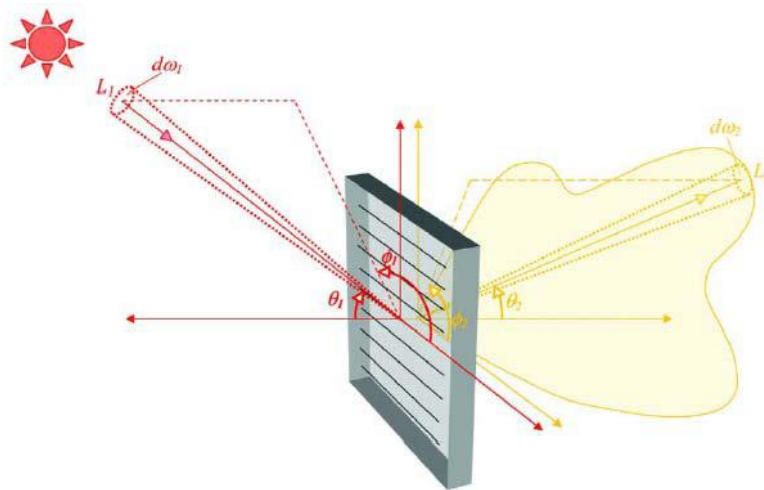


Figura 8.1 - Rappresentazione della BT(R)DF

Le unità di misura della BTDF sono espresse per steradiante o  $sr^{-1}$ . Le componenti della BTDF sono mostrate nella Figura 8.1 mentre nella Figura 8.2 sono mostrate le componenti delle BRDF di materiali opachi con comportamento vario.

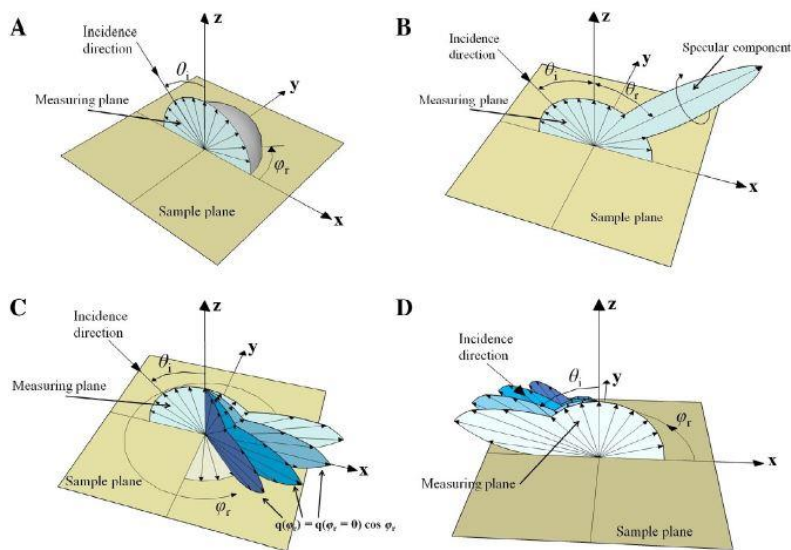


Figura 8.2 - Componenti delle BRDF per materiale lambertiano (A), speculare misto (B e C) e RR misto (D).

La misura della BTDF fotometrica richiede perciò la conoscenza degli angoli di incidenza della radiazione  $(\theta_1, \varphi_1)$ , l'illuminamento totale sul campione (indicato nella Figura 8.1 come  $L_1 * d\omega_1 * \cos \theta_1$ ), la luminanza  $L_2$  trasmessa (o riflessa) dal campione nella direzione  $(\theta_2, \varphi_2)$ . La BT(R)DF può così essere calcolata per tutti gli angoli noti utilizzando l'equazione su scritta.

### 8.1.1 *Campi di applicazione*

L'importanza di conoscere la BT(R)DF di sistemi complessi è rafforzato dalla capacità di caratterizzare, analizzare e prevedere le prestazioni dei materiali nell'ambito edilizio. La BTDF può anche fornire approfondimenti per possibili progetti di finestrate di nuova concezione. È stato suggerito che la conoscenza dettagliata delle proprietà ottiche delle finestrate, è necessaria "per ottimizzare l'uso e la produzione avanzata di sistemi di finestrate, e quindi controllare in modo efficiente il guadagno solare e l'illuminazione naturale attraverso le finestre". La BT(R)DF può essere utile per architetti, progettisti, ingegneri e consulenti in illuminazione per scegliere opportuni sistemi di finestrate negli edifici. La visualizzazione della distribuzione angolare della luce che emerge da questi sistemi nei diversi momenti della giornata e dell'anno, può fornire informazioni più intuitive sulle loro prestazioni. Migliore comunicazione di tali informazioni aiuterebbe, a sua volta, ad accrescere l'integrazione di questi sistemi e quindi migliorare l'illuminazione diurna e la performance termica. I Software di simulazione per i sistemi di illuminazione e di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici possono descrivere in modo particolareggiato il comportamento di questi sistemi supportati dalla conoscenza della BT(R)DF (Grobe 2018). Lo stesso discorso vale per la BRDF dei materiali opachi. La sua conoscenza e la disponibilità di modelli può essere utile, in fase di progettazione edilizia urbana per proporre soluzioni al fenomeno dell'UHI, attraverso simulazioni con software di modellizzazione energetica degli spazi urbani e per il risparmio energetico degli edifici. Tuttavia, spesso, i dati della BT(R)DF relativi a finestrate e materiali non sono disponibili per le simulazioni. Questo determina simulazioni condotte con ipotesi semplificate sulle prestazioni dei materiali e dei sistemi. Lo sviluppo di goniofotometri con la capacità di misurazione spettrale o quasi spettrale della BT(R)DF, può consentire la creazione di librerie di materiali con i dati della BT(R)DF per la simulazione delle loro prestazioni in ambito edilizio.

## 8.2 *Coefficienti di riflessione, trasmissione e assorbimento*

Quando un corpo è colpito da un fascio di luce, una parte dell'energia viene riflessa, una parte trasmessa ed una parte assorbita. Si possono definire allora i coefficienti di riflessione (o riflettanza)  $\rho$ , trasmissione  $\tau$  ed assorbimento  $\alpha$  come segue:

$$\rho = \frac{dE_{ref}}{dE_{inc}} \quad (8.3)$$

$$\tau = \frac{dE_{tra}}{dE_{inc}} \quad (8.4)$$

$$\alpha = \frac{dE_{abs}}{dE_{inc}} \quad (8.5)$$

Dove il pedice *ref* sta per riflessa, *inc* sta per incidente, *tra* sta per trasmessa e *abs* sta per assorbita. Per come sono stati definiti deve allora valere che:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (8.6)$$

e inoltre, per un corpo opaco, ovvero che ha  $\tau=0$ :

$$\rho + \alpha = 1 \quad (8.7)$$

Appare chiaro che questi tre coefficienti possono essere espressi in termini percentuali.

### 8.3 Il Goniometro del LIFT

Il Goniometro in dotazione al LIFT (Laboratorio interdipartimentale di Fisica Tecnica) è un Goniometro a scansione, montato in assetto gonoriflettometrico. Esso è costituito da un telaio, al quale sono collegati un portacampione ed un primo longherone metallico, denominato *base*, in grado di ruotare su un piano orizzontale rispetto al terreno. Al terminare di esso è calettato un secondo longherone metallico, denominato *braccio*, anch'esso libero di ruotare, ma nel suo caso su di un piano ortogonale al primo. Entrambi sono motorizzati e in grado di muoversi l'uno autonomamente rispetto l'altro, grazie a due motori elettrici indipendenti. Il *braccio* è in grado di compiere una rotazione completa, attorno al proprio asse, di 360°, mentre la *base* ruota da 0° a 160°.

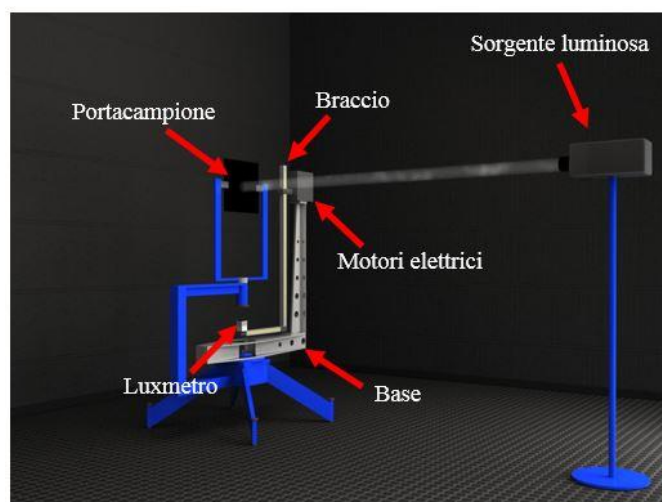


Figura 8.3 - Rappresentazione dell'apparato in dotazione al LIFT.

Sul *Braccio* è ancorato un luxmetro *Delta Ohm* mod. *HD 2021T* che permette di convertire l'illuminamento misurato, in segnale di corrente. Il range spettrale che rivela, rispetta la curva del visibile  $V(\lambda)$ . La risoluzione dello strumento è di  $1 \text{ lux}$  con un'incertezza pari a  $0,5 \text{ lux}$  ed un range di misura che spazia tra  $0$  e  $5000 \text{ lux}$ . La sua sensibilità è di  $5 - 500 \frac{\text{mV}}{\text{lux}}$  e ha un segnale di uscita con range



Figura 8.4: Luxmetro *HD 2021T*

$0 \div 10 \text{ V}$ . Assorbe una corrente di  $10 \text{ mA}$  con una temperatura operativa compresa tra  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Il valore di saturazione del luxmetro è di circa  $5000 \text{ lux}$ , oltrepassati i quali, i valori misurati risultano bloccati su questo valore.

A distanza fissa di  $1300 \text{ mm}$  dal porta-campione è posta una sorgente luminosa, una lampada professionale con  $400 \text{ W}$  di potenza della *LOT Quantum Design* mod. *LSN6016*, che presenta uno spettro di emissione compreso tra i  $350$  e  $1200 \text{ nm}$ , emettente un fascio luminoso, che dopo essere stato collimato e posto a fuoco attraverso una coppia di lenti, con distanza focale rispettivamente di  $750$  e  $1500 \text{ mm}$ , illumina il provino.



Figura 8.5: Sorgente luminosa con banco ottico di focalizzazione

Il sistema è in grado di monitorare lo spazio intorno al campione completando una sfera ideale. In tal modo è possibile ricostruire il solido fotometrico di emissione o riflessione di sorgenti luminose e materiali da costruzione. La movimentazione della macchina e la conseguente gestione della misura avvengono dall'esterno della camera oscura dove si trova il Goniometro, mediante un videoterminale che permette di lavorare sia in automatico che in manuale.

### 8.3.1 Procedimento di misura

Per prima cosa si colloca il provino sul portacampione, fissandolo nella parte posteriore con del nastro biadesivo, in modo da non interferire con il fascio luminoso incidente su di esso, poi si comincia ad inclinare il portacampione misurando con una livella graduata l'angolo di incidenza, fino a raggiungere quello desiderato. Una volta accesa la lampada va attesa circa un'ora che essa arrivi a temperatura di regime, dopodiché si può dare inizio alla misurazione vera e propria. Sigillata la camera oscura ove opera il Goniometro si opera completamente dall'esterno in modo da non creare interferenze, procedendo con questi step:

- Si accende la macchina;
- Si effettua la ricerca dello zero degli assi;
- Si settano i parametri di partenza ed arresto di *base* e *braccio*;
- Si setta la velocità di movimentazione degli organi;
- Si collega un computer portatile al terminale di controllo della macchina attraverso un cavo ethernet;
- Si avvia sul computer il software apposito di acquisizione dati;
- Si avvia la misura in modalità automatica, contemporaneamente all'acquisizione dei dati sul pc portatile.

Una volta avviata la misura, il sistema impiegherà circa due ore per terminare l'acquisizione dei dati. Al termine di essa verrà creato un file compresso in formato ".rar" al cui interno sono presenti tre file con estensione ".dat", denominati *channel01*, *channel02*, *channel03*. Rispettivamente essi contengono i valori di *Lux*, angolo di *base* ed angolo di *braccio*, campionati rispetto al tempo.

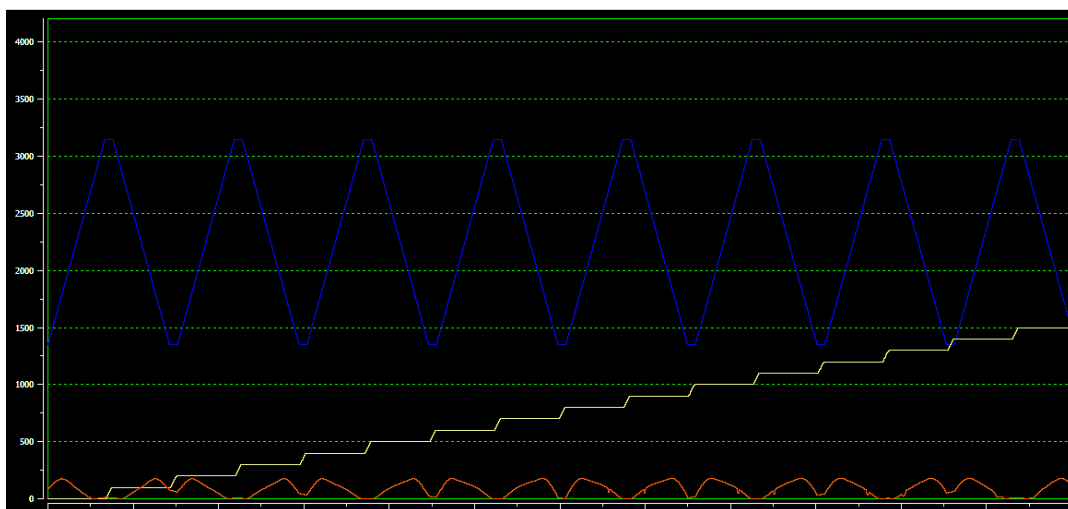


Figura 8.6: Esempio di visualizzazione dati del software d'acquisizione: Curva blu-braccio, curva gialla-base, curva rossa-lux



## 8.4 Lo spettrofotometro del LIFT

La spettrofotometria è quella branca della Fisica che studia la risposta dei materiali in termini di riflessione, assorbimento e trasmissione della radiazione luminosa, in funzione della lunghezza d'onda. La spettrofotometria copre le lunghezze d'onda del vicino infrarosso, del visibile e del vicino ultravioletto e si basa sull'utilizzo degli spettrofotometri, particolari strumenti di misura atti a valutare le caratteristiche proprie di risposta alla luce dei materiali. Gli spettrofotometri vengono solitamente distinti in base alle loro caratteristiche costruttive, al range di lunghezza d'onda sul quale operano, oppure in base alle modalità secondo la quale acquisiscono lo spettro. Lo spettrofotometro da campo del Laboratorio di Fisica Tecnica è uno strumento portatile della Konica Minolta mod. CM 2600D. Tale strumento, presentato in Figura 8.7 - Spettrofotometro CM 2600D: componenti e principio di funzionamento, è un dispositivo commerciale in grado di misurare la riflettanza di qualsiasi materiale diffondente, in una banda compresa tra 360 nm e 740 nm coprendo la porzione finale dello spettro ultravioletto e lo spettro visibile. Lo strumento è in grado di misurare la componente di riflessione regolare e diffusa separatamente.

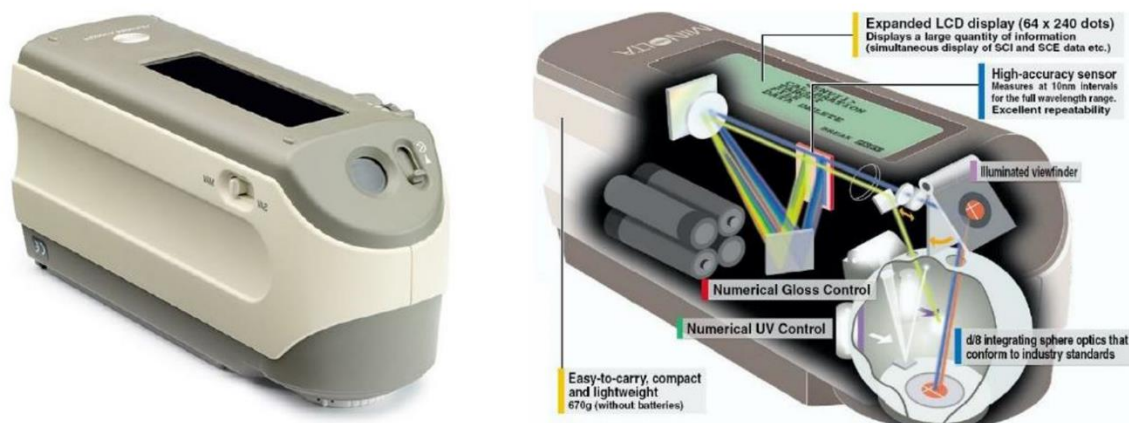


Figura 8.7 - Spettrofotometro CM 2600D: componenti e principio di funzionamento

Esso gestisce in modo completo la componente UV (inclusa, esclusa o aggiustata) e calcola simultaneamente la misura della Componente Speculare Inclusa ed Esclusa (SCI/SCE), riducendo così i tempi e gli errori di impostazione dello strumento nel passaggio da una misura ad un'altra. Le aree di misura selezionabili dallo strumento sono dei dischi con diametro variabile da 3 mm e 8 mm ed il range spettrale di misura varia tra 360 nm e 740 nm con intervalli di 10 nm. I dati sono visualizzati su un display LCD retroilluminato. La misurazione avviene poggiando lo strumento a contatto diretto con il campione da caratterizzare.

Lo spettrofotometro in questione è costituito dalle seguenti componenti:

- Sfera Integratrice o Sfera di Ulbricht di 80 mm di diametro, per la misura di materiali dal comportamento diffondente in riflessione. Essa è rivestita di solfato di bario, materiale con una riflettanza superiore al 90-95% nello spettro visibile.
- Foto-rilevatore per la misura delle componenti di riflessione diretta e totale emisferica della radiazione luminosa riflessa dal campione;
- Sistema di specchi;
- Sistema di acquisizione a fotodiodi per la scomposizione spettrale della misura;
- Tre sorgenti luminose (due al tungsteno per le misure nello spettro visibile e una al deuterio per le misure nello spettro UV).

La sfera di Ulbricht è una sfera cava con superficie interna perfettamente diffondente e altamente riflettente, con una riflettanza pari a 0,95 circa, che serve a misurare il potere di riflessione dei campioni con comportamento non speculare attraverso le interreflessioni che si generano all'interno di essa. Le misure vengono effettuate attraverso un fotorilevatore fissato dietro una piccolissima fessura presente sulla superficie della sfera; il rilevatore è schermato con una superficie diffondente al fine di evitare che i raggi luminosi, oggetto di misurazione possano, incidere direttamente su di essa, falsando così i risultati. Per come è realizzata la sfera, la fessura attraverso cui passano le radiazioni luminose è a tutti gli effetti un corpo nero, che assorbe totalmente la radiazione incidente, senza rifletterla. Il fotorilevatore o fotocellula è un dispositivo in grado di rilevare la radiazione elettromagnetica, fornendo in uscita un segnale in corrente o una differenza di potenziale proporzionali all'intensità della radiazione rilevata. Prima di effettuare una qualsivoglia misura è strettamente necessario calibrare lo spettrofotometro in funzione del nero e del bianco. La prima calibrazione è quella del nero, anche se è più corretto parlare di misura dello zero, con il nero in realtà si va a misurare l'energia dell'ambiente circostante attraverso una sorgente luminosa posta in alto sulla sfera integratrice e posizionando lo strumento verso l'alto. Fatto questo, si passa alla calibrazione del bianco. La calibrazione del bianco la si effettua, a differenza di quella del nero, ponendo in misurazione un campione. Per questo lavoro il campione utilizzato è stato lo Spectralon. Lo strumento è equipaggiato con due sorgenti luminose: una lampada al deuterio emettente raggi UV, mentre una in tungsteno emettente raggi nello spettro del visibile; le lampade possono essere contemporaneamente accese durante la misura oppure quella in deuterio può anche essere spenta. La luce che viene riflessa dal campione in esame è canalizzata in due fessure poste in alto sulla parte superiore della sfera: una che canalizza la riflessione speculare e l'altra quella diffusa. In tal maniera lo strumento calcola, dalla somma delle due componenti di riflessione, la SCI (Specular Component Included, componente speculare inclusa) e ricava quella SCE (Specular Component Excluded,

componente speculare esclusa) dalla sottrazione con quella totale, ovvero più propriamente nel seguente modo:

$$SCI - SC = SCE \quad (8.8)$$

Durante la misura lo strumento non fa altro che mettere a rapporto l'energia riflessa dal campione con quella del materiale bianco di riferimento:

$$\frac{E_{sfera\ campione}}{E_{sfera\ riferimento}} \quad (8.9)$$

Il risultato di tal rapporto verrà calcolato mediante la fotocellula accennata in precedenza. Entrando nello specifico l'energia del campione che stiamo misurando sarà compresa nel range tra l'energia misurata per il bianco ed il nero. Più precisamente la riflettanza del campione viene calcolata in questo modo:

$$\rho = \frac{E_{riflesso}}{E_{incidente}} \quad \rho_{campione} = \frac{E_{campione} - E_N}{E_B - E_N} \quad (8.10)$$

In cui però si faccia attenzione che  $E_B - E_N < E_{incidente}$ , in particolare è un valore inferiore all'unità, per tal motivo la riflettanza del campione viene ad essere corretta e cioè per ogni lunghezza d'onda  $\lambda$  si ottiene:

$$\rho_{campione}(\lambda) \cdot C \quad (8.11)$$

Dove C è la curva di calibrazione del materiale di riferimento (Spectralon).

$$\rho_{campione}(\lambda_1) \cdot C(\lambda_1) = \rho_{misura}(\lambda) \quad (8.12)$$

Si faccia presente che lo spettrofotometro impiegato consente di misurare solo le lunghezze d'onda nel campo del visibile, perciò si è considerato che tutti i materiali misurati si comportino nel NIR (NearInfraRed) come i materiali non selettivi che presentano valori di riflessione nello spettro solare circa uguali a quelli nel visibile.

## 9 CAMPAGNA DI MISURE SPERIMENTALI IN LABORATORIO

### 9.1 Campioni analizzati

Le misure eseguite riguardano un campione di vernice con sfere di vetro retro-riflettente, una guaina bituminosa con ghiaia dal comportamento misto diffusivo-RR, un campione con vernice per esterni al quarzo e un campione con vernice per esterni *cool*. I test sono stati effettuati per analizzare le modalità di distribuzione spaziale delle riflessioni (emettanza) e per la determinazione della riflettanza (Morini, et al. 2017). I grafici polari riportati mostrano la distribuzione della radiazione riflessa (emettanza) per angoli azimutali pari a  $80^\circ$  (ovvero sul piano di mezzeria del fascio incidente).

#### 9.1.1 Spectralon

Lo Spectralon è un fluoro-polimero che ha il valore più alto di riflettanza diffusa di qualsiasi altro materiale o rivestimento conosciuto, sia sulle lunghezze d'onda dell'ultravioletto, su quelle dell'infrarosso e su quelle del visibile. Il suo comportamento di risposta alla radiazione luminosa incidente segue la legge del coseno, ovvero riflette in maniera diffusa uniforme tutta la luce incidente su di esso. Esso mostra quindi un comportamento completamente lambertiano, tanto da essere costruito in una grande varietà di tipologie (forma e riflettanza); in genere è utilizzato come campione di materiale per la calibrazione di altri strumenti di misura, per sfere integratrici e come componente ottica nei laser.



Figura 9.1 - Campione di Spectralon a disposizione del LIFT

#### 9.1.2 Vernice retro-riflettente alle sfere di vetro

La tinta RR utilizzata per la campagna di misure è prodotta con l'utilizzo di un pigmento altamente riflettente combinato a delle microsfele di vetro. Si presenta come una vernice semitrasparente di colore grigiastro. L'effetto catarifrangente si attiva quando la superficie verniciata viene colpita da un fascio luminoso: a questo punto, una buona parte della luce incidente viene riflessa nella direzione da cui proviene. La tinta è a base acrilica a solvente, contenente un pigmento molto riflettente e delle microsfele di vetro di diametro compreso tra i  $35\ \mu\text{m}$  ed i  $50\ \mu\text{m}$ , con rotondità del 95% ed un indice di rifrazione pari a 2.2.

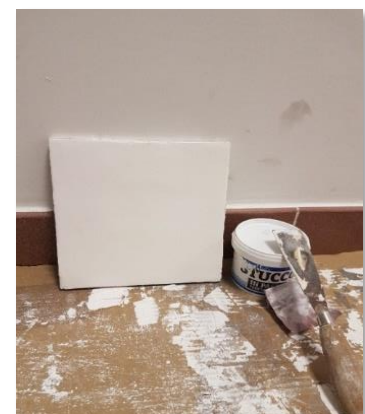


Figura 9.2 - Preparazione del campione

Inoltre, le microsferi presenti nella finitura silver sono rivestite di un film di alluminio che ne migliora le proprietà retroriflettenti. Prima di tutto è stata sagomata una tavoletta di legno 20 cm x 20 cm delle dimensioni del porta-campione, dopo essere stata carteggiata è stata stesa su di essa una mano di stucco di 1.5 mm. Una volta essiccato, lo stucco è stato carteggiato, ripassato con una mano più leggera e nuovamente carteggiato in modo tale da far sì che il piano sia perfettamente livellato e privo



Figura 9.3 - Campione di tinta retro-riflettente

di qualsiasi foro o avvallamento. Terminata questa fase, si è proceduto alla verniciatura vera e propria. La tinta è stata diluita all'interno dell'apposito contenitore con scala graduata, fornito nella confezione del prodotto, con del solvente poliuretano in parti uguali 1:1. Inizialmente si era pensato di stendere la tinta con il pennello, ma dopo alcune prove, si è potuto constatare l'inefficacia di tale metodo, in quanto la stesura non avveniva in modo omogeneo, poiché venivano a crearsi alcuni solchi più o meno marcati. Per ovviare l'inconveniente, è stata acquistata appositamente per questo scopo la Spray Gun direttamente dal fornitore

della vernice stessa. Grazie alla verniciatura spray è stato possibile stendere in maniera uniforme la tinta sul campione. In Figura 9.3 è possibile esaminare il campione terminato, pronto per il posizionamento sul porta-campione del Goniometro.

### 9.1.3 Guaina bituminosa retro-riflettente

Questo campione è composto da una guaina bituminosa con granuli di ghiaia di piccole dimensioni casualmente orientati. Dai grafici polari riportati nelle sezioni seguenti si può notare che il suo comportamento presenta sia una componente retroriflettente sia diffusiva. Questo materiale viene utilizzato come copertura impermeabilizzante per tetti.



Figura 9.4 - Guaina bituminosa con ghiaia, mostra un comportamento misto diffusivo-RR.

### 9.1.4 Vernice al quarzo e vernice cool

La vernice al quarzo è un lavabile acrilico per esterni, presente con una grana media, con un'altissima resistenza alle intemperie. Presenta un colore bianco opaco ed una superficie ruvida. La vernice al quarzo è una pittura composta al suo interno da microgranuli di quarzo, resine sintetiche e acqua. Questo tipo di tinte, negli ultimi anni, hanno visto un grande impiego nell'edilizia grazie alle ampie caratteristiche che presentano, sono infatti molto resistenti alla muffa, resistenti al tempo e sono piuttosto economiche. Inoltre, la presenza di quarzo in grana media conferisce alla tinta un'ottima resistenza agli sbalzi di temperatura ed agli agenti atmosferici. La vernice *cool* analizzata è una pittura nanostrutturata con effetto termoisolante e termoriflettente e con caratteristiche di elasticità, idrorepellente ed antialga. Presenta una colorazione bianca opaca ed un comportamento diffusivo con una riflettanza percentuale decisamente elevata ed è utilizzato per l'ottimizzazione energetica degli edifici.

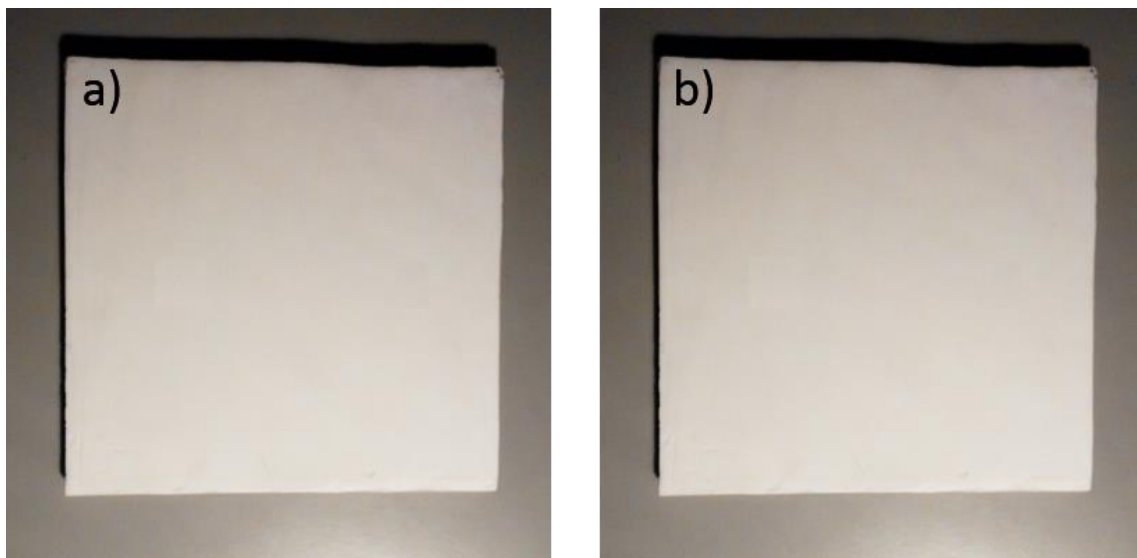


Figura 9.5 - Campioni di a) vernice al quarzo e b) vernice cool termoisolante.

## 9.2 Risultati delle misure

### 9.2.1 Premessa

Durante la sua movimentazione, il *braccio* del Goniometro, è in grado di compiere una rotazione completa attorno all'asse al quale è incernierato. Questo movimento consente di misurare la riflessione in ogni punto di una superficie corrispondente ad una calotta sferica centrata sul campione. Tuttavia, nel momento in cui l'angolo di *base* supera i  $75^\circ$ , ovvero metà della sua corsa, il *braccio*, passa davanti al fascio luminoso lungo un arco crescente all'aumentare dell'angolo di *base*. Questo provoca un oscuramento del campione, con una conseguenziale brusca caduta dei valori di illuminamento. Questi, terminato il passaggio del *braccio*, tendono rapidamente a risalire fino al

valore corretto. In Figura 9.6 si può osservare questo fenomeno analizzato sullo *Spectralon* per un angolo di incidenza del fascio luminoso sul campione pari a  $8^\circ$ .

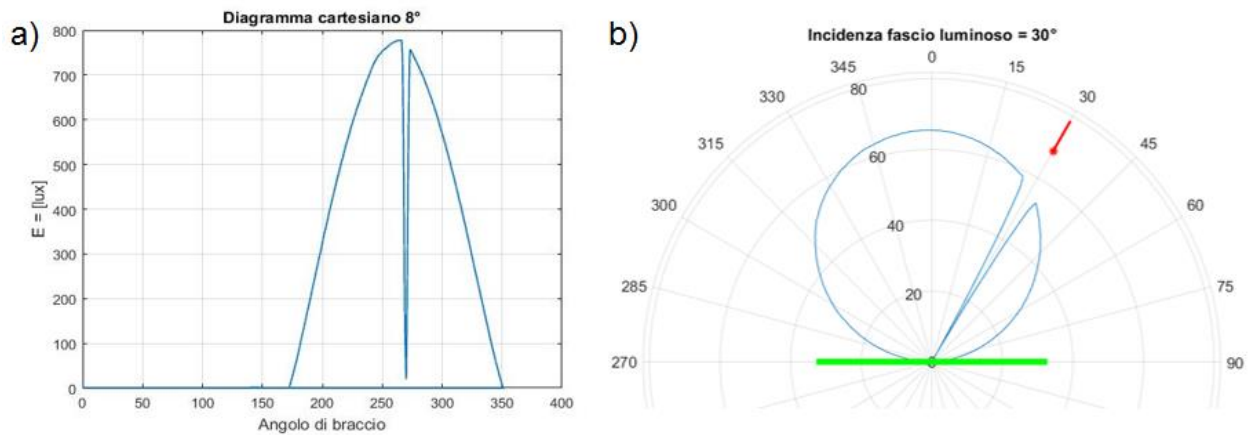


Figura 9.6 - Caduta dei valori per interferenza del braccio con il fascio: *Spectralon* cartesiano  $8^\circ$  e polare  $30^\circ$ .

Nella Figura 9.7 si può vedere la sovrapposizione di tutti i diagrammi per ogni *base* superiore ai  $75^\circ$ ; la finestra di oscuramento è tanto più ampia quanto cresce il valore dell'angolo di *base*.

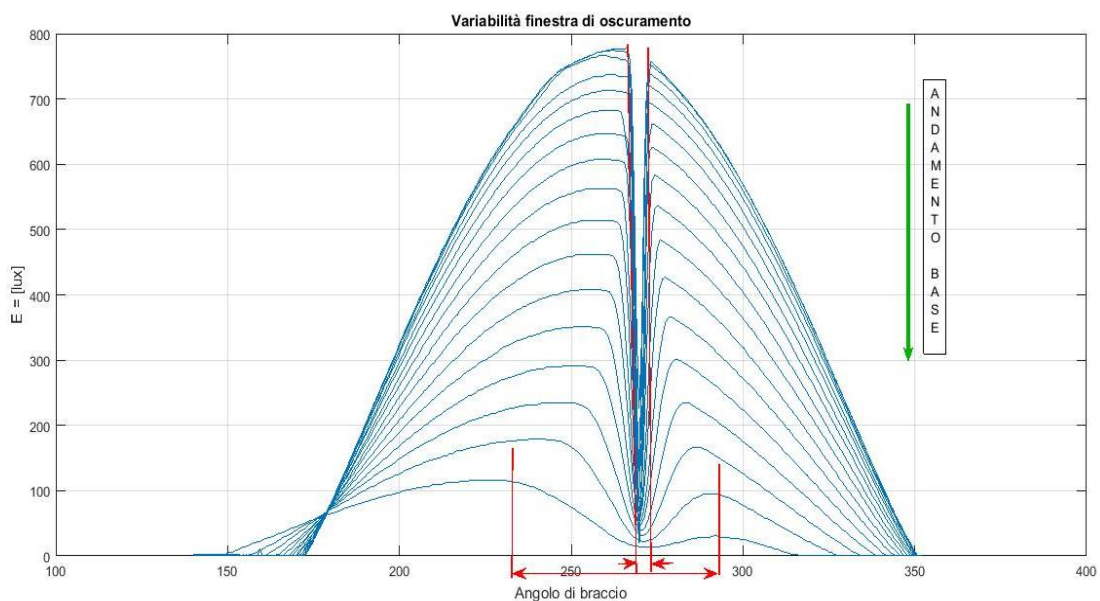


Figura 9.7: Rappresentazione della variabilità della finestra di oscuramento

Successivamente, grazie ad un attento post-processing mediante il software *Matlab* le cadute dei valori di illuminamento dovute ad interferenza vengono corrette in automatico e viene recuperato l'andamento corretto della curva, come mostrato in Figura 9.8.

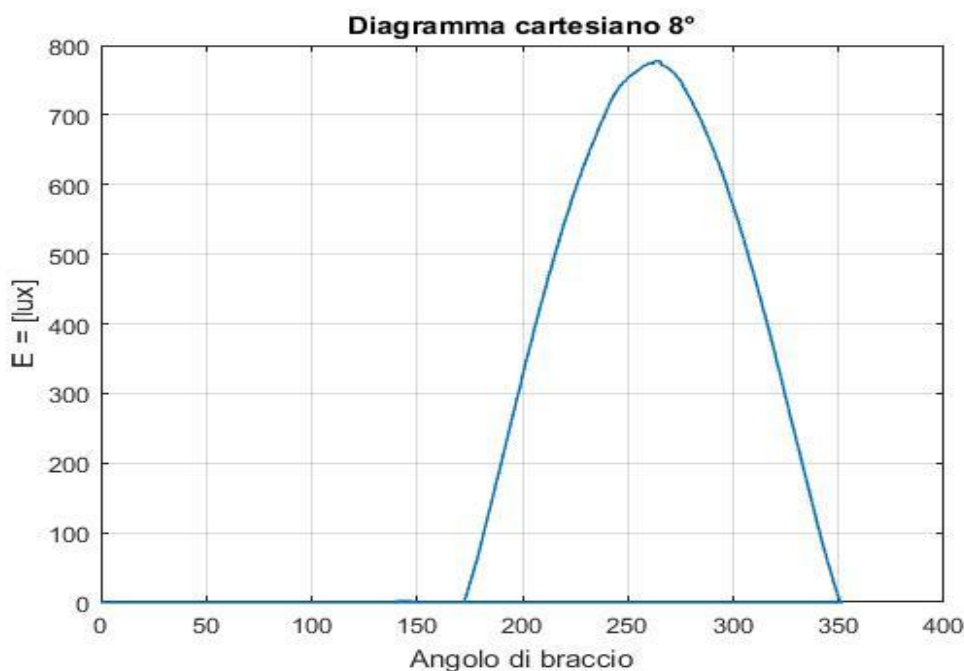


Figura 9.8: Dopo il post-processing

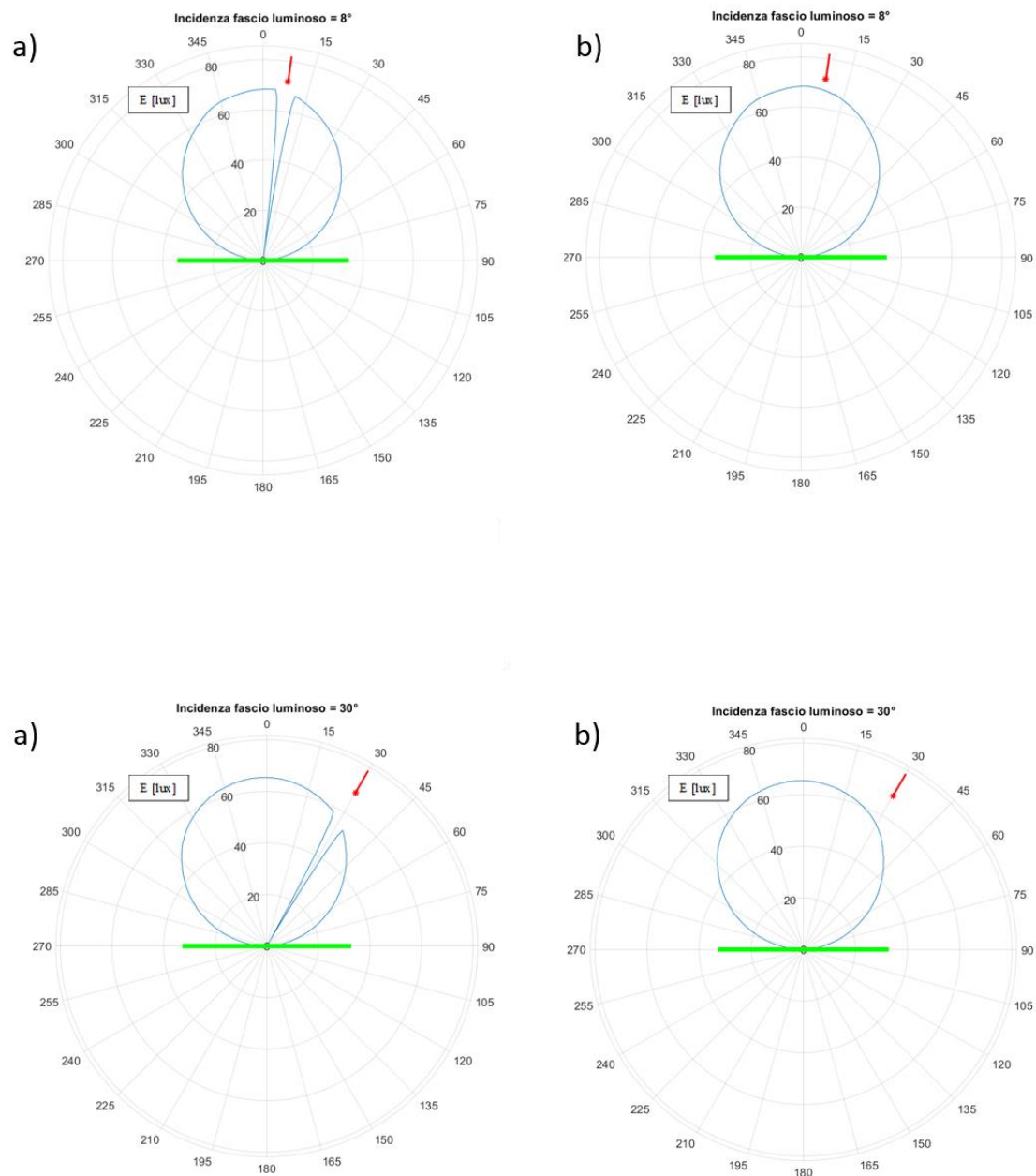
La caduta dei valori di illuminamento avviene sempre nelle stesse finestre di angolo di *braccio*, per questo motivo, all'interno del *Main* del codice *Matlab*, viene richiamata più volte una funzione esterna, creata appositamente per eliminare la caduta dei valori, tante volte quante sono le basi con i valori di illuminamento tagliati, ovvero 16 volte. Questa funzione richiede in input la matrice in cui sono presenti tutti i dati della misurazione, il valore di angolo identificativo della *base* che si vuole correggere, l'angolo di inizio della finestra di oscuramento del fascio luminoso e l'angolo in cui termina il passaggio del *braccio* del Goniometro davanti la luce. L'output generato è sempre la matrice in ingresso, solo che una volta processata essa fuoriesce corretta, con i valori di illuminamento in cui vi era la caduta, recuperati. Questo recupero viene fatto attraverso un'interpolazione non lineare dei tratti precedenti e successivi alla finestra oscurata, in modo tale da prendere le tangenti alla curva nell'istante immediatamente precedente e in quello successivo alla caduta, per poi intersecarle in modo da trovare un punto supposto corrispondere al massimo valore di illuminamento. Successivamente viene fatta passare per questo punto una *Spline*, ovverosia una curva interpolante descritta da un polinomio di terzo grado, in modo tale da recuperare l'andamento che la curva avrebbe avuto se non ci fosse stato l'oscuramento del fascio luminoso.

### 9.2.2 Diagrammi polari Spectralon

Per lo Spectralon si è effettuata la misurazione ad angoli di incidenza del fascio luminoso pari a 8° e 30°; la misura a 45° e 60° non è stata effettuata, poiché, essendo il campione di dimensioni ridotte (13 cm x 10 cm), nel momento in cui l'angolo di incidenza supera i 43°.ca, lo spot luminoso ellittico



dal fascio di luce incidente sul provino fuoriesce dal campione falsando la prova. Come ci si aspettava, lo Spectralon, si comporta da materiale Lambertiano, a qualsiasi angolo di incidenza del fascio.



### 9.2.3 Diagrammi polari tinta Retro-Riflettente

Per la tinta retroriflettente con tecnologia a microsferi di vetro, è stata effettuata la misurazione ad angoli di incidenza di 8°, 30°, 45° e 60° dal momento che il campione è stato preparato della misura di 20x20cm.

