STUDIO DELLO SCAMBIO RADIATIVO IN UN CANYON URBANO: ANALISI DELLE RIFLESSIONI MULTIPLE COME UNA DELLE CAUSE DEL FENOMENO UHI E DI UN POSSIBILE INTERVENTO DI MITIGAZIONE

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Dottorato in Energia e Ambiente

XXXII Ciclo

Candidata

Chiara Colucci

n° matricola 1384118

Relatore

Prof. Ing. Andrea Vallati

A/A 2016/2019

INDICE

1. Introduzione *4*

1.1. Premessa **4**

1.2. I fattori che influenzano l'effetto isola di calore **6**

1.3. Nozioni di termofisica dell'edificio **7**

1.4. Geometria e canyon urbani **9**

2. Metodologia e Modello *13*

2.1. La radiazione solare **13**

2.2. Comportamento radiativo delle superfici edilizie **15**

2.3. Materiali Lambertiani **17**

2.4. Setup sperimentale **17**

2.4.1. Misure e calibrazione 22

2.4.2. Determinazione dell'algoritmo di calibrazione 23

2.4.3. Risultati sperimentali 25

2.4.4. Determinazione dell'albedo 27

2.5. Modello Matematico **27**

2.5.1. Descrizione dei software utilizzati 27

2.5.1.1. SketchUp 27

2.5.1.2. TRNSYS 17 28

2.5.1.2.1. Architettura principale di TRNSYS 29

2.5.1.2.2.Simulazioni in ambiente TRNSYS 31

2.5.2. Radiation Mode 32

2.5.3. Modellizzazione delle riflessioni multiple 33

2.6. Validazione del modello matematico **39**

2.6.1. Configurazione Est-Ovest 41

2.6.2. Configurazione Nord-Sud 49

3. Risultati delle Simulazioni *55*

3.1. Confronto mediante analisi numerica tra i carichi solari sulle facciate di un edificio inserito in un canyon urbano e un edificio identico isolato **55**

3.1.1. Modello di simulazione 56

3.1.2. Risultati delle simulazioni 57

3.1.2.1 Analisi della radiazione solare assorbita normalizzata 58

3.1.2.2 Analisi della radiazione globale assorbita 60

3.1.2.3 Analisi delle temperature superficiali delle facciate 63

3.1.2.4 Fabbisogno di energia termica dell'edificio 65

3.2. Impatto delle mutue riflessioni nel campo della shortwave tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici (ε=0) **66**

3.2.1. Modello di simulazione 68

3.2.2. Risultati delle simulazioni 71

3.2.2.1. Analisi della radiazione solare assorbita 71

3.2.2.2. Fabbisogno di energia termica dell'edificio 74

3.3. Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici al variare della città 79
3.3.1. Modello di simulazione 79
3.3.2. Risultati delle simulazioni 80
3.3.2.1. Analisi della radiazione solare assorbita 80
3.3.2.2. Fabbisogno di energia termica dell'edificio 82

3.4. Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici (ε≠0) 84
3.4.1. Modello di simulazione 85
3.4.2. Risultati delle simulazioni 87
3.4.2.1. Analisi della radiazione solare assorbita 87
3.4.2.2. Fabbisogno di energia termica dell'edificio 89

4. Proposte per la mitigazione del fenomeno dell'UHI ***92***

4.1. Cool Roofs **94**

4.2. Cool Pavements **97**

4.3. Aree Verdi e Vegetazione **99**

4.4. Green Roofs **100**

4.2. Materiali Retro-Riflettenti **102**
4.2.1. Tecnologie esistenti 102
4.2.2. Caratteristiche e potenzialità 106

5. Verifica strumentale e misure ***107***

5.1. Strumenti per la caratterizzazione della risposta ottica dei materiali **107**
5.1.1. La funzione BT(R)DF 107
5.1.2. Campi di applicazione 110
5.1.3. Coefficienti di riflessione, trasmissione e assorbimento 111
5.1.3.4. Goniofotometro del LIFT 112
5.1.3.4.1. Procedimento di misura 114
5.1.3.5. Lo spettrofotometro del LIFT 115

5.2. Misure in laboratorio **118**
5.2.1. Campioni analizzati 118
5.2.1.1. Spectralon 118
5.2.1.2. Vernice al quarzo e vernice cool 119
5.2.1.3. Vernice retro-riflettente alle sfere di vetro 120
5.2.2. Risultati delle misure di laboratorio 121
5.2.2.1. Diagrammi polari Spectralon 124
5.2.2.2. Diagrammi polari tinta Retro-Riflettente 125
5.2.2.3. Diagrammi polari vernice al quarzo 127
5.2.2.4. Calcolo dell'energia riflessa 128
5.2.2.5. Misura dell'energia incidente 130
5.2.2.6. Coefficienti di riflessione 132
5.2.2.7. Risultati Spettrofotometria LIFT 133

5.3. Misure sperimentali **134**

6. Conclusioni ***146***

Appendice ***151***

Bibliografia ***165***

1. Introduzione

1.1. Premessa

Negli ultimi secoli la crescita demografica mondiale e il processo di urbanizzazione hanno determinato una considerevole modifica del territorio da parte dell'uomo. Uno degli effetti provocati da questa trasformazione è il cambiamento del microclima nelle aree urbane dove l'ambiente ha subito alterazioni più profonde.

Il termine *isola di calore urbana* (Urban Heat Island - UHI) è utilizzato per identificare il fenomeno che determina temperature maggiori nelle aree cittadine rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali.

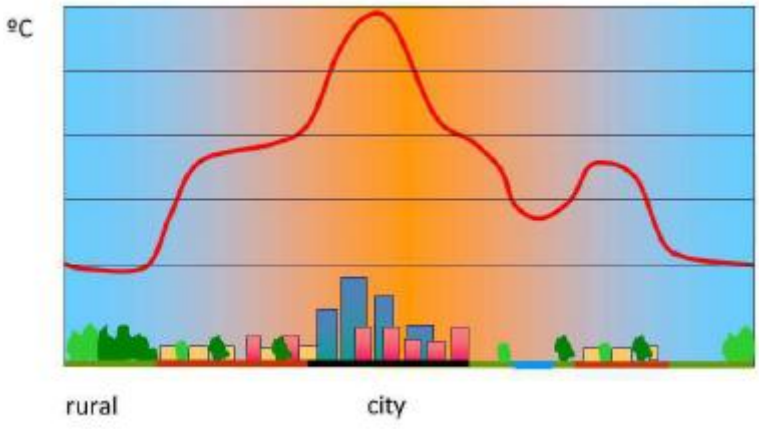


Figura 1. Profilo dell'UHI

L'indicatore utilizzato per quantificare questo scostamento è l'intensità dell'isola di calore (UHI *intensity*), definita come differenza tra la temperatura urbana e quella rurale. L'isola di calore è un fenomeno che condiziona inevitabilmente l'ambiente cittadino e la qualità della vita della popolazione urbana. Nonostante le maggiori temperature esistenti in città possano essere considerate un effetto positivo durante il periodo invernale, poiché riducono il carico di riscaldamento, le conseguenze negative dell'UHI sembrano superarne i benefici. È durante la stagione estiva infatti che si verifica la massima richiesta annuale di potenza elettrica e l'effetto isola di calore contribuisce a incrementare l'entità della domanda. L'utilizzo massiccio degli impianti di condizionamento, oltre a provocare maggiori emissioni di calore antropogenico che aumentano ulteriormente la temperatura, determina maggiori emissioni di gas serra e di inquinanti, riducendo la qualità dell'aria. Entrambi questi effetti danneggiano la salute umana e contribuiscono a generare stati di malessere soprattutto

nei soggetti più deboli, come bambini e anziani. Infine, l'elevata temperatura delle superfici riscalda in maniera anomala l'acqua piovana che defluisce poi in ruscelli, fiumi, stagni e laghi; tale inquinamento termico dell'ecosistema influisce negativamente sul metabolismo e sulla riproduzione di molte specie acquatiche (1).

L'entità del fenomeno varia notevolmente con le condizioni atmosferiche, la stagione e l'ora del giorno ma si presenta in tutte le metropoli, indifferentemente dalla regione climatica in cui esse sono situate. Per la città di Roma, durante le giornate estive, la differenza di temperatura rilevata tra le stazioni meteorologiche rurali situate più lontane dagli agglomerati cittadini e quelle urbane si attesta intorno a 1°C. Durante la notte, la situazione si capovolge: la differenza di temperatura cambia segno e può arrivare fino a 3°C [CCVS]. Kolokotsa et al. [2] ha studiato il fenomeno dell'UHI a Hania, in Grecia, trovando un'intensità massima giornaliera di 8°C e una differenza di temperatura urbana-rurale media di quasi 2.6°C. Più recentemente, Giannopoulou et al. [3] hanno riportato una intensità dell'UHI tra 3°C e 5.3°C durante il giorno e tra 1.3°C e 2.3°C durante la notte per la città di Atene.

La combinazione dell'isola di calore urbana con il fenomeno del riscaldamento globale rende il tutto particolarmente degno di attenzione anche da un punto di vista energetico. Gli scenari climatici previsti per i prossimi 100 anni [4] prevedono un aumento delle notti tropicali (>20°C) e delle giornate calde (>35°C) per il bacino del Mediterraneo. Temperature più elevate innalzano il fabbisogno di energia per il raffrescamento [5-10] causando un aumento significativo del consumo energetico degli edifici con negative ricadute sull'impatto ambientale.
Emerge pertanto come l'UHI sia un parametro di indiscusso peso per la corretta stima dei fabbisogni energetici degli edifici. Nonostante ciò, nella pratica di valutazione energetica il fenomeno dell'UHI è per lo più completamente ignorato.