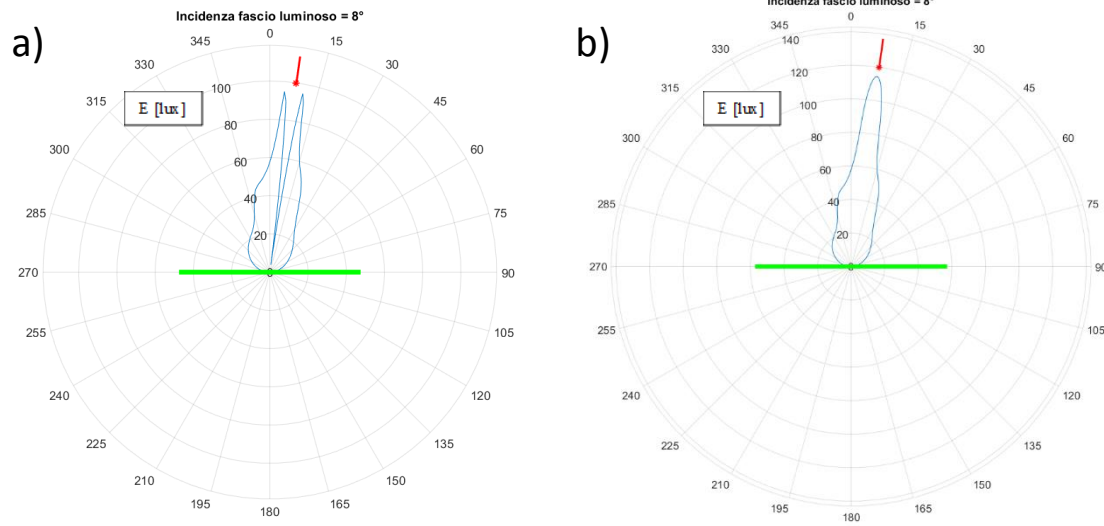


Figura 9.9: Diagramma polare materiale RR incidenza 8°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

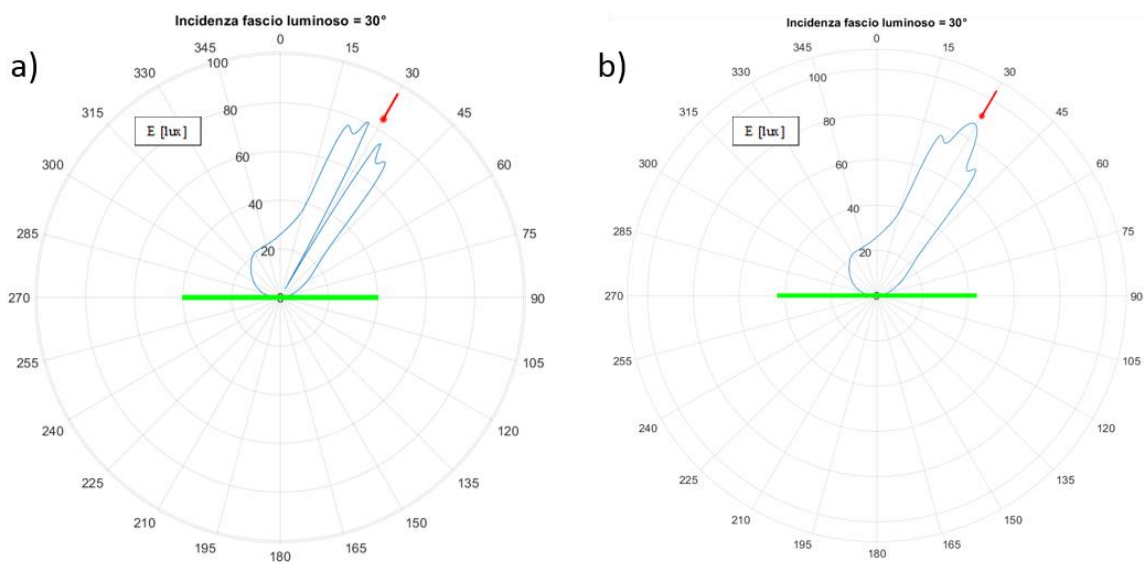


Figura 9.10 - Diagramma polare materiale RR incidenza 30°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

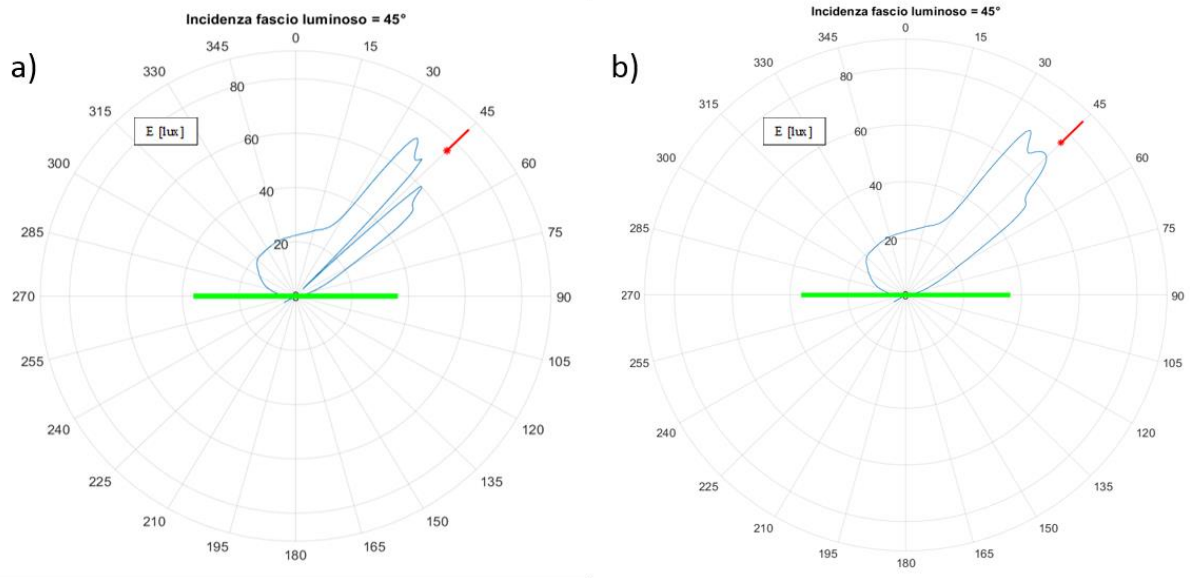


Figura 9.11 - Diagramma polare materiale RR incidenza 45°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

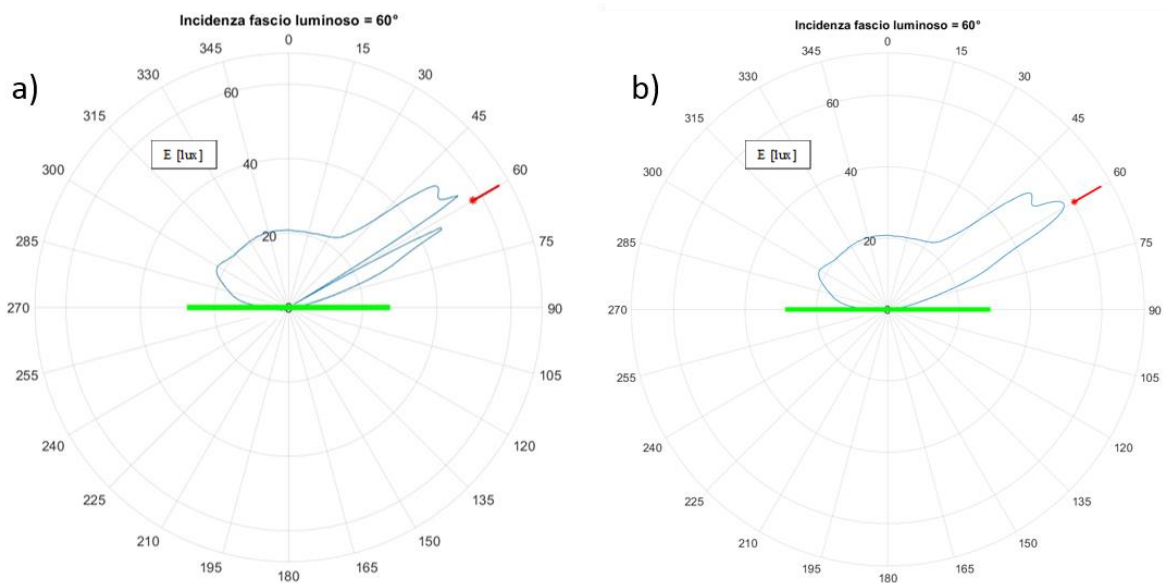


Figura 9.12 - Diagramma polare materiale RR incidenza 60°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

Dai diagrammi polari ottenuti e sopra riportati si può evincere che questa vernice, ha come comportamento prevalente di risposta alla radiazione incidente quello retroriflettente, con una quota parte di riflessione crescente all'aumentare dell'angolo di incidenza del fascio luminoso.

### 9.2.4 Diagrammi polari guaina bituminosa retro-riflettente

Per la guaina bituminosa sono state effettuate le misure per angoli di incidenza di  $8^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ . Il campione possiede un comportamento quasi retro-riflettente: la distribuzione della radiazione riflessa infatti non segue la legge del coseno e la direzione di riflessione prevalente è nel quadrante della direzione di incidenza del fascio. Nella Figura 9.13 sono stati riportati solo i diagrammi polari già corretti.

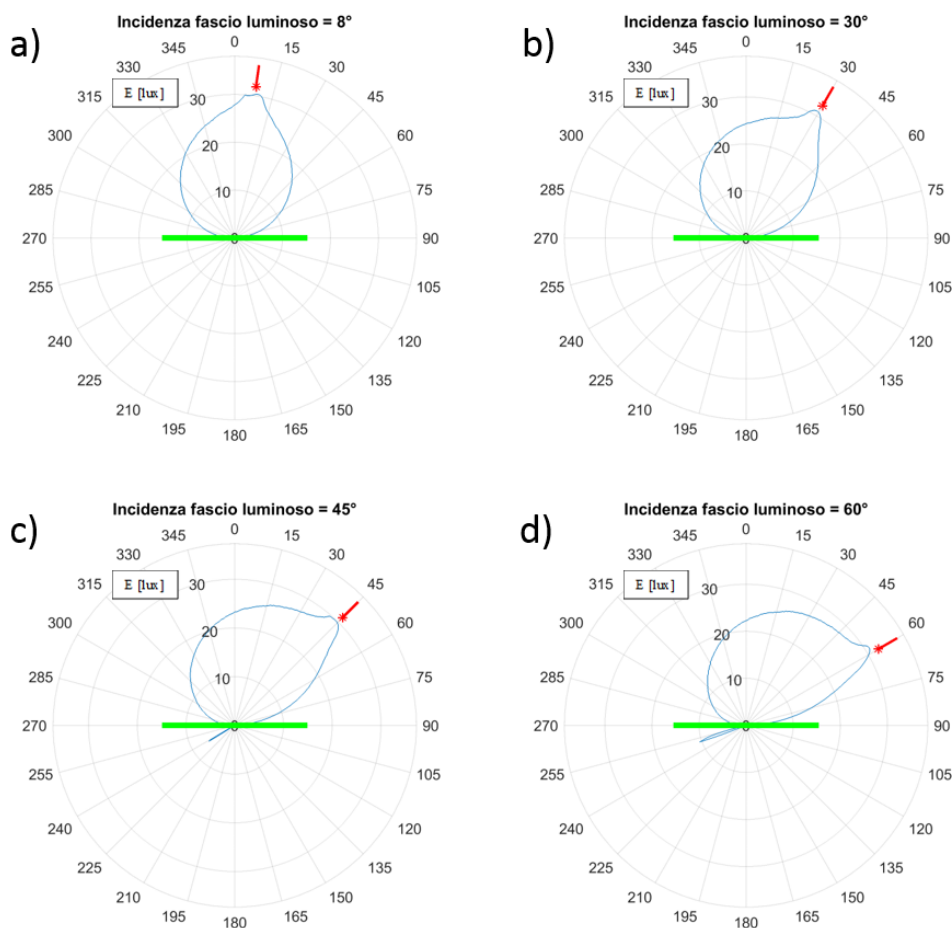


Figura 9.13 - Diagrammi polari guaina bituminosa: a) incidenza  $8^\circ$ , b) incidenza  $30^\circ$ , c) incidenza  $45^\circ$ , d) incidenza  $60^\circ$ .

### 9.2.5 Diagrammi polari vernice al quarzo e vernice cool

Per la pittura al quarzo e per la vernice cool, sono state effettuate le misure per angoli di incidenza di  $8^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$  dal momento che il campione è stato preparato della misura di  $20 \times 20$  cm. Il campione si comporta come un materiale lambertiano. Nella Figura 9.14 e Figura 9.15 sono stati riportati solo i diagrammi polari già corretti, in quanto la correzione effettuata non differisce da quella già presentata nel campione di riferimento diffusivo (Spectralon).

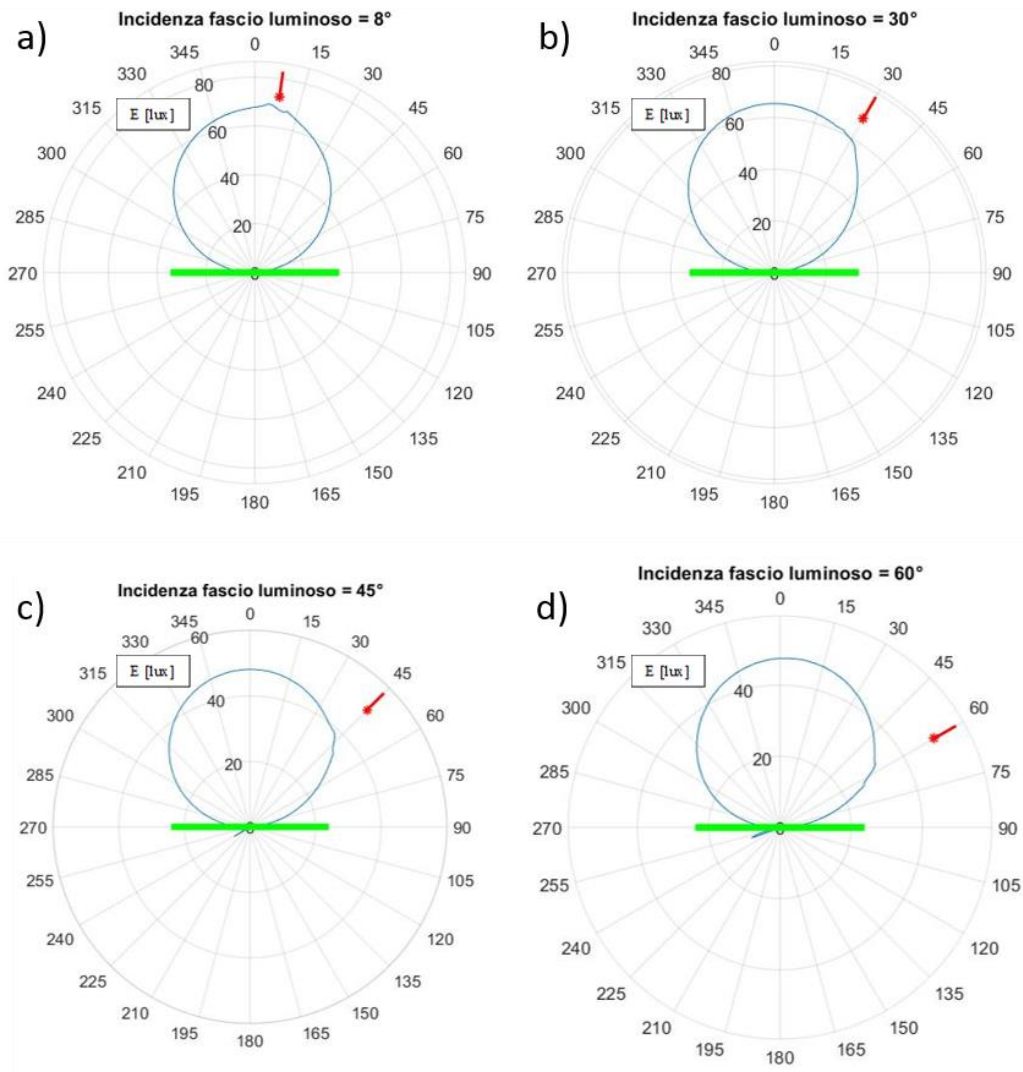


Figura 9.14 - Diagrammi polari vernice al quarzo: a) incidenza 8°, b) incidenza 30°, c) incidenza 45°, d) incidenza 60°.

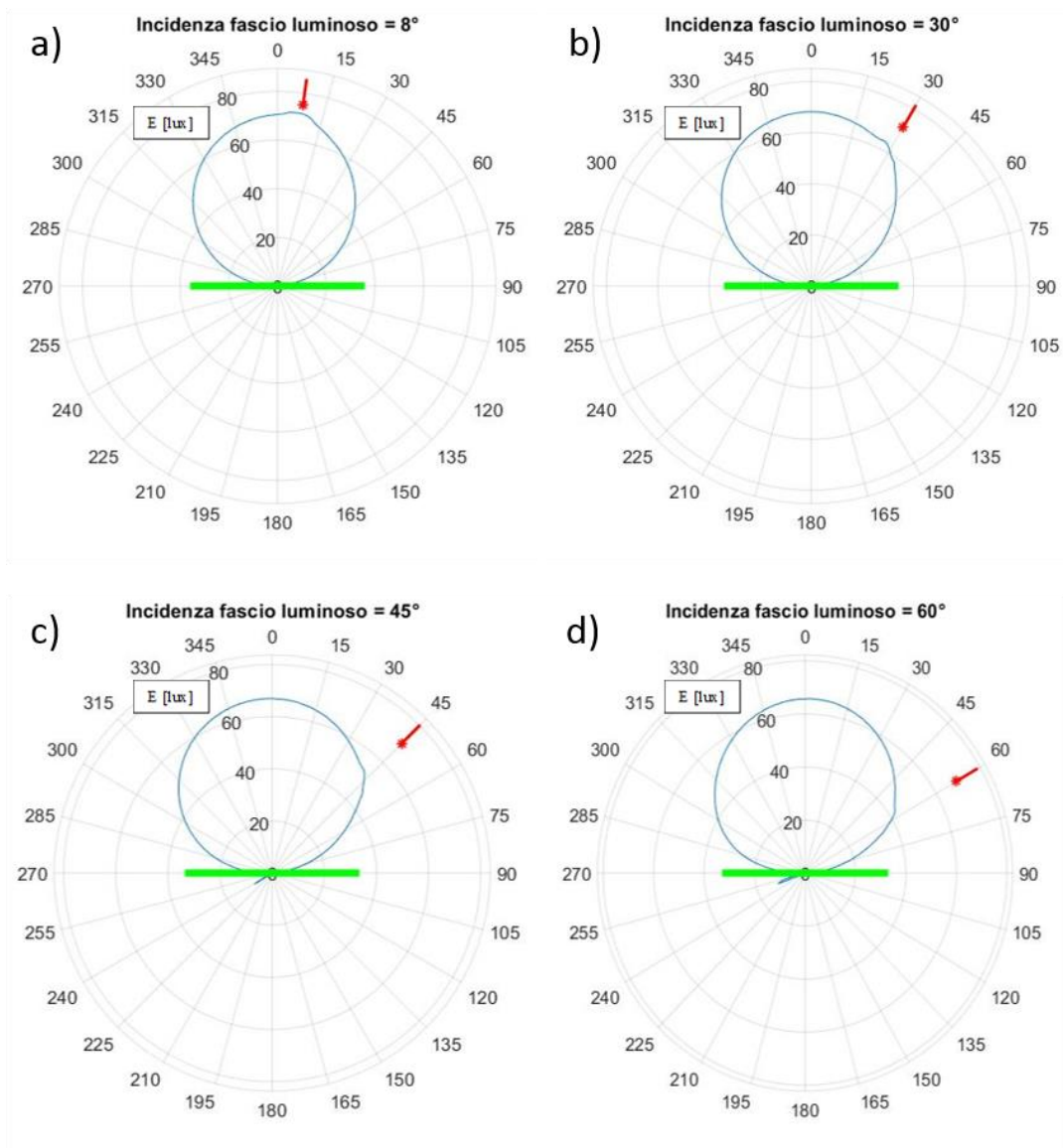


Figura 9.15 - Diagrammi polari vernice cool: a) incidenza 8°, b) incidenza 30°, c) incidenza 45°, d) incidenza 60°.

### 9.3 Calcolo dell'energia riflessa

Partendo dalla definizione di flusso luminoso e dal sistema di riferimento utilizzato in Figura 9.16:

$$d\phi_{riflesso} = E(\theta, \varphi) dA \quad (9.1)$$

$$dA = r d\varphi r \sin \varphi d\theta \Rightarrow d\phi = E(\theta, \varphi) r^2 \sin \varphi d\theta d\varphi \quad (9.2)$$

Passando agli integrali si ottiene:

$$\phi_{riflesso} = r^2 \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} E(\theta, \varphi) \sin \varphi d\theta d\varphi \quad (9.3)$$

Dove:

$\phi_{riflesso}$  sta ad indicare il flusso luminoso riflesso dal campione;

$E(\theta, \varphi)$  rappresenta i valori di illuminamento misurati dal luxmetro;

$dA$  rappresenta la calotta sferica infinitesima;

$r$  indica la distanza dal fotodiode del luxmetro al centro dello spot luminoso;

$\varphi$  rappresenta l'angolo di *braccio*;

$\theta$  rappresenta l'angolo di *base*;

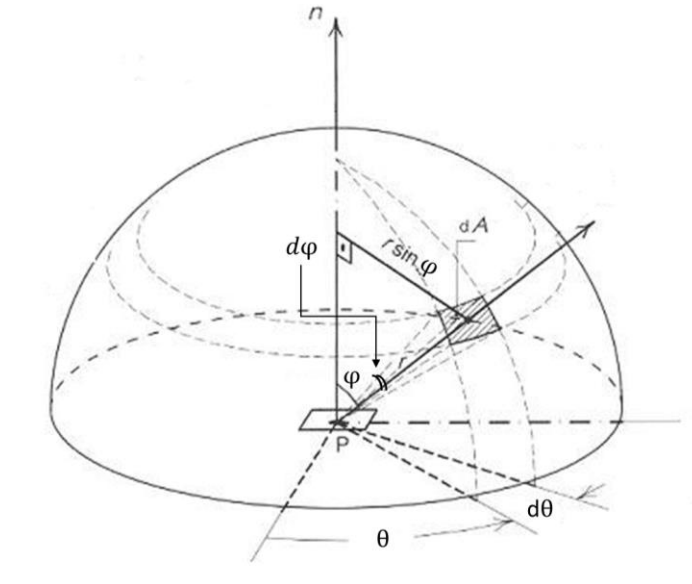


Figura 9.16 - Sistema di riferimento per l'impostazione del calcolo del flusso luminoso riflesso dal campione.

Per verificare l'esattezza del procedimento di calcolo appena impostato si è ipotizzato che:

$$E(\theta, \varphi) = \text{costante} = E \quad (9.4)$$

$$\phi_{r_{EC}} = E \cdot r^2 \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \sin \varphi \, d\theta \, d\varphi \quad (9.5)$$

$$\phi_{r_{EC}} = E \cdot r^2 \cdot [-\cos \varphi]_0^{\pi} \cdot [\theta]_0^{2\pi} = E \cdot r^2 \cdot 2 \cdot 2\pi \quad (9.6)$$

$$\phi_{r_{EC}} = 4\pi r^2 \cdot E \quad (9.7)$$

Che è esattamente il valore del flusso luminoso, calcolato per un campo di illuminamento  $E = \text{cost}$ , valutato sullo steradiante completo, ovvero su tutta una sfera intorno al campione. Passando quindi ad un dominio di integrazione al finito, discretizzato sulla base del funzionamento del Goniometro, ed adottando come metodo di integrazione numerica il *metodo dei rettangoli*, otteniamo:

$$\phi_{riflesso} = r^2 \sum_{\theta=\theta_{min}}^{\theta=\theta_{max}} \sum_{\varphi=\varphi_{min}}^{\varphi=\varphi_{max}} \bar{E}(\theta, \varphi) \sin \bar{\varphi} \, \Delta\theta \, \Delta\varphi \quad (9.8)$$

Dove:

$$\bar{E}(\theta, \varphi) = \frac{E_{i+1} + E_i}{2} \quad (9.9)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi_{i+1} + \varphi_i}{2} \quad (9.10)$$

$$\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i \quad (9.11)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i \quad (9.12)$$

Dove il pedice  $i$  sta ad indicare l'identificativo di riga della matrice contenente tutti i valori della misurazione, già elaborati e riordinati dal codice di calcolo *Matlab*. Una volta ottenuto quindi il flusso luminoso riflesso dal campione si passa al calcolo della riflettanza con questa formula:

$$\rho_{\text{campione}} = \frac{\phi_{\text{riflesso}}}{\phi_{\text{incidente}}} \quad (9.13)$$

#### 9.4 Misura dell'energia incidente

Per eseguire questa misurazione si è utilizzato un luxmetro da campo *Testo* mod. 540. Questo ha un campo di misurazione compreso tra 0 e 99999 *lux*, una precisione di  $\pm 3$  *lux*, ed una risoluzione di 1



Figura 9.17: Luxmetro "Testo 540"

*lux* operante su tutto il campo del visibile. Posizionando il sensore manualmente sullo *spot luminoso* presente sul campione, sono state prese 9 misurazioni dell'illuminamento presente su tutta l'area, di volta in volta annotando i valori letti sul display calcolandone nello *script* la media aritmetica in modo tale da avere un unico valore per l'illuminamento presente sul campione. In Figura 9.18 è riportata una schematizzazione del campione montato sul Goniofotometro ed illuminato dal fascio di luce proveniente dalla lampada. Lo *spot luminoso* è di forma ellittica, con diametro minore fisso, pari a 78 mm e diametro maggiore crescente all'aumentare dell'angolo di

incidenza della radiazione luminosa incidente.

I 9 punti evidenziati in Figura 9.18 sullo *spot luminoso* ellittico indicano le posizioni in cui è stato prelevato il valore di illuminamento con il luxmetro da campo.



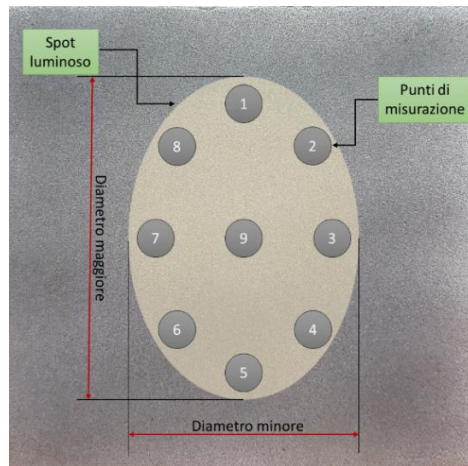


Figura 9.18: Spot luminoso ellittico sul campione e punti di prelevazione dei valori di illuminamento

I valori di *lux* misurati manualmente vengono riportati nello script *Matlab* dove viene calcolata la media aritmetica delle misurazioni prelevate. Moltiplicando quest'ultima per l'area dello *spot luminoso* si ottiene il valore del flusso luminoso medio incidente sul campione:

$$\phi_{medio\ incidente} = E_{medio\ incidente} \cdot A_{spot} \quad (9.14)$$

Ove:

$$A_{spot} = \pi \cdot \frac{D_{magg}}{2} \cdot \frac{D_{min}}{2} \quad (9.15)$$

Con:

$\phi_{medio\ incidente}$  è il valor medio del flusso luminoso incidente sul campione

$E_{medio\ inc.}$  è il valor medio dell'illuminamento misurato sullo spot luminoso

$A_{spot}$  è l'area dello spot luminoso (ellisse)

$D_{magg}$  è il diametro maggiore dell'ellisse

$D_{min}$  è il diametro minore dell'ellisse

Ottenendo il valor medio del flusso luminoso incidente sul campione.

## 9.5 Coefficienti di riflessione

Mediante il procedimento per il calcolo della riflettanza di cui si è discusso nel paragrafo precedente, si sono ricavati i valori sperimentali riportati in Tabella 9.1:

Tabella 9.1 - Valori dei coefficienti di riflessione in funzione degli angoli di incidenza

<b>VERNICE AL QUARZO</b>				
	Area spot (m <sup>2</sup> )	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
<b>8°</b>	0.0049	189.2	222.2	85.1
<b>30°</b>	0.0055	184.6	209.5	88.1
<b>45°</b>	0.0071	136.4	205.7	66.2
<b>60°</b>	0.0102	136.9	188.7	72.5
<b>VERNICE COOL</b>				
	Area spot (m <sup>2</sup> )	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
<b>8°</b>	0.0049	195.1	222.2	87.7
<b>30°</b>	0.0055	190.9	209.5	91.1
<b>45°</b>	0.0071	189.8	205.7	92.2
<b>60°</b>	0.0102	175.4	188.7	93.0
<b>VERNICE RETRO-RIFLETTENTE</b>				
	Area spot (m <sup>2</sup> )	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
<b>8°</b>	0.0049	84.9	222.2	38.2
<b>30°</b>	0.0055	81.9	209.5	39.1
<b>45°</b>	0.0071	80.4	205.7	39.1
<b>60°</b>	0.0102	79.8	188.7	42.3
<b>GUAINA BITUMINOSA</b>				
	Area spot (m <sup>2</sup> )	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
<b>8°</b>	0.0049	66.9	222.2	30.1
<b>30°</b>	0.0055	63.3	209.5	30.2
<b>45°</b>	0.0071	66.0	205.7	32.1
<b>60°</b>	0.0102	70.2	188.7	37.2

## 9.6 Misure nei laboratori dell'INRIM

### 9.6.1 Configurazione setup

Come accennato, dal momento che le misure ottenute mediante il Goniometro del LIFT erano affette da errore di inserzione dovuto all'interferenza del braccio con il fascio incidente, gli andamenti della BRDF sono stati corretti numericamente. Per la ricostruzione dell'andamento nell'intervallo cieco si sono usate due polyfit per trovare l'intersezione tra le curve subito a destra e subito a sx del suddetto intervallo; infine si è utilizzata una spline passante per la suddetta intersezione per ricostruire l'andamento. Questa ricostruzione numerica necessita di una verifica per determinare la bontà del procedimento. Per fare ciò, i laboratori dell'INRIM di Torino hanno messo a disposizione la strumentazione per tale verifica, effettuando un'analisi della radiazione riflessa (valutata in termini di luminanza) in prossimità di piani azimutali rientranti negli angoli ciechi riscontrati nell'analisi sperimentale del setup del LIFT. Il setup infatti, sfruttando una maggiore distanza tra sensore e campione ha permesso di monitorare direttamente la luminanza, su un piano con divergenza  $\delta_{div}=2^{\circ}64''$  rispetto al fascio incidente ( $\theta_{inc}-\delta_{div}$  rispetto alla normale al campione). In tal modo si è potuto ottenere un dato sperimentale che, nel caso delle misure effettuate al LIFT, non era effettivamente a disposizione in quanto era stato ricostruito mediante correzione numerica. La configurazione del setup è schematizzata in Figura 9.19 in cui sono riportate anche le distanze in gioco.

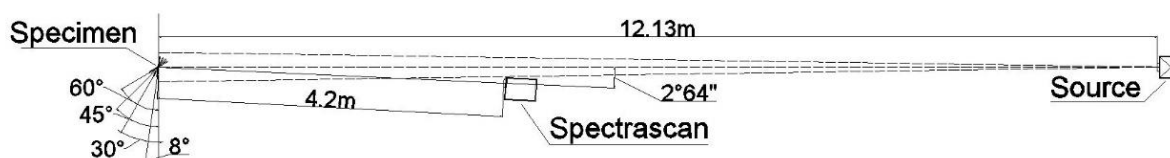


Figura 9.19 - Configurazione del setup nei laboratori dell'INRIM (Torino).

Lo strumento di misura (Spectrascan), non potendo ruotare intorno al campione sul piano di divergenza esaminato, ha permesso il monitoraggio solo di un angolo (intersezione tra il piano meridiano contenente il fascio e il piano con divergenza  $\delta_{div}=2^{\circ}64''$  a una distanza di 4.2m dal centro del campione. Il sistema di movimentazione del campione ha permesso l'analisi del fattore di luminanza  $q$  per angoli di incidenza pari a 8°, 30°, 45° e 60°

L'analisi di verifica è stata effettuata su tre campioni: (i) vernice retro-riflettente, (ii) guaina bituminosa e (iii) vernice al quarzo.

La strumentazione utilizzata per l'analisi sperimentale è la seguente:

- Kodak EKTAPro 320 Slide Projector (Figura 9.20a); la sorgente luminosa è un semplice proiettore per diapositive che monta una lampada EXR alogena al tungsteno da 300 W con temperatura di colore 3350 K. Il fascio è stato collimato il più possibile intorno al campione mediante diaframma interno al proiettore in modo da evitare le riflessioni eventuali dalle superfici circostanti;
- PR-650 Spectrascan Colorimeter (Figura 9.20b) montato su un cavalletto treppiedi con banda spettrale 380-780 nm, range di misura della luminanza tra 3.4 e 17,000 cd/m<sup>2</sup>. La grandezza dello spot è stata impostata a 6.3 cm Figura 9.20f.
- Sistema di movimentazione campioni per la definizione dell'angolo di incidenza del fascio (Figura 9.20c).

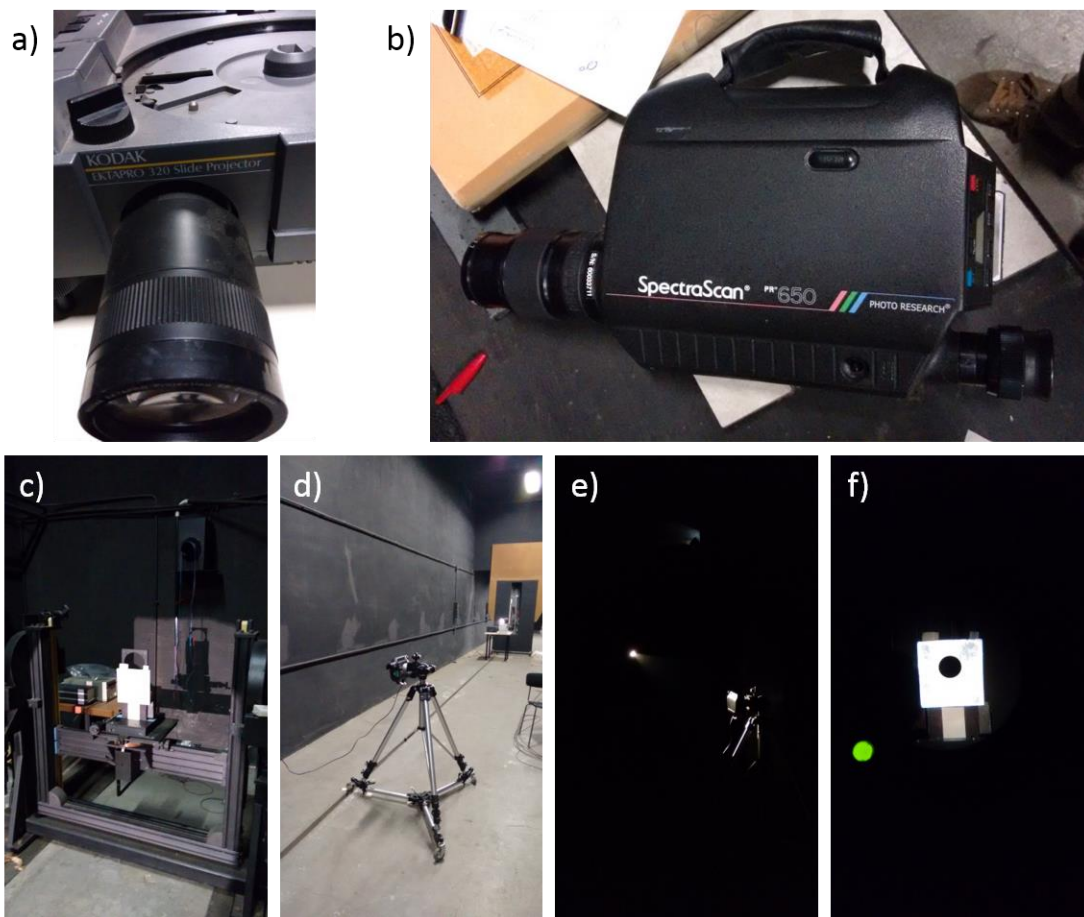


Figura 9.20 - Setup sperimentale INRIM: strumentazione a), b), c), d) e condizioni di misura e), f).

Le misure sono state effettuate in camera oscura come si può vedere in Figura 9.20e e Figura 9.20f. Insieme alle misure di luminanza è stata effettuata, su ciascun campione una misura di illuminamento medio a inizio e fine misura in modo da calcolare il valore del coefficiente di radianza in fase di post-processing dei dati.

### 9.6.2 Risultati delle misure e confronto con i dati ottenuti al LIFT

I risultati delle misure effettuate all'INRIM sono stati confrontati con quelli ottenuti dalla goniofotometria del LIFT di Roma Tre. Come accennato in precedenza, per poter effettuare un confronto, ci rifacciamo al coefficiente di radianza  $q$  così definito:

$$q = \frac{L_{v,riflessa}}{E_v(\theta_{incidente})} \quad (9.16)$$

mentre l'emettanza luminosa  $M_v$  valutata a Roma e la luminanza riflessa  $L_v$  misurata a Torino sono definite come:

$$M_v = \frac{d\phi_v}{dA} \quad (9.17)$$

$$L_{v,riflessa} = \frac{d^2\phi_v}{(dA \cdot d\omega \cdot \cos\theta)} \quad (9.18)$$

le quali differiscono per l'angolo solido e per la proiezione dell'elemento della superficie indagata nella direzione di osservazione. Potendo scrivere:

$$L_{v,riflessa} = M_v \cdot \frac{d\phi_v}{d\omega} \cdot \frac{1}{\cos\theta} \quad (9.19)$$

e avendo misurato in entrambi i casi  $E_v(\theta_{incidente})$  è stato possibile confrontare i coefficienti di radianza per i due campioni retro-riflettenti e per la vernice al quarzo. L'illuminamento sul campione al LIFT è pari a 45359 lx mentre all'INRIM è di 56.5 lux per tutti i campioni. In Tabella 9.2 sono stati riportati i valori delle grandezze illuminotecniche ottenute mediante misure sperimentali.

In Figura 9.21, Figura 9.22 e Figura 9.23 sono riportati gli andamenti del coefficiente di luminanza; come si può notare dal confronto i risultati dei setup sono sovrapponibili entro gli errori sperimentali.

Tabella 9.2 – Dati sperimentali INRIM e LIFT

	VERNICE RR		GUAINA RR		VERNICE QUARZO	
	$L_{v,riflessa}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$M_v$ (lx)	$L_{v,riflessa}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$M_v$ (lx)	$L_{v,riflessa}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$M_v$ (lx)
<b>8°</b>	49.5	115.0	8.9	31	8.9	31
<b>30°</b>	31.6	84.0	8.7	30	8.7	30
<b>45°</b>	24.0	68.3	8.6	30	8.6	30
<b>60°</b>	20.5	55.6	8.5	30	8.5	30

Le differenze dipendono dal fatto che sono state utilizzate due lampade differenti, con valori di illuminamento differenti, con una caratteristica di collimazione del fascio incidente differente e con

distanze differenti del sensore che, anche se nei calcoli sono tenuti in considerazione, introducono errori che aumentano l'incertezza di misura.

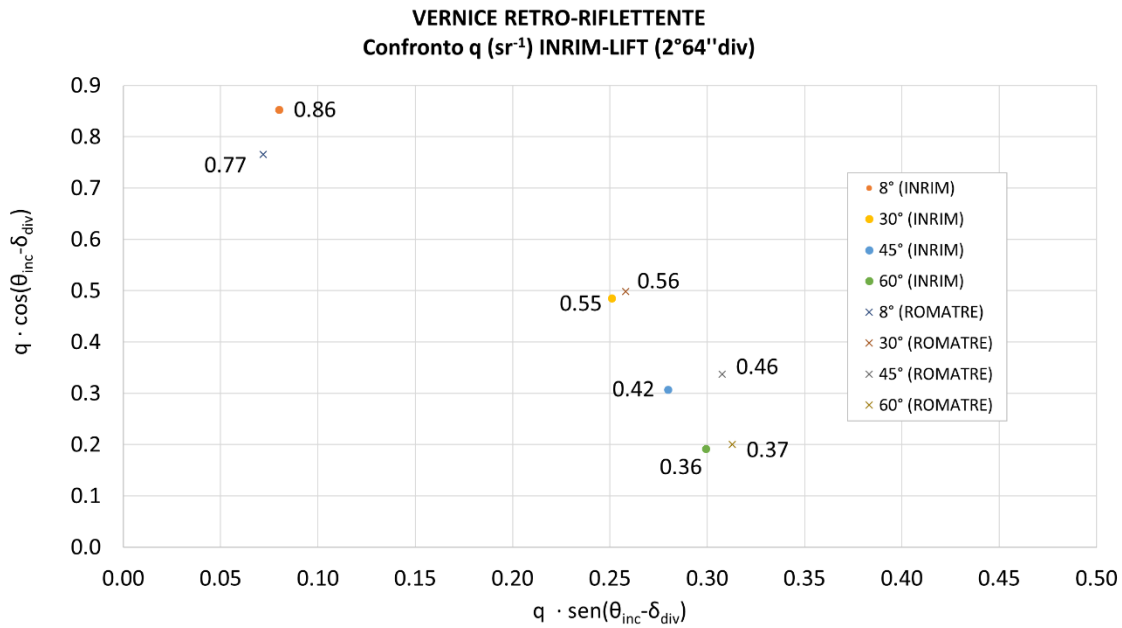


Figura 9.21 - Confronto tra i fattori di luminanza calcolati: vernice retro-riflettente.

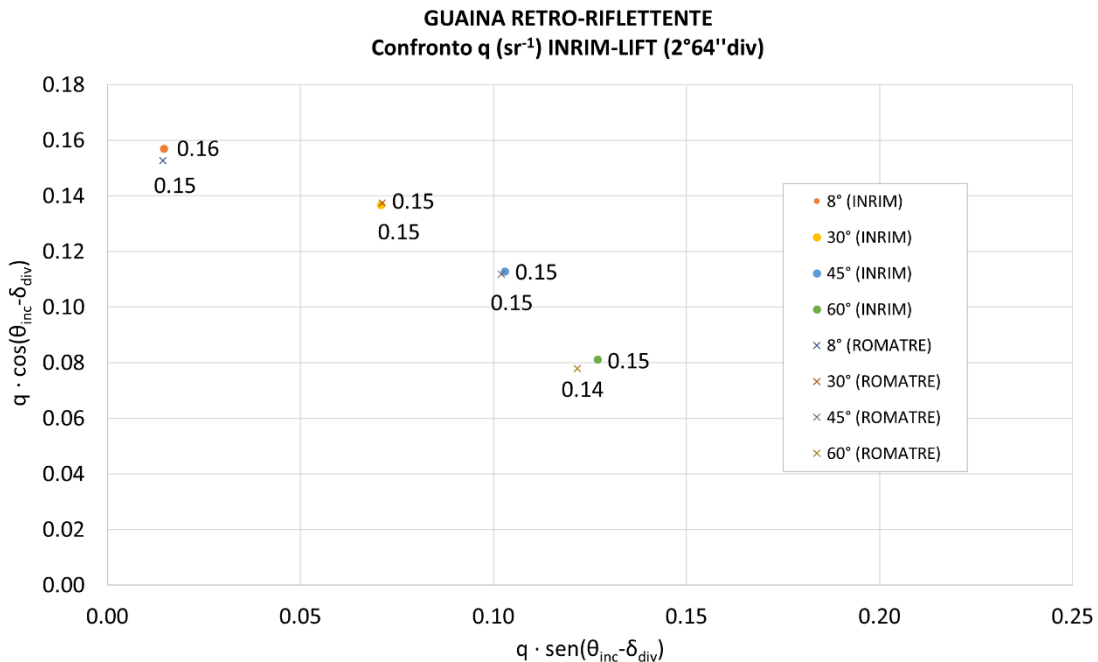


Figura 9.22 - Confronto tra i fattori di luminanza calcolati: guaina retro-riflettente.

Osservando la Figura 9.21 si notano divergenze tra i valori del coefficiente di luminanza  $q$  dell'ordine dell'ordine del 10% in corrispondenza di un angolo di incidenza quasi normale ( $8^{\circ}$ ) mentre è dell'8%

in corrispondenza di  $45^\circ$ . Per gli altri due angoli l'errore è del 3% ca. Nel caso di vernice al quarzo e guaina RR gli andamenti di  $q$  sono sovrapponibili.

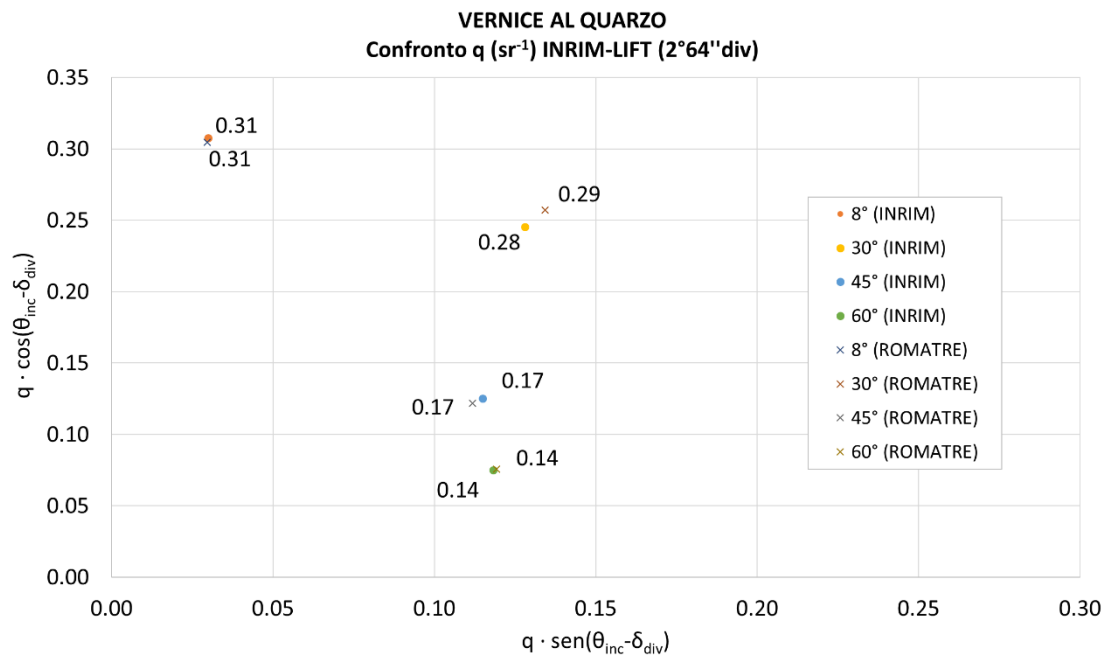


Figura 9.23 - Confronto tra i fattori di luminanza calcolati: vernice al quarzo.