Detta valutazione energetica viene eseguita per mezzo di software commerciali (certificati dal CTI) che si basano non solo su dati di input provenienti da stazioni metereologiche situate in zone aeroportuali, e dunque rurali e scevri dall'effetto dell'isola di calore urbana, ma anche su un'analisi di tipo quasi-stazionaria dei parametri di input meteoreologico (medi mensili). Un simile approccio comporta un ulteriore incremento dell'inaffidabilità e dell'inaccuratezza delle previsioni energetiche. Questi programmi di simulazione infatti, proprio in virtù del

loro approccio, non tengono conto di aspetti fondamentali quali l'inerzia delle pareti, la capacità termica dell'involucro e gli effetti delle variazioni climatiche nell'arco delle 24 ore. In estate, ad esempio, si possono avere escursioni termiche anche di 15 gradi tra giorno e notte; considerare una temperatura media (neanche giornaliera ma addirittura mensile) può essere da un lato una soluzione di comodo ma è sicuramente sintomo di un approccio approssimativo al problema.

L'obiettivo del mio percorso di ricerca di dottorato è stato quello di eseguire uno studio dettagliato del microclima urbano, che tenga conto dell'intensità dell'UHI attraverso un'analisi non più quasi-stazionaria bensì dinamica dei dati meteo grazie alla messa a punto di uno specifico modello in TRNSYS.

1.2. I fattori che influenzano l'effetto isola di calore

L'isola di calore urbana è un'anomalia termica provocata da molteplici fattori tra loro correlati. Nonostante gli elementi di influenza possano sembrare evidenti, il contributo all'effetto UHI di ciascuno di essi non è definibile in modo generale, poiché le specificità proprie di ogni città assumono un ruolo significativo. L'intensità del fenomeno è influenzata dalla posizione geografica, dal momento temporale considerato e dalle condizioni meteorologiche. Le variabili meteorologiche che maggiormente controllano l'intensità sono la velocità del vento e la nuvolosità, poiché modificano rispettivamente la turbolenza atmosferica e l'irraggiamento solare [11]. Le tipologie di fattori naturali sopracitate vengono definite da Rizwan et al. (2008) [12] incontrollabili, mentre le cause strettamente legate alla modifica antropica del territorio ed oggetto di possibili interventi di mitigazione sono definite variabili controllabili (Figura 2). **Tali cause dovute all'influenza umana sono collegate alla geometria urbana, alle proprietà termiche e radiative delle superfici**, alla riduzione della vegetazione e ai processi energetici che soddisfano le necessità della popolazione.

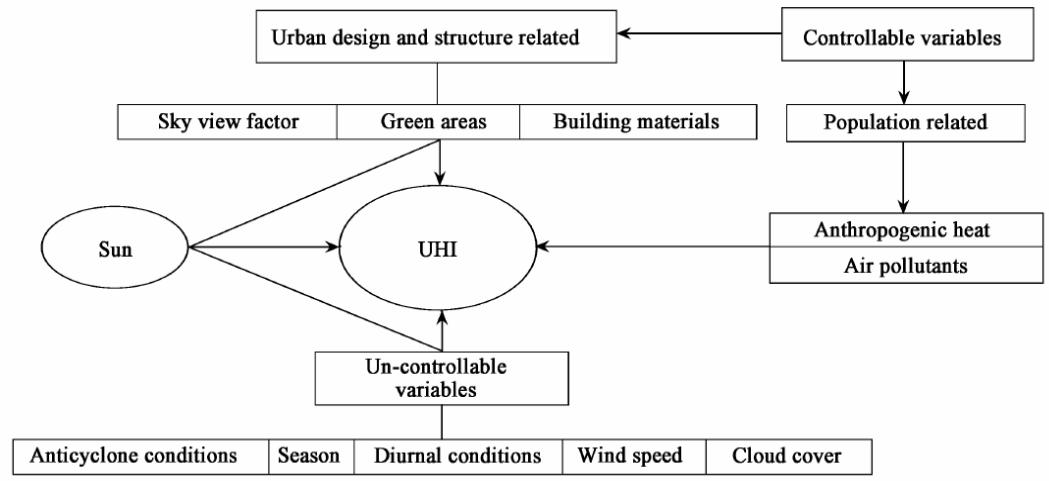


Figura 2. Classificazione delle cause dell'effetto UHI (Rizwan et al. 2008)

La diminuzione della vegetazione rispetto alle aree rurali e la presenza di superfici impermeabili comportano una riduzione dei processi di evaporazione e di traspirazione, con ulteriore riduzione del benessere termoigrometrico per la popolazione. **I materiali delle superfici urbane sono inoltre caratterizzati da un minore albedo (rapporto tra la quantità di luce riflessa da un corpo e la quantità di luce da esso ricevuta) rispetto ai terreni rurali e da un'elevata capacità di accumulare calore, che viene generalmente rilasciato durante le ore notturne. L'altezza e la vicinanza degli edifici causano delle riflessioni multiple della radiazione solare, diminuiscono il fattore di vista verso il cielo (limitando il raffreddamento radiativo notturno) e riducono la velocità del vento e dunque l'asportazione del calore.**

In aggiunta alle cause legate alla struttura urbana, il fenomeno isola di calore è causato dal calore antropogenico (proveniente da mezzi di trasporto, condizionatori e stabilimenti industriali) e dall'effetto serra urbano generato dall'inquinamento.

1.3. 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 W/m^2 in estate. Si tenga presente che nella stagione invernale, fatto 100 il fabbisogno di energia termica per riscaldamento, il 28% di esso è coperto dagli apporti solari (Figura 3).

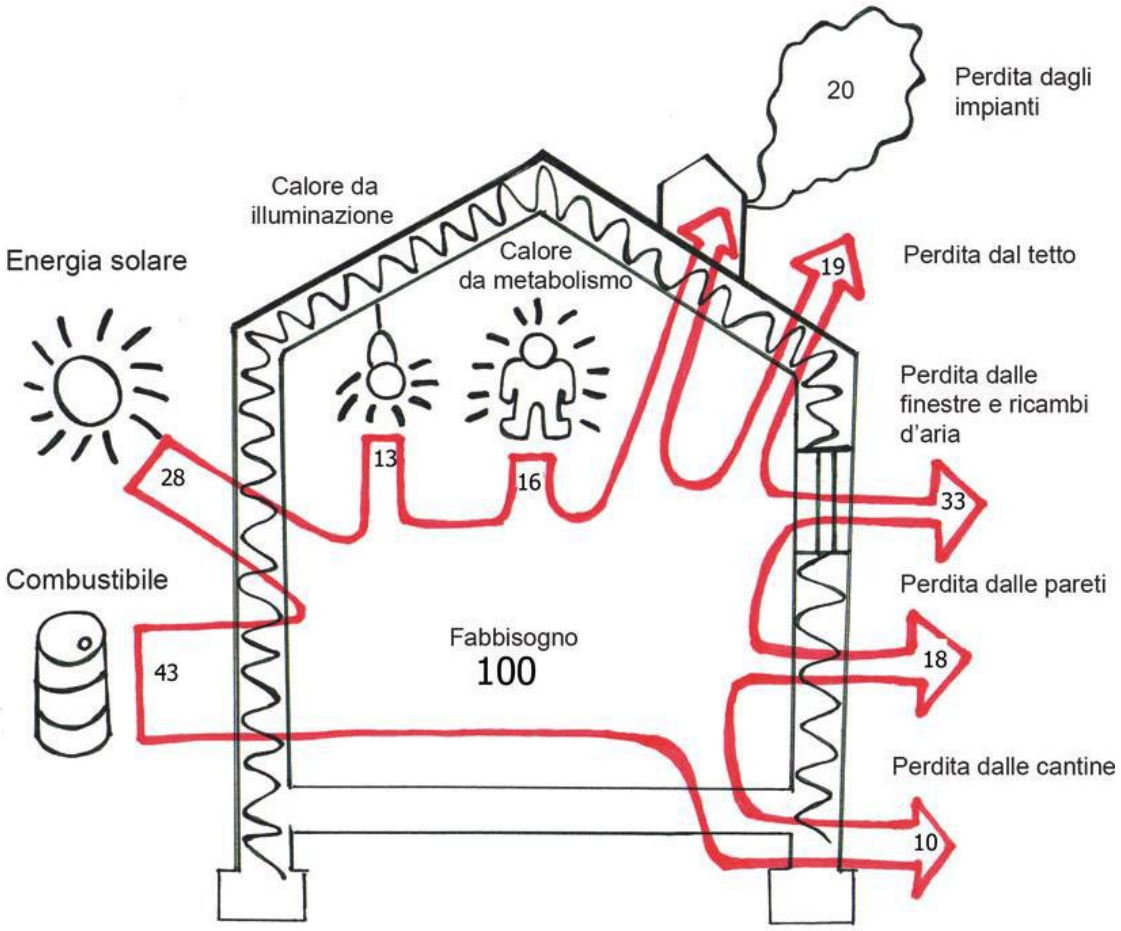


Figura 3. Bilancio termico di un edificio (stagione invernale)

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 maggiori 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.

1.4. Geometria e canyon urbani

Durante il percorso di dottorato, la mia ricerca si è concentrata sullo studio del comportamento radiativo che si sviluppa all'interno dei canyon urbani, in particolare sullo sviluppo delle riflessioni multiple. Un elemento che influenza la radiazione è la disposizione geometrica degli edifici, che è in grado di modificare i percorsi della radiazione. Nonostante ogni città presenti un proprio assetto geometrico, è possibile individuare un'unità geometrica urbana presente in maniera diffusa: il *canyon* urbano. Il canyon 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 (Fig.4).