Data la corrispondenza accettabile tra i valori corretti (LIFT) e calcolati mediante dati sperimentali (INRIM) del coefficiente di radianza, si è ritenuto il procedimento di correzione numerica funzionale allo scopo prefissato ovvero quello di riuscire a ricostruire con un margine di errore accettabile l'andamento della radiazione riflessa nell'angolo cieco della misura.

### 9.7 Risultati Spettrofotometria LIFT

I risultati dell'analisi spettrale dei campioni a disposizione sono riportati in Figura 9.24. Lo spettrofotometro del LIFT (Konica Minolta) fornisce una curva di riflettanza spettrale compresa tra i 380 e i 740 nm. Si tenga presente che questi valori sono stati ottenuti con l'illuminante D65 (luce diurna) e con angolo di incidenza del fascio di  $10^\circ$ . Integrando i valori su tutto il range spettrale è possibile determinare il valore della riflettanza visibile. I risultati e il loro confronto con quelli ottenuti dalla goniofotometria sono riportati in

Tabella 9.3 - Valori di riflettanza in % ottenuti mediante spettrofotometria e goniofotometria.

Campione	Spettrofotometria	Goniofotometria	Er%
Vernice RR	38.9	38.2	+1.8
Guaina RR	28.5	30.1	-5.6
Vernice Quarzo	80.0	85.1	-6.3
Vernice Cool	81.4	87.7	-7.7

## Spettrofotometria

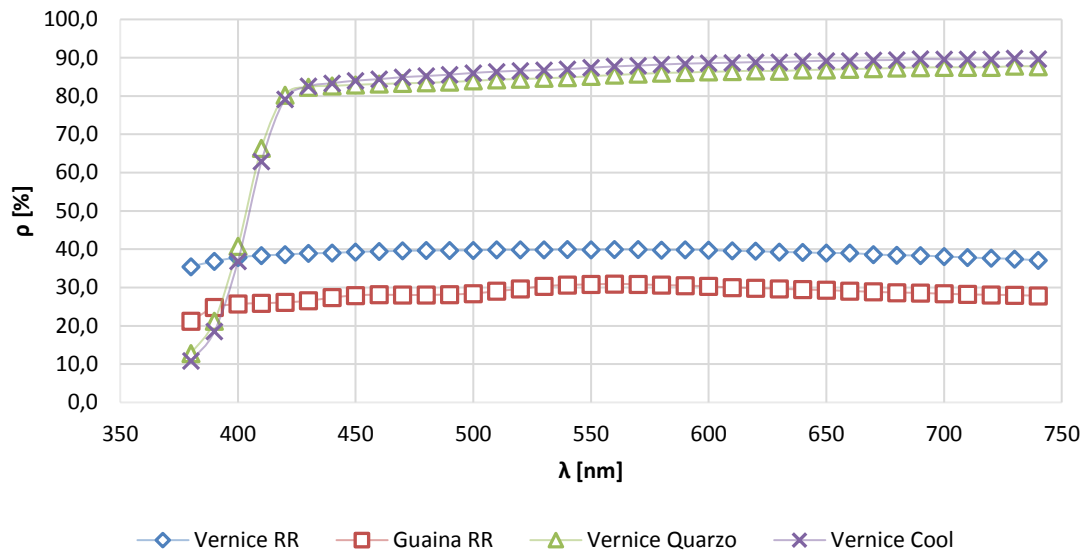


Figura 9.24 - Risultati della spettrofotometria



## 10 MODELLO NUMERICO PER MATERIALI RETRORIFLETTENTI

### 10.1 Riflettanza emisferica: modello analitico

La modellizzazione analitica dei materiali RR passa per la definizione di una funzione che possa descrivere la variazione della riflettanza globale in funzione dell'angolo di incidenza prescindendo dalla distribuzione spaziale della radiazione riflessa. Tutti i materiali che hanno queste proprietà vengono chiamati materiali ADR (*Angle Dependant Reflectance*) e i materiali RR rientrano in questa categoria. Partendo dai risultati ottenuti dall'analisi gonioflettometrica, basandosi sui risultati riportati nella Tabella 9.2 si sono ottenute due funzioni polinomiali per i campioni di materiali RR che hanno permesso di ricostruire la curva della riflettanza per qualsiasi angolo tra 0° e 90° di incidenza (Figura 10.1). I risultati per la guaina RR sono analoghi a quelli ottenuti in un precedente studio (Zinzi, Carnielo e Rossi, *Directional and angular response of construction materials solar properties: Characterization and assessment 2015*). Molti codici di simulazione energetica degli edifici non tengono conto di questa dipendenza della riflettanza dei materiali dall'angolo di incidenza della radiazione diretta ma lasciano solamente la possibilità di specificare un valore costante. Questo genera una sottostima del valore riflettanza, il cui valore costante considerato in questi codici, è in genere pari a quello determinato sperimentalmente per angoli di incidenza *near normal* (2°, 8° o 10°). Per dimostrare la necessità di modellizzare questa dipendenza è stato effettuato uno studio numerico mediante TRNSYS in cui si è sviluppato un metodo per ad hoc per simulare i materiali ADR sulle facciate degli edifici.

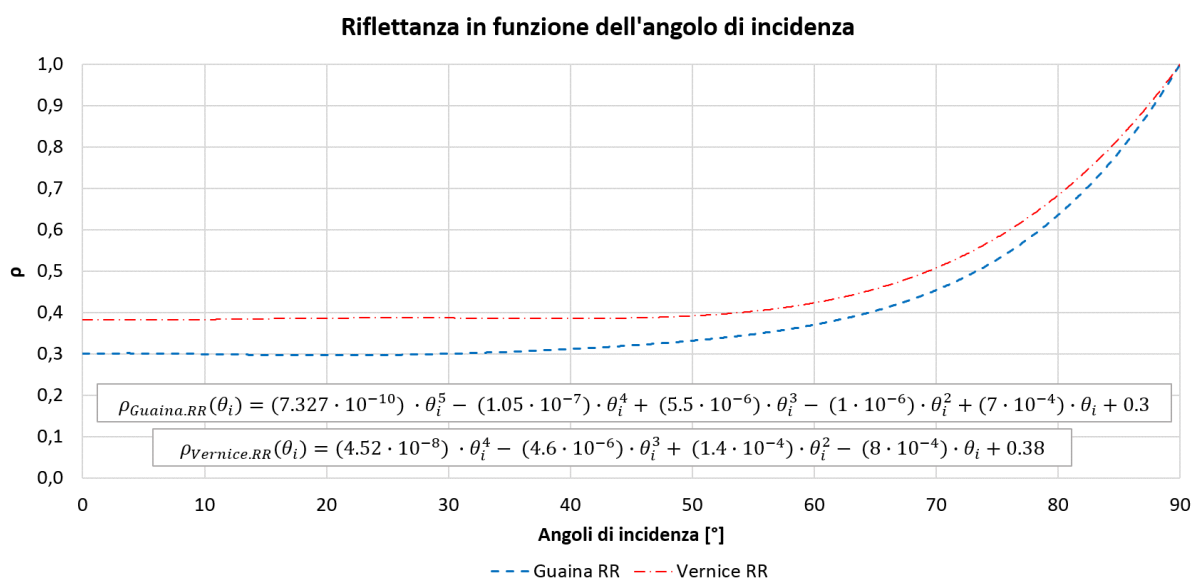


Figura 10.1 - Rappresentazione delle funzioni polinomiali ottenute dai risultati sperimentali.

## 10.2 Carichi solari sulle facciate di un edificio isolato

Si consideri che ad una superficie soggetta a una radiazione diffusa è associata una riflettanza costante (da ora in poi indicata come  $\rho_s^{d-h}$ ) mentre la riflettanza associata alla radiazione diretta è funzione dell'angolo di incidenza (ADR, da ora in poi indicata come  $\rho_s^{b-h}(\theta)$ ). Considerando queste ipotesi, e l'equazione di conservazione per le superfici opache  $\alpha+\rho=1$ , possiamo scrivere la seguente relazione (Zinzi, Carnielo e Rossi, Directional and angular response of construction materials solar properties: Characterization and assessment 2015):

$$Q = I_b(\theta)[1 - \rho_s^{b-h}(\theta)] + I_d(1 - \rho_s^{d-h}) \quad (10.1)$$

Come accennato, i software per la modellizzazione e la previsione dei consumi negli edifici considerano la riflettanza delle superfici d'involucro opache perfettamente diffusiva e costante, non considerando la dipendenza dall'angolo di incidenza. In questi casi  $\rho_s = \rho_s^{d-h} = \rho_s^{b-h}(\theta)$  e la relazione precedente torna ad essere:

$$Q = [I_b(\theta) + I_d](1 - \rho_d) = I_g(\theta)(1 - \rho_s) \quad (10.2)$$

Nella quale  $I_g(\theta)$  rappresenta la radiazione globale incidente che è funzione dell'angolo di incidenza. Quindi, sono stati definiti due tipi di riflettanza: la prima,  $\rho_s^{b-h}(\theta)$  è stata determinata mediante interpolazione di dati sperimentali, ottenuti per vari angoli di incidenza; la seconda,  $\rho_s^{d-h}$  è stata ottenuta come indicato nella seguente relazione (Siegel e Howell 2001):

$$\rho_s^{d-h} = \frac{\int_{\theta_i=0}^{\theta_i=\frac{\pi}{2}} \rho_s^{d-h}(\theta) \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) d\theta_i}{\int_{\theta_i=0}^{\theta_i=\frac{\pi}{2}} \cos(\theta_i) \sin(\theta_i) d\theta_i} \quad (10.3)$$

### 10.2.1 Modello di simulazione

Per valutare gli effetti di questa modellizzazione è stato utilizzato il software TRNSYS in cui è stato simulato un edificio isolato, ovvero non circondato da altri edifici, in tre località italiane (Milano, Roma e Palermo). Poiché l'obiettivo è quello di confrontare due modelli di simulazione per i materiali ad uso rivestimento d'involucro, i risultati ottenuti dall'utilizzo del materiale ADR sono stati confrontati con un modello a riflettanza costante (RC) con riflettanza pari al valore near normal (8° di incidenza nel nostro caso) del materiale ADR. Il materiale scelto per questa analisi numerica è la Guaina RR la cui ADR function è riportata in Figura 10.1. È utile sottolineare che questa funzione fornisce risultati differenti in base all'orientamento della superficie su cui sono determinati i carichi solari. Significa che per ciascuno dei quattro orientamenti principali N, S, W ed E, la  $\rho_s^{b-h}(\theta)$  assumerà valori diversi per ogni ora del giorno. Il valore della riflettanza del corrispondente materiale

RC con il quale è stato effettuato il confronto è pari a 0.3 (Figura 10.2). Per quanto riguarda il valore della sola componente diffusa della riflettanza del materiale ADR, è stata calcolata con l' Eq. (10.3) ed è risultato pari a 0.55.

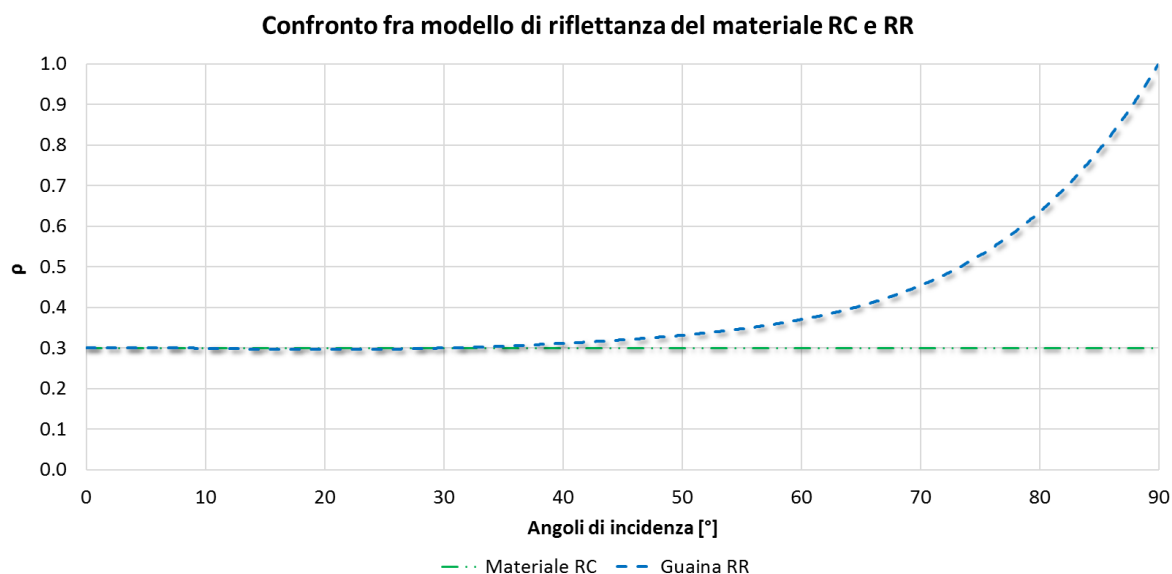


Figura 10.2 – Funzione ADR del materiale RR e modello a riflettanza costante del materiale RC

TRNSYS determina la radiazione solare assorbita su una superficie come prodotto tra la radiazione totale incidente e l'assorbanza solare il cui valore è specificato come parametro costante durante le simulazioni. Questa è una semplificazione che porta a non tener conto accuratamente dell'effettivo comportamento dei materiali reali, che hanno invece una dipendenza della loro riflettanza dall'angolo di incidenza della radiazione diretta. Sfortunatamente, TRNSYS non consente di impostare valori variabili orari dell'assorbanza solare (e quindi della riflettanza solare) dei componenti della superficie dell'involucro, come invece sarebbe necessario nel caso di modellizzazione di materiali ADR. Per rappresentare l'effetto dell'adozione dei suddetti materiali, è stato necessario implementare un metodo per considerare la dipendenza angolare del valore della riflettanza solare (Figura 10.3):

1. L'assorbanza solare delle superfici opache d'involucro è stata impostata pari ad 1;
2. Le radiazioni solari orarie dirette e diffuse e gli angoli di incidenza degli orientamenti principali (Nord, Sud, Est, Ovest e Orizzontale) delle tre località prescelte sono state estratte dai dati meteorologici TRNSYS;
3. I valori orari della riflettanza sono stati calcolati per ogni superficie, essendo noti gli angoli di incidenza e la funzione della riflettanza dipendente dall'angolo di incidenza;
4. I carichi solari superficiali sono stati calcolati utilizzando l'Eq. (10.1)

Avendo impostato l'assorbimento solare delle superfici d'involucro uguale a 1, i dati sulla radiazione processati come appena descritto, costituiscono già la radiazione solare assorbita dalle superfici dell'involucro.

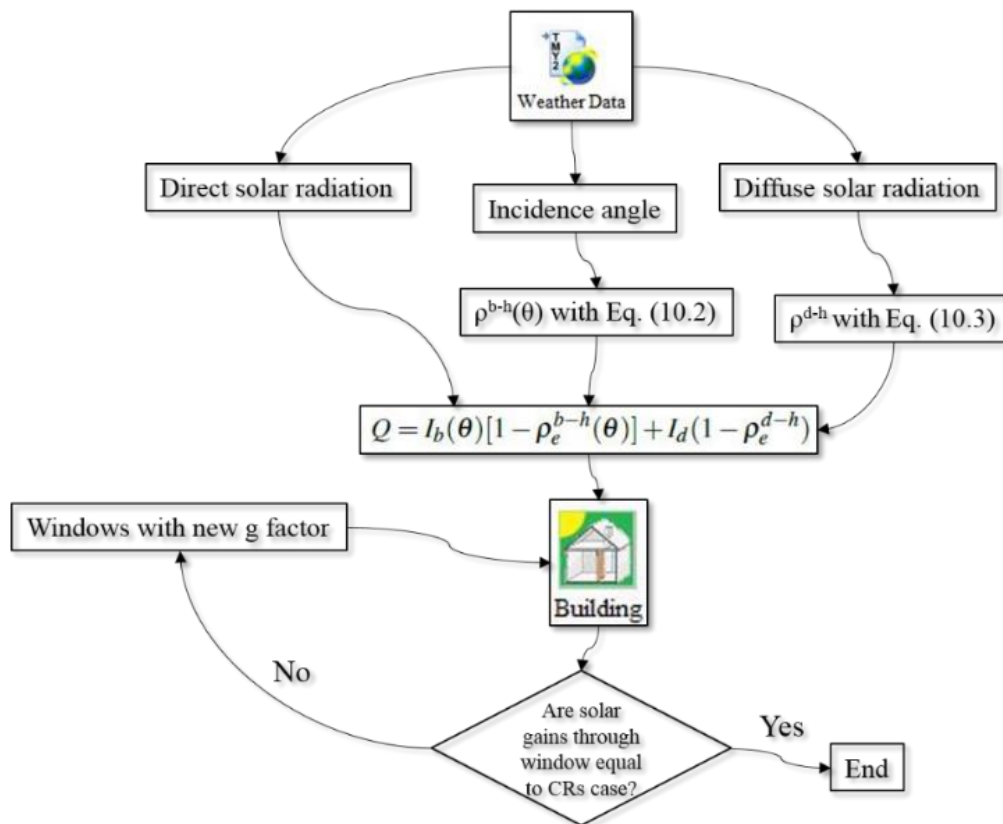
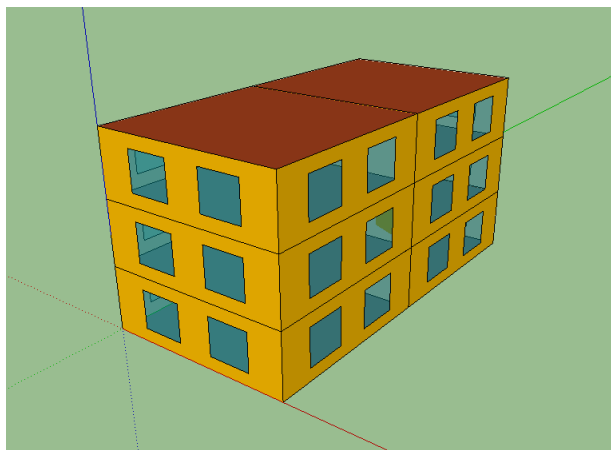


Figura 10.3 - Schema logico del modello a riflettanza solare dipendente dall'angolo di incidenza.

Riassumendo, la radiazione incidente sull'edificio coincide con quella assorbita in quanto già tiene conto della variabilità (funzione dell'angolo di incidenza) della riflettanza. Bisogna specificare però che, usando il metodo appena descritto, anche il valore dei guadagni solari attraverso i componenti trasparenti viene alterato. Per risolvere questo problema è stata confrontata la radiazione solare oraria che entra dai componenti finestrati nei casi di superfici d'involucro opache a riflettanza costante e in seguito nel caso di superfici d'involucro opache con materiale retroriflettente: dopo il confronto è stata scelta una finestra per il caso RR con un fattore di guadagno solare in grado di garantire la stessa energia solare in ingresso del caso a riflettanza costante RC (ma con lo stesso valore di trasmittanza termica). I modelli sopra citati consentono di confrontare carichi solari sulle superfici d'involucro e fabbisogni di energia termica per un edificio stand-alone (isolato) quando si utilizza un materiale RR per la superficie dell'involucro anziché un materiale lambertiano. In Figura 10.4 è riportato il modello virtuale di edificio utilizzato per l'analisi energetica che consiste in un edificio a tre piani con una superficie netta di pavimento di 182 m<sup>2</sup> per ciascun piano e un'altezza interpiano di 3 metri.

La superficie trasparente d'involucro è pari al 5% della superficie totale dell'involucro. L'involucro opaco dell'edificio ha una trasmittanza termica pari a  $0,29 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$  e si compone dei seguenti strati ordinati dall'esterno all'interno: 0.5 cm di strato di finitura (campioni testati), intonaco 1.5 cm, mattone cavo da 12.5 cm, strato isolante da 5 cm, mattone cavo di 12.5 cm, intonaco di 1.5 cm. Gli elementi dell'involucro vetrato dell'edificio hanno trasmittanza termica pari a  $2.01 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  e fattore solare pari a 0.703.



*Figura 10.4 - Modello 3D dell'edificio sottoposto all'analisi numerica.*

Poiché i modelli RC e il modello RR differiscono nella radiazione solare incidente, come precedentemente spiegato, la radiazione solare che passa attraverso le finestre nei due modelli sarebbe diversa. In effetti, la radiazione solare che entra attraverso gli elementi finestrati deve essere la stessa per non influire sul fabbisogno di energia termica nei due diversi modelli. Il metodo sopra menzionato è stato adottato per tutti e quattro gli orientamenti degli elementi dell'involucro verticale. Questo modello è stato convalidato confrontando i valori dell'energia solare entrante stagionale attraverso le finestre nei modelli RR e RC. Secondo gli standard italiani, per le simulazioni numeriche sono state considerate le seguenti condizioni operative all'interno dell'edificio: il tasso di ventilazione dell'aria è stato impostato a 0.5 vol/h in estate e in inverno;  $26^\circ \text{ C}$  di temperatura dell'aria e 50% di umidità relativa dell'aria in estate; temperatura dell'aria di  $20^\circ \text{ C}$  senza controllo sull'umidità relativa in inverno. Secondo le normative italiane, le simulazioni numeriche sono state eseguite dal 1° novembre al 28 febbraio per il periodo invernale e dal 15 maggio al 15 settembre per il periodo estivo.

### *10.2.2 Risultati delle simulazioni*

Per ciascuna superficie d'involucro sono stati determinati i carichi solari superficiali, calcolati a partire dal database meteo di TRNSYS, per i modelli RC e RR. Osservando le variazioni nei carichi solari, i cui risultati sono riportati in Tabella 10.1, è possibile fare le seguenti considerazioni: il modello RR comporta una diminuzione dei carichi solari superficiali rispetto al modello a riflettanza

costante CR, per tutte e tre le città analizzate, sia in estate che in inverno per tutti gli orientamenti delle facciate (tra -20.6% e -55.9% per Milano, tra -21.8% e -56.6 % per Roma, tra -20.6% e -55.9% per Palermo).

Tabella 10.1 - Carichi solari determinati per i due modelli RR e RC.

		Solar Loads [MJ/m <sup>2</sup> ]				Variazione %	
		RR		RC		RR-RC	
		Winter	Summer	Winter	Summer	Winter	Summer
Milano	Hor	289.7	1265.3	416.6	1617.5	-43.8%	-27.8%
	North	93.2	319.3	145.0	497.7	-55.6%	-55.9%
	South	525.7	636.7	634.1	906.6	-20.6%	-42.4%
	East	199.2	679.3	275.9	906.8	-38.5%	-33.5%
	West	198.1	703.1	274.9	934.1	-38.8%	-32.9%
Roma	Hor	446.3	1644.3	611.4	2002.1	-37.0%	-21.8%
	North	113.6	342.1	176.8	535.7	-55.6%	-56.6%
	South	831.5	671.3	975.6	977.5	-17.3%	-45.6%
	East	299.7	855.0	403.1	1109.9	-34.5%	-29.8%
	West	303.2	863.2	406.5	1119.6	-34.1%	-29.7%
Palermo	Hor	509.4	1703.0	687.7	2060.6	-35.0%	-21.0%
	North	130.5	349.0	202.9	548.3	-55.6%	-57.1%
	South	802.3	590.8	959.1	891.8	-19.6%	-51.0%
	East	317.5	845.3	430.3	1103.4	-35.5%	-30.5%
	West	319.6	878.8	433.2	1138.5	-35.6%	-29.6%

Tabella 10.2 – Fabbisogni energetici dell'edificio: valori assoluti e variazione % rispetto al modello RR.

	Thermal energy demand [kWh/m <sup>2</sup> ]				Variazione %	
	RR		CR		RR-CR	
	Heating	Cooling	Heating	Cooling	Heating	Cooling
Milano	43.4	3.5	43.0	4.1	1.1%	-16.1%
Roma	19.1	7.8	18.5	8.5	3.2%	-8.9%
Palermo	6.4	12.6	5.9	13.6	7.6%	-8.1%

In Tabella 10.2 viene evidenziato come l'utilizzo del materiale RR come superficie d'involucro garantisca una diminuzione dei fabbisogni di energia di raffrescamento rispetto a un materiale con riflettanza costante pari a 0.3 per tutte le località analizzate: -16.1% per Milano (da 4.1 a 3.5 kWh/m<sup>2</sup>), -8.9% per Roma (da 8.5 a 7.8 kWh/m<sup>2</sup>), -8.1% per Palermo (da 13.6 a 12.6 kWh/m<sup>2</sup>). Il corrispondente incremento della domanda di energia termica invernale non influisce negativamente sul bilancio annuale poiché i vantaggi energetici ottenuti per la stagione estiva sono superiori: + 1.1% per Milano

(da 43.0 a 43.4 kWh/m<sup>2</sup>), + 3.2% per Roma (da 18.5 a 19.1 kWh/m<sup>2</sup>), + 7.6% a Palermo (da 5.9 a 6.4 kWh/m<sup>2</sup>).

### 10.2.3 Considerazioni

La maggior parte degli strumenti di simulazione energetica degli edifici considerano i materiali da costruzione con una riflettanza solare perfettamente diffusiva e costante. Per questo motivo, raramente è possibile simulare il comportamento dei materiali RR e i loro effetti in termini energetici sugli edifici. La metodologia implementata fornisce la possibilità di simulare la dipendenza della riflettanza solare dei materiali RR all'interno del software TRNSYS. L'analisi numerica sottolinea che l'adozione di materiale RR sulle facciate degli edifici può far diminuire la domanda di raffrescamento dall'8.1% per Palermo al 16.1% per Milano a scapito di un lieve aumento della domanda di riscaldamento rispetto a un materiale con riflettanza costante pari a 0.3. La metodologia implementata per valutare i vantaggi dell'uso di RR materiali come rivestimento d'involucro degli edifici è estensibile a tutti i tipi di materiali con una dipendenza angolare della riflettanza solare. Pertanto, questo approccio può essere applicato nell'analisi sugli edifici isolati. Nella prossima sezione verrà descritta la formulazione analitica sviluppata per simulare il comportamento dei materiali RR in un canyon urbano, dove le mutue riflessioni tra le superfici alterano i valori dei carichi solari.

#### 10.2.1 Riflettanza direzionale: modello analitico

Mediante la funzione ADR del materiale è possibile inoltre tener conto della variazione delle proprietà di riflessione e modellizzarne l'influenza sui carichi solari. In questo caso quindi le modalità spaziali di riflessione del materiale non costituiscono una proprietà che influisce direttamente sul carico solare sull'involucro. Quando però, nell'ambito di una modellizzazione dei fattori di influenza esterna sulle prestazioni di un edificio, le superfici d'involucro si trovano ad interagire (radiativamente) con altre superfici, è necessario tener conto delle modalità di riflessione spaziale dei materiali. In questo caso, i risultati ottenuti mediante gonioreflettometria costituiscono il punto di partenza per una modellizzazione delle condizioni di scambio radiativo delle superfici degli involucri edilizi all'interno di un contesto urbano. Partendo da queste considerazioni, è necessario accennare i modelli utilizzati per descrivere il comportamento in termini di distribuzione spaziale, della radiazione riflessa dai materiali.

In generale, la distribuzione spaziale della radiazione riflessa di un materiale lambertiano può essere descritta attraverso la legge del coseno:

$$W_{r,\alpha} = \frac{W_i}{\pi} \rho \cos \alpha \quad (10.4)$$

Dove  $W_{r,\alpha}$  è la radiazione riflessa nella direzione  $\alpha$  (in  $W/m^2$ ) e  $W_i$  è la radiazione incidente (in  $W/m^2$ );

Trattando i materiali RR, quando la radiazione incidente è perpendicolare alla superficie, la distribuzione angolare della riflessione segue la relazione:

$$W_{r,\alpha} = W_{r,\perp} \cos^n \alpha \quad (10.5)$$

In cui  $W_{r,\perp}$  è la radiazione riflessa nella direzione normale alla superficie. Per una generica direzione della radiazione incidente la precedente può essere riscritta come segue (Rossi, F.; Pisello, A. L.; Nicolini, A.; Filipponi, M.; Palombo, M. 2014):

$$W_{r,\alpha} = W_{r,\perp} \cos^n(\alpha - \theta_i) \quad (10.6)$$

dove  $n$ , differente per ciascun materiali RR, rappresenta un fattore di concentrazione della radiazione riflessa nella direzione della radiazione incidente. Questo fattore si ricava per ciascun materiale dall'analisi sperimentale mediante gonioreflettometria.

Integrando sulla semisfera,  $W_r$  cambia in:

$$W_r = \int_0^{2\pi} W_{r,\perp} \cos^n(\alpha) d\Omega = W_{r,\perp} \frac{2\pi}{n+1} \quad (10.7)$$

Dalla quale si ricava:

$$W_{r,\alpha} = W_i \rho \frac{n+1}{2\pi} \cos^n(\alpha + \theta_i) \quad (10.8)$$

### *10.3 Carichi solari sulle facciate di un edificio inserito in un canyon urbano*

L'Eq. (10.1) permette la determinazione dei carichi solari sulle superfici dell'involucro edilizio quando non vi siano interazioni mutue tra superfici circostanti relative a rivestimenti d'involucro di edifici vicini. L'approccio è valido perciò solo quando si vogliono prevedere le prestazioni di un edificio isolato (stand-alone). Quando le superfici si trovano ad interagire radiativamente tra loro, mediante mutue riflessioni, l'Eq. (10.1) non è più sufficiente. Come precedentemente accennato infatti, il modello matematico relativo alla determinazione dei flussi radiativi sulle superfici (considerate lambertiane) in spazi chiusi si basa sulla formulazione di Gebhart. Questa trattazione tiene conto delle inter-riflessioni a onde corte tra le superfici mediante dei fattori ("fattori Gebhart") che sono fondamentalmente fattori di vista corretti per considerare le interazioni reciproche. I flussi radiativi ad onda corta in volumi chiusi sono calcolati come:



$$Q_{s,j} = A_j(1 - \rho_j)R_{s,j} + \sum_{k=1}^N A_k G_{kj} \rho_k R_{s,k} \quad (10.9)$$

In cui  $N$  è il numero delle superfici costituenti la frontiera dello spazio chiuso,  $Q_s$ , è il flusso radiativo ad onda corta,  $A$  è l'area della superficie,  $\rho$  è la riflettanza della superficie  $I_g$  è la radiazione solare incidente sulla superficie  $k$  e  $G_{ij}$  sono i fattori di Gebhart definiti come:

$$G_{kj} = (I - F_{kj}\rho_j)^{-1} F_{kj}(I - \rho_j) \quad (10.10)$$

Dove  $I$  è la matrice identità e  $F_{kj}$  sono i fattori di vista. Come accennato, le ipotesi dietro questa teoria implicano che tutte le superfici si comportino come perfettamente diffuse. Quando invece è presente qualche superficie che non ha un comportamento lambertiano ma un comportamento da materiale ADR, l'equazione precedente può essere modificata come segue:

$$Q_{s,j}^{Tot} = Q_{s,j}^{CdR} + Q_{s,j}^{ADR} \quad (10.11)$$

Dove

$$Q_{s,j}^{CdR} = A_j(1 - \rho_j^{CdR})R_{s,j}^{diff} + \sum_{k=1}^N A_k G_{kj}^{diff} \rho_k R_{s,k} \quad (10.12)$$

$$Q_{s,j}^{ADR} = A_j(1 - \rho_j^{ADR})R_{s,j}^{Dir} + \sum_{k=1}^N A_k G_{kj}^{ADR} \rho_k R_{s,k} \quad (10.13)$$

L'Eq. (10.12) ci dice che i materiali ADR, quando sono colpiti da radiazione diffusa, si comportano come materiali lambertiani. In questo caso  $\rho_j^{CdR} = \rho_s^{d-h}$  e nella determinazione dei fattori di Gebhart  $G_{kj}^{diff}$  i fattori di vista  $F_{kj}$  sono puramente geometrici. L'Eq. (10.13) invece si riferisce al loro comportamento funzione dell'angolo di incidenza della radiazione. I carichi solari  $Q_{s,j}^{ADR}$ , sono funzione di  $\rho_j^{ADR}$  (ovvero  $\rho_s^{b-h}(\theta)$ ) e di  $G_{kj}^{ADR}$ : entrambi dipendono dall'angolo di incidenza della radiazione diretta ( $\theta_i$ ) e  $G_{kj}^{ADR}$  è anche funzione dell'angolo prevalente di riflessione ( $\theta_r$ ). Infatti, i fattori di vista  $F_{kj}$  nel caso di materiali ADR non sono più solo geometrici ma dipendono anche dalla modalità di distribuzione spaziale della radiazione riflessa del materiale.

Quindi è possibile scrivere:

$$F_{k,j}^{RR} = f(\theta_i, n) \quad (10.14)$$

$$F_{k,j}^{CdR} = const. \quad (10.15)$$

Perciò il concetto che viene introdotto nel prossimo paragrafo è quello dei fattori di vista "corretti" di cui è riportata la formulazione analitica. Nella modellizzazione analitica dei materiali RR, l'angolo principale di riflessione attorno al quale si concentra la radiazione riflessa è uguale all'angolo di incidenza, perciò si può scrivere:

$$\theta_r = \theta_i \quad (10.16)$$

E quindi:

$$Q_{s,j}^{RR} = f(\theta_i) \quad (10.17)$$

L'Eq. (10.15) sottolinea la dipendenza dei carichi solari sulle superfici di uno spazio chiuso/semichiuso dall'angolo di incidenza della radiazione solare quando le suddette superfici hanno comportamenti RR.

### 10.3.1 Fattori di vista corretti

I fattori di vista sono dei parametri fondamentali nel calcolo degli scambi radiativi tra superfici (Gupta, et al. 2017). In genere vengono introdotti nella trattazione dello scambio termico per irraggiamento (range spettrale delle radiazioni ad onda lunga, 3000-10,000 nm) ma sono chiaramente validi anche per gli scambi radiativi ad onda corta o/ nel range spettrale della radiazione visibile. Poiché i materiali, qualsiasi sia il range spettrale entro il quale si considera lo scambio energetico, vengono considerati lambertiani, (senza direzioni prevalenti di emissione/riflessione), i fattori di vista dipendono puramente dalle condizioni geometriche delle superfici come forma e orientamento reciproco. Quando la modalità di emissione/riflessione non è lambertiana, i fattori di vista devono essere corretti. Prima di procedere alla trattazione dei fattori di vista corretti si ricorda che essi sono sostanzialmente definiti dal seguente rapporto:

$$F_{ij} = \frac{\text{Rad.Tot.emessa/riflessa dalla superficie } i \text{ che colpisce } j}{\text{Rad.Tot.emessa/riflessa dalla superficie } i} \quad (10.18)$$

Nel nostro caso si tratta di radiazione riflessa dalle superfici e non emessa. Tenendo presente questa ipotesi, il metodo dell'integrazione diretta per la determinazione dei fattori di vista diviene:

$$F_{ij} = \frac{\int_{A_i} \int_{A_j} W_{r,\alpha} d\omega dA_j dA_i}{W_{r,\perp} \cdot A_i} \quad (10.19)$$

Da cui, considerando l'Eq. (10.6) e l'Eq. (10.7) possiamo ottenere:

$$F_{ij} = \frac{\int_{A_i} \int_{A_j} W_{r,\perp} \cos^n(\alpha + \theta_i) d\omega dA_j dA_i}{W_{r,\perp} \cdot A_i} = \frac{\int_{A_i} \int_{A_j} (n+1) \cos^n(\alpha + \theta_i) d\omega dA_j dA_i}{2\pi \cdot A_i} \quad (10.20)$$

La determinazione dei fattori di vista implica la conseguente conoscenza dei fattori di Gebhart e la possibilità di determinare il contributo delle inter-riflessioni nel calcolo dei carichi solari sulle

superfici di un canyon urbano. Per il calcolo dei fattori di vista si è implementato un codice in ambiente Matlab.

### 10.3.2 Modello analitico del campione di materiale Guaina RR

Come visto nella sezione precedente, la funzione ADR ci permette di sapere come varia il valore della riflettanza globale emisferica in funzione dell'angolo di incidenza. Per conoscere la variazione dei fattori di vista in funzione dell'angolo di incidenza è stato modellizzato il comportamento della riflessione nello spazio del materiale Guaina RR. Per fare ciò è stata implementata una routine in Matlab che, leggendo i dati sperimentali ottenuti dall'analisi mediante Goniofotometro, ricostruisce, mediante l'Eq. (10.6), il comportamento del materiale ciclando fino al raggiungimento di determinate condizioni di convergenza. Sempre riferendoci alla l'Eq. (10.6), per ogni piano azimutale (di base) e per ogni angolo zenitale (di braccio) viene determinato il valore (intero) di  $n$  tale per cui si ha il minimo valore della differenza pesata  $\varepsilon$  calcolata tra i valori sperimentali e quelli teorici, come nella relazione seguente, usata anche in (Rossi, Pisello, et al. 2013):

$$\varepsilon = \sum_j \Delta_j = \sum_j \left| W_{r,\alpha_j}^{Meas} - W_{r,\alpha_j}^{Theor} \right| \left( W_{r,\alpha_j}^{Meas} \right)^2 \quad (10.21)$$

Questo metodo iterativo ha permesso di ricostruire un modello di materiale che approssimi il comportamento della Guaina RR per ciò che concerne la sua modalità di riflessione nello spazio tridimensionale. In Figura 10.5 è riportato il diagramma polare dei dati sperimentali e ricostruiti del piano azimutale  $0^\circ$  del campione di Guaina RR.

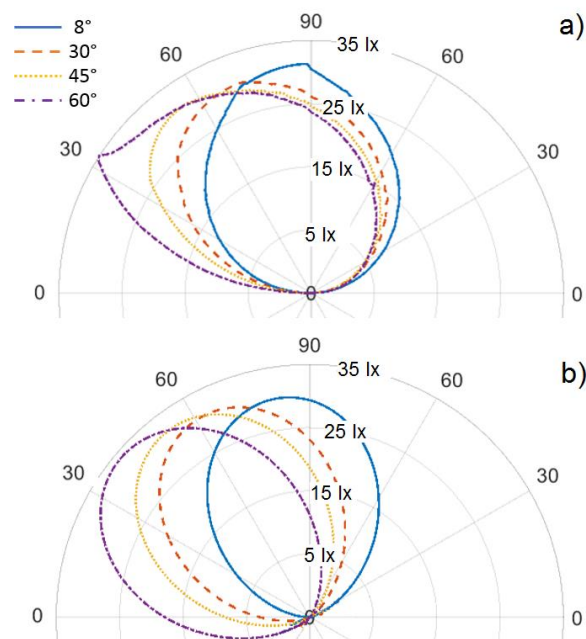


Figura 10.5 - a) Dati sperimentali e b) ricostruzione analitica.

Per ogni piano azimutale (da  $0^\circ$  a  $180^\circ$  con passo pari a quello della base del Goniometro, ovvero  $5^\circ$ ) e per ogni angolo di braccio (ricampionato per ogni grado) viene ricostruito il comportamento del materiale attraverso la modellizzazione analitica. In questo modo è possibile calcolare i fattori di vista corretti mediante apposita routine Matlab. La ricostruzione del materiale RR su base teorica ci permette di determinare i corrispondenti fattori di vista, in funzione dell'angolo di incidenza del fascio di radiazione diretta.

### 10.3.3 Fattori di vista: confronto Lambertiano – RR

In Figura 10.6 e in Figura 10.7 sono riportati gli andamenti dei fattori di vista tra superfici parallele e perpendicolari come si trovano in letteratura. I valori dei fattori sono parametrizzati in funzione della geometria delle superfici.

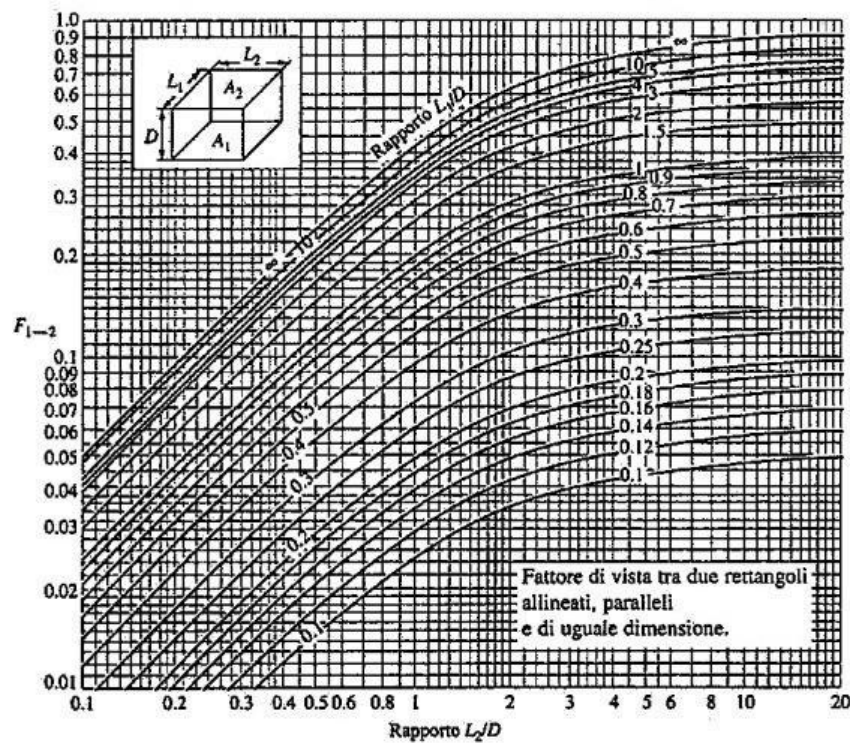


Figura 10.6 - Fattori di vista nel caso di superfici parallele lambertiane

In particolare, i fattori sono funzione dei rapporti  $L_2/D$  e  $L_1/D$  per le superfici parallele e dei rapporti  $Z/X$  e  $Y/X$  per le superfici perpendicolari (vedi specchietto in alto a sx della Figura 10.6 e Figura 10.7). Mediante il codice implementato in Matlab sono stati effettuati i confronti tra i fattori di vista di un materiale lambertiano e della Guaina RR, il cui modello analitico è stato presentato nella sezione precedente. Il materiale lambertiano scelto per il confronto ha la stessa riflettanza della Guaina RR: in Figura 10.8 è riportata la BRDF teorica dei due materiali scelti per il confronto.

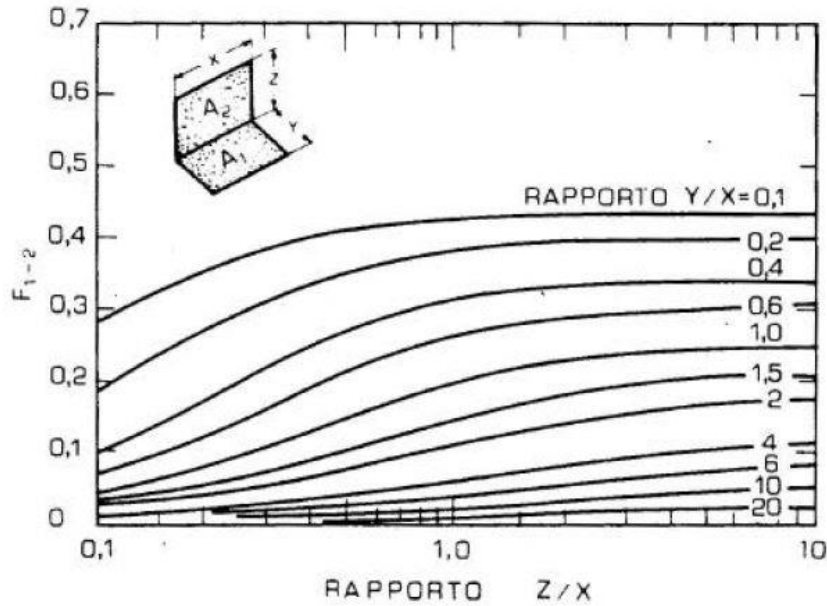


Figura 10.7 - Fattori di vista nel caso di superfici perpendicolari lambertiane

Gli andamenti dei fattori di vista sono stati determinati per i 4 valori dell'angolo di incidenza della radiazione diretta di cui si aveva a disposizione i dati sperimentali ( $8^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  e  $60^\circ$ ). Osservando in successione la Figura 10.9, la Figura 10.10, la Figura 10.11 e la Figura 10.12 si nota che la i fattori di vista della Guaina RR diminuiscono al variare dell'angolo di incidenza della radiazione. In realtà nella Figura 10.9 e nella Figura 10.10 ( $8^\circ$  e  $30^\circ$  di incidenza) i fattori di vista del RR risultano maggiori del corrispondente materiale lambertiano (le curve continue sono tutte superiori alle corrispondenti curve tratteggiate in Figura 10.9 e la Figura 10.10).

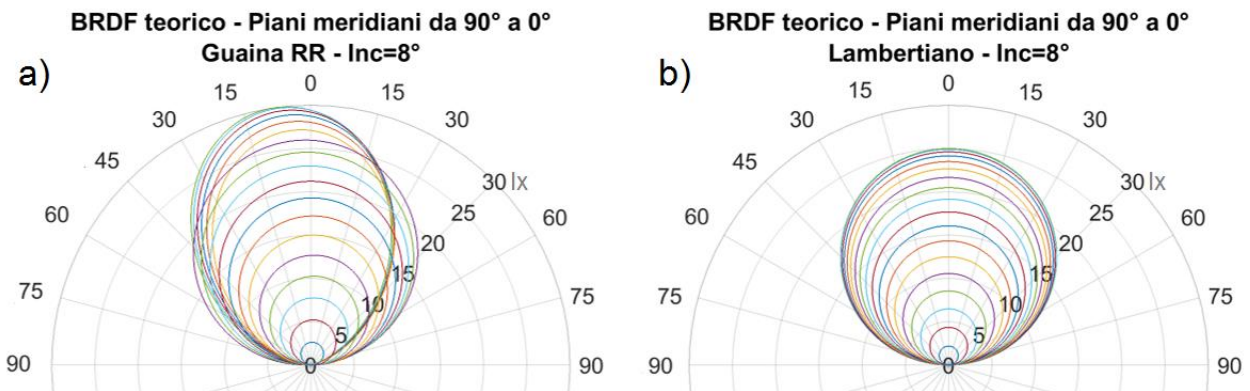


Figura 10.8 - Modello teorico per  $\theta_i=8^\circ$  della a) Guaina RR e del b) materiale Lambertiano con cui è stato effettuato il confronto numerico.

Questo è spiegato dal fatto che le componenti di riflessione sui piani meridiani con divergenza oltre i  $45^\circ$  mostrano un comportamento leggermente speculare rispetto alla radiazione incidente. Ciò implica una maggiore fattore di vista di queste componenti rispetto alle componenti del lambertiano

di confronto (vedere Figura 10.8). Per angoli di incidenza maggiori di  $45^\circ$  i fattori di vista della Guaina RR sono minori di quelli del materiale lambertiano.

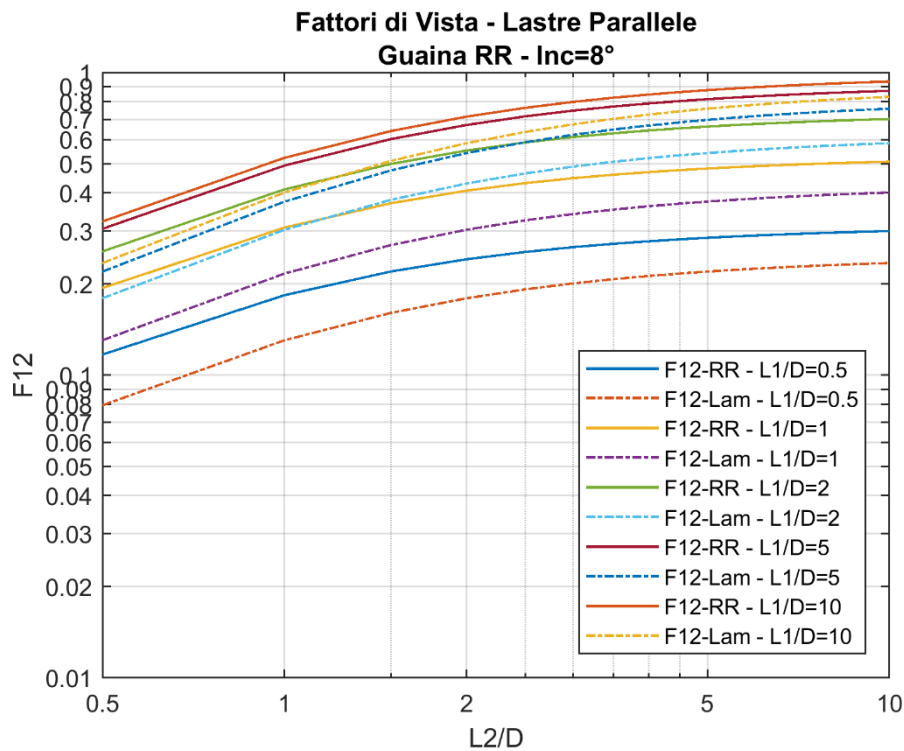


Figura 10.9 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di  $8^\circ$  - Superfici parallele

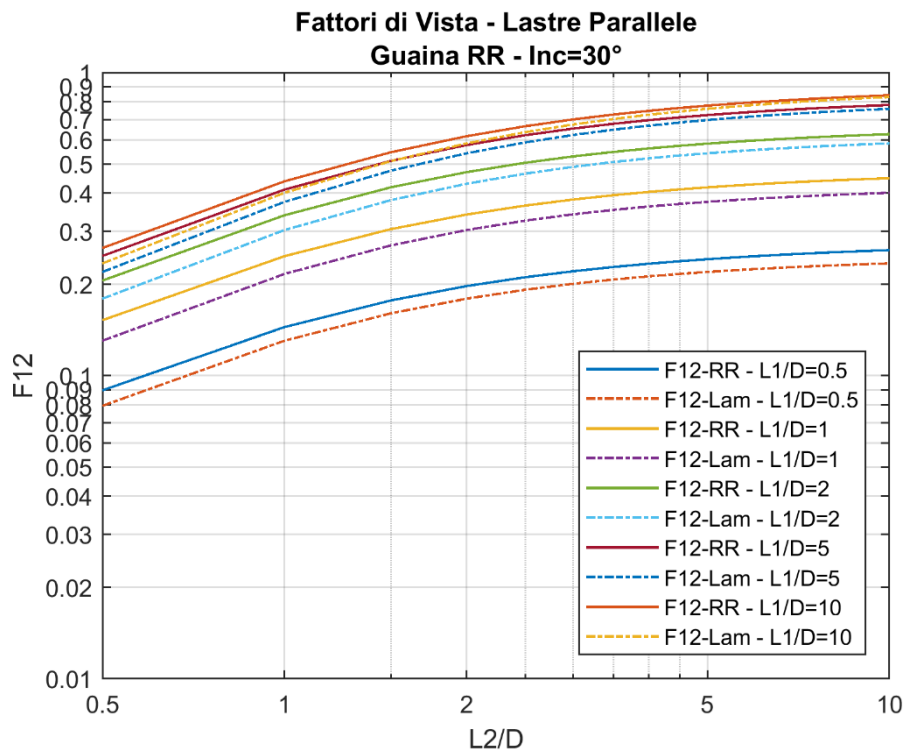


Figura 10.10 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di  $30^\circ$  - Superfici parallele

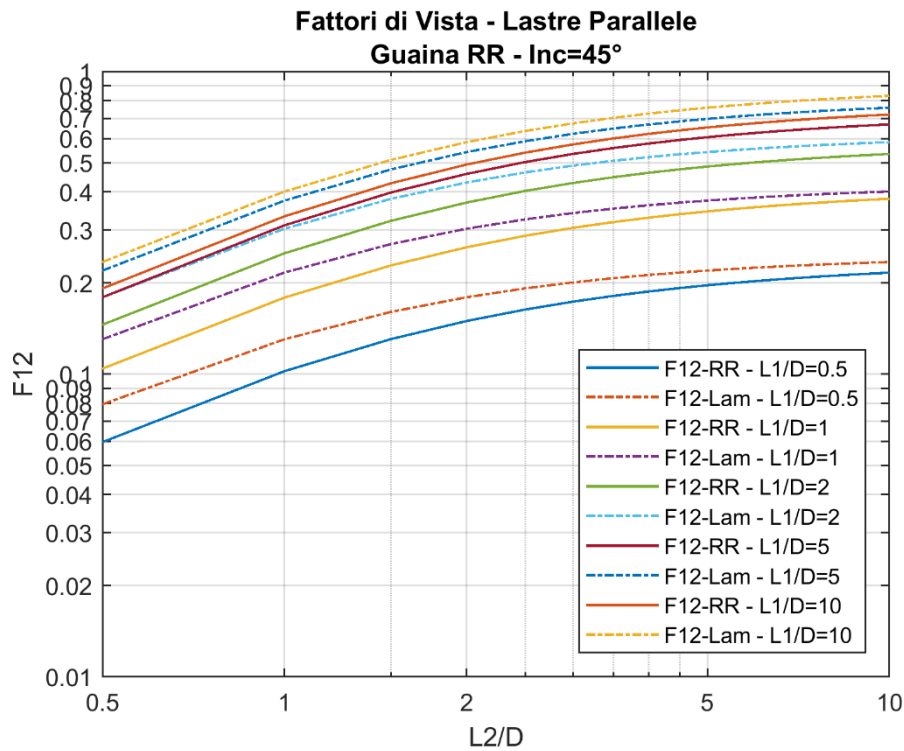


Figura 10.11 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 45° - Superfici parallele

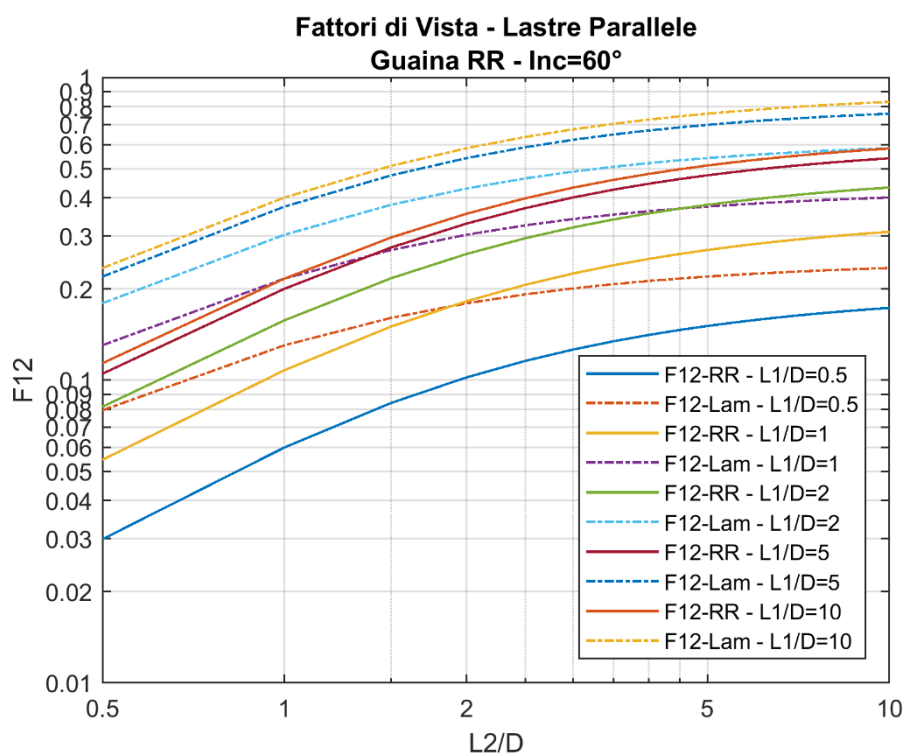


Figura 10.12 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 60° - Superfici parallele

Osservando il confronto tra fattori di vista nel caso in cui le superfici fossero tra loro perpendicolari (Figura 10.13, Figura 10.14, Figura 10.15 e Figura 10.16), le considerazioni sono le stesse.

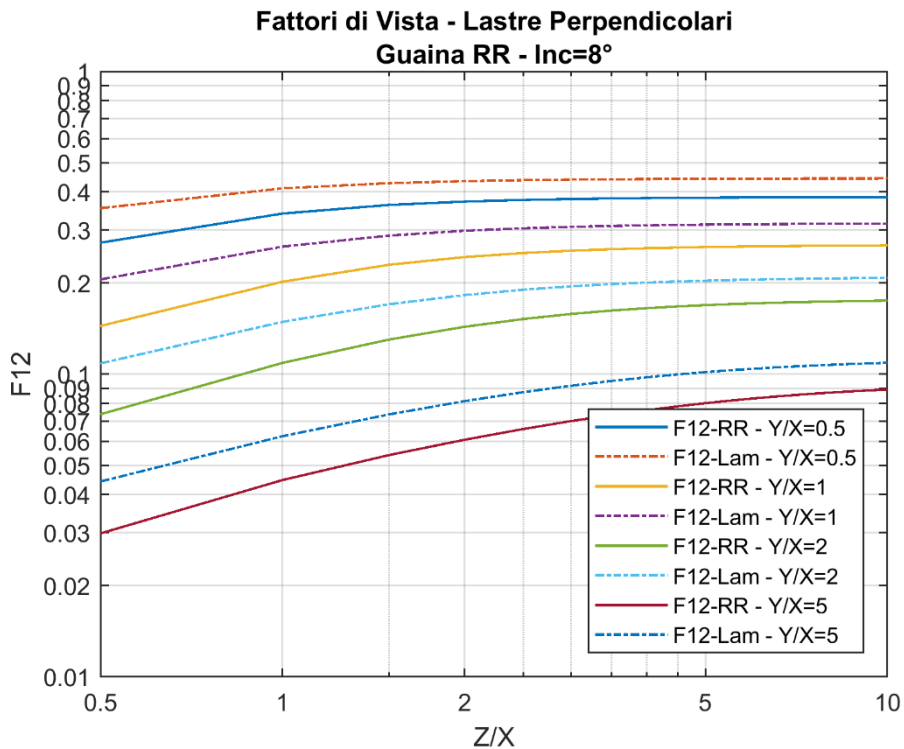


Figura 10.13 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 8° - Superfici perpendicolari

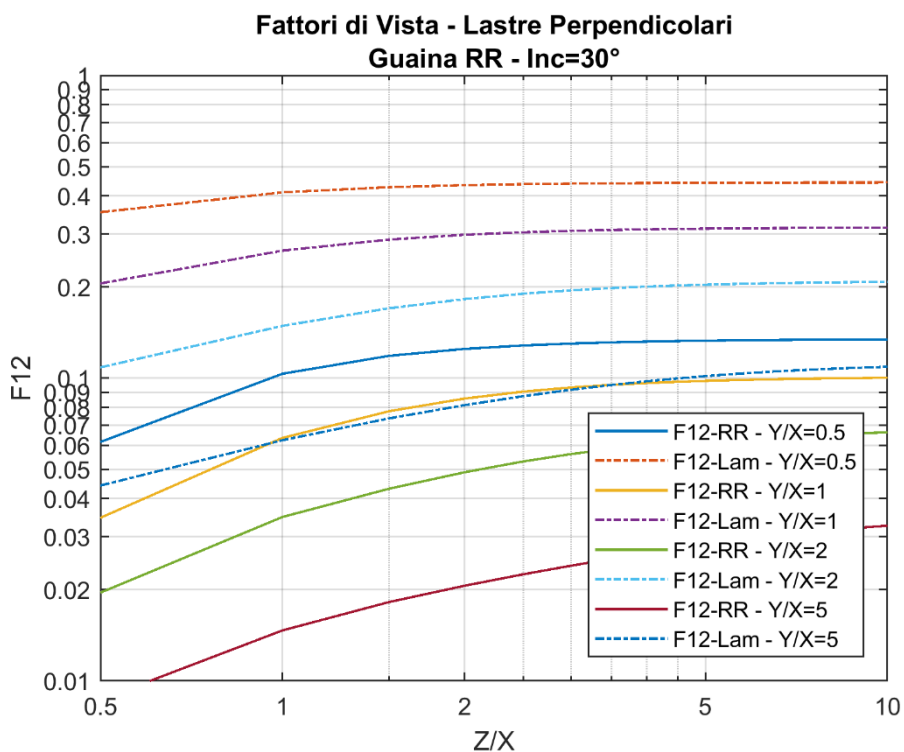


Figura 10.14 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 30° - Superfici perpendicolari



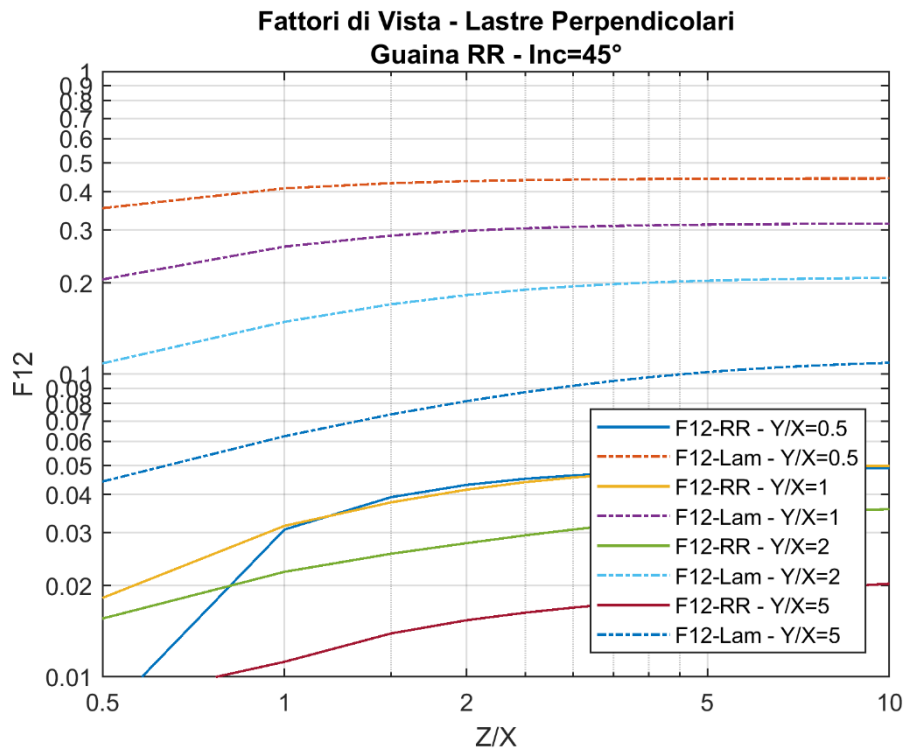


Figura 10.15 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 45° - Superfici perpendicolari

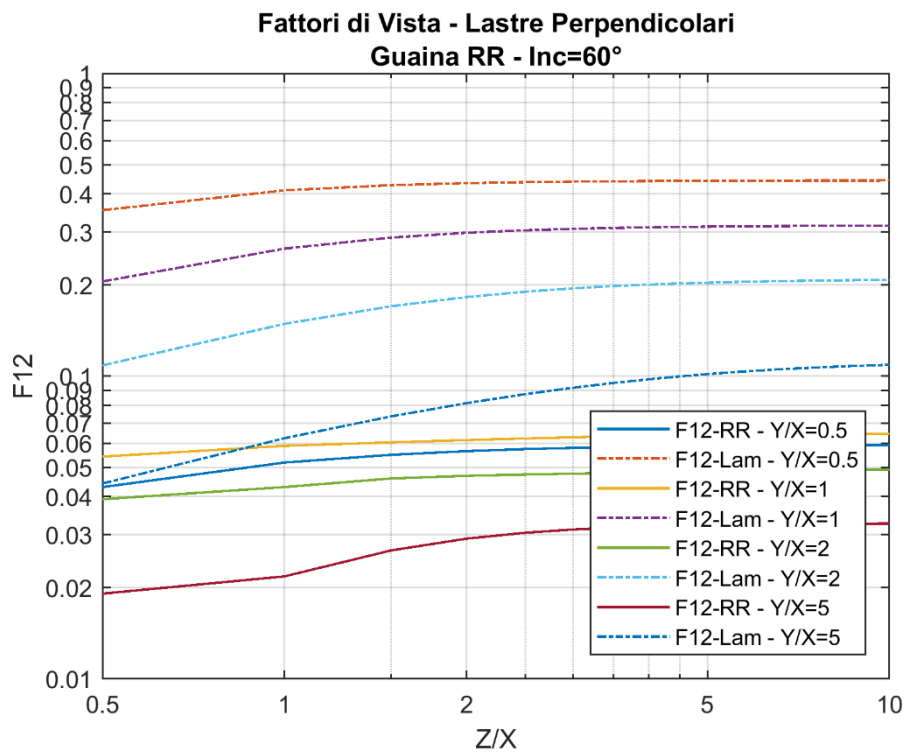


Figura 10.16 - Confronto tra fattori di vista di un materiale lambertiano e la Guaina RR per un angolo di incidenza di 60° - Superfici perpendicolari

Per angoli di incidenza da  $30^\circ$  in poi anzi, i fattori di vista per la Guaina RR sono decisamente inferiori rispetto a quelli del materiale lambertiano. Questo modulo del codice determina i fattori di vista ci permette di sapere come si distribuirà la radiazione riflessa della superficie con il materiale RR sulle altre superfici del canyon urbano.

#### 10.4 Codice Matlab per il calcolo dei carichi solari in un canyon

Il codice implementato in ambiente Matlab è costituito da varie subroutine (Figura 10.18). La prima si occupa della generazione della geometria (blocco “Canyon geometry”) del canyon mediante la definizione delle mesh costituenti le superfici delle facciate degli edifici (verticali) e della pavimentazione (orizzontale) stradale. In essa vengono specificate le estensioni superficiali, le distanze e la discretizzazione delle mesh. Come si può osservare in Figura 10.17 le superfici costituenti il canyon sono 3: facciata Sud (in blu), facciata Nord (in giallo), pavimentazione stradale (in rosso).

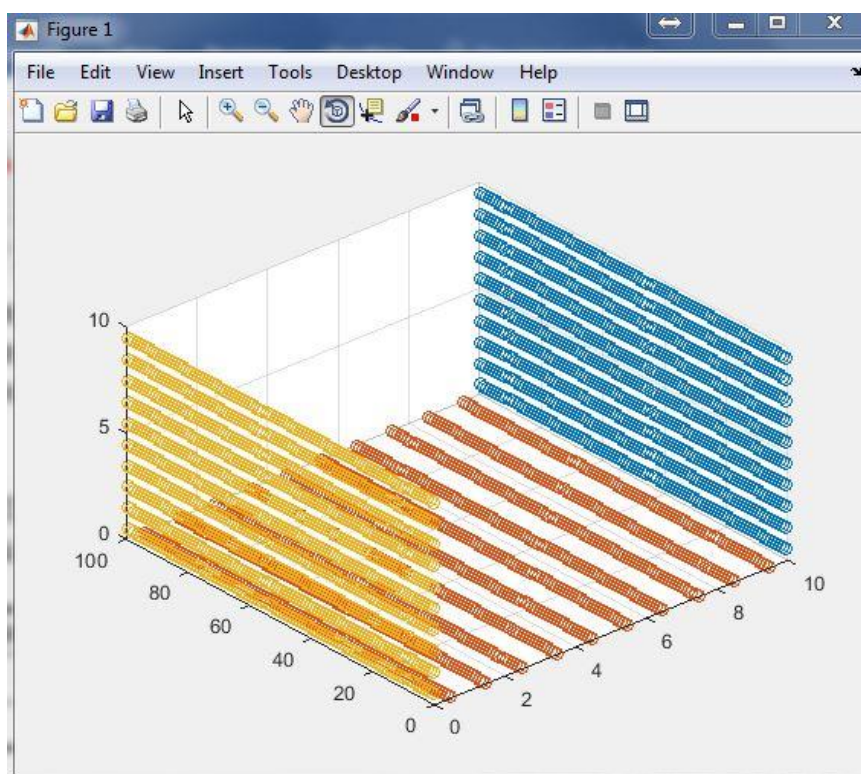


Figura 10.17 - Visualizzazione 3D delle superfici costituenti il canyon urbano.

Allo stato attuale il codice è in grado di simulare canyon urbani con asse stradale orientato Est-Ovest e quindi con facciate degli edifici Nord-Sud. Tenendo presente questo, la modellizzazione del materiale RR verrà effettuata solo sulla superficie rivolta a Sud anche considerando che essa riceve la quota parte di radiazione diretta maggiore e che è proprio la presenza di radiazione incidente diretta la condizione necessaria affinché vi si a attivazione dell'effetto RR della superficie.

Un'altra subroutine è dedicata alla lettura dei dati della radiazione solare che sono presenti in una libreria come file esterni. Il suddetto file meteo mette a disposizione i valori di radiazione incidente sulle superfici e gli angoli della geometria solare, ovvero Azimuth e Zenith e gli angoli di incidenza della radiazione solare diretta sulle varie superfici. Si tenga presente che il codice effettua una simulazione dei carichi solari su intervalli temporali orari e perciò fornisce in output 8760 valori per ciascuna superficie. Un'altra routine si occupa della determinazione degli ombreggiamenti in funzione dell'orientamento del canyon stradale e dell'ora del giorno, individuando quali nodi delle mesh sono in ombra e quali al sole. Un'altra routine ha il compito di calcolare i fattori di vista (e di conseguenza anche i fattori di Gebhart) delle superfici e del fattore di vista del cielo (per il calcolo della radiazione diffusa). La routine finale è dedicata al calcolo dei valori dei carichi solari sulle superfici mediante il metodo dei fattori di Gebhart.

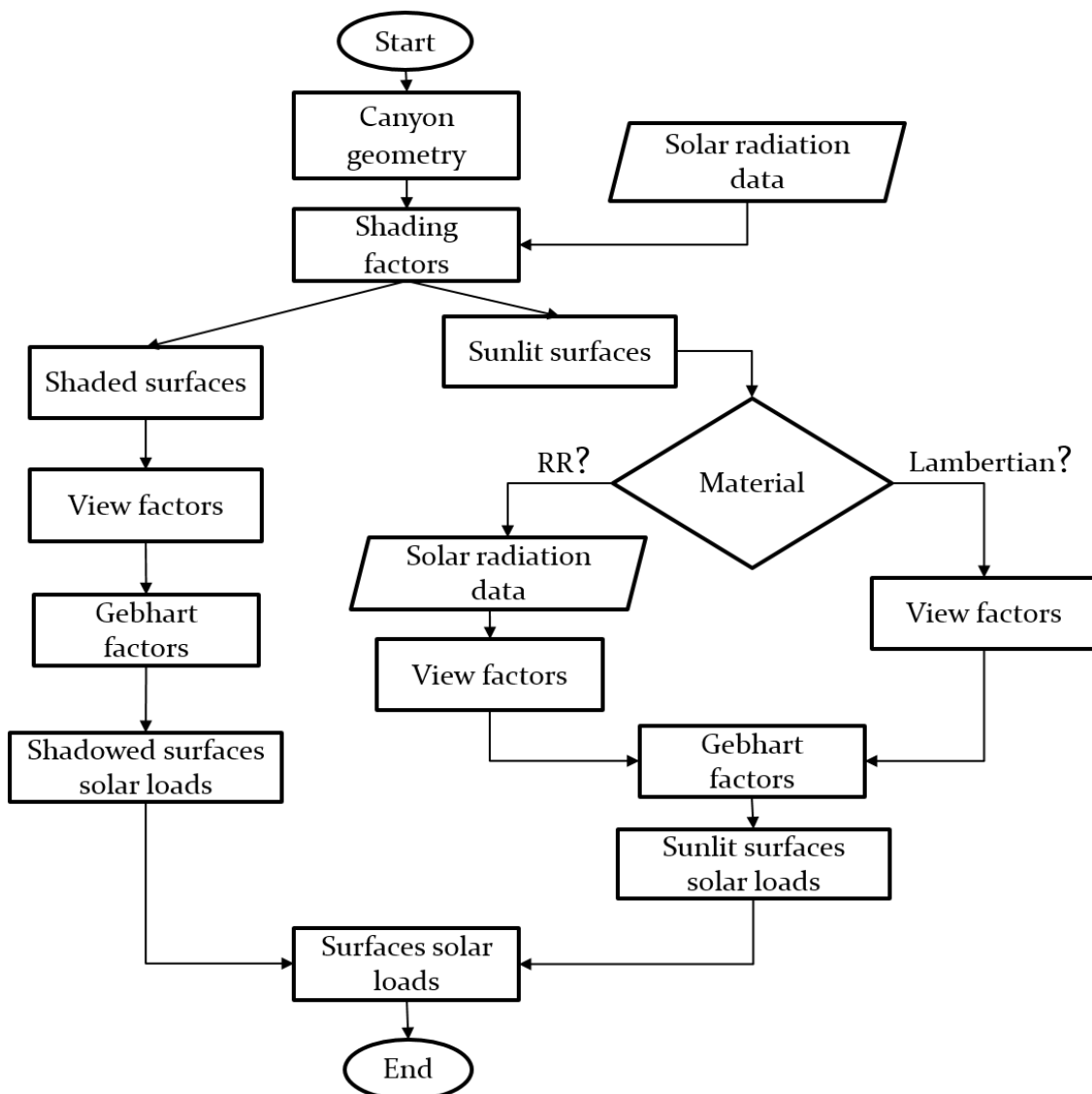


Figura 10.18 - Diagramma a blocchi del codice implementato in Matlab.

Il modulo che si occupa della determinazione dei fattori di vista si trova necessariamente a valle del modulo che genera le matrici di ombreggiamento. Ogni porzione di superficie, a seconda che sia in ombra o al sole vedrà le altre porzioni di superfici con un fattore di vista specifico. Inoltre, la superficie Sud, dato che si comporta da materiale RR utilizzerà il modulo per il calcolo dei fattori di vista dei materiali RR. Con l'obiettivo, quindi, di permettere una valutazione dettagliata

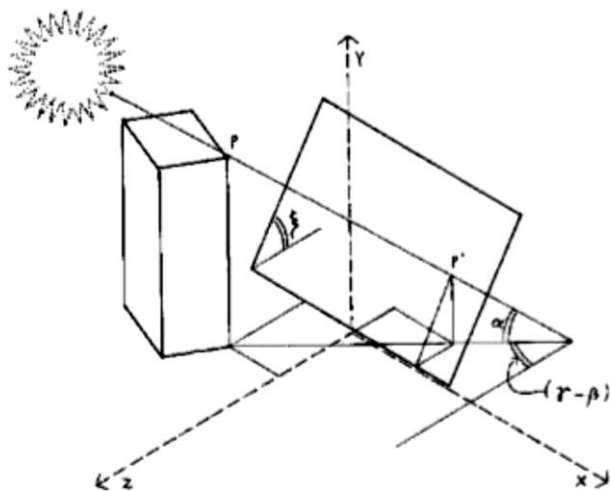


Figura 10.19 - Angoli caratteristici nel calcolo dell'ombreggiamento

dell'ombreggiamento al fine di una maggiore accuratezza nella determinazione dei carichi solari, è stato quindi sviluppato un modello ad hoc per il calcolo del fattore di ombreggiamento delle superfici. Per ogni punto 'P' di ogni prisma - ostruzione, avente coordinate spaziali  $x(P)$ ,  $y(P)$  e  $z(P)$  nel sistema di riferimento, si considera una retta proiettante passante per esso ed avente la stessa direzione dei raggi solari. Si calcola quindi l'intersezione di questa retta con il piano cui appartiene la superficie in esame,

punto P' in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Chiameremo questi punti di intersezione punti-proiezione. Per costruire il profilo dell'ombra-inviluppo delle ombre proiettate da più ostruzioni urbane si procede nel seguente modo. Ad ogni coppia di punti-proiezione costituenti gli estremi di uno spigolo della base superiore di un prisma-ostruzione (intervallo del primo tipo) viene associata una retta, passante per i due punti, di cui si calcola l'equazione. I punti-proiezione vengono quindi riordinati per ascissa decrescente, e per ogni intervallo fra due di essi (intervallo del secondo tipo) viene ricercata la retta più alta; questa costituirà il limite superiore dell'ombra in quell'intervallo. Quando le ombre di due ostruzioni diverse si sovrappongono, la retta più alta all'estremo di un intervallo del secondo tipo può essere diversa dalla retta più alta all'altro estremo. In tal caso si calcola il punto di intersezione fra le due rette ed in corrispondenza di esso si spezza l'intervallo. Qualora le ostruzioni siano sollevate da terra un procedimento analogo è operato sugli spigoli inferiori, fra i quali viene ricercato il più basso. Le equazioni delle quattro rette che costituiscono i bordi della superficie in esame rappresentano i limiti della possibile area ombreggiata, ed intervengono nel procedimento di suddivisione degli intervalli del secondo tipo.

Osservando la Figura 10.20 è possibile individuare gli angoli fondamentali della geometria delle superfici e della geometria solare che concorrono a determinare le condizioni per cui una superficie si trova in ombra o a sole.

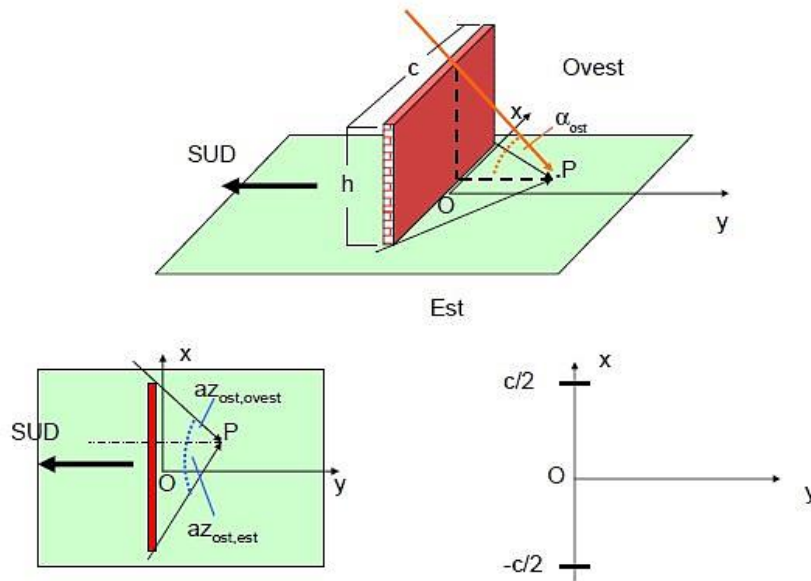


Figura 10.20 - Calcolo dell'ombreggiamento per una superficie con orientamento a Sud

La linea orizzontale superiore del muro determina un angolo di altezza solare al di sotto del quale i punti retrostanti restano in ombra. La relazione che determina questo angolo è la seguente:

$$\alpha_{ost}(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{h}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \tag{10.22}$$

se con x si indica la coordinata generica, alla base del muro (retta di intersezione fra muro e terreno, dalla parte del muro affacciata verso il punto), avente origine nel punto O e positiva nella direzione di b (gli estremi della base del muro hanno coordinate x=-a, x=b) per ogni punto della base del muro. Con y, invece si indica la coordinata, giacente sul piano orizzontale, avente ancora origine nel punto, direzione ortogonale al muro e verso dal punto O in allontanamento dal muro (con riferimento a detta figura y=d).

Per quanto riguarda l'azimut il punto resta in ombra se questo angolo è compreso fra:

$$az_{ost,est} = \tan^{-1} \left( \frac{c+x}{y} \right) \qquad az_{ost,ovest} = -\tan^{-1} \left( \frac{c-x}{y} \right) \tag{10.23}$$

Il codice Matlab utilizza le relazioni appena introdotte per determinare, per ogni punto delle mesh rappresentanti le superfici, le condizioni di ombreggiamento mediante una logica booleana: il punto è in ombra (1) o è a sole (0). In Figura 10.21 è riportato uno screenshot del modulo di visualizzazione degli ombreggiamenti per un giorno di febbraio alle ore 12.00 a Roma. A partire dalle condizioni di ombreggiamento il codice determina i carichi solari mediante l'approccio di Gebhart.

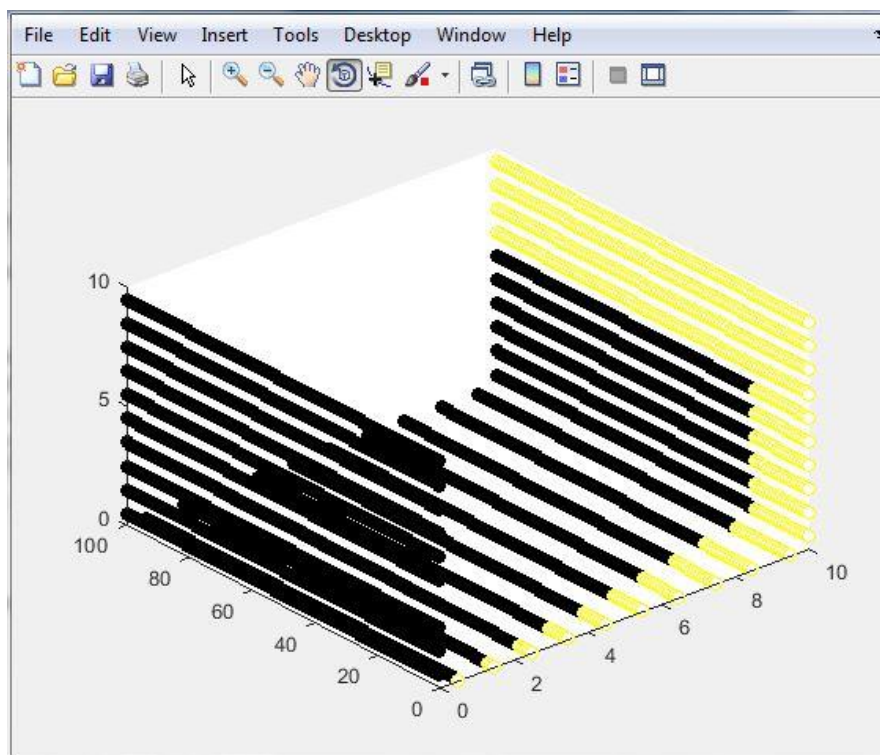


Figura 10.21 - Screenshot dell'interfaccia grafica del modulo per la determinazione delle aree ombreggiate

## 10.5 Risultati dell'analisi numerica effettuata mediante codice Matlab

Nei paragrafi successivi vengono riportati i risultati delle analisi numeriche effettuate su un modello di canyon con  $H/W=1$ ,  $H/L=0.1$  con discretizzazione spaziale della mesh di 0.5 m e con assi orientati Est-Ovest e facciate orientate Nord-Sud. Come prima analisi è stato effettuato un confronto software-software (Matlab vs TRNSYS) per dimostrare l'affidabilità del codice ivi implementato e successivamente si è proceduto al suo utilizzo per modellizzare un materiale RR.

### 10.5.1 Confronto Matlab – TRNSYS

In questa sezione, i risultati numerici sono organizzati come confronto tra modello implementato in Matlab e modello di simulazione impostato in TRNSYS. Il materiale modellizzato analiticamente è una tinta perfettamente lambertiana con riflettanza pari a 0.31. Tutte le superfici interne del canyon sono pensate ricoperte dal suddetto materiale. La località scelta per l'analisi numerica è Roma e le simulazioni sono state effettuate nelle giornate del 21 giugno e del 21 dicembre. I carichi solari sono presentati per le superfici Sud, Nord e per la pavimentazione stradale.

#### **Caso invernale**

Analizzando gli andamenti dei carichi solari in Figura 10.22, Figura 10.23 e Figura 10.24 risulta una corrispondenza tra risultati ottenuti mediante i due codici. Entrando più nel dettaglio,

la variazione percentuale di radiazione solare assorbita sulle superfici del canyon nell'arco della giornata, tra Matlab e TRNSYS, oscilla tra un 8% (per la superficie orientata a Nord) a un valore di 12.7% per la superficie orientata a Sud.

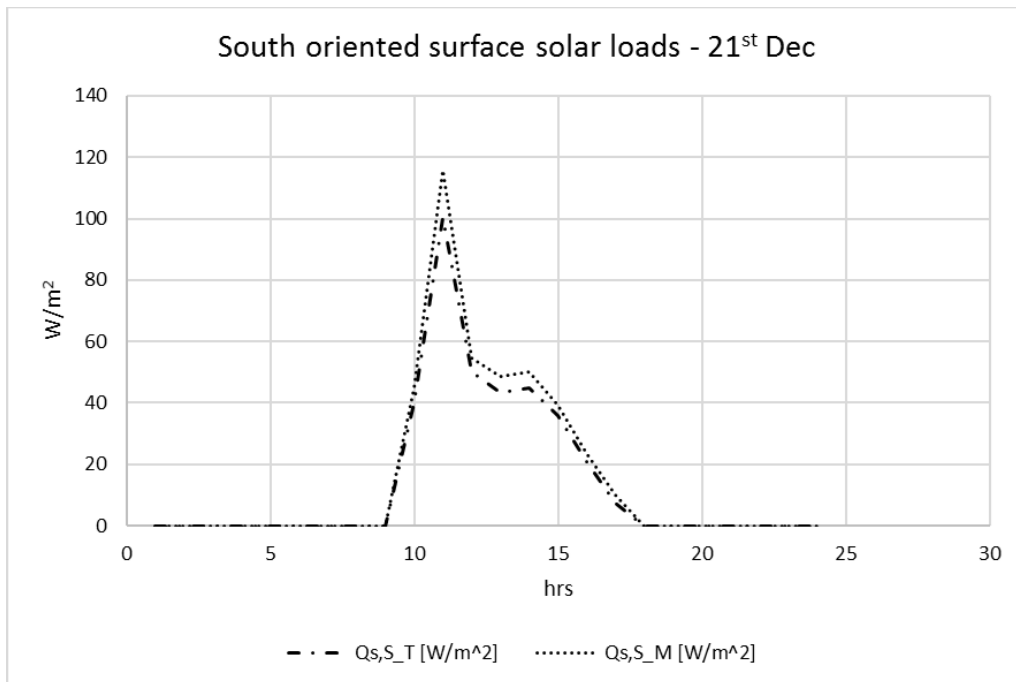


Figura 10.22 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su superficie orientata a Sud – Inverno

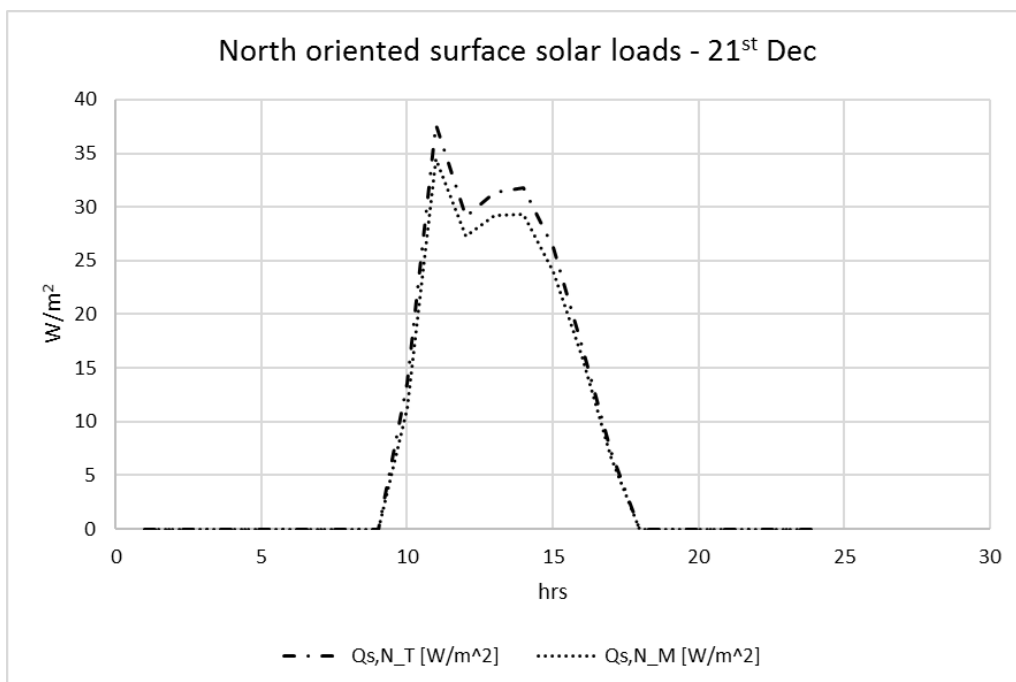


Figura 10.23 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su superficie orientata a Nord – Inverno

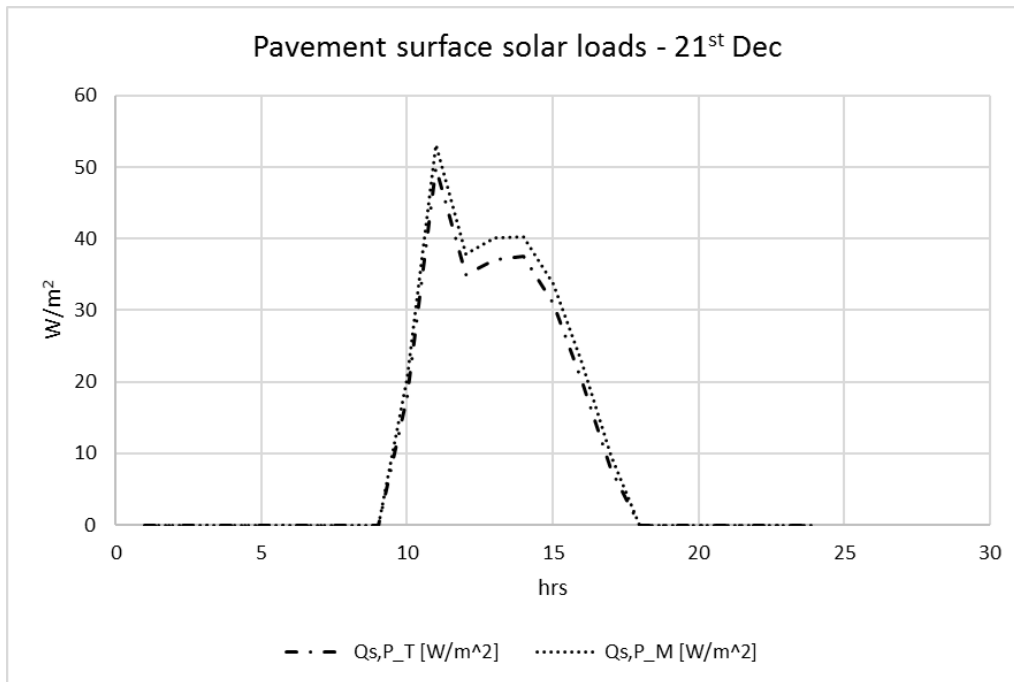


Figura 10.24 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su pavimentazione stradale – Inverno

### Caso estivo

Analizzando gli andamenti dei carichi solari in Figura 10.25, Figura 10.26 e Figura 10.27, ovvero nel caso della stagione estiva, la variazione percentuale di radiazione assorbita sulle superfici del canyon nell'arco della giornata, nel confronto tra Matlab e TRNSYS, varia da un 7.5% (pavimentazione del canyon) a un valore del 3.9% (superficie orientata a Sud).