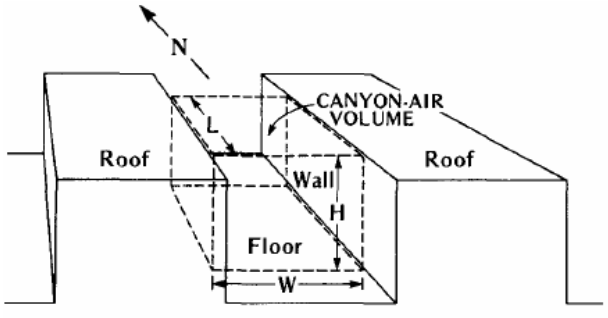


Figura 4. Rappresentazione schematica di un canyon urbano (Nunez e Oke 1977)

La geometria del canyon influenza il bilancio energetico urbano in vari modi: aumenta la superficie esposta ai processi di scambio, complica l'ingresso 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. I canyon urbani catturano infatti una maggiore quantità di radiazione solare**, intrappolata dalle numerose riflessioni multiple** che i raggi solari subiscono da parte delle pareti dei palazzi e del fondo stradale (Figura 5). È soprattutto a causa di tale fenomeno, noto appunto come *effetto canyon*, che l'isola di calore si conserva anche nelle ore notturne. Di notte il raffreddamento dell'aria che ristagna entro i canyon è molto più lento che nelle adiacenti aree rurali perché l'energia infrarossa irraggiata nell'ambiente dalle superfici che delimitano il corridoio stradale, anziché disperdersi liberamente nello spazio, viene in gran parte catturata e più volte riflessa dagli edifici che si fronteggiano ai lati opposti della strada.

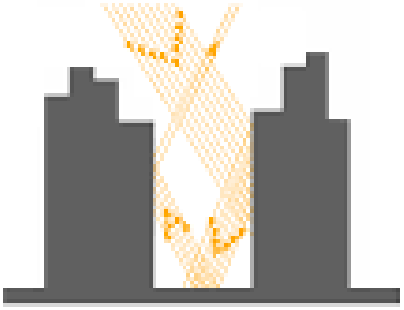


Figura 5. Le riflessioni e gli assorbimenti multipli in un canyon urbano incrementano l'albedo effettivo del sistema

Naturalmente non tutti i canyon urbani influenzano allo stesso modo gli 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;

- i fattori di vista (un rapporto variabile tra 0 e 1 che esprime la quantità di radiazione intercettata da una superficie rispetto a quella emessa da un'altra).

Il rapporto H/W descrive quanto gli edifici siano densamente spaziati rispetto alla loro altezza: valori crescenti del rapporto indicano una diminuzione della porzione di cielo visibile dall'interno del canyon. Tale parametro tuttavia è inadatto per descrivere efficacemente la grande varietà delle situazioni urbane. Una misura più flessibile e più utilizzata per quantificare l'influenza della geometria sugli scambi radiativi è lo *sky view factor* (SVF o ψs), definito come il rapporto, compreso tra zero e uno, tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie planare e la radiazione emessa (o ricevuta) dall'intero ambiente emisferico.

Lo SVF è quindi una caratteristica di uno specifico punto nello spazio ed esprime l'entità dello scambio radiativo con il cielo Unger (2009) [13]. Se consideriamo un punto della superficie urbana, la radiazione proveniente dal punto in parte raggiunge il cielo e in parte viene assorbita dalle superfici circostanti (edifici, alberi...). È pertanto possibile calcolare lo SVF di un sito sottraendo da uno tutti i fattori di forma delle superfici "viste" dal punto (Figura 6).

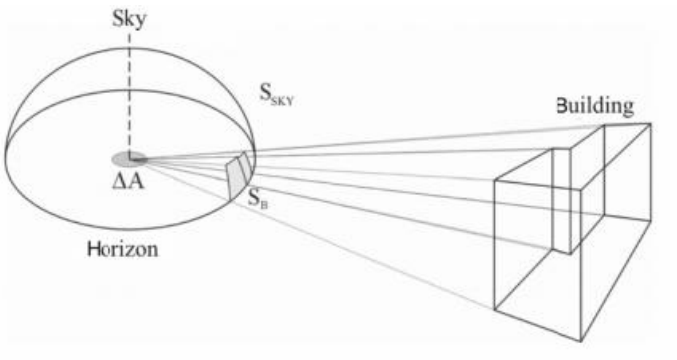


Figura 6. Lo Sky View Factor di un elemento di superficie (ΔA) viene ridotto dagli edifici in modo proporzionale alla proiezione degli stessi nell'emisfero centrato in ΔA (Unger 2009)

La riduzione dello SVF nei canyon urbani è considerata una delle principali cause dell'UHI al di sotto dell'altezza media degli edifici, poiché comporta una diminuzione delle perdite radiative notturne in condizioni di vento debole e cielo sereno. Tale affermazione è

supportata dalle osservazioni di Oke (1982) [11] che ha riscontrato una correlazione tra SVF e intensità massima notturna dell'UHI in varie città (Figura 7).

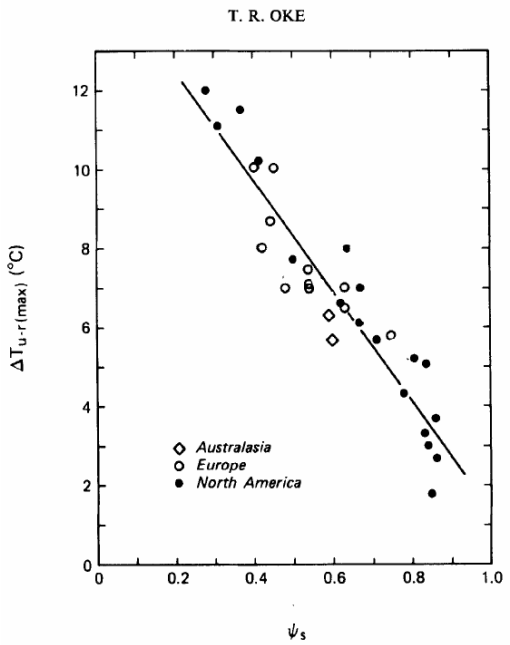


Figura 7. Relazione tra UHI e SVF osservata durante notti estive e senza nubi (Oke 1982)

2. Metodologia e Modello

2.1. 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.

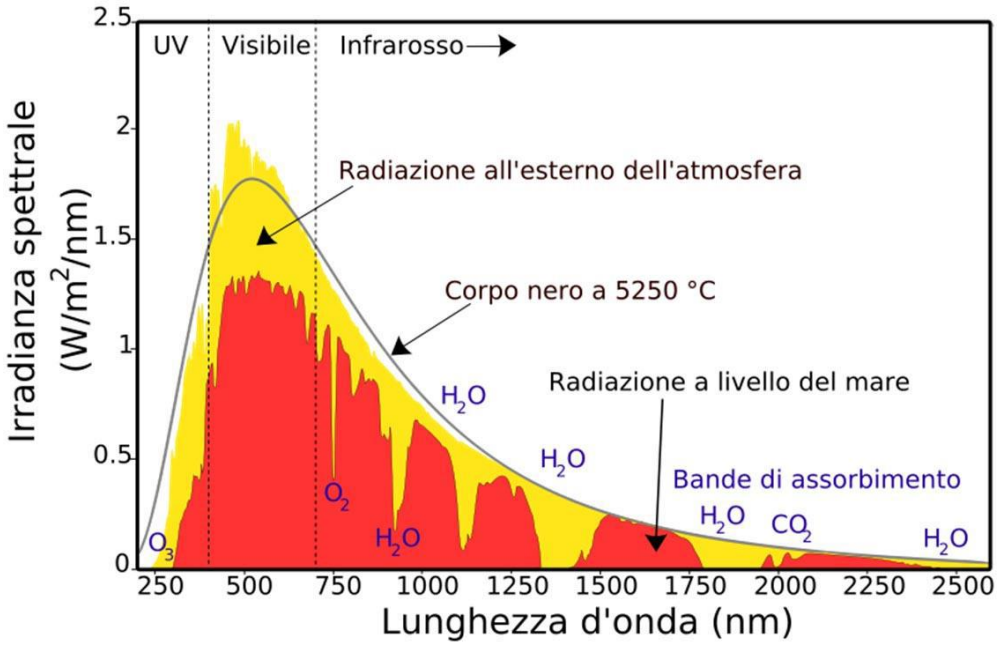


Figura 8. Spettro della radiazione solare

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

• 0.2 – 0.38 μm: ultravioletto (6.8 % dell'energia totale)

• 0.38 – 0.78 μm: visibile (47.6 %)

• 0.78 – 10 μm: infrarosso (45.6%).

Fuori dall'atmosfera terrestre, il bilancio di potenza ricevuta dal sole si aggira intorno a 1367 W/m^2. Tale valore di irraggiamento (extraterrestre) si riferisce alla cosiddetta costante solare (GSC), 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.

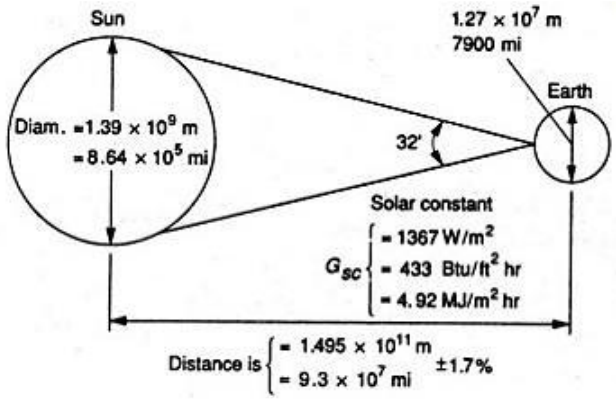


Figura 9. Geometria Terra-Sole

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.

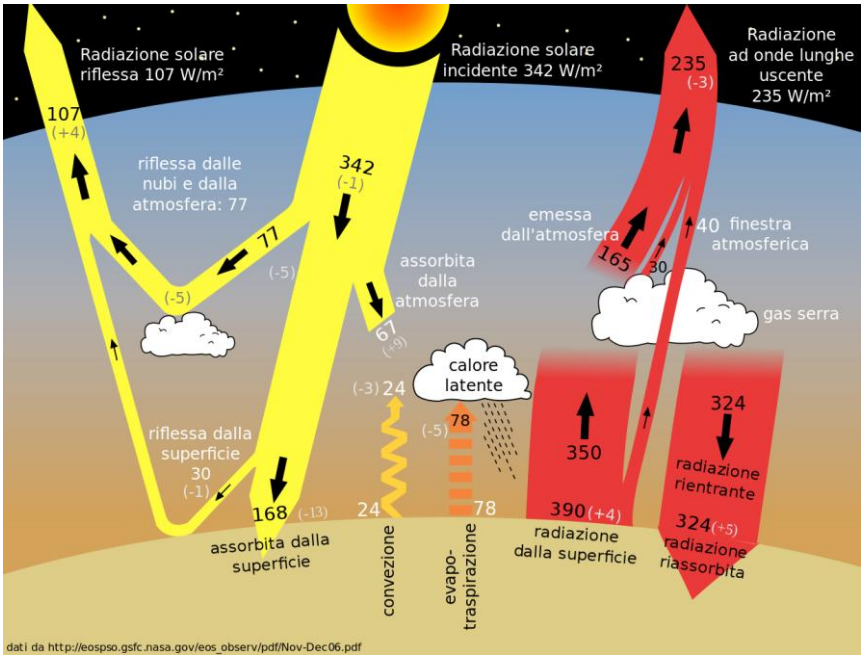


Figura 10. Il budget radiativo dell'atmosfera terrestre

Tutti questi fattori sono molto difficili da considerare e sono variabili nel tempo e con la località presa in considerazione.

2.2. Comportamento radiativo delle superfici edilizie

Tra gli aspetti che contribuiscono alla formazione dell'effetto isola di calore, oltre allo studio del particolare tessuto urbano, la riflettanza delle superfici costruite, in particolar modo quelle appartenenti alla pelle degli edifici, risulta essere un parametro di valutazione strategico della progettazione tecnologica energetica degli edifici e degli spazi urbani. Infatti, la forte presenza di superfici edilizie a scapito della copertura vegetale comporta l'immagazzinamento di una maggiore quantità di energia solare che viene poi riemessa sotto forma di infrarosso all'ambiente portando ad un'alterazione del microclima locale con un innalzamento della temperatura dell'aria. Anche a livello normativo questo parametro, ovvero l'albedo, inizia a presentarsi come elemento caratterizzante nella scelta delle superfici degli edifici e delle pavimentazioni nei nuovi interventi costruttivi.

Il contributo che hanno i materiali edilizi sul surriscaldamento degli ambienti urbani è rappresentato dal fatto che durante le ore diurne, principalmente nella stagione estiva, essi assorbono una gran quantità di energia radiante dovuta all'irraggiamento solare, diretto e diffuso, alla radiazione infrarossa proveniente dall'atmosfera, alle mutue riflessioni radiative che si creano tra le superfici di un ambiente urbano; questa energia incorporata viene poi riemessa nell'ambiente sotto forma di radiazione infrarossa provocando appunto un innalzamento della temperatura dell'aria. Questa radiazione infrarossa emessa segue la legge di Stephan – Boltzmann risultando così proporzionale con la quarta potenza della temperatura superficiale, che in alcuni casi può arrivare nelle ore di maggior insolazione anche a 60 °C.

Il tipico assetto geometrico delle città, con strade relativamente strette rispetto alle dimensioni verticali degli edifici accentua le conseguenze di questo meccanismo di scambio termico. Avviene così che, a differenza di una superficie piana non edificata, i canyon urbani catturino una maggiore quantità di radiazione solare, intrappolandola sotto forma di numerose **riflessioni multiple** che i raggi solari subiscono incidendo sulle pareti dei palazzi e del fondo stradale.

È soprattutto a causa di tale fenomeno, noto appunto come “effetto canyon”, che l’isola di calore si conserva anche nelle ore notturne. Infatti, di notte il raffreddamento dell’aria, che ristagna entro i canyon, è molto più lento che nelle adiacenti aree rurali. Questo perché l’energia infrarossa irraggiata nell’ambiente dalle superfici che delimitano il corridoio stradale, anziché disperdersi liberamente nello spazio, viene in gran parte catturata e più volte riflessa dagli edifici che delimitano il corridoio stradale. Il canyon agisce come un corpo nero che assorbe tutte le radiazioni a onda corta che dall’alto penetrano al suo interno impedendo la dispersione della radiazione, portando fenomeni di riscaldamento delle superfici e di riduzione dell’effettivo albedo urbano.

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 retroriflettenti (d); comunemente è più facile trovare superfici dal comportamento misto (c) ed (e).

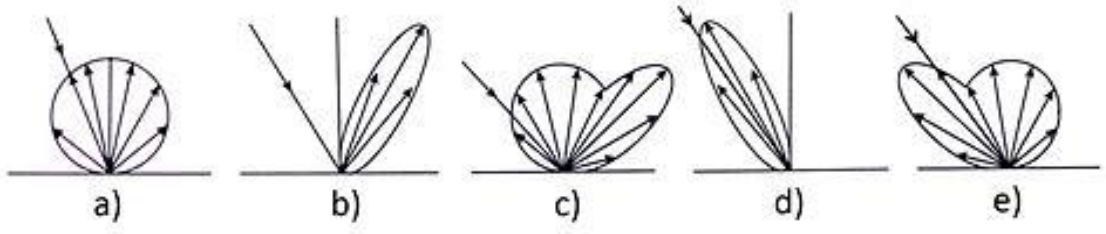


Figura 11. a) lambertiano, b) speculare, c) speculare-diffusivo, d) retroriflettente, e) misto retroriflettente

2.3. Materiali Lambertiani

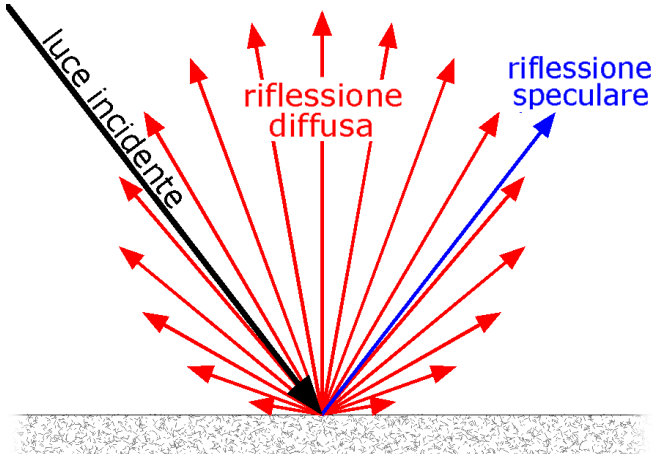


Figura 12. Modalità di riflessione di un materiale Lambertiano

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. 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. Significa che quando un raggio di luce incide su una superficie lambertiana essa riflette la luce in tutte le direzioni in maniera uniforme.

Tutti i principali materiali da costruzione oggi sono lambertiani, i retroriflettenti non sono ancora mai stati usati negli edifici, ma le ricerche stanno mostrando sempre più le potenzialità ed è probabile che in pochi anni possano diventare una valida soluzione per mitigare parte degli effetti delle isole di calore.

Le analisi che ho svolto durante il mio percorso di dottorato si concentrano principalmente su due aspetti:

- lo studio di una delle cause principali del fenomeno UHI: le riflessioni multiple che si sviluppano all'interno di un canyon urbano;
- lo studio dei materiali retroriflettenti come tecnica di mitigazione dell'UHI.

Per effettuare queste analisi, con il mio gruppo di ricerca abbiamo sviluppato sia un setup sperimentale che un modello matematico in TRNSYS, validato con i risultati sperimentali.

2.4. Setup sperimentale

Per l'apparato sperimentale è stato previsto l'utilizzo di pannelli rimuovibili, corrispondenti alle facciate verticali degli edifici in scala, su cui sono state applicate diversi tipi di vernice (diffusiva e retroriflettente). La disposizione degli strumenti di misura è stata prevista sul

piano della superficie di frontiera superiore del canyon, ovvero sul *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 (incidente) e quella uscente (riflessa), in prossimità del piano di mezzeria, in modo da limitare gli effetti di bordo sulle misure sperimentali.