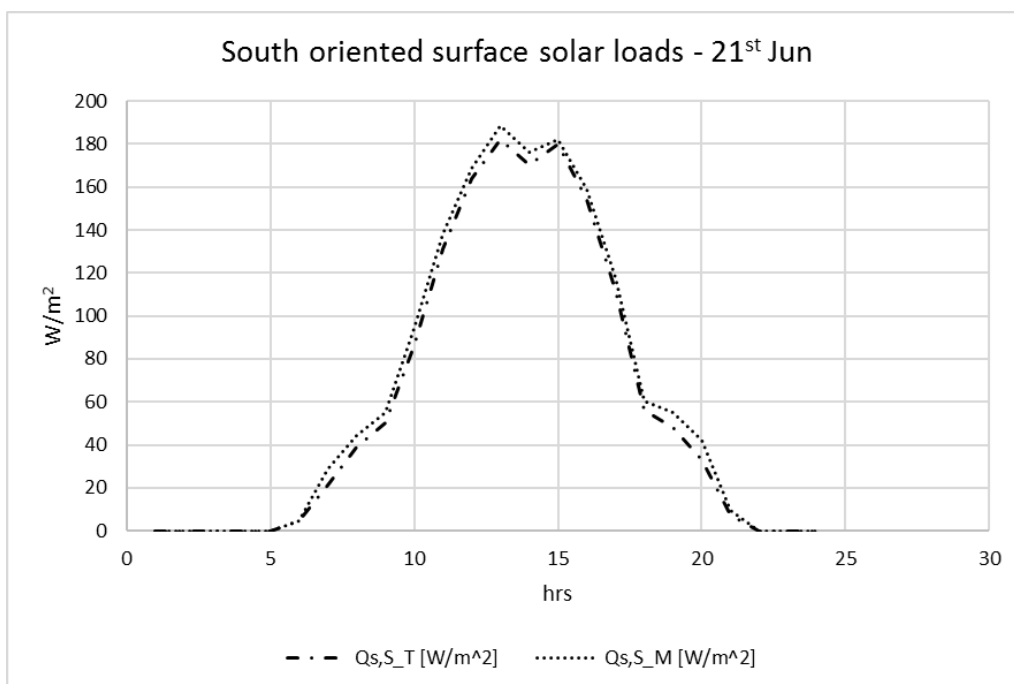


Figura 10.25 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su superficie orientata a Sud – Estate



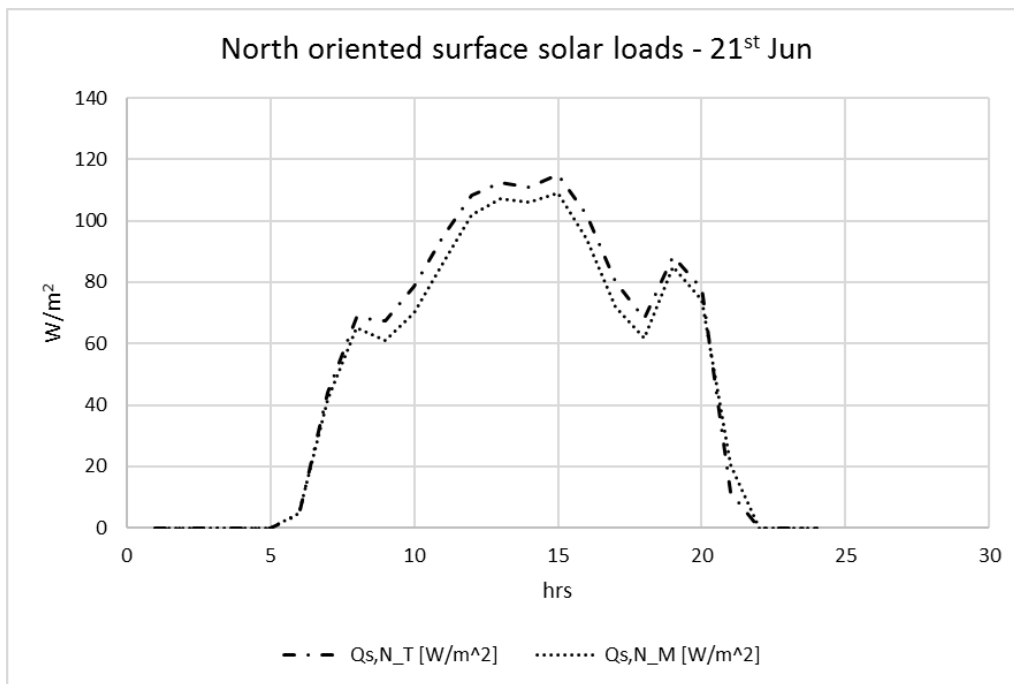


Figura 10.26 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su superficie orientata a Nord – Estate

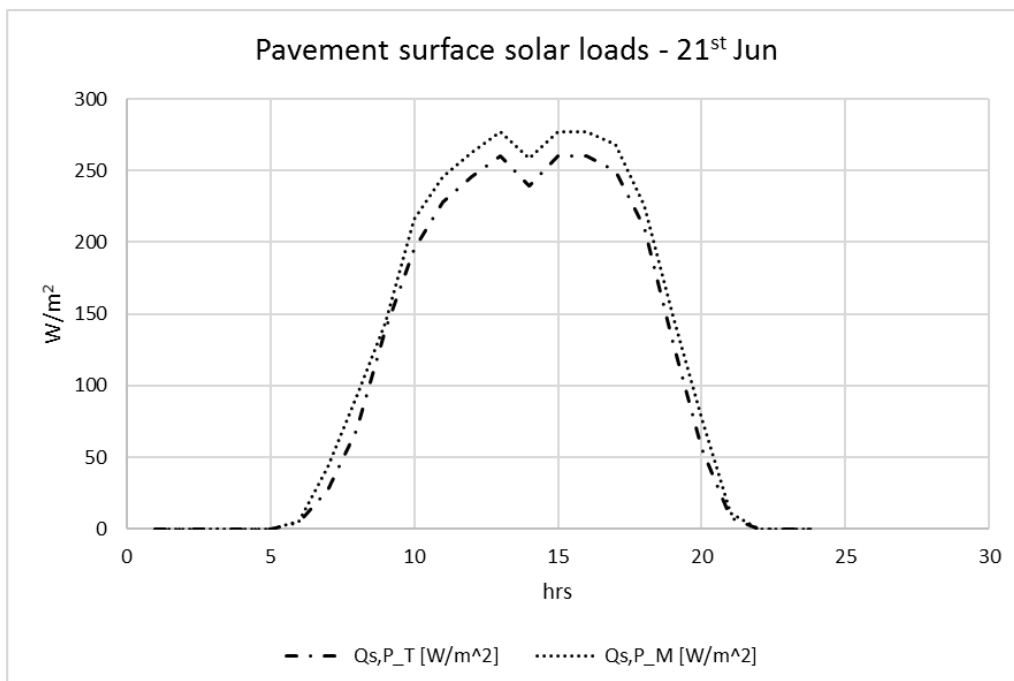


Figura 10.27 - Matlab vs TRNSYS: carichi solari su pavimentazione stradale – Estate

I risultati di questa analisi preliminare validano numericamente il codice implementato in ambiente Matlab e permettono di affrontare la modellizzazione dei materiali RR nel paragrafo seguente.

### 10.5.2 Confronto materiale lambertiano – materiale RR

In questa sezione, i risultati numerici sono organizzati come confronto tra la configurazione lambertiana e quella RR. Il materiale di cui è stato utilizzato il modello analitico è la Guaina RR, precedentemente caratterizzata da gonioriflettometria e in seguito modellizzata numericamente. La configurazione lambertiana del canyon vede tutte le superfici con riflettanza pari a 0,31, ovvero la riflettanza emisferica per incidenza  $8^\circ$  della Guaina. La località scelta per l'analisi numerica è Roma. Le simulazioni sono state effettuate nelle giornate del 21 giugno e del 21 dicembre. I carichi solari sono presentati per le superfici Sud, Nord e per la pavimentazione stradale. Va sottolineato che nella configurazione RR la Guaina RR è considerata applicata solo sulla superficie orientata a Sud, poiché, come già detto, questa riceve più radiazione solare diretta, la quale attiva l'effetto retro-riflettente. Le altre superfici sono considerate lambertiane e hanno una riflettanza costante pari a 0,31.

#### Caso invernale

Analizzando gli andamenti dei carichi solari in Figura 10.28, Figura 10.29 e Figura 10.30 risultano evidenti gli effetti dell'adozione di un materiale RR sulle superfici del canyon. Entrando più nel dettaglio, la differenza di radiazione solare assorbita sulle superfici del canyon nell'arco della giornata, rispetto alla configurazione lambertiana, varia da -13% (per la pavimentazione e per la superficie orientata a Nord) a un valore di -15% per la superficie orientata a Sud.

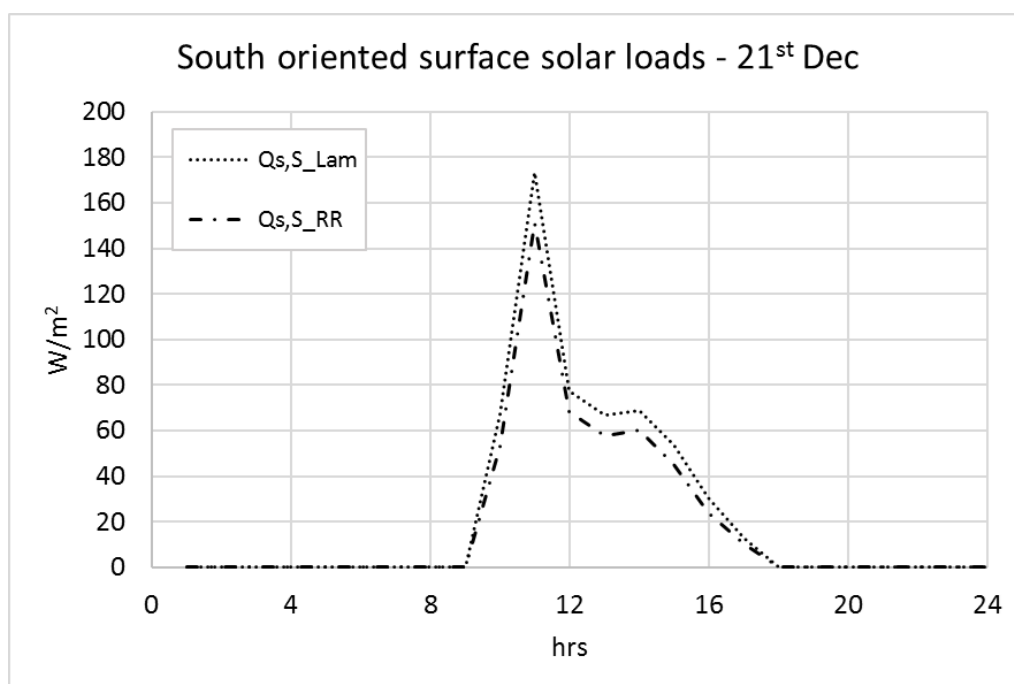


Figura 10.28 – Lam vs RR: carichi solari su superficie orientata a Sud – Inverno

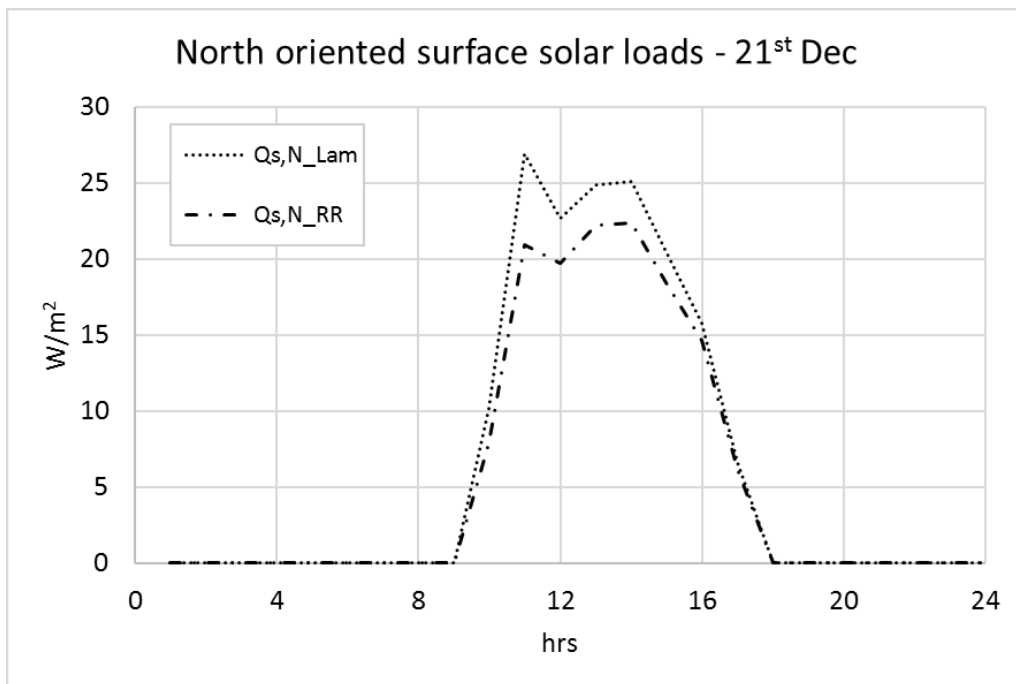


Figura 10.29 – Lam vs RR: carichi solari su superficie orientata a Nord - Inverno

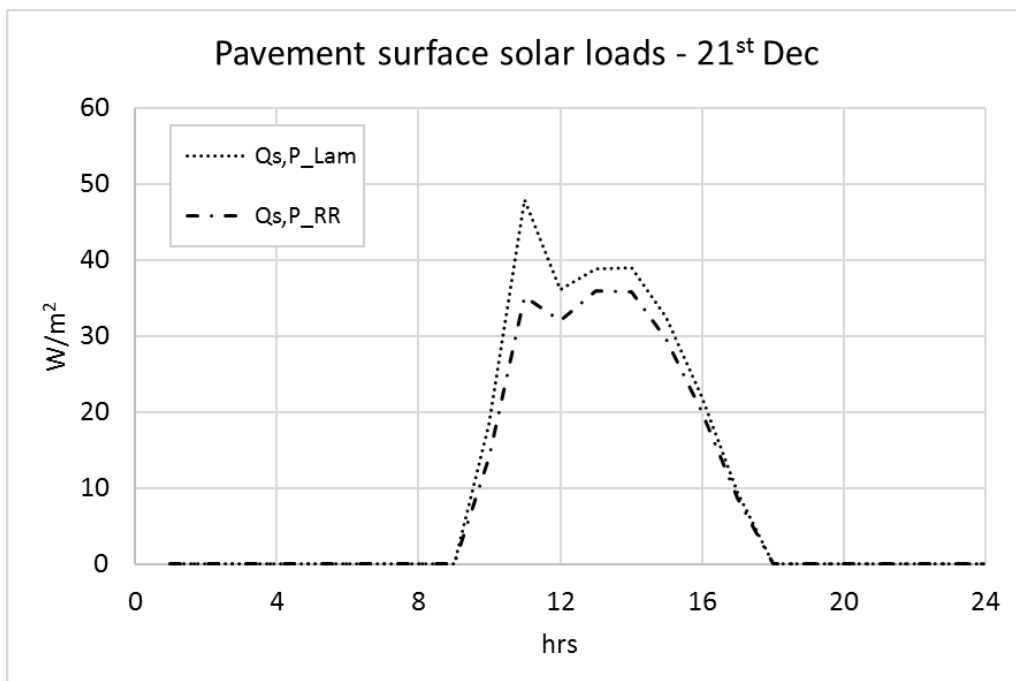


Figura 10.30 – Lam vs RR: carichi solari su pavimentazione stradale - Inverno

### **Caso estivo**

Analizzando gli andamenti dei carichi solari in Figura 10.31, Figura 10.32 e Figura 10.33, ovvero nel caso della stagione estiva, la differenza di radiazione assorbita sulle superfici del canyon nell'arco

della giornata, rispetto alla configurazione lambertiana, varia dal -19/-20% (superficie orientata a Nord e pavimentazione del canyon) al -24% (superficie orientata a Sud).

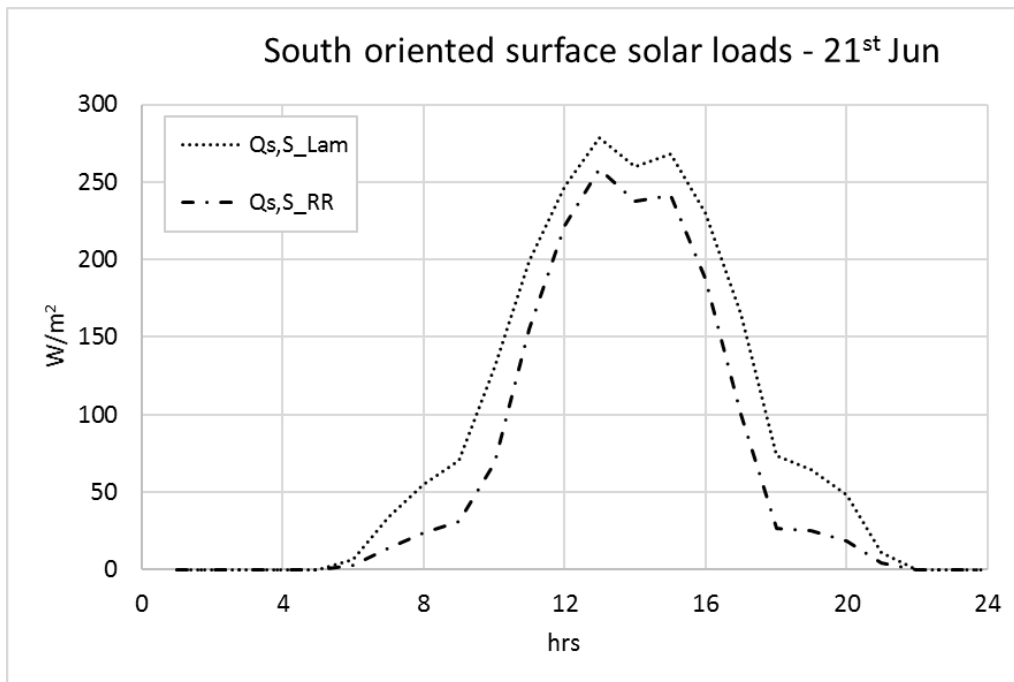


Figura 10.31 – Lam vs RR: carichi solari su superficie orientata a Sud – Estate

Per la superficie orientata a Sud la diminuzione è pari al 48%. Valgono quindi le stesse osservazioni fatte per il caso invernale.

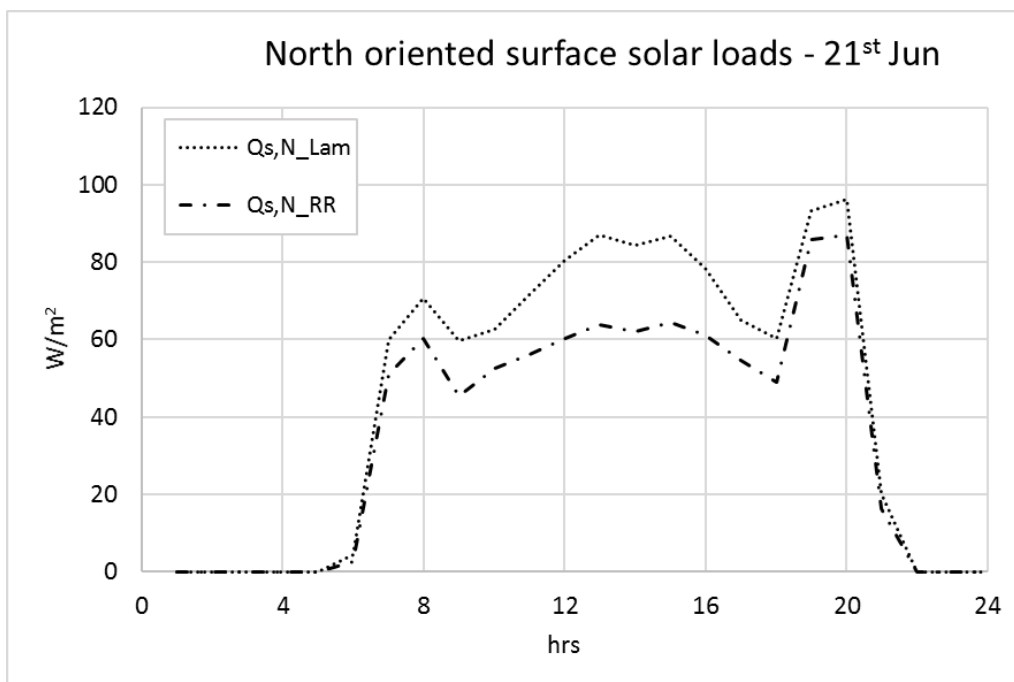


Figura 10.32 – Lam vs RR: carichi solari su superficie orientata a Nord - Estate

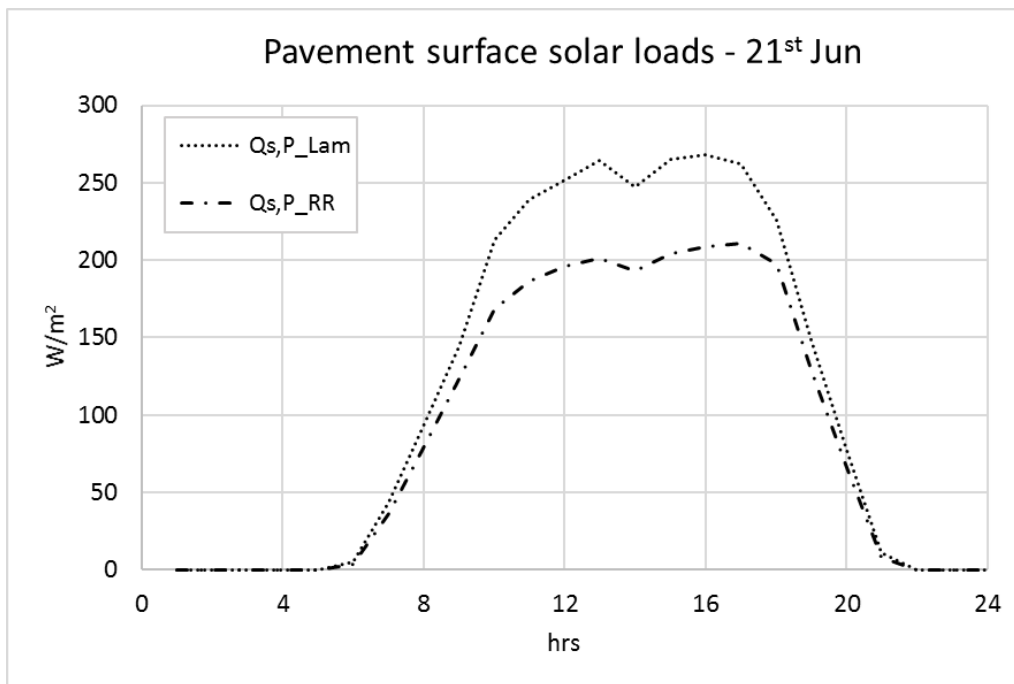


Figura 10.33 – Lam vs RR: carichi solari su pavimentazione stradale - Estate

A valle di questa analisi numerica, si può affermare che i risultati per la superficie orientata a Sud sono profondamente influenzati dalla dipendenza della sua riflettanza sull'angolo di incidenza della radiazione solare diretta. Questo sia per la stagione invernale sia per quella estiva. Il valore della diminuzione rispetto alla superficie orientata a Nord è dovuto al fatto che essa riceve essenzialmente radiazione diffusa e riflessa del cielo: i suoi carichi solari inferiori sono spiegati dalla diminuzione delle inter riflessioni con la superficie orientata a Sud (con rivestimento RR). Più in generale, i carichi solari inferiori riguardanti le altre superfici sono spiegati dalla diminuzione delle reciproche riflessioni interne dovuta ai particolari fattori di vista reciproci con la superficie Sud. In effetti, la maggior parte della radiazione viene riflessa verso il cielo quando vi sono gli angoli di incidenza più elevati della radiazione solare diretta. Quindi, implica che le reciproche inter riflessioni dovute alla radiazione solare diretta siano basse e questo fatto evidenzia la potenzialità dell'uso del materiale RR in un contesto urbano. Il codice numerico è ulteriormente implementabile e una futura campagna di analisi parametriche, variando geometria del canyon e località fornirebbe un quadro più completo per determinare il livello di affidabilità del modello.

## **11 CAMPAGNA DI MISURE SPERIMENTALI SU MODELLI DI CANYON URBANI IN SCALA**

A seguito della modellizzazione analitica dei materiali RR si è pensato di supportare sperimentalmente i risultati numerici, mediante l'implementazione di appositi setup che riproducessero, anche in parte, le condizioni di riflessione all'interno di un canyon urbano. In letteratura si trovano numerosi lavori sperimentali effettuati su canyon in scala. Alcuni lavori mirano a caratterizzare il comportamento dei materiali retro-riflettenti in un canyon urbano (F. Rossi, B. Castellani e A. Presciutti, et al. 2016), altri ambiscono a valutarne le prestazioni energetiche in tale ambito (F. Rossi, B. Castellani e A. Presciutti, et al. 2015). Come fase preliminare, dal momento che era necessario scalare le geometrie dei canyon urbani reali fino a fattori 1:100, si è pensato di progettare dei sensori in grado di monitorare la radiazione incidente e/o riflessa che minimizzassero gli errori di inserzione. In questa sezione perciò viene presentata la fase di progettazione, realizzazione e calibrazione di un prototipo di un albedometro per la misura dell'albedo dei canyon urbani in scala (Yuan, Farnham e Emur 2015). Le caratteristiche principali del sensore sono le ridotte dimensioni e il costo notevolmente basso di tutti i componenti (Martínez, Marquez e Enrique 2009). Il dispositivo si basa su fotodiodi PIN al silicio (Osram SFH 229) impostati in configurazione fotoconduttiva. Questo tipo di trasduttore consente un'eccellente risposta da 10 a 1000 lx in un intervallo compreso approssimativamente tra 400 e 1200 nm, fornendo la massima sensibilità intorno a 850 nm.

A causa del limite superiore nella scala di misurazione (1000 lux), il sensore arriva immediatamente alle condizioni di saturazione in ambienti esterni con illuminazione naturale a causa della massima irradianza che raggiunge il suolo in Italia.

Quindi, al fine di evitare la saturazione, un sistema di attenuazione costituito da strati di teflon è stato testato ottenendo buoni risultati per ciò che concerne l'attenuazione e garantendo una buona accuratezza nella misura.

I risultati ottenuti sono stati confrontati in seguito con i dati ottenuti dall'albedometro LP PYRA 06 della Delta Ohm usato preliminarmente come strumento di riferimento per la calibrazione. Il confronto ha dimostrato un'ottima accuratezza delle misure eseguite con il dispositivo progettato.

Come detto, il dispositivo proposto è stato sviluppato per eseguire misurazioni su modelli di canyon urbani in scala: è il primo di una griglia di 8 dispositivi identici progettati per lavorare insieme in un sistema di monitoraggio integrato per determinare l'albedo di diversi tipi di smart materials applicati come rivestimento d'involucro edilizio per la riduzione dell'effetto isola di calore.

### *11.1 La catena di misura*

In questo paragrafo verrà illustrata passo per passo la costruzione e l'implementazione della catena di misura composta principalmente:

- dal prototipo di albedometro;
- dal circuito di condizionamento;
- dal sistema di acquisizione, (scheda hardware Arduino Uno);
- dall'interfaccia grafica sviluppata in Labview per gestire e raccogliere i dati real time provenienti dal sensore.

Il prototipo di albedometro costruito da noi (che da ora in avanti verrà denominato per semplicità “*Albedometro LIFT*”) è composto a sua volta da:

- sensori di numero pari a due e disposti in modo tale da rilevare la radiazione riflessa (sensore DOWN) e la radiazione incidente (sensore UP);
- sistema di attenuazione;
- sistema di housing;

Il circuito di condizionamento prevede un breadboard sulla quale sono disposti elementi circuitali quali resistenze e jumper per ottenere i collegamenti tra i vari componenti. In questo circuito si effettua la conversione corrente/tensione.

La scheda Arduino ha la funzione di convertitore analogico/digitale (ADC cioè Analog to Digital Converter), di fonte di alimentazione dell'elemento a semiconduttore e inoltre di sistema di acquisizione dati grazie all'ambiente di sviluppo integrato (software).

Infine, attraverso il computer, per permettere di scegliere meglio l'intervallo di campionamento delle misurazioni e di intervenire nell'acquisizione dei dati e selezionare il percorso di salvataggio è stato utilizzato il software Labview che, grazie ad una libreria dedicata ad Arduino presente al suo interno, consente la comunicazione diretta con il microcontrollore.

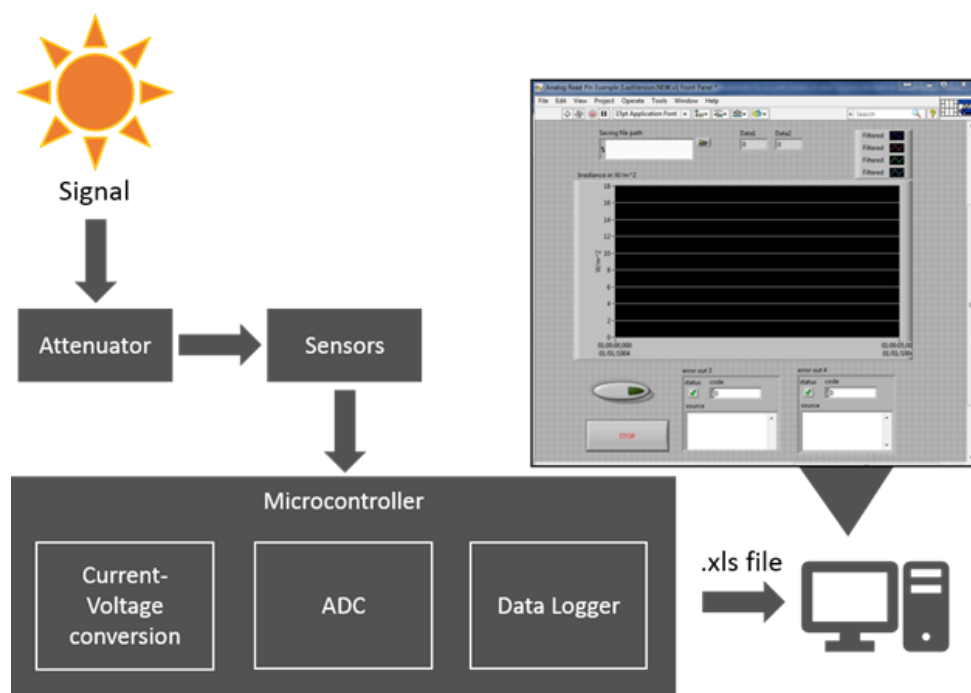


Figura 11.1 - Diagramma a blocchi della catena di misura

### 11.1.1 Scelta del sensore

Nel mercato esistono diversi tipi di fotorilevatori. La scelta dei sensori che sono stati inseriti all'interno dell'albedometro LIFT ha richiesto un esaustivo studio dei vari elementi fotosensibili disponibili in commercio, nonché un'approfondita indagine sul funzionamento e sulle proprietà del sensore da noi infine selezionato: ossia il fotodiodo. Per comprendere meglio perché la decisione sia ricaduta sul fotodiodo esaminiamo le caratteristiche in generale di questo sensore per poi osservare alcuni parametri del datasheet del modello prescelto.

### 11.1.2 I fotodiodi

I fotodiodi sono forse i rivelatori più diffusi per le loro caratteristiche di robustezza, versatilità e prezzo contenuto e vengono impiegati per lo più come trasduttori di potenza luminosa. Il funzionamento si basa sulle caratteristiche dei materiali di cui è composto, ovvero *materiali semiconduttori*. I materiali semiconduttori di per sé non sono né isolanti né conduttori; se nel reticolo caratteristico della loro struttura vengono inseriti artificialmente altri elementi (*drogaggio*) si può avere un eccesso di cariche positive o negative a seconda dell'elemento introdotto (*drogaggio di tipo p o n*) come drogante. Quando due porzioni di materiale, drogate in modo opposto, vengono poste a contatto, nella zona di interfaccia le cariche positive da una parte e negative dall'altra si neutralizzano a vicenda, creando una zona a carica neutra, detta zona di svuotamento. La zona di svuotamento può



essere "allargata" introducendo una opportuna differenza di potenziale ai capi delle due porzioni di materiale.

Quando un fotone luminoso rilascia la propria energia all'interno della zona di svuotamento, le cariche prima neutralizzate vengono nuovamente liberate dando così luogo ad un passaggio di corrente, la cui intensità sarà proporzionale al numero di fotoni incidenti. La misura di tale corrente dà quindi una misura della radiazione incidente sul fotorivelatore.

Scendendo nei particolari costruttivi, un fotodiode è sostanzialmente dunque un diode particolare caratterizzato da una giunzione *pn* drogata in modo asimmetrico. La zona *p*, cioè la zona drogata con  $N_a$  accettori (atomi che hanno un elettrone in meno rispetto agli altri presenti nel reticolo cristallino, hanno una *lacuna*) è molto più drogata rispetto alla zona *n*, zona caratterizzata dalla presenza di atomi  $N_d$  donori (atomi che hanno un elettrone in eccesso rispetto agli altri presenti nel reticolo, hanno un *elettrone*).

L'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica è assorbita dalla regione di svuotamento che determina il contributo della corrente elettrica.

Nel momento in cui un fotone incide sulla superficie del fotodiode, l'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica, data dall'equazione:

$$E_g = h\nu \quad (11.1)$$

se sarà maggiore della differenza di energia tra banda di valenza e banda di conduzione del dispositivo, causerà la creazione di una coppia elettrone-lacuna libera (EHP).

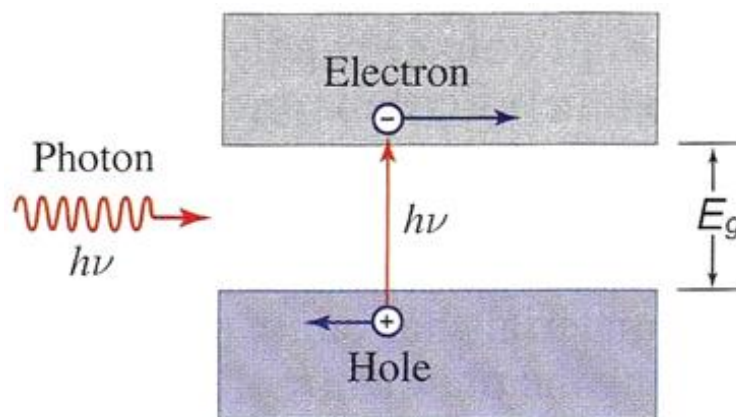


Figura 11.2 - Generazione di una coppia elettrone-lacuna all'interno di un semiconduttore

Una EHP libera consiste in un elettrone eccitato in banda di conduzione ed una lacuna in banda di valenza. Una volta generata la coppia, essa sarà soggetta al campo elettrico generato dalla differenza di potenziale applicata ai capi del dispositivo. Il campo elettrico si estende lungo la zona di assorbimento. L'elettrone sarà quindi spontaneamente attratto verso la zona *n* mentre la lacuna verso la zona *p*. A causa della assenza di una coppia elettrone-lacuna nella zona svuotata, la regione non

sarà più neutra. Non essendo più neutra, il dispositivo compenserà questa situazione con un movimento di elettroni-lacune prelevati dal generatore di polarizzazione, causando così la presenza di una fotocorrente inversa  $I_{ph}$  che rappresenta il segnale elettrico prodotto dall'incidenza del fotone. Le caratteristiche di un fotodiode dipendono fortemente dal materiale con cui sono costruiti, ed in base a questo cambia l'energia minima che deve avere un fotone per produrre fotocorrente ed essere quindi rivelato, ad esempio, per i fotodiode al silicio, i fotoni devono avere lunghezze d'onda comprese tra 190 nm e 1100 nm, per quelli al germanio tra 800 e 1700 nm e per quelli all'arseniuro di gallio tra 800 e 2600 nm. I più diffusi sono quelli al silicio ed a questi limiteremo la presente trattazione: infatti il fotodiode selezionato per questo lavoro è al silicio.

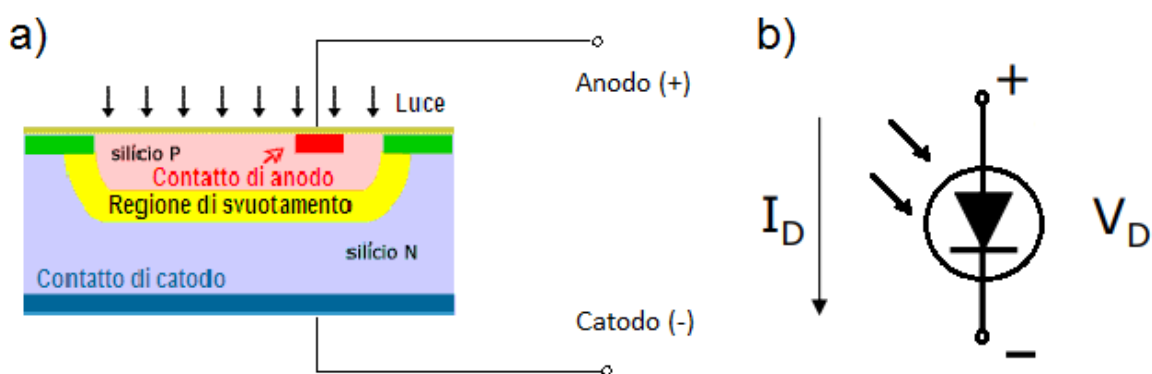


Figura 11.3 - a) Rappresentazione giunzione PN fotodiode; b) schema circuitale fotodiode.

La caratteristica tensione corrente di un fotodiode è dunque uguale a quella di un diode, con la differenza che la luce incidente la sposta in basso in proporzione al flusso di fotoni e con l'aggiunta di un termine di corrente fotogenerata  $I_{ph}$ . Infatti, la corrente  $I_D$  che attraversa il fotodiode è la somma di due contributi:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (11.2)$$

- la corrente del diode espressa dalla legge di Shockley;
- la corrente  $I_{ph}$  foto generata nella zona di svuotamento;

dove  $I_0$  è la corrente di leakage del diode (corrente inversa di saturazione – corrente di buio),  $V_D$  la tensione ai capi del dispositivo e  $V_T$  la tensione termica.

I fotodiode, inoltre, possono essere classificati in base alla funzione e alla costruzione come segue:

- Fotodiode *pn*
- Fotodiode *pin*
- Fotodiode tipo *Schottky*
- *APD* (Fotodiode a valanga)

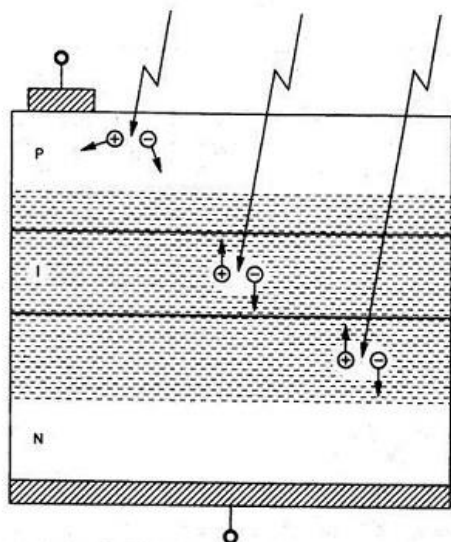


Figura 11.4 - Schema semplificato giunzione pn

Il fotodiiodo *pn* è stata la prima forma di fotodiiodo ad essere sviluppata ed utilizzata. Al giorno d'oggi, non è così diffuso come altri tipi che sono in grado di offrire parametri di performance migliori, tuttavia è ancora usato in alcuni casi.

Quello che invece ci interessa maggiormente è il tipo *pin*, che è una delle forme più diffuse oggi perché raccoglie i fotoni di luce in modo più efficiente rispetto al fotodiiodo standard. Il *pin* si differenzia dal tipo *pn* perché le regioni drogate *p* ed *n* della giunzione sono separate da una regione di semiconduttore *intrinseco* (non drogato). Nel

fotodiiodo *pn* molte coppie elettroni-lacune vengono dissociate dai fotoni incidenti al di fuori della zona in cui vi è il campo elettrico (zona di svuotamento meno estesa della zona di assorbimento). Queste cariche normalmente si ricombinano perché non vengono separate dal campo elettrico. Esse, quindi, non danno contributo alla corrente del fotodiiodo. Nei fotodiiodi *pin*, invece, il tempo di vita dei portatori (elettroni e lacune) nel semiconduttore intrinseco è molto alto e la regione di svuotamento risulta più ampia. Quindi le coppie generate (per assorbimento dei fotoni) non si ricombinano perché vengono subito separate dal campo elettrico. Pertanto, l'efficienza quantica è maggiore. Anche se i diversi tipi di fotodiiodo lavorano in modo leggermente diverso, la base di funzionamento di tutti i fotodiiodi rimane la stessa, cioè quella spiegata sopra.

### 11.1.3 Modalità operative del fotodiiodo

Le modalità in cui opera un fotodiiodo sono:

- *Modalità fotoconduttiva*: il fotodiiodo opera in condizioni di polarizzazione inversa, la tensione presente ai propri terminali  $V_d < 0$ , e si comporta come un generatore di corrente. Il primo termine dell'espressione di  $I_D$  si riduce a  $I_0$ ; allora si ha  $I = -I_0 - I_{ph}$  cioè il fotodiiodo eroga una corrente proporzionale linearmente alla potenza ottica con sovrapposta la corrente di buio. Si lavora nel terzo quadrante della caratteristica  $I/V$ .
- *Modalità fotovoltaica*: il fotodiiodo opera senza l'applicazione di tensioni di polarizzazione  $V_d = 0$ . La corrente che scorre nel diodo è pari alla fotocorrente inversa  $I_d = -I_{ph}$ . Per  $I_d = 0$  il fotodiiodo si comporta come un generatore di tensione. La tensione ai capi del fotodiiodo varia in modo logaritmico con l'illuminazione. Questo è il funzionamento tipo delle celle solari. Si lavora nel quarto quadrante della caratteristica  $I/V$ .

La situazione è quella descritta in Figura 11.5:

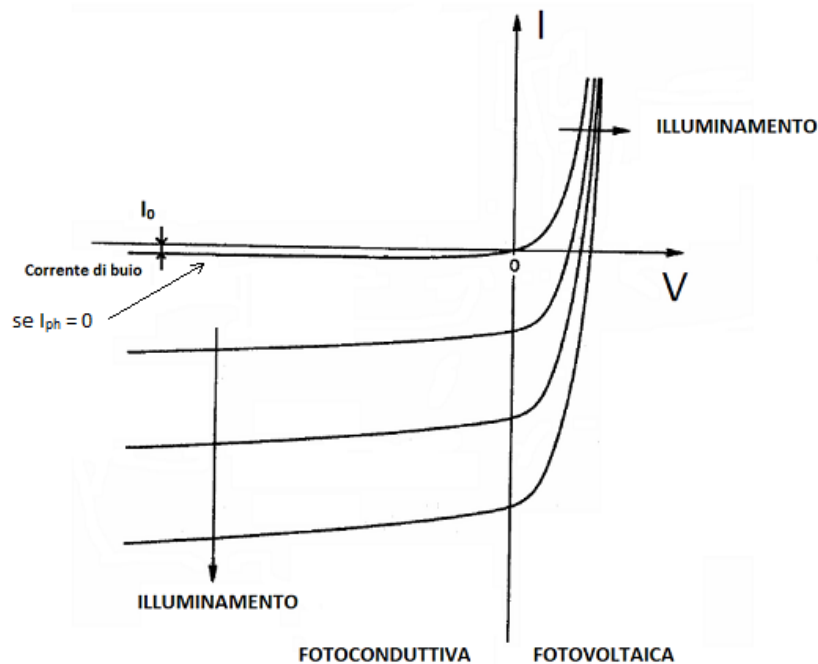


Figura 11.5 - Curve tensione corrente in funzione del livello di illuminamento.