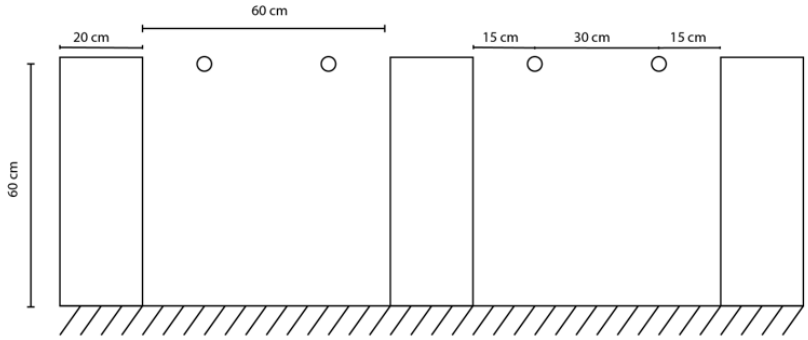


Figura 13. Sezione Trasversale Setup

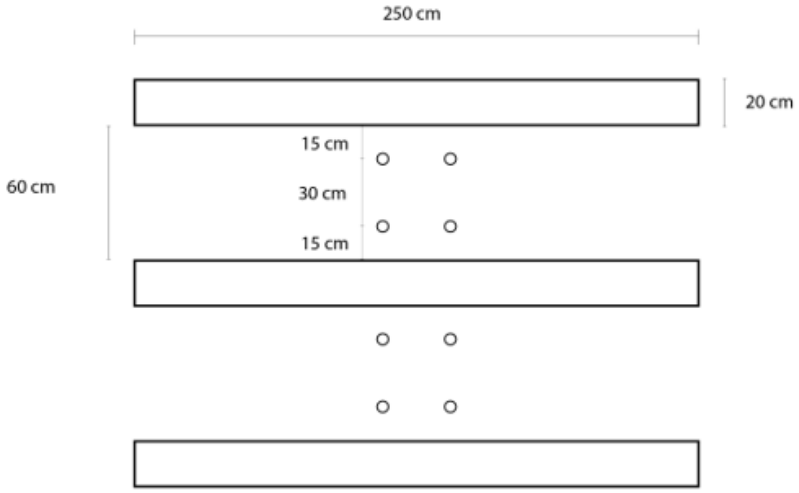


Figura 14. Pianta Setup Sperimentale

Prima di vedere più nel dettaglio i vari componenti dell'apparato, in Figura 15 viene riportata una foto dell'apparato che può aiutare a comprenderne meglio la configurazione finale:

Figura 15. Configurazione finale apparato sperimentale in scala

Ciascun modello di edificio (i parallelepipedi verdi in figura 15) 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 gli 8 sensori sono da 30x30 cm e sono disposti in modo da tenere i sensori a distanza di 15 cm da ciascuna delle due pareti laterali degli edifici in scala. Poiché 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 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.

Figura 16. Agilent 34970° Fronte

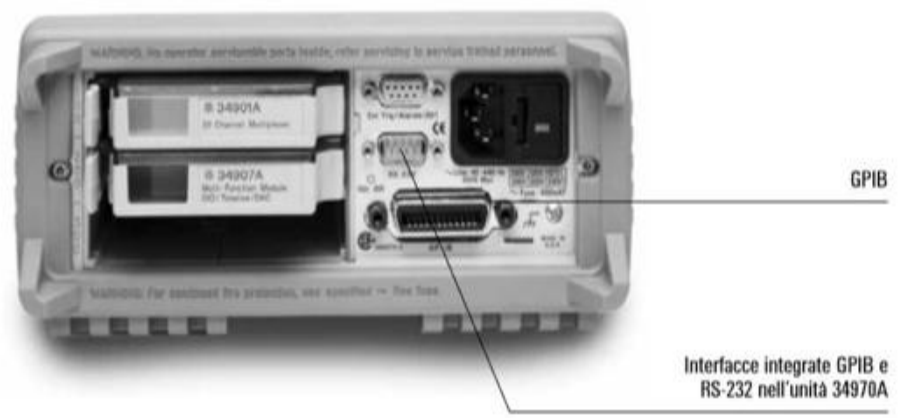


Figura 17. Agilent 34970° Retro

All'interno dell'Agilent come si vede in figura è stata inserita una scheda plug in: è un circuito detto multiplexer che permette il collegamento all'acquisitore degli strumenti utilizzati.

Figura 18. Multiplexer

Poiché le breadbord 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. Si tenga presente che la DAQ (Data AcQuisition) e l'alimentatore stabilizzato sono stati disposti all'interno del modello di edificio centrale.

Viene dunque presentata la fase di progettazione e realizzazione di un prototipo di un albedometro per la misura dell'albedo dei canyon urbani in scala. Le caratteristiche principali del sensore sono le ridotte dimensioni e il costo notevolmente basso di tutti i componenti. 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° 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 provenienti dai sensori.

In Figura 19 è mostrato il raccordo a T utilizzato come alloggiamento per i sensori.

Figura 19. Giunzione a T scelta come housing per i fotodiodi

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.

Figura 20. Sensore con sistema di attenuazione

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.

L'obiettivo specifico della ricerca è dunque quello di studiare il beneficio che può essere ottenuto dall'applicazione di nuovi materiali retroriflettenti (RR) sugli involucri edilizi nei canyon urbani.

2.4.1. 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, effettuato 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 metereologiche, risultasse serena per evitare la comparsa di episodi nuvolosi e favorire 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.

2.4.2. 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 21 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

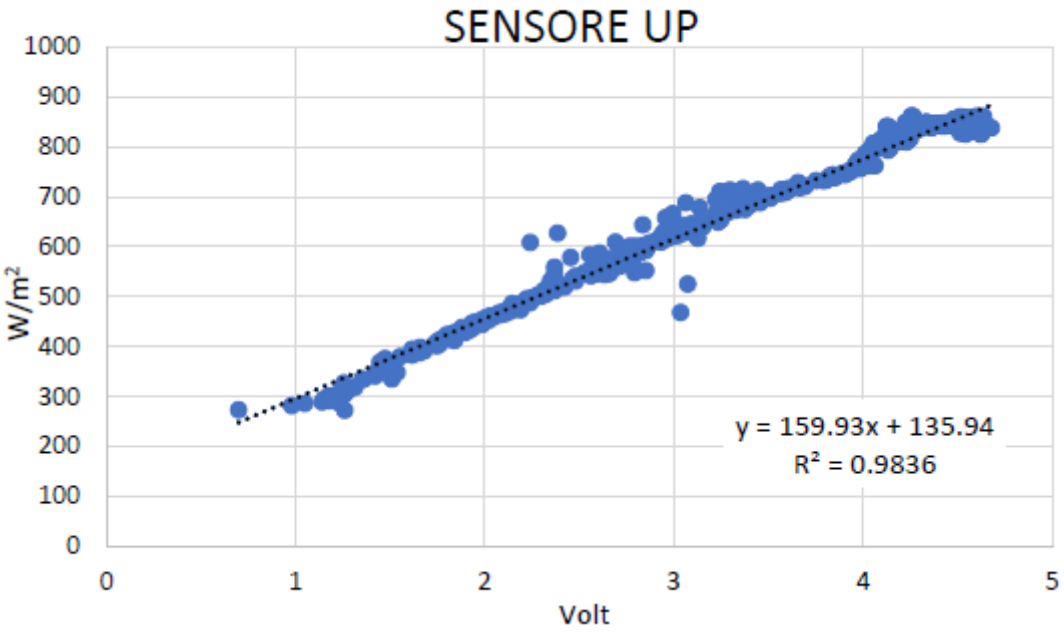


Figura 21. Calibrazione dati sperimentali sensore superiore

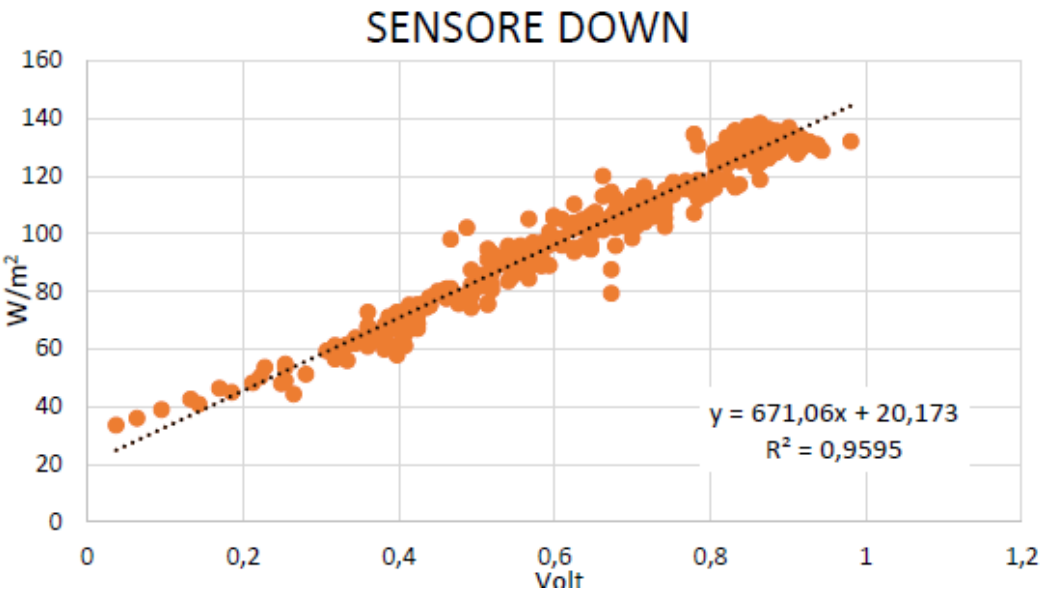


Figura 22. Calibrazione dati sperimentali sensore inferiore

Poiché la relazione tra le misure dei due albedometri è lineare, possiamo aspettarci che la linea 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 piranometro 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 = 0.99 per il sensore Up;
- R = 0.98 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.

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.

2.4.3. 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 W/m^2. Allora sono stati tracciati in un grafico l'andamento dell'irradianza solare misurata dall'albedometro Delta Ohm e i risultati trovati sperimentalmente dal dispositivo progettato nella giornata del 6 Aprile 2018.