La corrente fotogenerata risulta proporzionale alla potenza luminosa incidente, ovvero al flusso di fotoni che incidono sul sensore. Matematicamente si può esprimere:

$$I_{ph} = \frac{\eta e}{h\nu} P \quad (11.3)$$

dove  $\eta$  è l'efficienza quantica,  $e$  è la carica dell'elettrone;  $P/h\nu$  rappresenta il numero di fotoni al secondo.

Nella valutazione e comparazione delle prestazioni dei fotodiodi entrano in gioco due parametri importanti: l'efficienza quantica e la responsività. L'efficienza quantica è il numero di coppie elettrone-lacune generate per ogni fotone incidente, mentre la responsività è il rapporto tra la corrente fotogenerata e la potenza ottica incidente  $P$ .

Il fotodiodo opera correttamente se polarizzato in inversa, e cioè se la tensione ai propri terminali si presenta più alta nella zona  $n$  che nella zona  $p$  ed è proprio questa la modalità scelta con cui sono stati configurati i nostri fotodiodi.

I vantaggi di questa configurazione sono:

- la linearità della risposta; come detto, infatti, la fotocorrente inversa varia linearmente con l'intensità luminosa e, tipicamente è dell'ordine di qualche  $\mu\text{A}$ .
- rapidità della risposta; per effetto della polarizzazione inversa la velocità del rilevatore aumenta.

L'unico svantaggio, invece, è rappresentato dalla presenza della corrente di buio che si sovrappone a quella del fotodiode e che crea del rumore nel segnale di uscita. Ma questa corrente è dell'ordine del nA e nel nostro caso non disturba significativamente il segnale utile.

#### 11.1.4 Sensibilità spettrale dei fotodiode

La scelta del rivelatore più adatto alla misura che si ha in programma di fare deve partire da alcune considerazioni preventive, prima tra tutte la banda spettrale in cui si ha intenzione di effettuare la misura stessa. Un rivelatore ideale per una data misura infatti, dovrà essere molto sensibile nella banda di interesse ed essere, idealmente, insensibile altrove, ovvero non produrre alcun risultato se investito da radiazione con altre lunghezze d'onda. La sensibilità spettrale ideale di un rivelatore dovrebbe avere quindi la forma riportata in Figura 11.6.

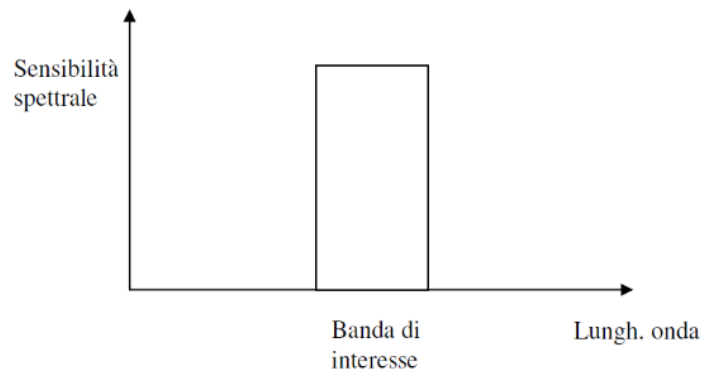


Figura 11.6 - Sensibilità ideale di un rivelatore

Questa idealizzazione è poco praticabile con i rivelatori reali, ma con alcuni accorgimenti si possono ottenere risultati molto buoni. È necessario, innanzitutto, avere un buon segnale iniziale, ovvero: il rivelatore deve dare un alto segnale quando investito dalla radiazione che si vuole misurare, ed eventualmente le radiazioni che non interessano (ma che producono ugualmente segnale) possono essere opportunamente filtrate. In Figura 11.7 sono riportate le sensibilità spettrali di alcune tipologie di rivelatori.

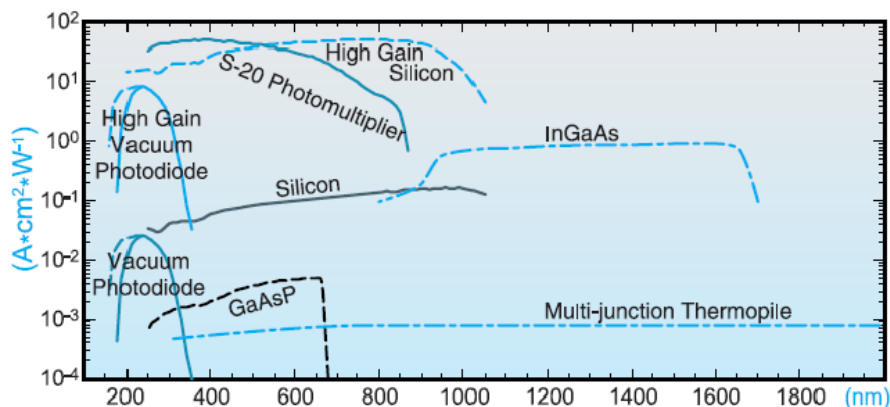


Figura 11.7 - Sensibilità spettrali di alcune tipologie di rivelatori

La sensibilità spettrale dei fotodiodi al silicio è bassa nella banda UV, dato che queste radiazioni rilasciano la propria energia nei primissimi strati di materiale dove la rivelazione non avviene. In modo opposto, non vengono rilevate lunghezze d'onda maggiori di un micron e mezzo in quanto esse attraversano il materiale senza rilasciarvi energia, quindi ha una sensibilità allo spettro solare più stretto delle termopile. Il picco di sensibilità è intorno ai 900 nm e questi rivelatori hanno una risposta lineare luce incidente – corrente prodotta, rendendoli degli ottimi rilevatori.

### 11.1.5 Il fotodiodo Osram SFH 229

Il sensore selezionato per questo progetto è il fotodiodo al silicio PIN SFH 229 della OSRAM.

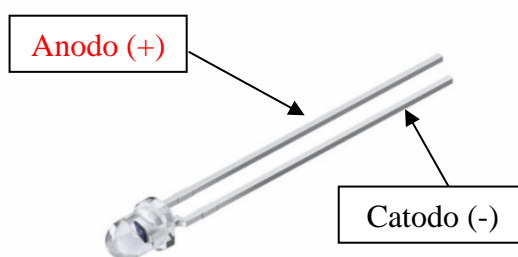


Figura 11.8 - Fotodiodo al silicio Pin Osram SFH 229

Nello specifico per il fotodiodo OSRAM SFH 229 dalla scheda tecnica si hanno le seguenti caratteristiche principali:

**Characteristics** ( $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$ )

Parameter	Symbol	Value	Unit
		SFH 229	
Photocurrent $V_R = 5\text{ V}$ , standard light A, $T = 2856\text{ K}$ , $E_V = 1000\text{ lx}$	$I_P$	28	$\mu\text{A}$
Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\text{max}}$	860	nm
Spectral range of sensitivity	$\lambda$	380 ... 1100	nm
Radiant sensitive area	$A$	0.3	$\text{mm}^2$
Half angle	$\varphi$	$\pm 17$	Grad deg.
Dark current, $V_R = 10\text{ V}$	$I_R$	50	pA
Spectral sensitivity, $\lambda = 850\text{ nm}$	$S_\lambda$	0.62	A/W

Figura 11.9 - Principali caratteristiche tecniche del fotodiodo SFH 229

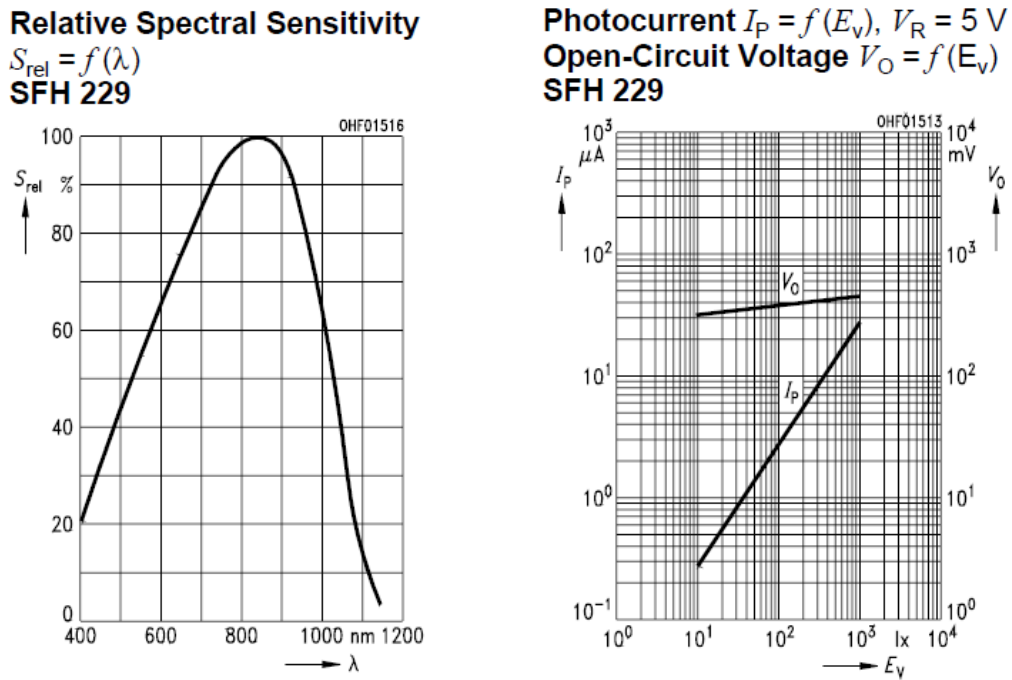


Figura 11.10 - Curva sensibilità spettrale e caratteristica di uscita fotocorrente.

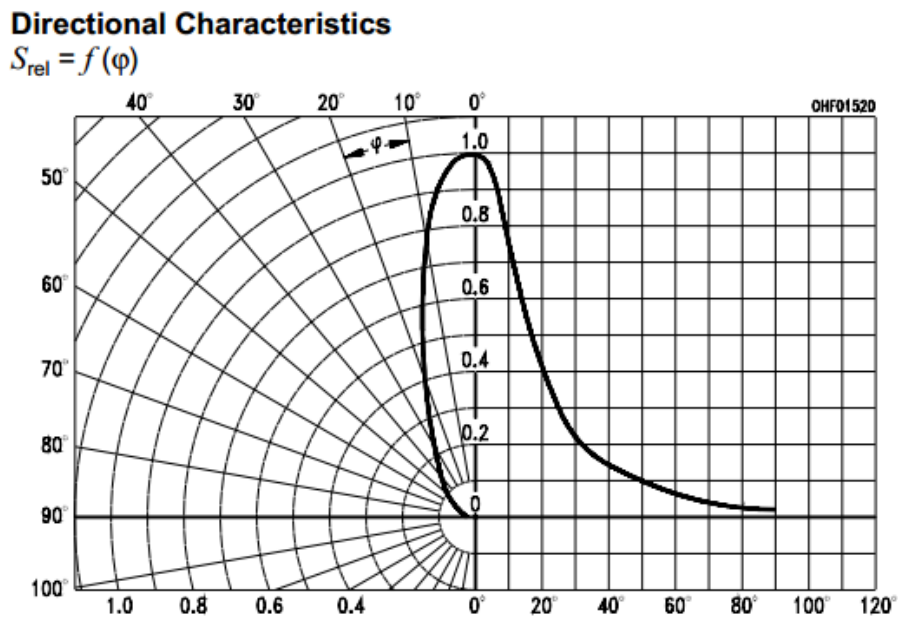


Figura 11.11 - Sensibilità angolare del fotodiode SFH 229

### 11.1.6 Scelta del circuito di condizionamento

Il sistema di acquisizione dati comprendente il fotodiode dovrà includere un circuito di condizionamento atto alla regolazione del punto di lavoro affinché sia nella zona di minimo rumore. I circuiti di condizionamento hanno il compito di elaborare il segnale in uscita dal trasduttore per adattarlo alle caratteristiche dei circuiti che seguono nella catena di acquisizione.

In pratica con il termine condizionamento si indica un vasto insieme di operazioni messe in atto per ottimizzare le prestazioni del sistema di acquisizione.

I trasduttori con uscita analogica, come lo è il fotodiodo, pongono la necessità di elaborazioni complesse, quali:

- convertire la grandezza elettrica in uscita dal trasduttore in una tensione;
- adattare il campo di variabilità del segnale a quello dei circuiti a valle (come i convertitori ADC) al fine di rendere massima la risoluzione del sistema di acquisizione;
- ridurre al minimo le alterazioni del segnale provocate dai disturbi e dalle distorsioni;
- trasferire il massimo valore del segnale in tensione o in potenza;
- compensare le non linearità del trasduttore;
- filtrare il segnale.

Sono state analizzate e studiate diverse alternative per il condizionamento del segnale prodotto dal fotodiodo. Il circuito visualizzato in Figura 11.12 rappresenta la base elementare per il condizionamento dei fotodiodi.

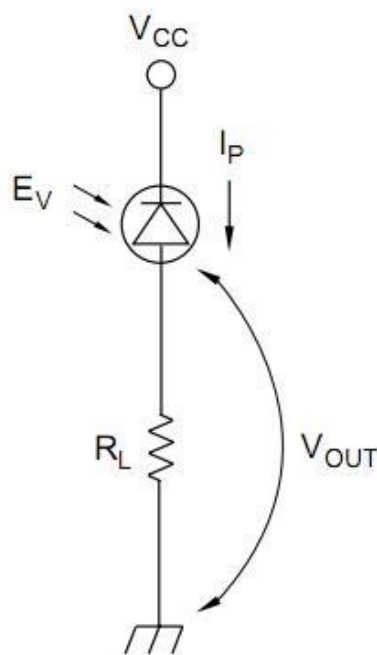


Figura 11.12 - Circuito con polarizzazione inversa

In questa configurazione il fotodiodo è polarizzato inversamente e la fotocorrente generata è trasformata in tensione mediante una resistenza; vale la legge di Ohm per la quale la tensione di uscita si calcolerà come:

$$V_{OUT} = I_P R_L \quad (11.4)$$

dove  $R_L$  è la resistenza di carico.



Poiché in generale si ha la necessità di amplificare o attenuare la fotocorrente generata, oltre al classico circuito di condizionamento appena visto, si prevede l'utilizzo di ulteriori componenti di amplificazione o attenuazione. Nello specifico la configurazione tipica, suggerita in letteratura, per attenuare il segnale uscente dal fotodiodo presenta un transistor; mentre, l'analoga configurazione per amplificare il segnale in tensione del fotodiodo comprende nel circuito un amplificatore operazionale. Gli amplificatori operazionali trovano molto spazio nei circuiti di condizionamento per fotodiodi perché sono in grado di sopprimere l'influenza della corrente di buio e ridurre l'effetto rumoroso; inoltre l'andamento della tensione è lineare con l'intensità di radiazione incidente. In Figura 11.13 è riportato un esempio applicativo con l'operazionale.

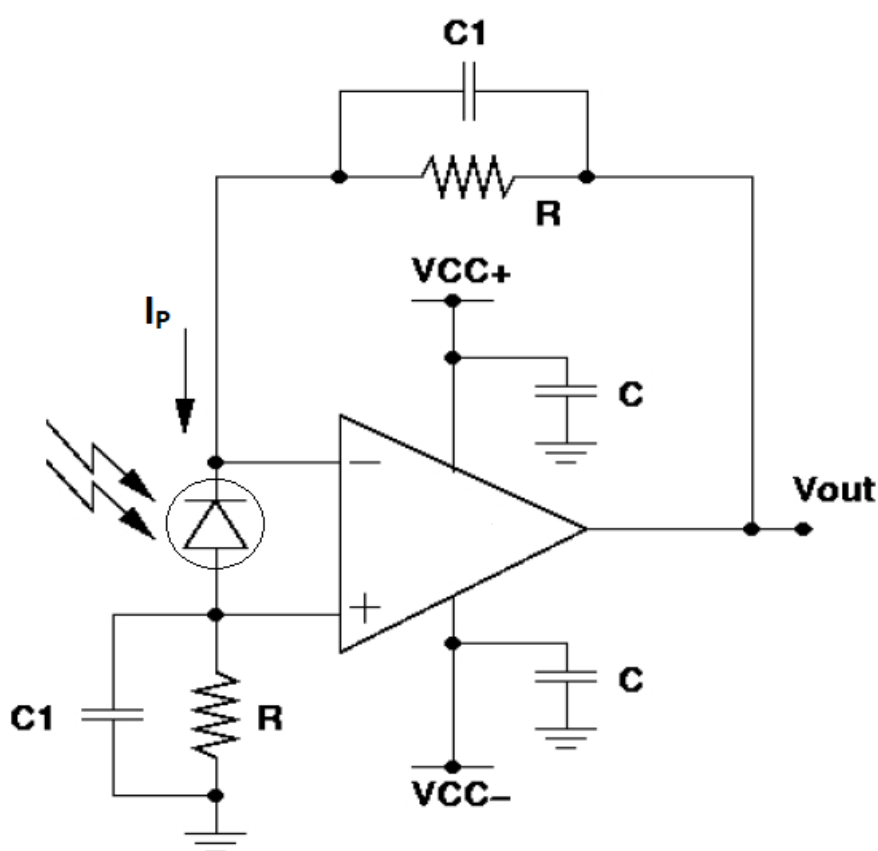


Figura 11.13 - Circuito di condizionamento con amplificatore operazionale

Questa configurazione presenta indubbi vantaggi ed è stata presa in considerazione come valida scelta per il circuito di condizionamento del nostro fotodiodo. Ma, poiché richiedeva l'introduzione di componenti elettronici aggiuntivi, per semplicità di costruzione del circuito si è deciso di scartare l'opzione (Hidalgo, Martinez e Vidal 2012).

La scelta del circuito di condizionamento del fotodiodo è dunque ricaduta sulla prima configurazione esaminata, cioè quella elementare.

È chiaro che, nella costruzione del circuito serve alimentare con una tensione inversa ciascun fotodiode ( $V_{CC} = 5 \text{ V}$ ) e prevedere una elevata resistenza di carico per ognuno di essi in modo da ottenere un segnale di tensione lineare, elevato e veloce. In accordo con le caratteristiche elettroniche del fotodiode SFH 229 per una tensione di polarizzazione inversa di  $5 \text{ V}$  con un illuminamento di  $1000 \text{ lux}$  viene generata una fotocorrente massima di  $28 \mu\text{A}$ , mentre con un illuminamento di  $10 \text{ lux}$  la fotocorrente prodotta è di  $0.28 \mu\text{A}$ . Allora il valore usato per dimensionare la resistenza di carico è stato trovato in accordo con la legge di Ohm:

- $R_L = 180 \text{ k}\Omega$ .

Per poter alimentare ambedue i fotodiode contemporaneamente con la stessa  $V_{CC}$  essi sono stati disposti in parallelo. Nella figura seguente è rappresentata la configurazione finale del sistema di condizionamento.

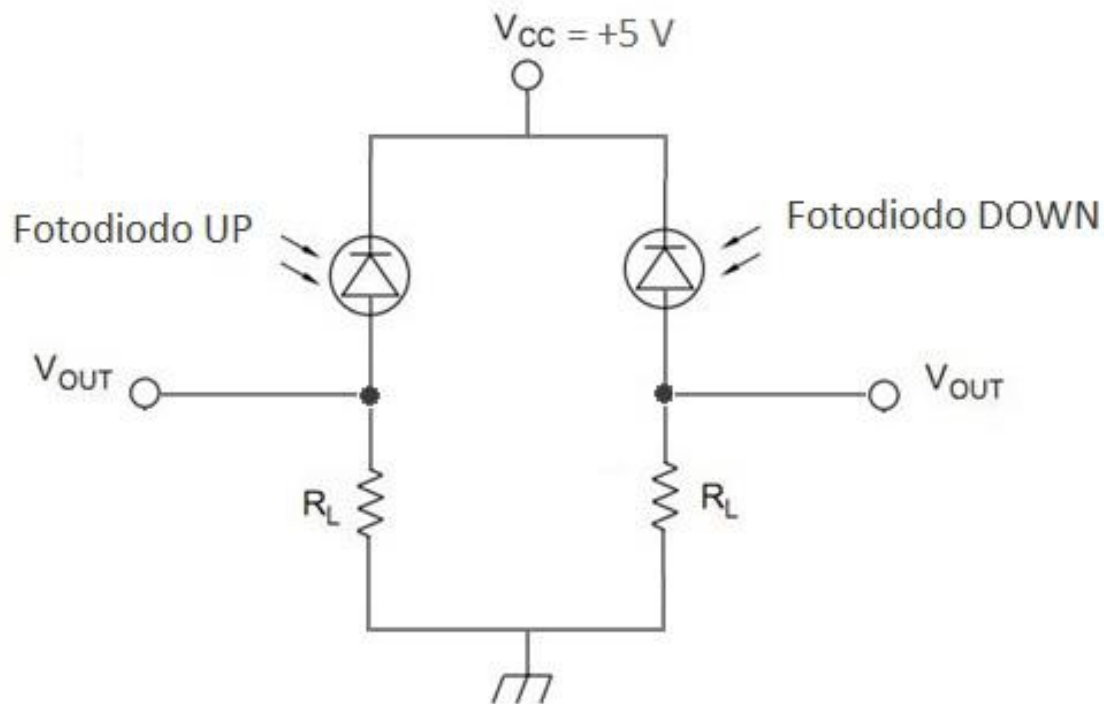


Figura 11.14 - Circuito di condizionamento finale con i due sensori

Il circuito scelto si comporta come un convertitore corrente – tensione dove l'uscita in tensione varia linearmente con l'intensità della radiazione incidente sul fotodiode. Concretamente il circuito di condizionamento costruito sul breadboard si presenta in questo modo:

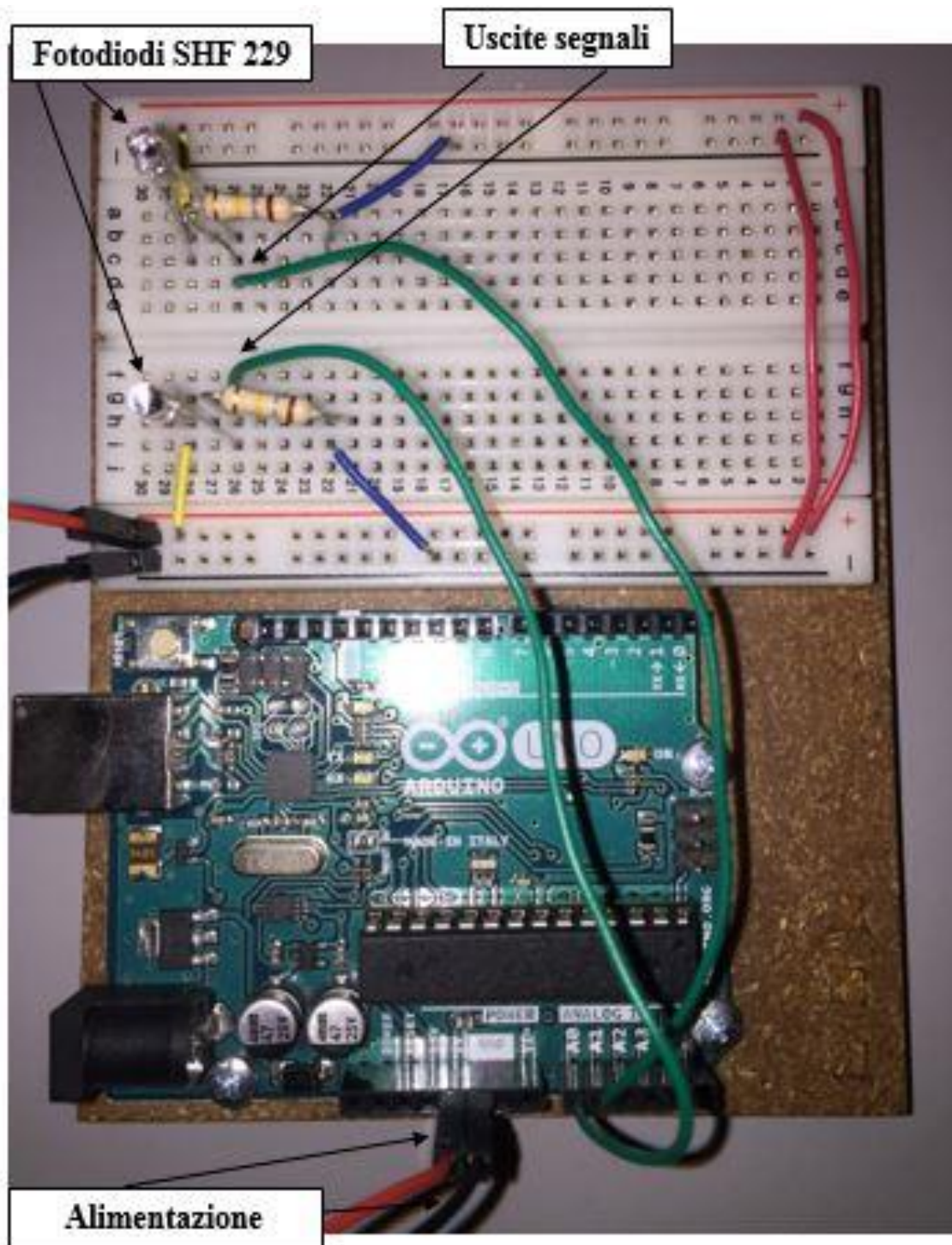


Figura 11.15 - Collegamenti del circuito di condizionamento su breadbord Arduino UNO.

L'output del circuito fornisce un segnale analogico che cade nel range di valori 0–5 V; successivamente al circuito segue un sistema di acquisizione digitale.

### 11.1.7 Ricostruzione in laboratorio caratteristica sensore

A seguito della progettazione del circuito di condizionamento del trasduttore, è stata eseguita in laboratorio una ricostruzione della caratteristica lineare illuminamento-fotocorrente del sensore SFH

229. Cioè è stato verificato che la relazione tra fotocorrente e illuminamento fosse lineare. Per fare questo è stato utilizzato come sorgente un'illuminante standard A (ovvero una lampada ad incandescenza). Inoltre, come strumento di riferimento è stato impiegato un luxmetro da campo Testo 540. Sono stati posti perpendicolarmente al di sotto della lampada sia il fotodiodo in considerazione che il luxmetro. È stato constatato dalla scheda tecnica che il campo di misura del fotorilevatore SFH 229 è compreso tra 10 lux con una relativa uscita in corrente di  $0.28 \mu\text{A}$  (che corrispondono a  $0.05 \text{ V}$  – vedi circuito di condizionamento) e  $1000 \text{ lux}$  con una corrente di  $28 \mu\text{A}$ ; per cui a  $200 \text{ lux}$  di illuminamento coincide  $1 \text{ Volt}$ . In seguito, sono state eseguite le misure per diversi valori di illuminamento e sono stati riportati in un grafico i dati reali provenienti dal fotodiodo, la curva ideale fornita dalla scheda tecnica del sensore SFH 229 e quelli misurati dal luxmetro. È possibile notare che quindi la caratteristica ottenuta in laboratorio ricostruisce l'andamento di quella fornita nel datasheet e che queste due invece presentano un piccolo discostamento (deriva) dalla curva ottenuta dal luxmetro.

Ricostruzione caratteristica sensore

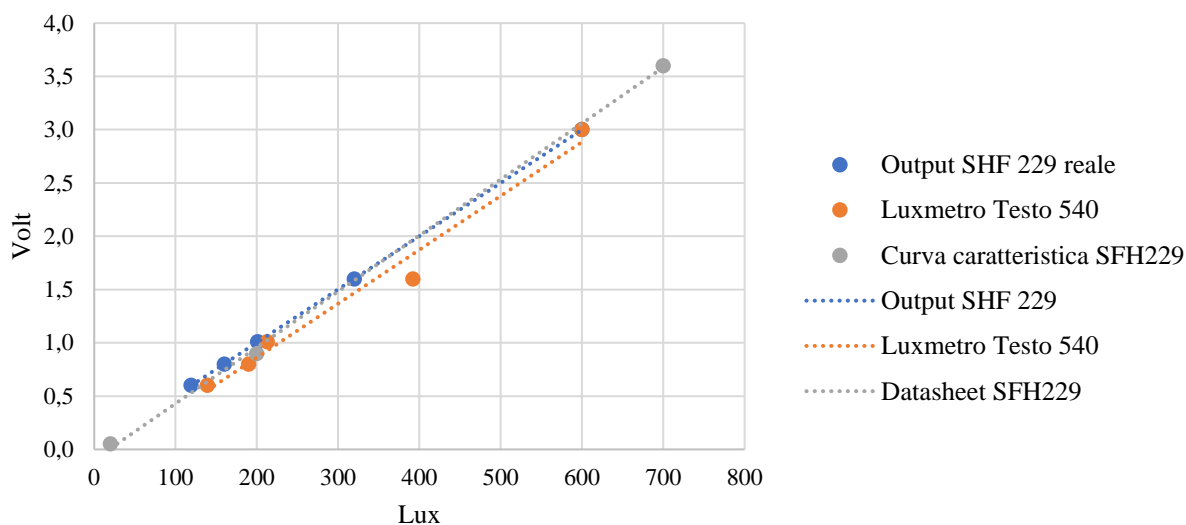


Figura 11.16 - Ricostruzione caratteristica sensore

Questo procedimento è stato effettuato come verifica della corrispondenza con la caratteristica del fotodiodo riportata nella scheda tecnica.

### 11.1.8 Scelte progettuali per il sistema di housing dei sensori

La struttura esterna dell'albedometro è costituita da un piccolo raccordo a T in pvc nero reperibile in commercio e usato nel giardinaggio per i sistemi di irrigazione. Questo alloggiamento si presenta come un giunto a 3 vie. Tale geometria ha permesso di disporre i due fotodiodi in modo sicuro all'interno, installandoli in opposizione di  $180^\circ$  l'uno rispetto all'altro: una via affacciata verso l'alto

e l'altra verso il basso al fine di ricevere rispettivamente la radiazione incidente e quella riflessa. Infine, l'ultima via è stata usata come uscita per raggruppare i 4 cavi proveniente dai sensori. In Figura 11.17 è mostrato il raccordo a T utilizzato come alloggiamento per i sensori.



Figura 11.17 - Giunzione a T scelta come housing per i fotodiodi

Il diametro del foro del raccordo è di 16 mm. In generale le caratteristiche che il telaio deve soddisfare sono:

- ridotte dimensioni,
- robustezza della struttura,
- resistenza alle alte temperature, radiazioni e adeguatezza ad un impiego continuativo all'aperto,
- colore nero al fine di non interferire con la misurazione,
- basso costo,
- disponibilità immediata.

Sono state fatte alcune modifiche alla versione originale del raccordo per ottenere un alloggiamento più adeguato per i sensori: i due tubi opposti in cui sono disposti i fotorilevatori sono stati tagliati riducendone le dimensioni come mostrato in Figura 11.18.

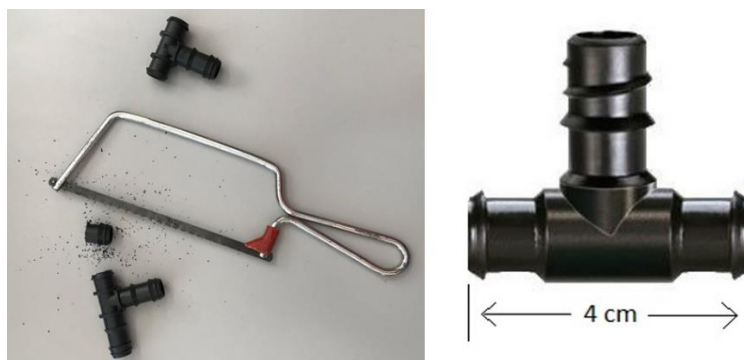


Figura 11.18 - Raccordo modificato

In seguito per permettere il posizionamento stabile dei fotodiodi all'interno dei giunti è stato realizzato un supporto cavo di forma cilindrica. Sulla base di esso è presente un foro rettangolare attraverso cui sono stati fatti passare i pin del fotodiodo, quest'ultimo è stato inserito fino a battuta ed è stata utilizzata una goccia di colla per tenere stabile il fotodiodo.

Mentre il raccordo a 3 vie è stato acquistato in commercio, il supporto è stato ideato e progettato interamente da noi attraverso Autocad e prodotto attraverso la stampa 3D nel laboratorio MUG dell'università di Roma tre. L'angolo di vista scelto per il fotodiodo ( $72^\circ$ ) consente di mantenere un valore di sensibilità angolare dell'elemento captante elevato (vedi Figura 11.11).

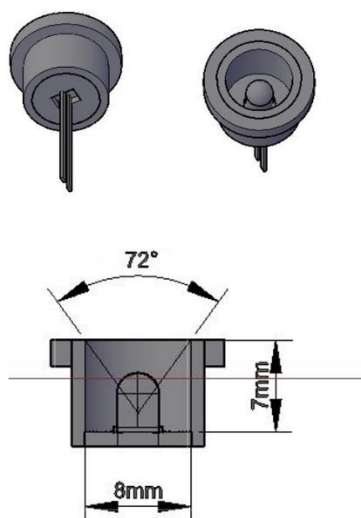


Figura 32 – Design dell'alloggiamento e della copertura del rilevatore

Il raccordo a T, ospitante i fotodiodi, è stato collegato quindi ad una asta di fissaggio che permettesse il passaggio dei cavi che partono dai sensori e arrivano al circuito, per assicurare una posizione a sbalzo al fine di eseguire le misure. L'asta è stata poi collegata e fissata ad un treppiede che consentisse di dare stabilità nel complesso all'intero apparato, permettendo anche il controllo della posizione in altezza. È stata così replicata la struttura di un albedometro tradizionale.

### 11.1.9 Sistema di attenuazione

Il sensore superiore è esposto direttamente alla radiazione incidente e presenta un limite di saturazione per quanto riguarda l'illuminamento rilevato dal fotodiodo che coincide con 1000 lux come riportato nel datasheet. Dal momento che per la radiazione solare, il fattore di conversione può essere assunto pari a  $0.0079 \text{ W/m}^2$  per lux, 1000 lux corrispondono a un'irradianza di  $7.9 \text{ W/m}^2$  quando si alimenta con una tensione di 5V. Ma durante l'anno mediamente l'irradianza solare sul piano orizzontale nel territorio italiano è  $300 \text{ W/m}^2$ . Infatti, l'irradianza solare in Italia è dell'ordine di alcune centinaia di  $\text{W/m}^2$  e raggiunge valori massimi intorno a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Dopo aver valutato che il picco di irradianza massima misurato nel centro Italia è di circa  $1100 \text{ W/m}^2$  durante la stagione estiva, si è dovuto trovare perciò un modo per attenuare questo valore e riportarlo nel range che il fotorilevatore è in grado di valutare. Questa attenuazione è stata calcolata mediante l'equazione:

$$x = \frac{1100 - 7.9}{1100} * 100 = 99.3\%$$

Quindi per evitare la saturazione nel campionamento dei dati, è necessario adottare un elemento di attenuazione che possieda i seguenti requisiti:

- non deve essere selettivo per le lunghezze d'onda comprese nell'intervallo tra 380 e 1200 nm dello spettro solare,
- l'attenuazione deve essere proporzionale al valore di irradianza originale,
- le caratteristiche di attenuazione non devono essere influenzate dalle condizioni atmosferiche dell'ambiente,
- deve essere economico e maneggevole da usare.

Poiché l'elemento di attenuazione non deve filtrare né tantomeno assorbire le lunghezze d'onda dello spettro solare, dovrà essere di colore bianco. Come provato in molte delle soluzioni adottate nei più comuni dispositivi usati per la determinazione dell'irradianza solare, uno schermo di diffusione in plastica bianco risulta idoneo per lo scopo.



*Figura 11.19 - Esempio di strumento per la misura di radiazione con cupola in Teflon attenuante*

Ad esempio, nel luxmetro, come mostrato nell'immagine sopra, l'elemento sensibile è coperto da uno schermo protettivo in plastica bianco in modo tale da non filtrare le lunghezze d'onda importanti per una corretta misurazione.

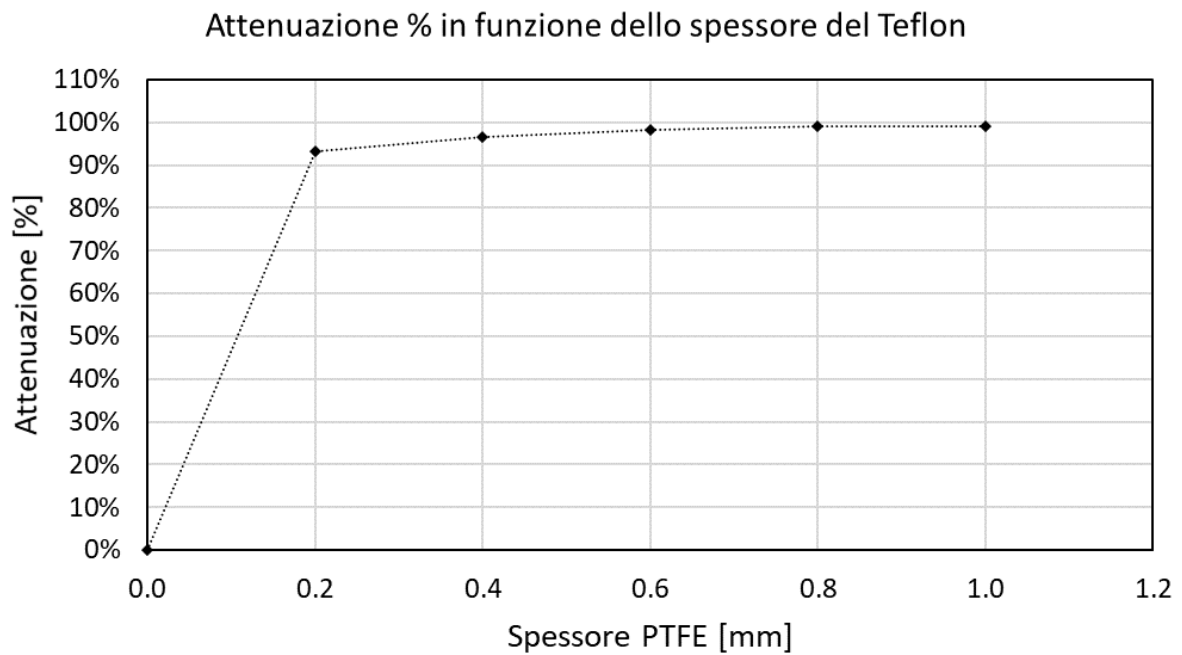
Esiste un'ampia varietà di materie plastiche, ma per l'esigenza che presenta il sensore e poiché l'attenuazione dipende dallo spessore dell'elemento usato la scelta è ricaduta sul polimero PTFE (Teflon). Questo prodotto, commercialmente molto diffuso e disponibile in qualunque ferramenta, è usato per diverse applicazioni grazie alle sue notevoli caratteristiche. Si presenta in svariate forme, tra cui quella di sottile nastro bianco di larghezza pari a 15 mm e spessore 0.2 mm, che è stato selezionato perché adatto all'impiego previsto in questo lavoro. Il Teflon peraltro è termicamente stabile, resistente alle alte temperature e alle radiazioni, insolubile in acqua, inerte agli agenti atmosferici e possiede ottime qualità meccaniche. In aggiunta, è antiaderente e non assorbe l'umidità. Queste ultime proprietà sono importanti perché non permettono la creazione di sporcizia o la presenza di polvere che potrebbero alterare i rilevamenti.



*Figura 11.20 - Nastro di Teflon*

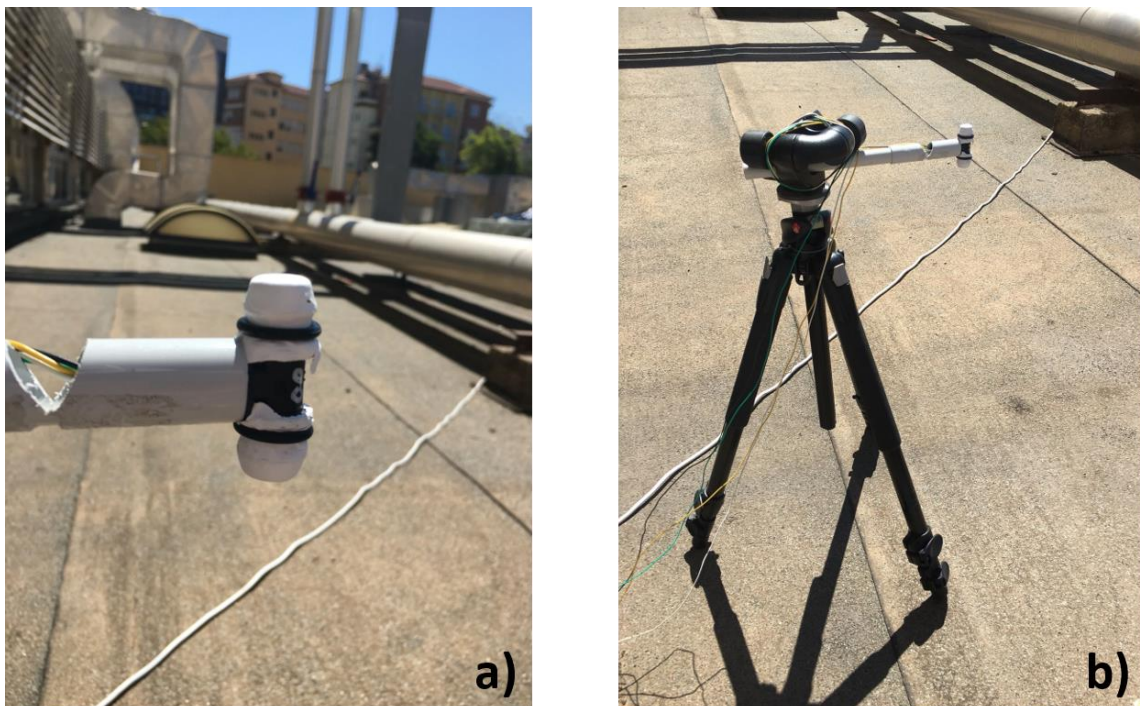
Come già anticipato, il valore corretto di attenuazione è una funzione dello spessore dello strato di Teflon. Questo particolare materiale ha una curva di trasmittività che, combinata con la sensibilità spettrale del fotodiodo, consente di avere una quasi perfetta coincidenza con la curva rappresentativa della funzione  $V(\lambda)$ . Tuttavia, il Teflon è una materia plastica in grado di fornire un'attenuazione pressoché costante, su tutte le lunghezze d'onda della radiazione visibile, crescente linearmente con il suo spessore. Sovrapponendo alcuni strati di 0.2 mm, è possibile ottenere il livello desiderato di spessore e di attenuazione. Quindi, delle prove sono state eseguite misurando ogni volta l'irradianza e comparandola con quella rilevata da un piranometro certificato per determinare l'andamento dell'attenuazione del Teflon all'aumentare dello spessore. Nel grafico ottenuto con i dati raccolti da queste prove è possibile notare chiaramente che il livello di irradianza viene abbattuto fortemente già con il primo strato di Teflon (0.2 mm) e quanto questo influisca sulla percentuale di irradianza che raggiunge il fotodiodo. Poi l'attenuazione aumenta fino ad arrivare al 99.3% quando sono stati posizionati sul sensore 6 strati. Questa informazione è rilevante per determinare il numero di strati necessari ad attenuare la massima irradianza, preservando la sensibilità del sensore.





*Figura 11.21 - Diagramma attenuazione dell'irradianza al variare dello spessore del teflon*

Quindi il numero di strati adoperato è 3 per uno spessore complessivo di 0.6 mm. Il sensore con il sistema di attenuazione appare come in Figura 11.22:



*Figura 11.22 – a) Sensore con sistema di attenuazione montato e b) configurazione finale con sistema di posizionamento*

### 11.1.10 Determinazione dell'incertezza di misura

L'albedo viene determinato come il rapporto tra l'uscita in tensione ( $V_{down}$ ,  $V_{up}$ ) dei due fotodiodi contrapposti ( $PD_{down}$ ,  $PD_{up}$ ). Come già accennato, partendo dai dati costruttivi del fotodiode SFH 229, è stato scelto un valore della resistenza nel circuito di condizionamento (e di acquisizione dei dati) per ottenere una risposta in tensione linearmente proporzionale alla radiazione incidente. In primo luogo, le risposte dei due fotodiodi alla stessa radiazione incidente, generata mediante la lampada alogena al tungsteno presente nel LIFT, sono state confrontate ed è stato calcolato il coefficiente di correlazione, che ha dimostrato non esserci correlazione tra i segnali di output dei fotodiodi (no cross-talk). In seguito, i valori medi ( $PD1m$ ,  $PD2m$ ) e gli errori relativi standard per tre diversi valori di radiazione incidente (relativi a tre diversi valori di temperatura di equilibrio del sensore) sono stati calcolati e vengono ivi riportati nel grafico in Figura 11.23. L'incertezza (casuale) è correlata probabilmente alla non stazionarietà del flusso luminoso della lampada.

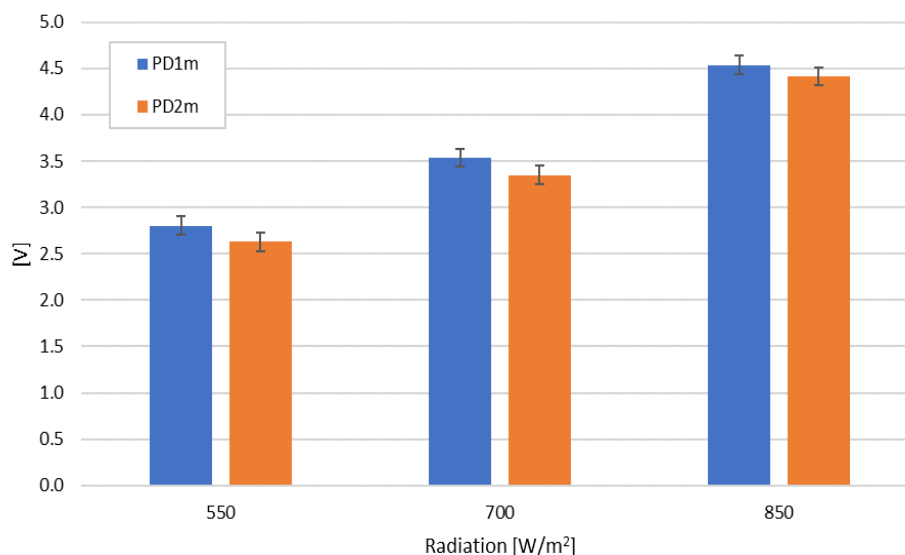


Figura 11.23 - Valore medio dell'output dei fotodiodi ed errore relativo per tre differenti valori di radiazione incidente.

L'albedo ( $Al_1$ ) viene determinato come il rapporto di  $V_{down}$  e  $V_{up}$  ciascuno ottenuto mediando 6 acquisizioni di segnale (intervallo di campionamento di 10s mediato al minuto). L'incertezza standard  $u(V_i)$  è stata calcolata dalla varianza relativa. La stessa misura ( $Al_2$ ) è stata effettuata invertendo i fotodiodi. Il conseguente valore di albedo ottenuto ( $Al$ ) è la media dei due rapporti come mostrato nell'Eq. 11.5:

$$Al = \frac{\frac{V_{d1} + V_{d2}}{V_{u2} - V_{u1}}}{2} \quad (11.5)$$

In accordo con lea Guida per l'espressione dell'incertezza in misura (GUM), l'incertezza standard,  $u$  ( $Al$ ), dell'albedo calcolato, si ottiene combinando appropriatamente le incertezze standard  $u(V_{\text{down}})$ ,  $u(V_{\text{up}})$  del valore atteso di  $V_{\text{down}}$  e  $V_{\text{up}}$  ed è dato dall'Eq. (11.6):

$$u_c(Al)^2 = \frac{\partial Al^2}{\partial V_1} u(V_1)^2 + \frac{\partial Al^2}{\partial V_2} u(V_2)^2 \quad (11.6)$$

dove i valori di  $V_1$  e  $V_2$  sono indipendenti o non correlati. Quindi  $u(Al)$  viene valutato per ogni punto. L'errore percentuale massimo dell'albedo è inferiore o uguale al 20%.

Un'analisi dell'influenza della temperatura è stata effettuata in situ, a setup sperimentale ultimato. Poiché infatti la risposta dei sensori dipende dalla temperatura e stato necessario analizzare l'andamento del segnale in fase di transitorio iniziale, appena avviata la catena di misura. I fotodiodi sottoposti a una radiazione (di mattina) di circa  $400 \text{ W/m}^2$  raggiungono una temperatura stazionaria e quindi forniscono un segnale di uscita stabile, dopo circa 10 minuti.

### *11.1.11 Sistema di visualizzazione e salvataggi dati*

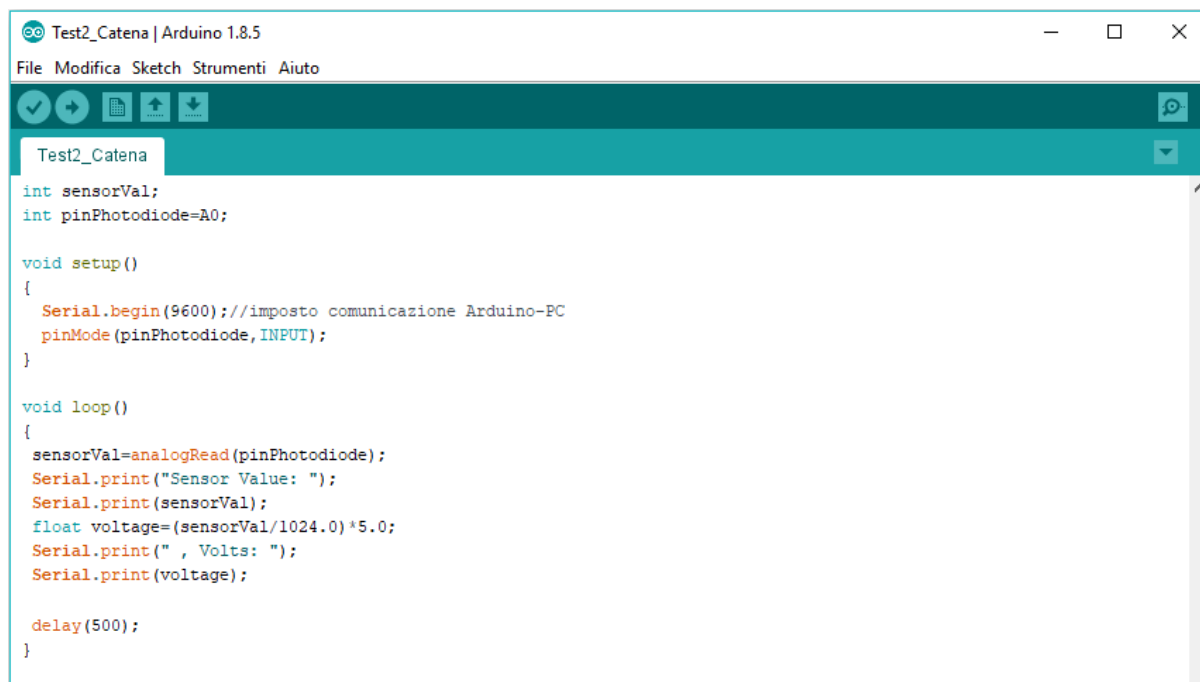
Il microcontrollore utilizzato come datalogger è stato Arduino Uno il cui IDE (integrated development environment cioè ambiente di sviluppo integrato) è stato interfacciato con Labview per visualizzare meglio l'acquisizione dei dati in tempo reale, gestire la strumentazione elettronica di Arduino, per regolare la frequenza di campionamento, il percorso di salvataggio e per avere un filtraggio preliminare dei dati.

I dati ottenuti sono stati post – elaborati al fine di calibrare la catena di misura con due algoritmi diversi, uno per il sensore superiore e uno per quello inferiore.

Arduino Uno si compone di una piattaforma hardware che si basa su un circuito integrato che comprende un microcontrollore con dei pin connessi alle porte I/O, regolatore di tensione e un'interfaccia USB che permette la comunicazione con il computer usato per programmare. L'alimentazione della scheda avviene in corrente continua tramite la porta USB del computer. La versione Uno utilizza un microcontrollore Atmega8U2 programmato come convertitore USB – seriale. È fornita di funzionalità input/output (I/O). Tramite le funzionalità di input la scheda riceve i segnali raccolti dai sensori esterni. Il comportamento della scheda è gestito dal microcontrollore in base ai valori provenienti dai sensori e alle operazioni determinate dal programma in esecuzione sulla scheda. Nel caso in esame i canali di output non sono stati utilizzati perché non è prevista alcuna interazione con l'esterno. Sulla scheda Arduino sono presenti connettori per I/O sia digitali che dedicati ad ingressi di segnali analogici; 2 dei pin di input analogico (A0 e A1) sono stati impiegati per i fotodiodi. Tali connettori ricevono i valori di tensione provenienti dai fotorilevatori (fino ad un massimo di 5 Volt) e sono collegati chiaramente ad un convertitore analogico – digitale (ADC) che

ha il compito di convertire questi valori di tensione, che hanno andamento continuo, in 1024 livelli discreti (da 0 a 1023).

Alla piattaforma fisica Arduino Uno è abbinato un ambiente di sviluppo integrato per la programmazione del microcontrollore. Attraverso il software è stato creato inizialmente un codice per gestire gli ingressi analogici e visualizzare le misure derivanti dai sensori, che sono state trasformate di nuovo in Volt. L'immagine in Figura 11.24 evidenzia il codice generato per un fotodiode.



```
Test2_Catena | Arduino 1.8.5
File Modifica Sketch Strumenti Aiuto
Test2_Catena
int sensorVal;
int pinPhotodiode=A0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);//imposto comunicazione Arduino-PC
  pinMode(pinPhotodiode, INPUT);
}

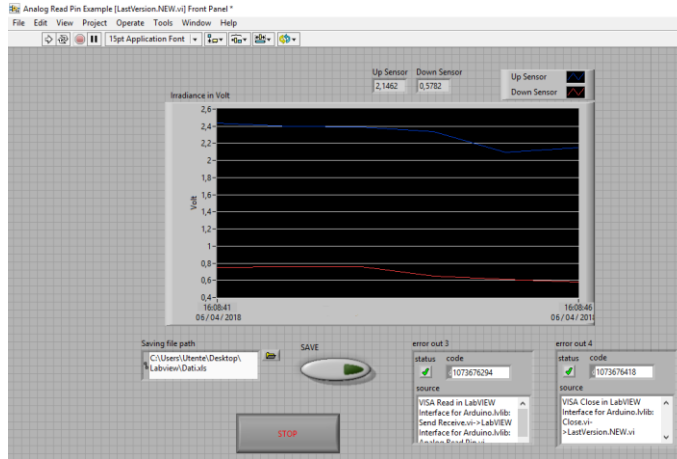
void loop()
{
  sensorVal=analogRead(pinPhotodiode);
  Serial.print("Sensor Value: ");
  Serial.print(sensorVal);
  float voltage=(sensorVal/1024.0)*5.0;
  Serial.print(" , Volts: ");
  Serial.print(voltage);

  delay(500);
}
```

Figura 11.24 - Sketch Arduino UNO.

Per gestire in modo più opportuno i dati provenienti dai sensori, l'IDE di Arduino è stato interfacciato con il software LabVIEW della National Instruments. Per la preparazione dell'ambiente LabVIEW si è dovuto, oltre l'ambiente di sviluppo, installare [NI-VISA for LabVIEW](#). Questo pacchetto ha dato la possibilità a LabVIEW di utilizzare una serie di funzionalità per interfacciarsi secondo vari standard con strumentazione varia tra cui Arduino. La connessione è stata resa possibile grazie alla libreria di codice kit NI LabVIEW Interface For Arduino Toolkit. Perché Arduino e LabVIEW comunichino è stato necessario caricare sulla scheda Arduino Uno un apposito software chiamato LIFA\_Base.ino. L'interfaccia di LabVIEW per Arduino (LIFA) vi consente di acquisire dati dal microcontrollore Arduino ed elaborarli nell'ambiente di programmazione grafico LabVIEW. Il programma realizzato è denominato VI (Virtual Instrument); il suo aspetto e funzionamento è simile a quello di uno strumento fisico e si compone di due parti:

- pannello frontale (front panel) che corrisponde all'interfaccia utente del VI. La Figura 11.25 mostra il pannello frontale in cui viene visualizzato in real time la misura della radiazione solare in Volt percepita dai sensori in un Waveform Chart.



- schema a blocchi funzionale (block diagram): è il diagramma di flusso che rappresenta in formato grafico il codice sorgente (Figura 11.26). Il terminale di ingresso è rappresentato da Arduino e sono presenti due cicli FOR. In ogni iterazione per quanto riguarda i due cicli vengono rispettivamente letti e salvati in un file .xls le misure fornite da ciascuno dei sensori.

Figura 11.25 - Front Panel di LabView

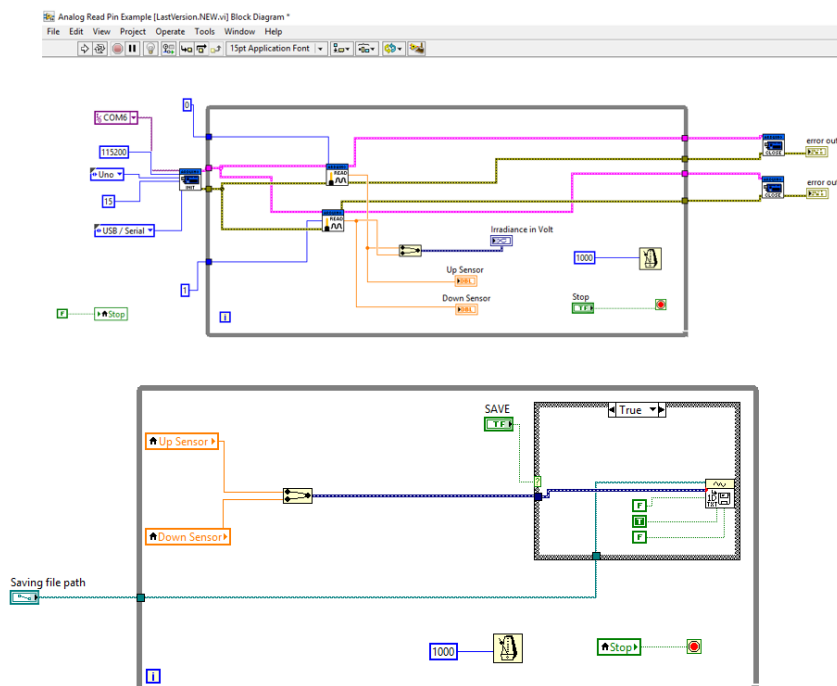


Figura 11.26 - LabView Block Diagram

## *11.2 Misure e calibrazione*

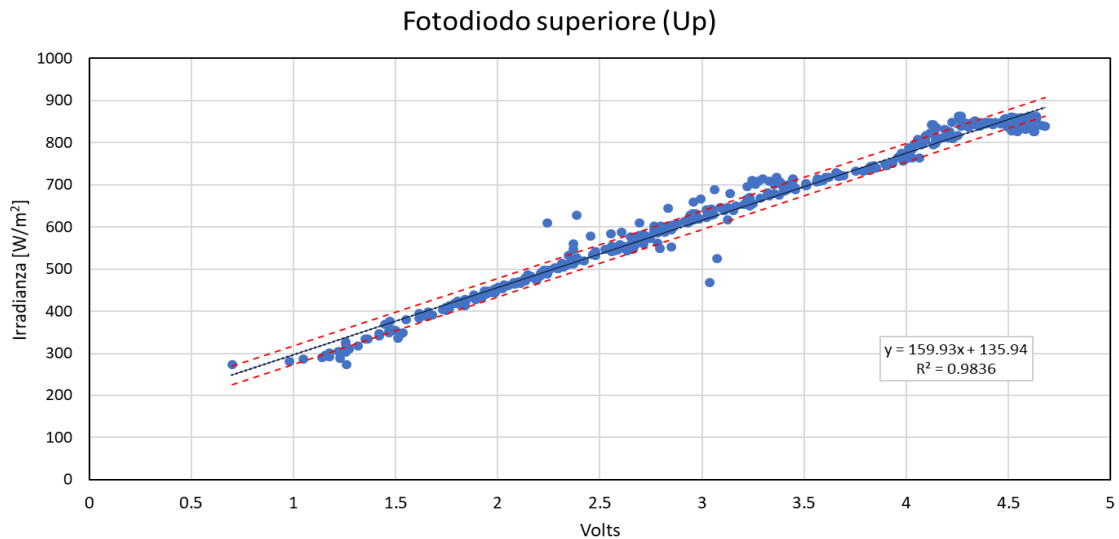
Dopo la costruzione dell'albedometro secondo le specifiche e la metodologia descritta nei precedenti capitoli, il passo successivo è stato la calibrazione dello strumento. L'approccio usato per la calibrazione è stato il metodo per confronto, effettuata paragonando lo strumento di misura con un altro strumento di classe di precisione superiore effettuando la misura contemporaneamente sulla stessa grandezza da valutare, cioè in tal caso la radiazione solare incidente e la radiazione solare riflessa. È stato impiegato come strumento campione di riferimento l'albedometro DeltaOhm LP PYRA 06, le cui caratteristiche sono note e riferibili.

Le misure della radiazione solare con i due strumenti sono state eseguite durante la giornata del 6 Aprile 2018 a Roma sul tetto piano del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli studi di Roma Tre. In questo contesto la superficie della quale è stato trovato l'albedo è una guaina bituminosa che funge da rivestimento per la copertura. È stata scelta una giornata, che in accordo con le previsioni meteorologiche, risultasse serena per evitare la comparsa di episodi nuvolosi e favorire con la misurazione in condizioni ottimali.

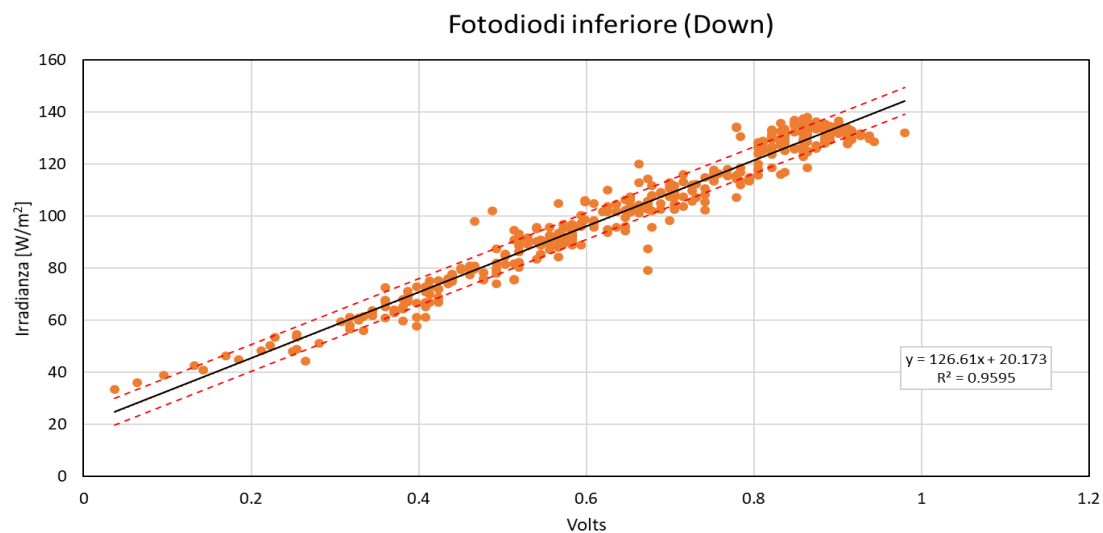
I dati ottenuti dal nostro dispositivo sono stati confrontati con quelli generati dallo strumento campione per trovare un algoritmo di calibrazione. Come già spiegato, i valori trovati con i sensori progettati cadono nell'intervallo 0–5 Volt e sono stati campionati ogni 10 secondi. In seguito nella fase di post – elaborazione ogni 6 campioni è stata fatta la media per ottenere il valore rappresentativo di ciascun minuto. Di fatto anche i dati uscenti dall'albedometro LP PYRA 06 sono mediati al minuto. In questo modo è stato possibile procedere con il confronto e la calibrazione.

### *11.2.1 Determinazione dell'algoritmo di calibrazione*

Per la determinazione degli algoritmi di calibrazione (diversi tra loro per i sensori inferiore e superiore) sono stati riportati su uno stesso foglio di calcolo Excel in quattro colonne distinte le misure in Volt e in  $W/m^2$  originate rispettivamente dal nostro prototipo di albedometro e dallo strumento di riferimento. Sebbene la risposta dei sensori proposti segue un andamento molto simile a quella del dispositivo campione esiste una differenza evidente tra le due. Per avere quindi un riscontro effettivo, sono stati definiti gli algoritmi empirici per ciascun sensore riportando in un grafico sull'asse delle ascisse le grandezze in Volt provenienti dal sensore progettato mentre sull'asse delle ordinate quelli in  $W/m^2$  date dallo strumento di riferimento. Sul grafico in Figura 11.27 è presenta anche la linea di tendenza ovvero la linea di interpolazione dei dati. Per ciascuno di essi è mostrato anche l'algoritmo empirico rappresentato dall'equazione della curva.



*Figura 11.27 - Calibrazione dati sperimentali sensore superiore*



*Figura 11.28 - Calibrazione dati sperimentali sensore inferiore*

Poiché la relazione tra le misure dei due albedometri è lineare, possiamo aspettarci che la curva di interpolazione sia una retta nella forma  $y = mx + q$ . È stata individuata la relazione tra i gruppi di dati espressa da  $R^2$  diversa per il sensore superiore e quello inferiore. Il valore di  $R^2$  è il quadrato del coefficiente di correlazione. Il coefficiente di correlazione,  $R$ , dà una misura della adeguatezza della relazione lineare tra i valori di  $x$  e i valori di  $y$ . Un valore di  $R=1$  indica una esatta relazione lineare tra  $x$  e  $y$ . Valori di  $R$  vicini a 1 indicano un'eccellente accordo tra i dati e la relazione scelta. Nel caso in esame i valori di  $R$  sono rispettivamente

- $R = 0.98$  per il sensore Up;
- $R = 0.96$  per il sensore Down.

Questi valori dimostrano che la funzione di calibrazione è accurata e che i valori in uscita dallo strumento da noi progettato non si discostano molto da quelli del dispositivo campione. Un ulteriore

indice statistico che ci fornisce informazioni sulla dispersione dei dati è la deviazione standard. I valori ottenuti per il sensore superiore e per quello inferiore sono i seguenti:

- $\sigma_{Up} = 23.6 \text{ W/m}^2$
- $\sigma_{Down} = 5.1 \text{ W/m}^2$

Grazie a questi algoritmi di calibrazione è stato possibile correggere i valori grezzi forniti in tensione dall'apparato creato, ottenendo così una buona corrispondenza con i risultati di riferimento del dispositivo LP PYRA 06 della DeltaOhm.

In base alle prestazioni dello strumento proposto è possibile confermare una buona affidabilità dei risultati. Se consideriamo il singolo piranometro al silicio costruito, come abbiamo detto, esso ha una sensibilità spettrale che si estende dalla banda UV fino al vicino infrarosso (1100 nm) quindi non assorbe tutta la radiazione solare ma solo una contenuta frazione dello spettro. Tuttavia, grazie alla calibrazione eseguita il problema della non sensibilità dell'infrarosso e al non assorbimento totale della radiazione visibile viene ampiamente risolto. Però questo dispositivo si porterà dietro un'incertezza che lo renderà meno preciso dello strumento a termopila.

### 11.2.2 Risultati sperimentali

Dopo aver eseguito la calibrazione dello strumento progettato, quindi determinata la caratteristica di funzionamento dei due piranometri, questa è stata applicata ai dati ottenuti dal prototipo di sensore, cioè sono stati riportati i Volt, letti in uscita, in  $\text{W/m}^2$ . Allora sono stati tracciati in un grafico l'andamento dell'irradianza solare misurata dall'albedometro Delta Ohm e risultati trovati sperimentalmente dal dispositivo progettato nella giornata del 6 Aprile 2018.

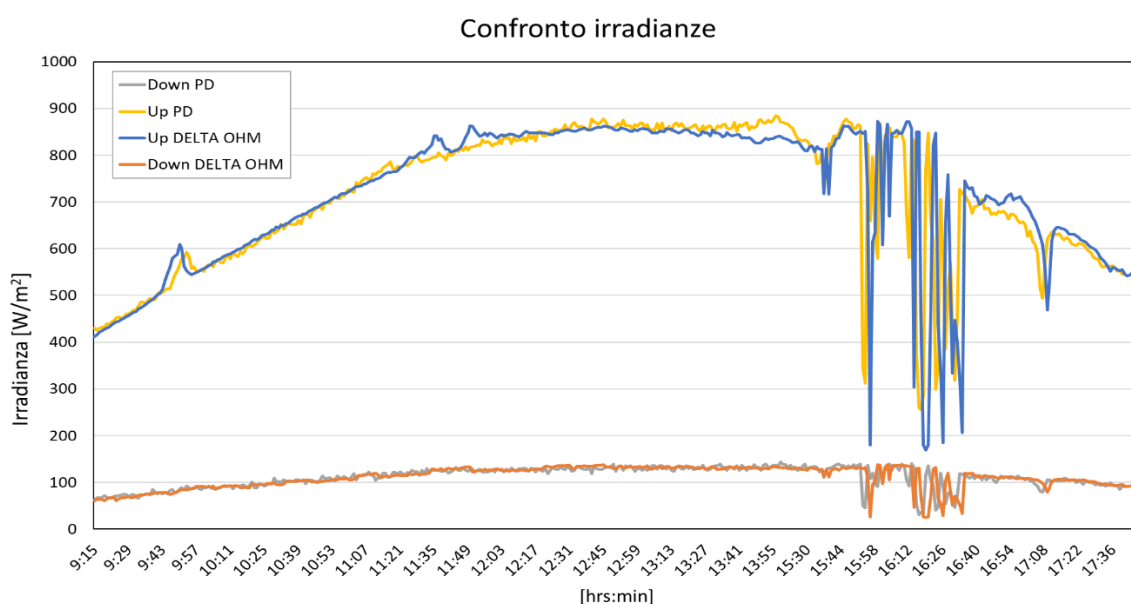


Figura 11.29 - Risultati misure con applicazione dell'algoritmo di calibrazione



Guardando la Figura 11.29 si può osservare che lo strumento proposto ricalca le curve provenienti dal piranometro della Delta Ohm. Si noti invece come nel primo pomeriggio (intervallo temporale compreso tra le 14:15 e le 15:30 circa) si rileva un comportamento molto oscillatorio con picchi verso l'altro e verso il basso dovuti a un cambiamento temporaneo delle condizioni meteorologiche. Infatti, nelle prime ore in cui è stata eseguita la misura il cielo si è presentato sereno e di conseguenza l'andamento della radiazione solare mostra la forma approssimativamente simile a quella della curva a campana tipica. Al contrario, nel primo pomeriggio è comparso qualche annuvolamento: la presenza delle nubi, come già spiegato ferma con grande efficacia la radiazione proveniente dal sole, attenuando l'intensità di quella che raggiunge il suolo e il loro passaggio davanti al disco solare è ben segnalato sul grafico mediante la presenza di tratti saliscendi dall'aspetto tanto più irregolari, quanto più variabile è l'evento nuvoloso in atto.

### 11.2.3 *Determinazione dell'albedo*

La valutazione dell'albedo è stata fatta quindi per la guaina bituminosa presente sul tetto dell'università dove è stata effettuata la misura. Per entrambi i dispositivi è stata eseguita facendo il rapporto per ogni misura memorizzata tra la radiazione globale riflessa e la radiazione globale incidente. Successivamente di tutti i valori di albedo trovati è stata fatta una media temporale. I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Albedometro LP PYRA 06 –  $\alpha = 0.158$
- Albedometro LIFT –  $\alpha = 0.157$

Questo conferma l'affidabilità dello strumento di misura progettato, dal momento che l'errore relativo percentuale si attesta su un valore dello 0.5%.

## 11.3 *Apparato sperimentale I: canyon in scala all'esterno*

Il dispositivo a semiconduttore progettato è stato il primo di una serie di 8 dispositivi che ha permesso di effettuare misure di albedo su una coppia di modelli di canyon urbani in scala 1:30 c.ca. Questo apparato ha previsto l'utilizzo di pannelli rimuovibili, corrispondenti con le facciate verticali degli edifici in scala, su cui diverse tinte per esterni sono state applicate. La disposizione degli strumenti di misura è stata prevista sul piano della superficie di frontiera superiore del canyon, ovvero sul già citato *canopy layer*. I sensori, per un totale di 4 per ciascuno dei 2 canyon in scala, sono stati disposti ai vertici di un quadrilatero e posizionati in modo da misurare la radiazione entrante nel canyon e quella uscente (riflessa), in prossimità del piano di mezzera, in modo da limitare gli effetti di bordo sulle misure sperimentali. Tutti i sensori erano stati sottoposti a processo di calibrazione preliminare come descritto nella sezione precedente. Prima di descrivere più nel dettaglio geometria e

configurazione dell'apparato, in Figura 11.30 viene riportata una foto dell'apparato che meglio può aiutare a comprenderne l'aspetto finale.



*Figura 11.30 - Configurazione finale apparato sperimentale canyon urbani in scala.*

Ciascun modello di edificio (i parallelepipedi verdi in Figura 11.30) ha altezza 60 cm, lunghezza 250 cm e spessore 20 cm. I due canyon urbani tra essi compresi hanno larghezza 60 cm. Tale configurazione comporta un aspect ratio del canyon urbano  $H/W=1$ . I due quadrilateri che ospitano e tengono in posizione gli 8 sensori sono da 20x20 cm e sono disposti in modo da tenere i sensori a distanza di 10 cm da ciascuna delle due pareti laterali degli edifici in scala. Poichè i sensori sono 8 e ciascun sensore è costituito da 2 fotodiodi, l'apparato necessita di 16 circuiti di condizionamento in totale. Per cui, il sistema di acquisizione dei dati utilizzato doveva poter leggere il segnale (differenziale) proveniente da 16 trasduttori. A tale scopo è stata sfruttata una DAQ Agilent 34970° in grado di leggere fino a 63 segnali differenziali. Poiché le breadboard con i circuiti di collegamento necessitavano di un'alimentazione costante per il condizionamento dei fotodiodi è stato utilizzato un alimentatore stabilizzato che alimentava in parallelo ciascun circuito. In Figura 11.31 viene riportato come appariva la catena di misura appena descritta prima della sua installazione finale. Si tenga presente che le breadboard, la DAQ e l'alimentatore stabilizzato sono stati disposti all'interno del modello di edificio centrale.



Figura 11.31 - Catena di misura prima dell'installazione finale.

Le misure mediante l'apparato sperimentale sono state effettuate per diverse configurazioni. Nell'arco della stagione estiva (Luglio-Settembre) sono stati raccolti dati sperimentali con i canyon con assi orientati Sud-Nord ed Est-Ovest e con varie combinazioni di materiali. Nei successivi paragrafi vengono divisi i risultati ottenuti con il setup in configurazione lambertiana rispetto a quello con tinta retro-riflettente.

### 11.3.1 Risultati delle misure con vernici lambertiane

Tra le misure sperimentali effettuate nell'arco della stagione estiva, in Tabella 11.1 è riportato il calendario delle misure effettuate sui canyon con pannelli in configurazione lambertiana.

Tabella 11.1 - Calendario delle misure sperimentali con pannelli con tinte lambertiane.

	Canyon NORD		Canyon SUD	
	Tinta	Sup.	Tinta	Sup.
24-lug	Al quarzo BIANCA ( $\rho=0.86$ )	N	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	N
	Al quarzo BIANCA ( $\rho=0.86$ )	S	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	S
26-lug	Cool BIANCA ( $\rho=0.88$ )	S	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	S
	Cool BIANCA ( $\rho=0.88$ )	N	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	N
	Canyon EST		Canyon OVEST	
	Tinta	Sup.	Tinta	Sup.
11-set	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	E	Cool BIANCA ( $\rho=0.88$ )	E
	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	O	Cool BIANCA ( $\rho=0.88$ )	O
12-set	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	E	Al quarzo BIANCA ( $\rho=0.86$ )	E
	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	O	Al quarzo BIANCA ( $\rho=0.86$ )	O

**Canyon con assi orientati Est-Ovest**

In Figura 11.32 e Figura 11.33 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati gli andamenti dell'albedo per due distinte giornate (24 e 26 luglio) e differenti combinazioni di vernici (una grigia con  $\rho=0.39$  e due bianche con  $\rho=0.86$  e  $\rho=0.88$ ) per i canyon con assi Est-Ovest e pannelli orientati verso Nord e Sud. Ciascun grafico riporta due andamenti, relativi alle misure effettuate in parallelo, ovvero contemporaneamente, per quella specifica giornata.

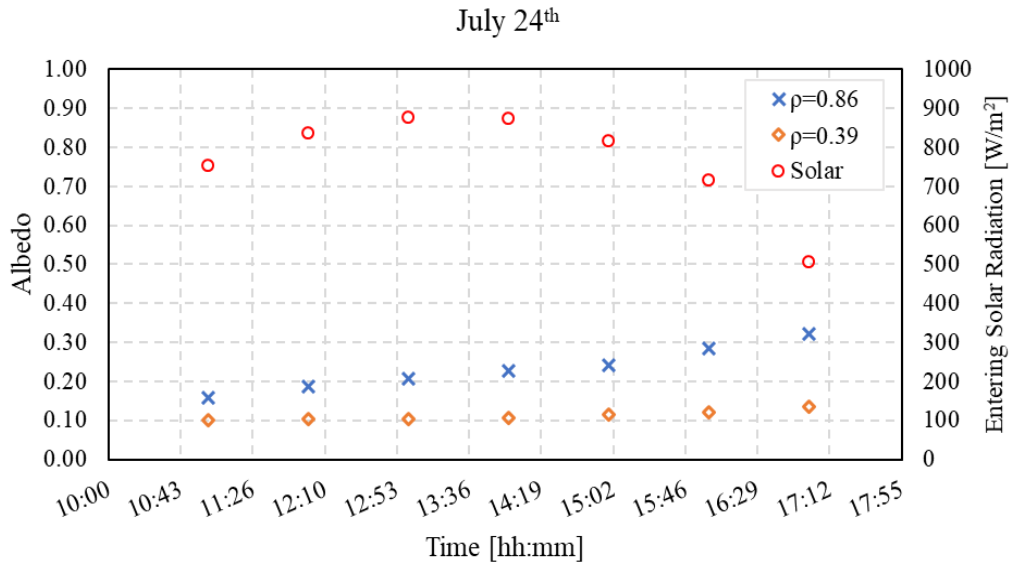


Figura 11.32 – Facciate orientate Nord-Sud: albedo rilevato il giorno 24 luglio per vernice grigia e bianca al quarzo.

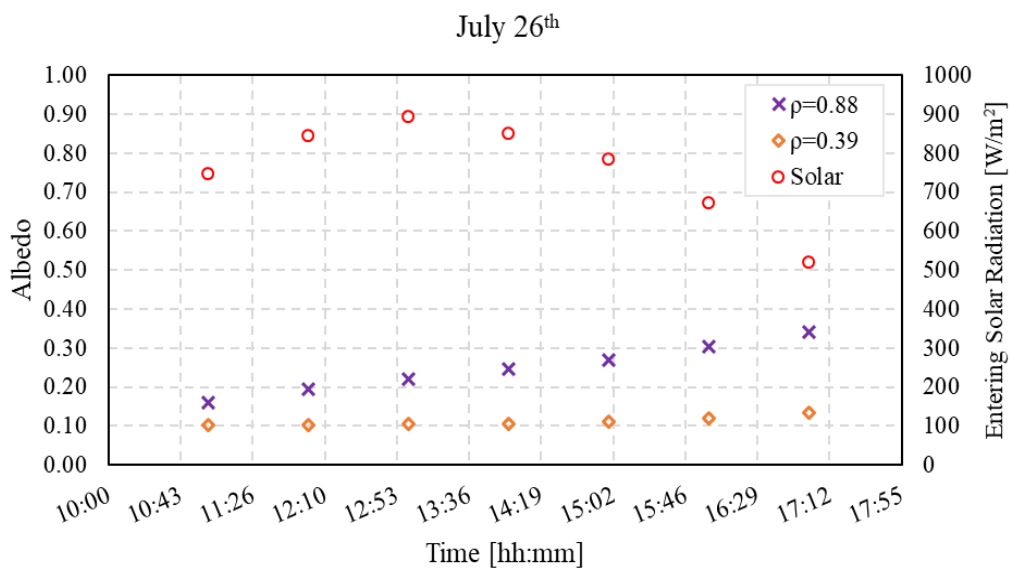


Figura 11.33 - Facciate orientate Nord-Sud: albedo rilevato il giorno 26 luglio per vernice grigia al quarzo e bianca cool.

Osservando gli andamenti dell'albedo in Figura 11.32 e Figura 11.33 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si nota immediatamente una sua dipendenza dal tempo; questo sembrerebbe in contraddizione con il concetto di albedo il cui valore dovrebbe rimanere costante, dal momento che rappresenta il rapporto tra radiazione riflessa e radiazione incidente su una superficie. In realtà, in questa tesi, per semplicità, viene chiamato albedo il rapporto tra ciò che viene riflesso e ciò che entra all'interno di un ambiente costituito da superfici orizzontali e verticali, ovvero il canyon urbano in scala. Ciò che spiega questo andamento è il movimento, nell'arco della giornata, dell'ombra proiettata dalle superfici verticali, che determina il rapporto tra superfici irradiate da radiazione diretta e diffusa e quelle irradiate da sola radiazione diffusa. Un'altra indicazione, confrontando il valore di albedo per il canyon con pannelli bianchi con  $\rho=0.86$  rispetto a quello con pannelli bianchi con  $\rho=0.88$  (evidenziati con indicatori a crocetta) è che viene riscontrato un lieve incremento del valore di albedo (0.25 contro 0.23). I pannelli grigi invece, nelle due differenti giornate ivi riportate (andamenti con indicatori a rombo), forniscono un valore di albedo identico, essendo identico il valore di riflettanza dei pannelli stessi ( $\rho=0.39$ ).

### Canyon con assi orientati Sud-Nord

In Figura 11.34 e Figura 11.35 sono riportati i risultati delle misure sperimentali effettuate con i canyon orientati con assi Nord-Sud, con pannelli verticali orientati verso Est e Ovest (11 e 12 settembre). Le combinazioni di riflettanze dei pannelli sono le stesse già presentate nei casi del 24 e 26 luglio.

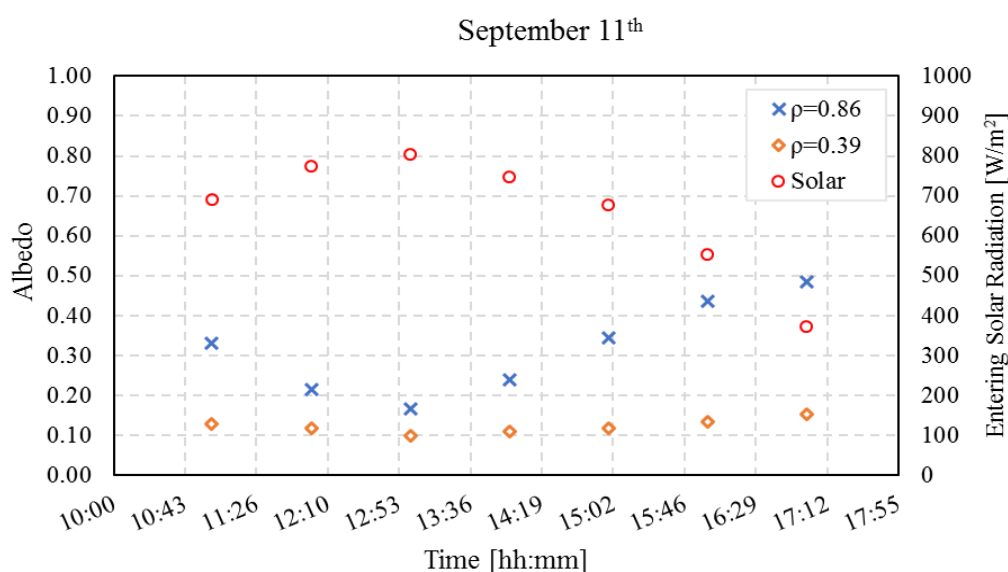


Figura 11.34 - Facciate orientate Est-Ovest: albedo rilevato il giorno 11 settembre per vernice grigia e bianca al quarzo.

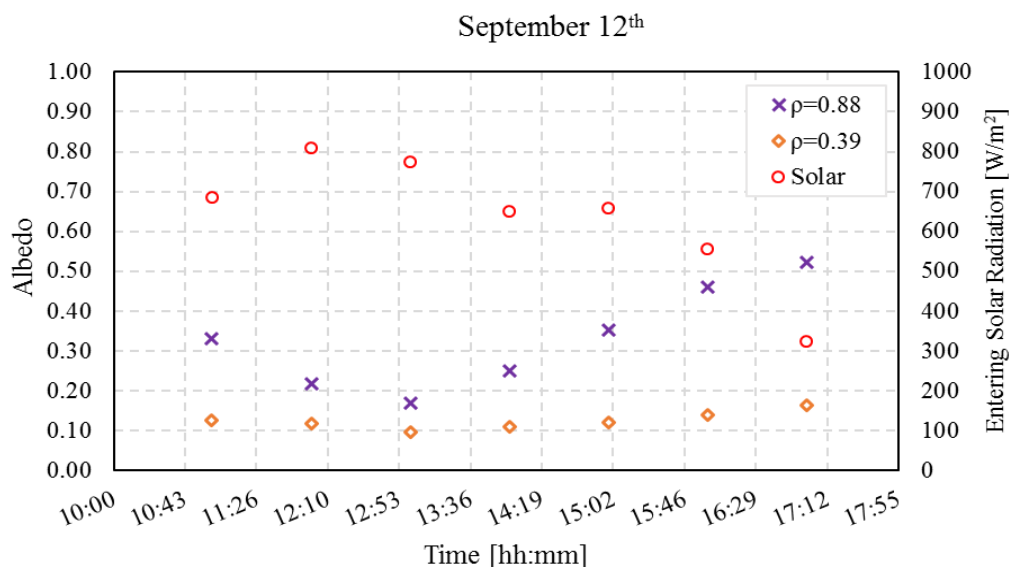


Figura 11.35 - Facciate orientate Est-Ovest: albedo rilevato per vernice grigia al quarzo e bianca cool.

Osservando gli andamenti dell'albedo, risulta ancor più marcato l'effetto dovuto all'evolversi delle ombre nell'arco della giornata. I valori minimi dell'albedo si riscontrano a metà giornata (tra le ore 12.10 e le 14.10), quando il sole è più alto all'orizzonte (e tutto il canyon è irradiato), e la maggior parte della radiazione viene riflessa dalla superficie orizzontale costituente la pavimentazione del canyon. Inoltre, si può notare, nelle ore pomeridiane, un valore di albedo maggiore rispetto al caso con facciate orientate Nord-Sud. Ciò è dovuto agli angoli della geometria solare, che in questo caso sono tali da permettere ai sensori di ricevere più radiazione riflessa da parte delle superfici verticali. Il valore di albedo medio giornaliero rilevato dai sensori nel caso di pannelli bianchi con  $\rho=0.88$  è pari a 0.33 mentre nel caso di pannelli bianchi con  $\rho=0.86$  è pari a 0.32. Il canyon con pannelli grigi con  $\rho=0.39$ , fornisce un valore di albedo medio giornaliero pari, in entrambe le giornate, a 0.12.

### 11.3.2 Risultati delle misure con vernice RR alle sfere di vetro

Tra le misure sperimentali effettuate nell'arco della stagione estiva, in Tabella 11.2 è riportato il calendario delle misure effettuate sui canyon con pannelli in configurazione RR. La valutazione degli effetti dell'utilizzo dei materiali retro-riflettenti è stata effettuata confrontando i risultati con il canyon in configurazione lambertiana con pannelli grigi. Dalla Tabella 11.2 si può infatti notare che in uno stesso giorno si avevano i canyon in entrambe le configurazioni. Il canyon in configurazione lambertiana presentava pannelli grigi con riflettanza near-normal pari a quella dei pannelli con materiale RR. In tal modo è stato possibile confrontare a parità di riflettanza, l'effetto della differente modalità di riflessione nello spazio dei materiali RR. I risultati riportati nei grafici seguenti, oltre a riportare il confronto tra i valori di albedo, mirano a dimostrare il legame tra gli angoli della geometria solare e i risultati sperimentali stessi.

Tabella 11.2 - Calendario delle misure sperimentali con pannelli con tinte RR.

	Canyon EST		Canyon OVEST	
		Sup.		Sup.
06-set	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>
	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>
25-set	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>
	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>
26-set	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>E</b>
	Al quarzo GRIGIA + RR ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>	Al quarzo GRIGIA ( $\rho=0.39$ )	<b>O</b>

Osservando la Figura 11.36, Figura 11.38 e Figura 11.40, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati, in funzione della radiazione solare entrante nel canyon attraverso il canopy layer, i valori dell'albedo. I valori riferiti al canyon in configurazione retro-riflettente sono rappresentati in rosso attraverso delle triangoli (RR), quelli riferiti al canyon con tinte tradizionali diffuse sono rappresentati in blu attraverso delle crocette (Lam). Si può immediatamente notare, nelle ore centrali della giornata, un valore dell'albedo maggiore (dell'ordine del 1.5/2%), per il canyon con pareti ricoperte da vernice RR rispetto al canyon con vernice diffusiva/lambertiana. In prossimità delle ore centrali della giornata, il canyon urbano è soggetto a una maggiore radiazione entrante, in dipendenza dalla geometria solare. La modalità di risposta della radiazione da parte dei materiali RR comporta una maggiore riflessione della radiazione verso la direzione di ingresso per due motivi: (i) angoli di incidenza maggiori equivalgono a maggiore coeff. di riflessione per i materiali RR e (ii) la direzione di riflessione equivale a quella di ingresso.