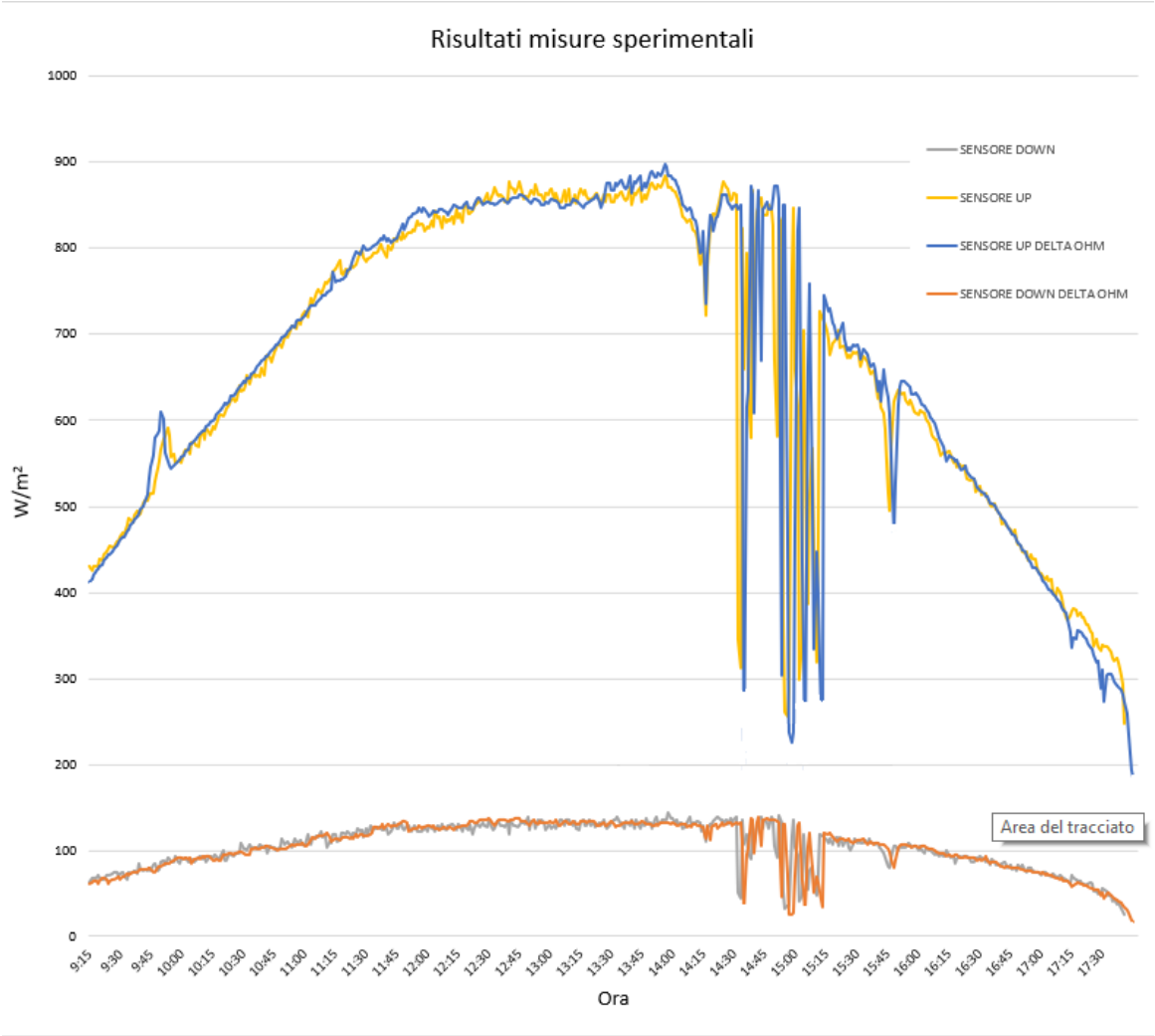


Figura 23. Risultati misure con applicazione dell'algoritmo di calibrazione

Guardando la Figura 23 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 metereologiche. 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 irregolare, quanto più variabile è l'evento nuvoloso in atto.

2.4.4. 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 – $\alpha = 0.15$
- Albedometro LIFT – $\alpha = 0.15$

Questo conferma l'affidabilità dello strumento di misura progettato.

2.5. Modello Matematico

2.5.1. Descrizione dei software utilizzati

Il software adottato per la creazione del modello matematico è TRNSYS. Nel capitolo viene presentato il software SketchUp utilizzato per riprodurre la geometria dell'edificio e il software TRNSYS (versione 17) utilizzato per la simulazione dinamica dell'edificio.

2.5.1.1. SketchUp

Sketchup è un software di modellazione 3D, in grado di riprodurre bidimensionalmente e tridimensionalmente gli edifici o i singoli oggetti. Una nota particolare merita la possibilità di strutturare l'oggetto in gruppi e componenti, i quali possono essere ripetuti (copiati) più volte. Attraverso questi elementi è possibile ottenere la ripetizione di particolari del modello, facilitando il lavoro in serie al disegnatore. Le componenti, una volta correttamente posizionate, possono essere modificate simultaneamente agendo solo su una di esse, senza dover aggiornare manualmente e ridefinire ogni singola ulteriore componente inserita.

Le caratteristiche principali di Sketchup sono:

- un sistema intelligente di disegno (chiamato inference/inferenza);

- un sistema parametrico per la definizione delle forme grafiche sia 2D che 3D;
- possibilità di studiare forme tridimensionali attraverso tecniche di estrusione molto intuitive (Push/Pull Technology);
- definire le coordinate geografiche dell'oggetto (longitudine, latitudine);
- simulare l'incidenza realistica delle ombre solari sul modello, ad una data ora e periodo dell'anno;
- possibilità di gestire semplici animazioni della scena;
- i modelli possono essere colorati individualmente grazie a librerie di materiali anche definibili dall'utente;
- interazione con Google Earth;
- semplicità d'uso, orientata soprattutto al disegno tecnico;
- l'espansibilità delle funzioni attraverso plugin (macro) in Ruby Script.

2.5.1.2. TRNSYS 17

TRNSYS (Transient Energy System), sviluppato dalla University of Wisconsin Madison e dall'Universita del Colorado, è una piattaforma completa, flessibile ed estensibile per eseguire simulazioni termiche in regime dinamico di vari sistemi, tra i quali anche gli edifici multi zona. Questo software, disponibile commercialmente dal 1975, è conosciuto ed utilizzato da ingegneri e ricercatori di tutto il mondo per dimostrare la validità di nuovi studi e ricerche nell'ambito dell'energia: dal semplice sistema per produzione di acqua calda sanitaria al progetto e simulazione degli edifici e dei loro impianti; integrando strategie di controllo compatibili con il benessere degli occupanti e sistemi ad energia alternativa (eolico, solare, fotovoltaico, sistemi ed idrogeno) ecc...

Il programma viene costantemente aggiornato grazie al lavoro di sviluppo congiunto di un insieme di istituzioni, quali: Solar Energy Laboratory negli Stati Uniti, Thermal Energy Systems Specialist negli Stati Uniti, Aiguasol Enginyeria in Spagna, Centre Scientifique et Technique du Batiment in Francia, Transsolar GmBH Energietechnik in Germania. La versione utilizzata in questo studio è la 17 del 2012. Due fattori chiave del successo del software TRNSYS sono: la sua aperta struttura modulare e il codice di programmazione disponibile agli utenti che possono modificare i moduli a seconda delle proprie esigenze. L'architettura del software, basata su file con estensione *.DDL*, permette all'utente di modificare i modelli esistenti o crearne di nuovi in base alle proprie esigenze di analisi

tramite i piu comuni linguaggi di programmazione (C++, FORTRAN, PASCAL, …), in aggiunta TRNSYS può essere facilmente collegato con molte altre applicazioni (Microsoft Excel, Matlab, EES,…) per operazioni di pre/post-processing.
Il campo di applicazione di TRNSYS include i seguenti sistemi:

- sistemi solari (termici e fotovoltaici);
- edifici a basso consumo energetico e sistemi HVAC con avanzate caratteristiche di progetto (ventilazione naturale, free-cooling, doppie facciate,…);
- sistemi per energie rinnovabili;
- cogenerazione e celle a combustibile.

2.5.1.2.1. Architettura principale di TRNSYS

TRNSYS è composto da una suite di programmi integrati tra loro:

- TRNSYS Simulation Studio: è la principale interfaccia grafica del software, attraverso questo programma è possibile collegare i vari componenti del sistema che si sta studiando. E' possibile creare un nuovo progetto semplicemente selezionando e trascinando i componenti interessati nell'area di lavoro (Figura 24), connettendoli uno con l'altro a seconda della logica di funzionamento del sistema studiato e impostando i parametri globali della simulazione.