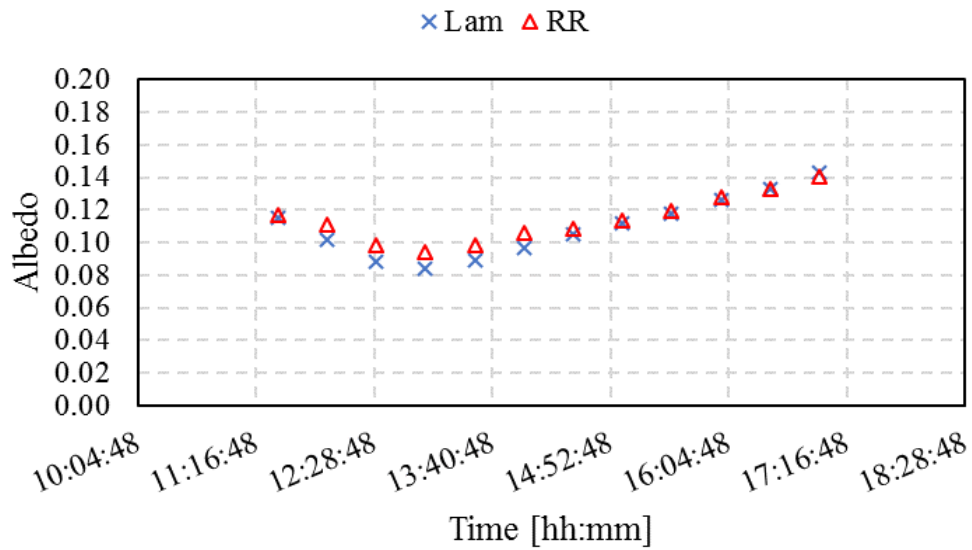


Figura 11.36 – 6 settembre: confronto tra albedo per il canyon con materiale RR e il canyon con materiale lambertiano.

A supporto delle suddette indicazioni, in Figura 11.37 a), Figura 11.39 a) e Figura 11.41 a), si nota una riflessione maggiore proprio in prossimità di una maggiore radiazione entrante.

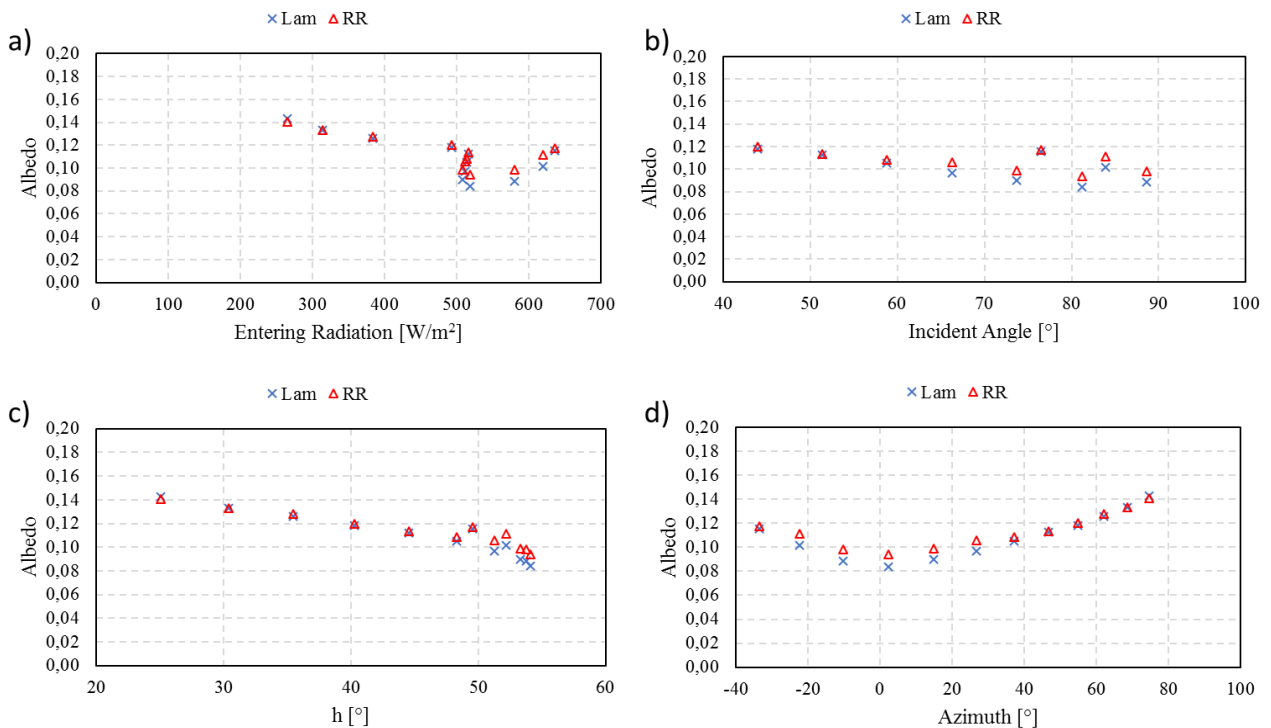


Figura 11.37 - 6 settembre: dipendenza tra alcuni parametri caratteristici della radiazione solare e valori di albedo per RR e lambertiani.



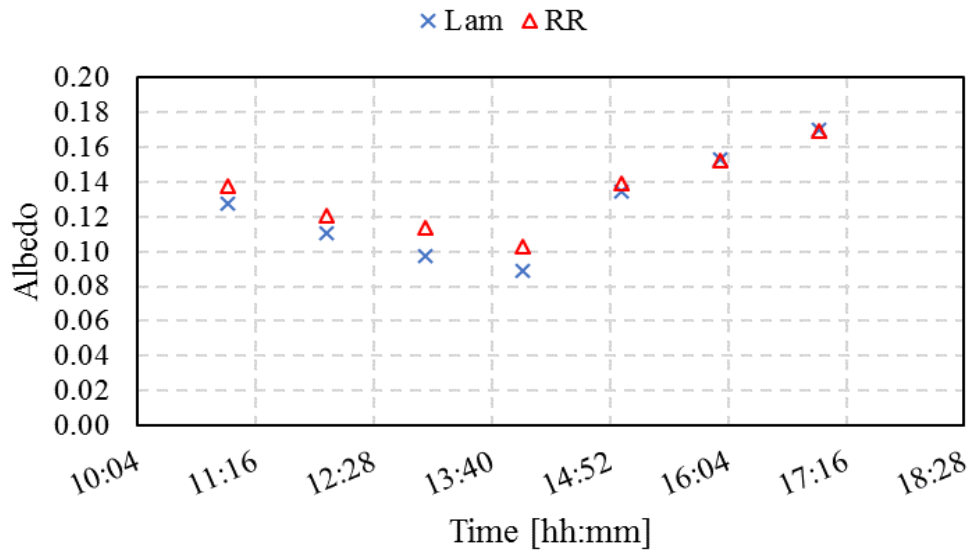


Figura 11.38 - 25 settembre: confronto tra albedo per il canyon con materiale RR e il canyon con materiale lambertiano.

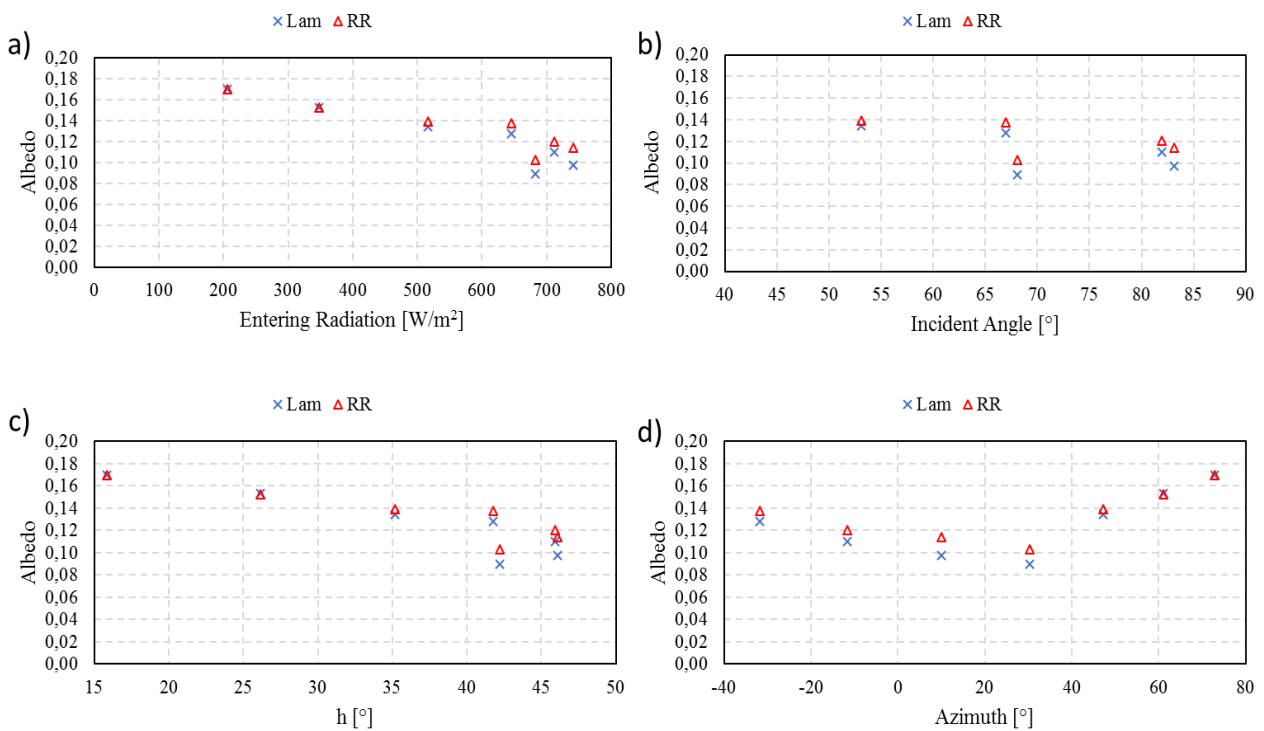


Figura 11.39 - 25 settembre: dipendenza tra alcuni parametri caratteristici della radiazione solare e valori di albedo per RR e lambertiani.

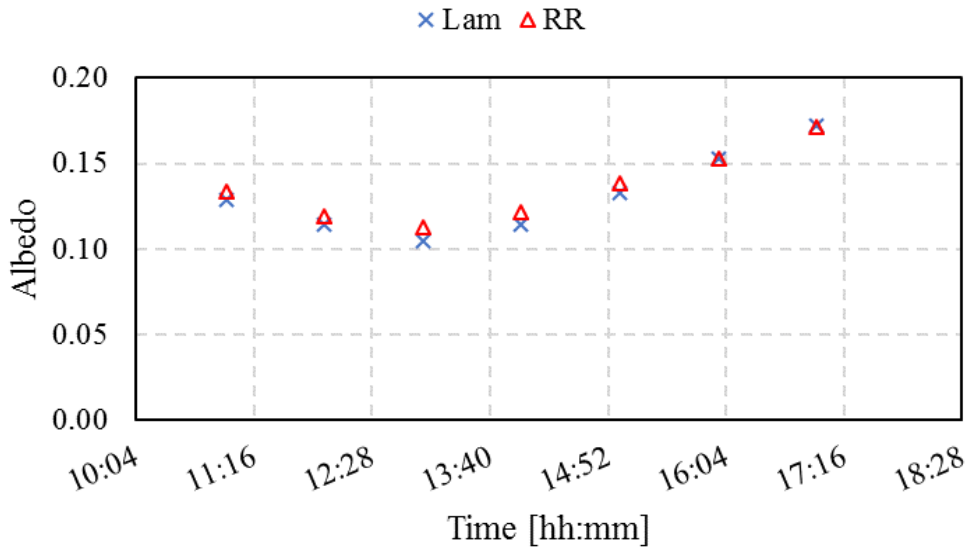


Figura 11.40 - 26 settembre: confronto tra albedo per il canyon con materiale RR e il canyon con materiale lambertiano.

In Figura 11.37, Figura 11.39 e Figura 11.41 b), c), d), si può notare la dipendenza dell'albedo dagli angoli caratteristici della geometria solare per quanto riguarda i materiali RR. In tutti i risultati, per tutte le tre giornate, maggiori sono altezza solare, azimuth e angolo di incidenza, maggiore è l'albedo.

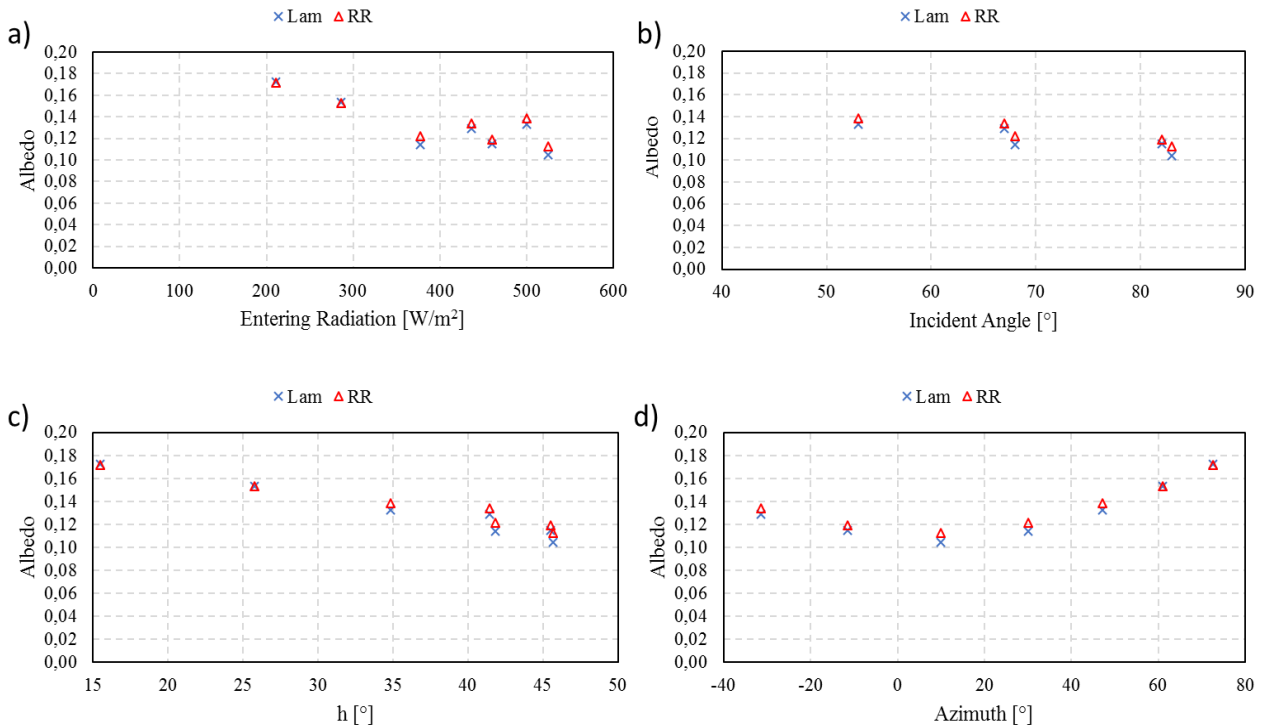


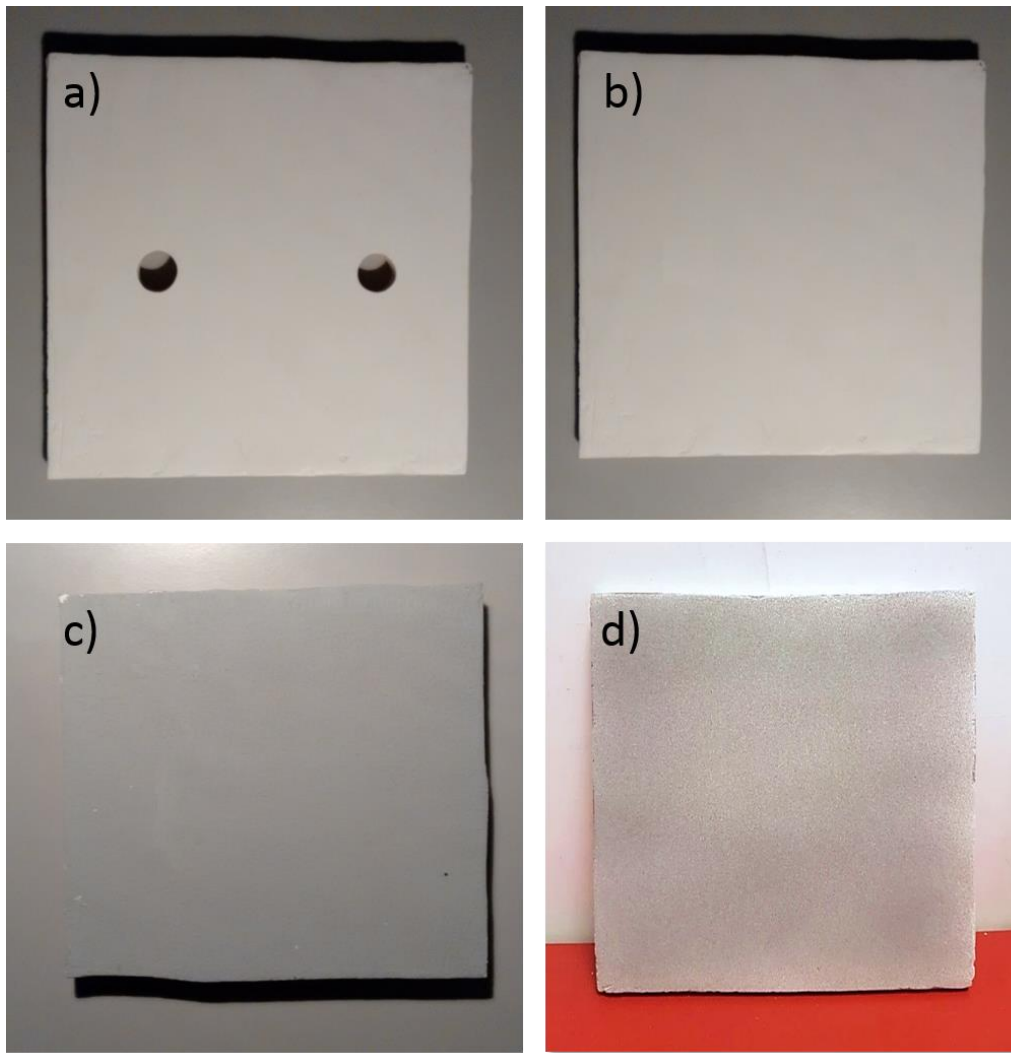
Figura 11.41 - 26 settembre: dipendenza tra alcuni parametri caratteristici della radiazione solare e valori di albedo per RR e lambertiani.

### *11.4 Apparato sperimentale II: canyon in scala in laboratorio*

Utilizzando i campioni a disposizione, tutti di dimensioni 20x20 cm, è stato costruito un canyon in scala 1:100, con aspect ratio  $H/W=1$  e  $H/L=1$ . Questo canyon dalla forma cubica è stato progettato in due configurazioni:

- Retro-riflettente (RR): parete soggetta a radiazione incidente costituita dal campione di vernice RR, parete corrispondente alla pavimentazione del canyon costituita dal campione di vernice bianca al quarzo e parete ombreggiata (affacciata verso la parete RR) costituita dal campione di vernice bianca cool.
- Lambertiano (Lam): parete soggetta a radiazione incidente costituita da un campione di vernice diffusiva costituita dalla vernice al quarzo con aggiunta di colorante nero in modo da ottenere un grigio con  $p=0.38$ , parete corrispondente alla pavimentazione del canyon costituita dal campione di vernice bianca al quarzo e parete ombreggiata (affacciata verso la parete grigia) costituita dal campione di vernice bianca cool.

I campioni utilizzati per costruirlo sono riportati in Figura 11.42: il campione a) è il provino costituito da vernice bianca cool, già caratterizzato dalla gonifotometria come materiale lambertiano. Stessa cosa vale per il campione b), che presenta la vernice al quarzo. Il campione d) è quello rivestito di vernice RR alle sfere di vetro. Il campione c) è invece un campione di vernice cool con aggiunta di colorante nero.



*Figura 11.42 - Campioni utilizzati per costruire il canyon urbano in scala cubico.*

Poiché l'obiettivo era quello di confrontare l'entità della radiazione riflessa sulla parete verticale di fronte alla parete dove incide il fascio, si è riprodotto un materiale lambertiano che avesse la stessa riflettanza a  $8^\circ$  di incidenza del fascio del campione con vernice RR. Per fare ciò si è letteralmente cercato il valore della riflettanza del campione RR mediante diversi rapporti di diluizione bianco/nero fino ad ottenere un grigio con riflettanza da spettrofotometria pari a 0.364. Ricordando che il valore della riflettanza del campione di materiale RR è risultato pari a 0.389 con la spettrofotometria, si vuole verificare che, anche se la riflettanza del materiale RR è circa del 6.4% maggiore di quella del materiale lambertiano, sulla parete di fronte incide meno radiazione riflessa.

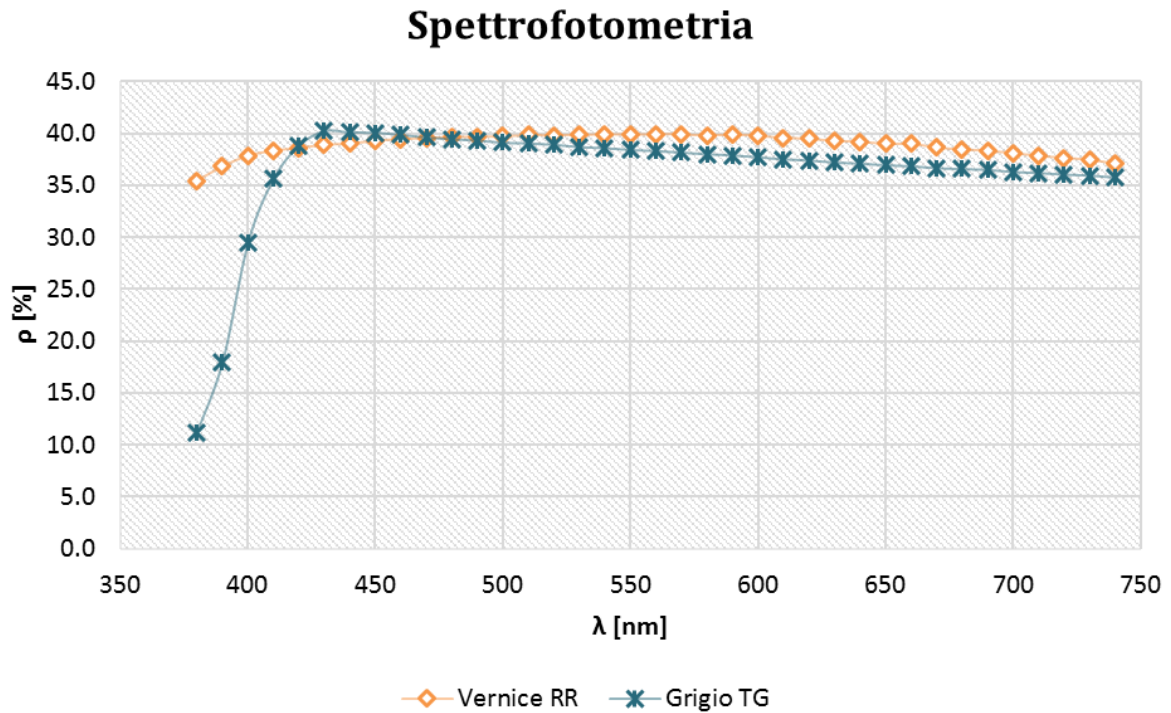


Figura 11.43 - Spettrofotometria del campione di materiale RR e del campione di grigio lambertiano.

Il canyon è stato montato sul portacampioni del goniofotometro come mostrato in Figura 11.44 e, a riscaldamento avvenuto della lampada, sono state effettuate misure per  $45^\circ$  e  $60^\circ$  di incidenza (come schematizzato in Figura 11.45).

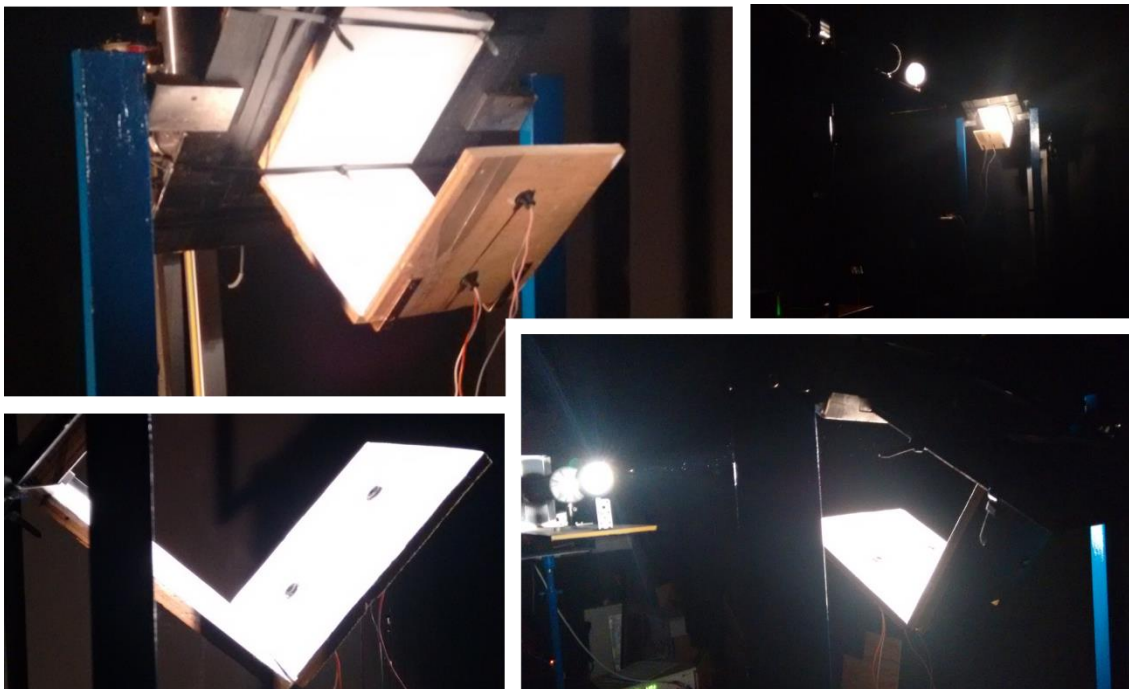


Figura 11.44 - Fasi di misura del setup di laboratorio.

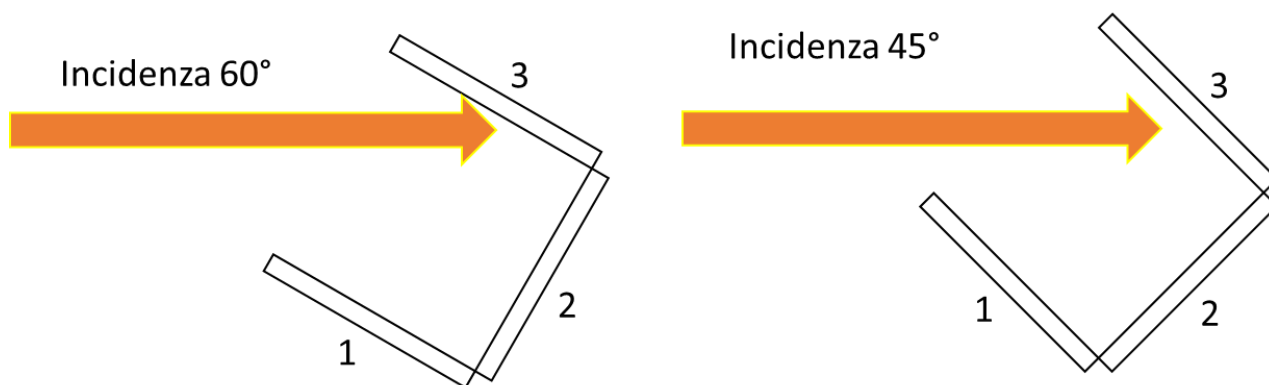


Figura 11.45 - Fasi della campagna di misure. La mattonella 1 presenta la vernice bianca cool, la mattonella 2 la vernice bianca al quarzo e la mattonella 3 il campione RR e quello lambertiano.

Sulla campione a) di Figura 11.42 sono stati praticati due fori a 5 cm di distanza dai bordi del campione e a 10 cm di distanza tra di loro. In questi fori sono stati montati dispositivi di misura simili a quelli implementati per le misure esterne. Le differenze con quei dispositivi sono sostanzialmente due: (i) essi non possiedono elementi di attenuazione della radiazione incidente; (ii) hanno solo un fotodiode che riceve la radiazione riflessa. Viste queste premesse essi avranno una caratteristica di risposta come riportata in Figura 11.16, ovvero a 1 Volt corrispondono 200 lux. I sensori sono stati montati verticalmente ma dopo una prima serie di misure la mattonella è stata ruotata di  $90^\circ$  in modo da effettuare misure con i sensori disposti orizzontalmente. I valori delle due configurazioni dei sensori sono stati poi mediati. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 11.46.

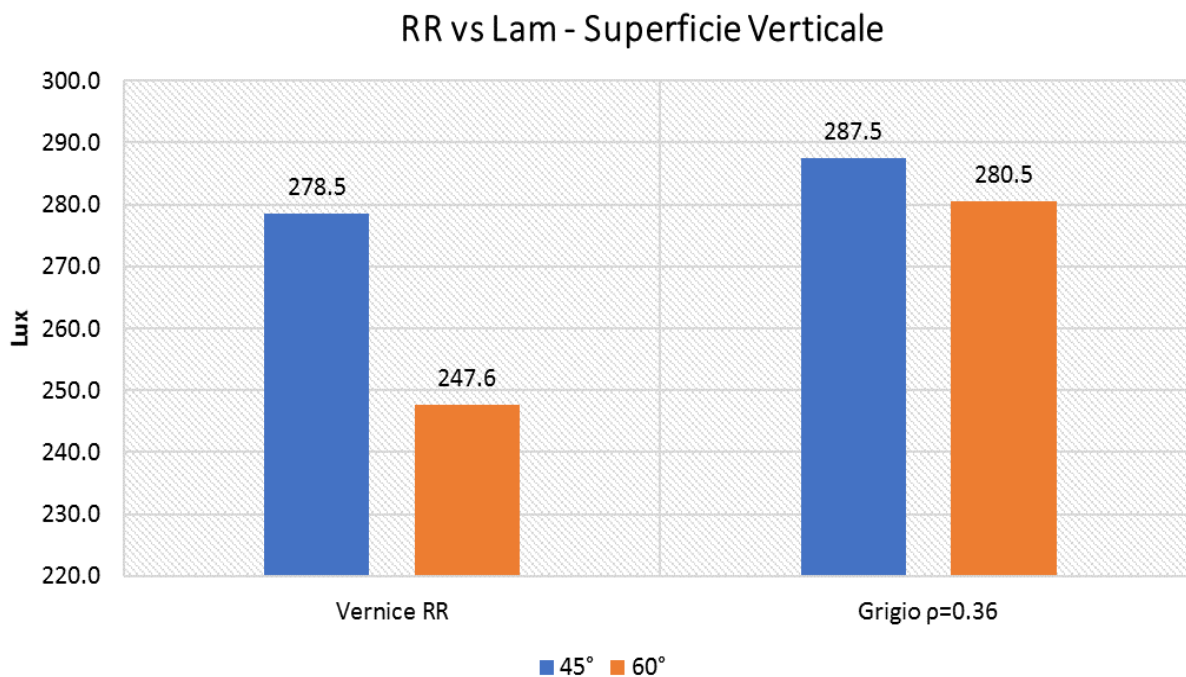


Figura 11.46 - Risultati della campagna di misure effettuate sul canyon in laboratorio.

Osservando i risultati si possono effettuare le seguenti considerazioni:

- Nonostante il materiale lambertiano abbia una riflettanza minore (-6.4%) rispetto al materiale RR, sulla superficie di fronte giunge più radiazione riflessa sia nel caso di incidenza a  $45^\circ$  (+3.1%) sia nel caso di incidenza a  $60^\circ$  (11.7%). Questo si spiega certamente con la distribuzione sferica della radiazione riflessa (Figura 9.15). Il campione RR, avendo una modalità di riflessione più concentrata (vedere grafici polari in Figura 9.11 e Figura 9.12);
- Il fatto che all'aumentare dell'angolo di incidenza aumenti la differenza tra radiazione riflessa dal lambertiano rispetto al RR conferma che a dominare il fenomeno sono i fattori di vista della superficie riflettente nei confronti della superficie di fronte. Infatti, nel caso del materiale lambertiano esso continua a riflettere in modo prettamente diffusivo, senza sentire l'influenza della variazione dell'angolo di incidenza del fascio. Il materiale RR, con un fascio incidente più inclinato risponde riflettendo ancor più verso l'esterno del canyon.

## 12 CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi di Dottorato si inserisce all'interno della macrotematica dei cambiamenti climatici e del loro impatto sui fabbisogni energetici delle città. Per questo, nelle ultime due decadi si è posta sempre più attenzione sull'influenza delle condizioni di morfologia urbana sul microclima degli spazi esterni. La grande sfida cui oramai si cerca di rispondere tra i ricercatori è quella di trovare soluzioni sostenibili per fronteggiare il fenomeno dell'Isola di Calore, tenendo presenti i vincoli imposti dall'esistente. Infatti, se per i centri urbani di nuova concezione questo vincolo non esiste, la transizione a Smart City per le città con tessuto urbano consolidato, richiede uno sforzo concentrato sul contenuto di tecnologia delle contromisure al problema dell'UHI. Nelle regioni dell'Europa Mediterranea, a fabbisogno di raffrescamento prevalente, la scelta di *smart materials* per l'edilizia costituisce una delle leve sulle cui agire per contrastare il fenomeno del riscaldamento locale. Dopotutto, in queste regioni è la radiazione solare a comandare la variazione delle richieste di energia termica degli edifici. Materiali ad elevata riflettanza e *cool materials* hanno finora rappresentato la soluzione *smart* per gran parte dei componenti opachi delle strutture urbane, in cui ricadono ovviamente le superfici d'involucro degli edifici civili e industriali. Se però si considera la complessità delle configurazioni urbane e si trascurano le interazioni mutue tra le strutture, la soluzione può diventare un problema o non avere gli effetti previsti. L'aumento del coefficiente di albedo delle superfici verticali in un contesto urbano può infatti essere controproducente. In questo lavoro è stato inizialmente analizzato l'impatto delle mutue riflessioni tra superfici verticali di un canyon urbano al variare della riflettanza delle stesse, dimostrando che, nella stagione estiva, questa apparente soluzione al fenomeno dell'UHI può generare un inatteso aumento del fabbisogno di raffrescamento. Per questo motivo, si è concentrata l'attenzione su un tipo di materiali che hanno come caratteristica principale quella di riflettere la radiazione solare nella stessa direzione da cui viene. In tal modo, il fenomeno dell'intrappolamento radiativo all'interno dell'ambiente urbano viene in qualche modo contrastato. La caratterizzazione della distribuzione della radiazione riflessa dei materiali è un procedimento necessario per conoscere le potenzialità dei materiali da costruzione, soprattutto se si prevede che essi non si comportino come materiali lambertiani. Mediante la strumentazione a disposizione nel laboratorio del LIFT dell'Università di Roma Tre sono state effettuate delle campagne di misura su svariati campioni, dal comportamento lambertiano e retroriflettente, e sono stati determinati i valori del coefficiente di riflessione e della distribuzione spaziale della radiazione visibile riflessa (o BRDF). Nell'arco di questi tre anni è stato implementato un metodo per il calcolo della riflettanza senza campione di taratura ed è stato ottimizzato il software di post-processing per correggere gli errori di inserzione intrinseci per quella che è la configurazione dell'apparato. I risultati ottenuti sono stati validati mediante il confronto con risultati sperimentali



ottenuti nei laboratori dell'INRIM di Torino. In seguito, è stato sviluppato, partendo dalla teoria dei fattori di Gebhart per materiali lambertiani, un modello di simulazione per la determinazione dei carichi solari nei canyon urbani, tenendo presente le proprietà dei materiali retro-riflettenti. Poiché i fattori di Gebhart sono sostanzialmente fattori di vista corretti per tener conto delle mutue riflessioni tra superfici, si sono ricostruiti, mediante il metodo dell'integrazione diretta, i fattori di vista per i materiali RR. Per fare questo si è modificata la legge di Lambert che descrive i materiali diffusivi per renderla adatta a descrivere il comportamento dei materiali RR mediante l'introduzione di un fattore di concentrazione del fascio riflesso e di un angolo di direzione prevalente di riflessione. Un codice Matlab appositamente sviluppato ha permesso di determinare i fattori di vista (per vari angoli di incidenza della radiazione diretta) di uno dei campioni di materiali RR caratterizzati precedentemente mediante goniofotometria. Integrando il codice all'interno della teoria dei fattori di Gebhart è stato possibile modellizzare la geometria semplificata di un canyon urbano per simulare gli scambi radiativi tra superfici quando sia presente un materiale retro-riflettente. I risultati numerici di simulazioni effettuate nell'arco di giornate caratteristiche di stagione estiva e invernale, per un canyon con superfici verticali orientate a Nord e a Sud, hanno fornito dei risultati che sono in linea con i risultati presenti in letteratura. Quando un materiale retro-riflettente è colpito da radiazione diretta con elevati angoli di incidenza, le superfici circostanti ricevono meno radiazione riflessa del caso in cui sia un materiale lambertiano a venir colpito dalla stessa radiazione con lo stesso angolo di incidenza. Questi risultati numerici sono stati in parte confermati da misure sperimentali effettuate su modelli di canyon urbani in scala sviluppati in laboratorio e all'esterno. Un setup sperimentale implementato al LIFT di Roma Tre (in scala 1:100) in cui sono stati utilizzati, per le misure, sensori appositamente sviluppati, ha fornito risultati a supporto di quelli ottenuti numericamente. In particolare, sono state riprodotte le stesse condizioni del modello numerico basato sulla teoria dei fattori di Gebhart e si sono riscontrati valori di riduzione della radiazione riflessa tra configurazione RR e lambertiano dell'ordine del 10%. Un secondo setup (in scala 1:30), posizionato negli spazi esterni dell'Università, ha fornito risultati che indicano un incremento della radiazione riflessa verso il cielo, quando a un materiale lambertiano venga preferito un materiale RR. Ulteriori misure sperimentali per la calibrazione del modello numerico sono possibili mediante la catena di misura implementata e tra gli sviluppi futuri si propone una caratterizzazione dei materiali anche su bande spettrali dell'infrarosso e l'implementazione di un setup dedicato alla determinazione di fattori di vista tra superfici parallele e perpendicolari.

In conclusione, la valutazione dei vantaggi dell'utilizzo dei materiali retro-riflettenti per l'involucro edilizio passa attraverso la possibilità di modellarli utilizzando algoritmi numerici fedeli e poco dispendiosi in termini di potenza di calcolo. La possibilità di sfruttare il metodo analitico implementato inserendolo nelle subroutine dei software BES più diffusi apre uno scenario che

permette di effettuare valutazioni sui benefici in termini di risparmio energetico per gli edifici, andando ulteriormente ad approfondire gli aspetti legati alla sostenibilità dei costi e al mantenimento delle prestazioni nel tempo dei materiali retro-riflettenti, determinandone l'effettiva competitività rispetto ai materiali innovativi già in uso.

### 13 BIBLIOGRAFIA

- Akbari, H., S. Davis, S. Dorsano, J. Huang, e S. Winert. «Cooling our Communities — A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing.» Climate Change Division, US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, 1992.
- Akbari, H.; Konopacki, S. «Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies.» *Energy Policy* 33, n. 6 (2005): 721-756.
- Allegrini, J., V. Dorer, e J. Carmeliet. «Impact of radiation exchange between buildings in urban street canyons on space cooling demands of buildings.» *Energy and Buildings* 127 (2016): 1074–1084.
- Ångström, A. K. «On the computation of global radiation from record of sunshine.» *Arkiv. for Geof.* 2, n. (22) (1924): 471.
- CIE. «Practical methods for the measurement of reflectance and transmittance.» 1998.
- . «Radiometric and Photometric Characteristics of Materials and their Measurement.» 1977.
- Djedjig, R., E. Bozonnet, e R. Belarbi. «Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons.» *International Journal of Low-Carbon Technology* 10, n. 1 (2015): 34-44.
- Ferrari, G. F. *La prossima città*. Mimesis, 2018.
- Fischer, E. M., e C. Schär. «Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes.» *Climate Dynamics* 33 (2009): 917-935.
- Gebhart, B. «Surface temperature calculations in radiant surroundings of arbitrary complexity –for gray, diffuse radiation.» *International Journal of Heat and Mass Transfer* 3, n. 4 (1961): 341-346.
- Grobe, L. O. «Characterization and data-driven modeling of a retro-reflective coating in RADIANCE.» *Energy and Buildings* 162 (2018): 121-133.

- Gupta, M. K., K. J. Buntariya, H. A. Shukla, e P. Patel. «Methods for Evaluation of Radiation View Factor: A Review.» *Materials Today: Proceedings* 4, n. 2 (2017): 1236-1243.
- Hidalgo, F. G., R. F. Martinez, e E. F. Vidal. «Design Of A Low-Cost Sensor For Solar Irradiance.» *IEEE*, 2012: 1-8.
- Jones, B. G. «Population growth, urbanization and disaster risk and vulnerability in metropolitan areas: a conceptual framework.» *Environmental Management and Urban Vulnerability*, 1992.
- Klein, S. A. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program University of Wisconsin*. Solar Energy Laboratory. Madison, 2010.
- Lambert, J. H. *Lambert's Photometrie (Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae)*. 1760.
- Landsberg, E. H. «The Urban Climate.» *International Geophysics Series* 28 (1981).
- Liu, B.Y. H., e R. C. Jordan. «The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.» *Solar Energy* 4, n. 3 (1960): 1-19.
- Martínez, M. A., J. A. Marquez, e J. M. Enrique. «A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range.» *Sensors* 9 (2009): 4615-4634.
- McKinsey Global Institute. 2015.
- Moonen, P., T. Defraeye, V. Dorer, B. Blocken, e J. Carmeliet. «Urban Physics Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand.» *Frontiers of Architectural Research* 1, n. 3 (2012): 197-228.
- Morini, E., B. Castellani, A. Presciutti, M. Filipponi, A. Nicolini, e F. Rossi. «Optic-energy performance improvement of exterior paints for buildings.» *Energy and Buildings* 139 (2017): 690-701.
- Nunez, M., e T. R. Oke. «The Energy Balance of an Urban Canyon.» *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 1977: 11-19.
- Oke, T. R. «The distance between canopy and boundary layer on urban heat island.» *Atmosphere* 14, n. 4 (1976): 268–277.
- Oke, T. R. «The significance of the atmosphere in planning human settlements.» *Ecological and Classification in Urban areas, Ecological Land Classification Series* Vol. 3 (1977).

- Oke, T. R., D. G. Johnson, D. G. Steyn, e I. D. Watson. «Simulation of surface urban heat island under ideal conditions at night – Part 2: Diagnosis and causation.» *Boundary Layer Meteorology* 56 (1991): 339-358.
- Rossi, F., A. L. Pisello, A. Nicolini, e M. Filippini. «Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model.» *Applied Energy* 114 (2013): 621-631.
- Rossi, F., et al. «Experimental evaluation of urban heat island mitigation potential of retro-reflective pavement in urban canyons.» *Energy and Buildings* 126 (2016): 340-352.
- Rossi, F., et al. «Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations.» *Applied Energy* 145 (2015): 8-20.
- Rossi, F.; Pisello, A. L.; Nicolini, A.; Filippini, M.; Palombo, M. «Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model.» 114 (2014): 621-631.
- Runnals, K. E., e T. R. Oke. «Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver British Columbia.» *Physical Geography* 21 (2000): 283-304.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, e I. Korona. «On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings.» *Solar energy* 70, n. 3 (2001): 201-216.
- Sarrat, C., A. Lemonsu, V. Masson, e D. Guedalia. «Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution.» *Atmospheric Environment* 40, n. 10 (2006): 1743-1758.
- Siegel, R., e J. Howell. «Thermal Radiation Heat Transfer.» CRC Press, 2001.
- Stathopoulou, M., C. Cartalis, e C. Nektarios . «Using midday surface temperature to estimate cooling degree-days from NOAA-AVHRR thermal infrared data: An application for Athens, Greece.» *Solar Energy* 80, n. 4 (2006): 414-422.
- Watkins, R., J. Palmer, M. Kolokotroni, e P. Littlefair. «The London Heat Island – results from summertime monitoring.» *Building Services Engineering Research and Technology* 23, n. 2 (2002): 97-106.
- Weber, R.; et al. «Strahlungsmodell für TRNSYS mit Gebhart- aktoren.» *Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt, Bautechnologien*, 1999.
- Yuan, J., C. Farnham, e K. Emur. «Development of a retro-reflective material as building coating and evaluation on albedo of urban canyons and building heat loads.» *Energy and Buildings* 103 (2015): 107-117.

Zinzi, M., E. Carnielo, e G. Rossi. «Directional and angular response of construction materials solar properties: Characterization and assessment.» *Solar Energy* 115 (2015): 52-67.

Zinzi, M., E. Carnielo, e G. Rossi. «Directional and angular response of construction materials solar properties: Characterization and assessment.» *Solar Energy* 115 (2015): 52-67.