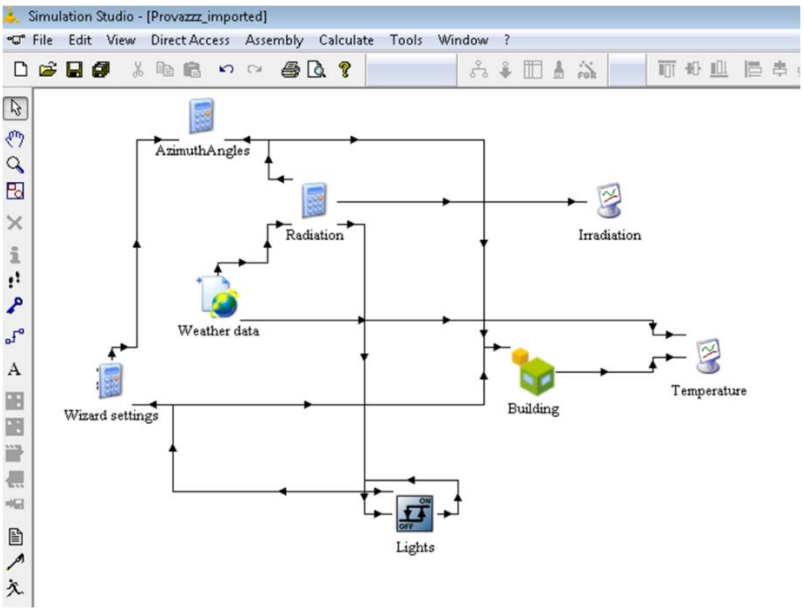


Figura 24. Simulation Studio, interfaccia grafica di TRNSYS

Ogni *Type* (componente) è descritto da un modello matematico e presenta una serie di parametri (parameters), ingressi (input), uscite (output) i quali possono essere impostati dall'utente oppure collegati ad un file esterno. I risultati delle simulazioni possono essere integrati su file, stampati e visualizzati in forma di grafici (Figura 25).

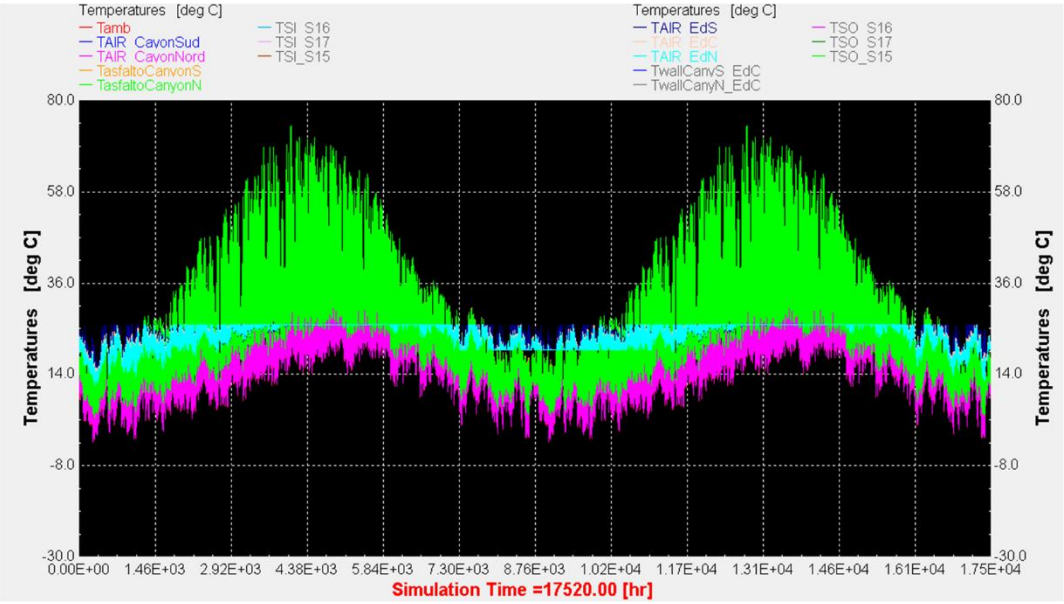


Figura 25. Esempio di grafico creato da Simulation Studio.

- TRNBuild.exe: è l'interfaccia grafica utilizzata per modellizzare edifici e strutture (Figura 26). Consente di inserire i dati di input, di specificare tutti i dettagli della struttura e tutto quello che è necessario a simulare il comportamento termico dell'edificio (come le proprietà ottiche e termiche delle finestre, gli apporti termici interni, i settaggi per la climatizzazione e il riscaldamento,…).

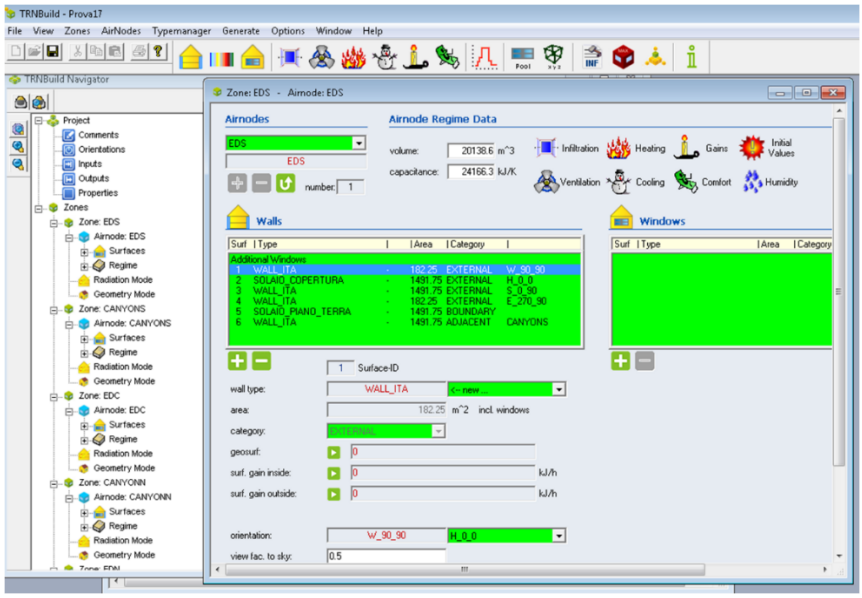


Figura 26. Interfaccia grafica di TRNBuild

2.5.1.2.2.Simulazioni in ambiente TRNSYS

La simulazione in ambiente TRNSYS è realizzata tramite l'assemblaggio di una serie di *Type* (componenti), individuate in una libreria già esistente, all'interno dell'interfaccia Simulation Studio. I vari *Type* devono essere interconnessi in modo da permettere lo svolgimento di una sequenza ordinata di operazioni che dipende dal tipo di studio e dal tipo di simulazione che si vuole eseguire. Ogni Type è descritto da un modello matematico detto "proforma". Il proforma è una subroutine in Fortran che modella il componente in termini di equazioni matematiche, ha una struttura a black- box con INPUT, OUTPUT e PARAMETRI (Figura 27).

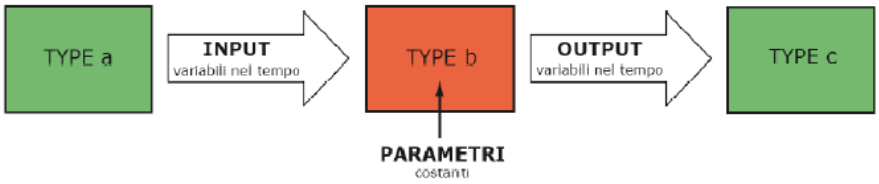


Figura 27. Struttura Type a black box.

Tutti i *Type* utilizzati nel progetto, le modalità secondo le quali questi saranno chiamati a interagire tra loro e le impostazioni generali della simulazione sono raccolti in un file,

detto file deck, che rappresenta l'input vero e proprio al motore di simulazione. Il file deck è composto da due parti:

- TRNDll.dll: è il simulation engine cioè il motore che contiene i codici dei componenti, li legge, li richiama e determina la convergenza dei risultati.
- TRNExe.exe: rappresenta la parte esecutiva che effettua la simulazione e stampa i risultati. Esegue l'intero sistema di equazioni associato al file deck, per ogni timestep di simulazione impostato, tramite un processo iterativo dei valori in input e output che soddisfi tutte le equazioni (Figura 28).

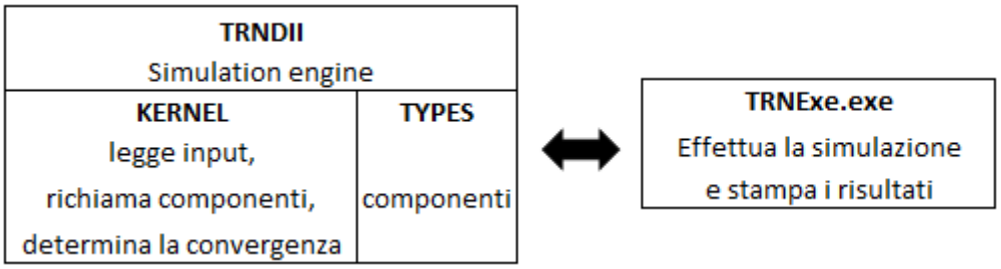


Figura 28. Logica di simulazione TRNSYS.

2.5.2. Radiation Mode

Nella versione 17 sono disponibili, all'interno di una zona termica, diversi modelli per tener conto dello scambio termico per irraggiamento. Viene utilizzata la modalità dettagliata per il calcolo degli scambi radiativi:

- Distribuzione di un fascio di radiazioni

Per le finestre esterne sono utilizzate le matrici di ombreggiatura e insolazione per distribuire la radiazione diretta solare primaria entrante nella zona. Queste matrici sono basate sui dati tridimensionali della costruzione e delle superfici di ombreggiamento.
Un programma ausiliario chiamato TRNSHD è usato da TRNBuild per la generazione di questi file. Questa modalità è consigliata per la simulazione di zone con superfici vetrate molto ampie (doppia facciata, atrio), dove la corretta distribuzione della radiazione solare diretta è importante.

- Distribuzione di radiazione diffusa

Per una trattazione dettagliata della radiazione diffusa ad onde corte tra cui la riflessione multipla, al nuovo modello di radiazioni si applicano i fattori di Gebhart. Il fattore chiave di questo metodo è la matrice fattore di vista. Per la generazione della matrice TRNBuild utilizza un programma ausiliario chiamato TRNVFM. Questa modalità è consigliata per la simulazione di zone con superfici vetrate molto ampie senza un dispositivo di

ombreggiamento, in cui la radiazione diffusa svolge un ruolo importante (pareti esposte a nord, doppia facciata o atrio).

- Scambio di radiazione ad onda lunga su superfici all'interno di una zona

Per una trattazione dettagliata dello scambio di radiazioni ad onda lunga tra cui la riflessione multipla, al nuovo modello di radiazioni si applicano i fattori di Gebhart. Il fattore chiave di questo metodo è la matrice fattore di vista. Per la generazione della matrice TRNBuild utilizza un programma ausiliario chiamato TRNVFM. Questa modalità è consigliabile per modellare un'analisi dettagliata del comfort, dove il comfort dipende dalla posizione all'interno della zona. Questa modalità aumenta il tempo di calcolo di un fattore pari a 2-3. Nel caso di studio si è scelta la modalità dettagliata come in Figura 29.

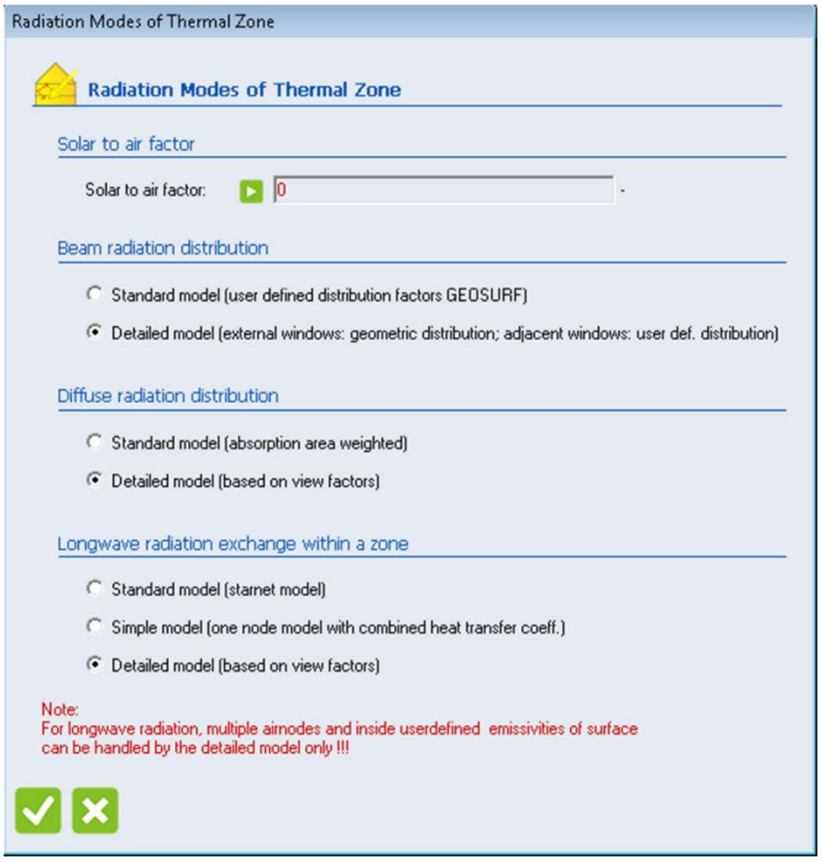


Figura 29. Radiation Modes of Thermal Zone.

2.5.3. Modellizzazione delle riflessioni multiple

Come detto precedentemente il software adottato per la creazione del modello matematico è TRNSYS 17. TRNSYS 17 consente il calcolo dinamico ora per ora dei parametri metereologici e quindi dei fabbisogni di energia. Per quanto riguarda la conduzione del

calore attraverso gli elementi dell'involucro edilizio, essa è modellata attraverso le funzioni di trasferimento 1D mentre, per i fenomeni convettivi, il software TRNSYS dà la possibilità di impostare i CHTC (coefficienti di convezione) esterni ed interni come valori costanti o correlazioni. Lo scambio di calore radiativo è modellato in modo diverso per le superfici esterne e interne. Più in particolare, l'irraggiamento solare che colpisce le facciate esterne degli edifici è considerato come un guadagno mentre la radiazione ad onde lunghe viene trattata come una perdita di calore verso il cielo freddo. **In TRNSYS è presente un modello di radiazioni 3D che tiene conto delle riflessioni multiple, ma solo all'interno delle zone chiuse**. Ciò significa che, nel caso dei canyon, il modello radiativo non considera le inter-riflessioni che si verificano tra le facciate degli edifici vicini. **Poiché il principale obiettivo dello studio è valutare gli effetti radiativi sul microclima urbano, e valutare come questi influenzano la domanda energetica dell'edificio oggetto di studio, i canyon sono stati modellati come zone termiche interne ("falsa" zona) con il tetto e le pareti di confine come finestre virtuali** (Figura 30).

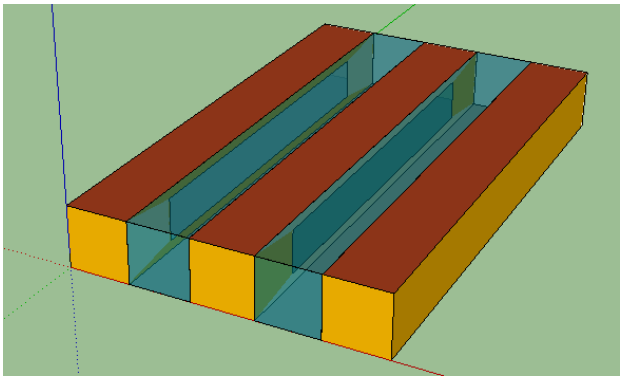


Figura 30. Canyon modellato come un volume chiuso circondato da finestre virtuali.

In questo modo, è possibile modellare accuratamente sia l'ombreggiamento fornito dagli edifici vicini, sia lo scambio di radiazioni ad onda corta e ad onda lunga tra i diversi edifici e quindi la presenza delle interiflessioni. Per quanto riguarda la radiazione solare, il software determina una matrice di ombreggiamento/insolazione in funzione della posizione del sole e dell'orientamento del modello. Sugli elementi opachi una frazione della radiazione solare diretta viene assorbita mentre la parte rimanente viene riflessa diffusamente. Per le superfici vetrate, una parte viene assorbita nei pannelli, una seconda parte viene trasmessa all'interno dell'edificio e il resto viene riflesso in modo diffuso. La radiazione diffusa globale, cioè la radiazione solare diffusa e la radiazione diffusa della radiazione solare diretta riflessa, è distribuita sulle superfici che compongono il canyon

stradale (incluse le superfici virtuali) utilizzando i fattori di Gebhart [14,15] che sono, fondamentalmente, i fattori di vista corretti, per considerare le interiflessioni. TRNSYS 17 divide lo spettro di radiazioni elettromagnetiche principalmente in due bande: onde lunghe e onde corte che sono trattate separatamente, in effetti Weber R. et al., hanno dimostrato che i fattori Gebhart (Gij) possono essere usati per tutte le bande spettrali. Quindi, per quanto riguarda la radiazione ad onde corte, abbiamo le seguenti relazioni:

$$G_{ij} = \left(I - F_{ij}\rho_j\right)^{-1} F_{ij}\left(I - \rho_j\right) \tag{1}$$

$$Q_{s,j} = A_j\left(1 - \alpha_j\right) R_{s,j} + \sum_{i=1}^{n} A_i G_{ij} \alpha_i R_{s,i} \tag{2}$$

dove G è la matrice del fattore Gebhart, i è una delle superfici che scambia con la superficie j, I è la matrice di identità, F è la matrice del fattore di vista, ρ è la riflettività, n è il numero di superfici, Qs,j è il flusso di radiazione ad onda corta, A è la superficie, α l'albedo e Rs,i è il flusso di radiazione solare sulla superficie j. La frazione della radiazione diffusa ad onda corta che viene distribuita sulle superfici finestrate viene nuovamente riflessa, assorbita e trasmessa attraverso i vetri. Così come per la radiazione diffusa ad onda corta, anche per la radiazione ad onde lunghe in volumi chiusi abbiamo espressioni simili:

$$G_{ij} = \left(I - F_{ij}\rho_j\right)^{-1} F_{ij}\varepsilon_j \tag{3}$$

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

dove Ql,j è il flusso di radiazioni ad onda lunga, ε è l'emissività, σ è la costante di Stefan-Boltzmann e T è la temperatura delle superfici. Viene quindi calcolata la perdita radiativa ad onda lunga direttamente verso il cielo, attraverso l'individuazione di una temperatura fittizia, funzione della temperatura dell'aria, dell'umidità dell'aria, della nuvolosità e della pressione atmosferica locale. Per le superfici che non sono in volumi chiusi o di fronte ad un canyon stradale, la radiazione ad onda lunga verso il cielo è calcolata come segue:

$$Q_{l,j} = A_k\varepsilon_j\sigma\left(T_j^4 - T_{fsky}^4\right) \tag{5}$$

$$T_{fsky} = \left(1 - f_{sky}\right) T_a + f_{sky} T_{sky} \tag{6}$$

dove fsky è la frazione del cielo vista dalla superficie j, Ta è la temperatura ambiente e Tfsky è la temperatura del cielo fittizio. Le superfici laterali sono state considerate opache per le radiazioni ad onda lunga, quindi non vi è trasmissione di calore attraverso gli elementi vetrati in questo campo radiativo. Come detto in precedenza ogni canyon è stato modellato come un atrio con soffitto aperto, utilizzando una finestra virtuale, disponibile nel database TRNBuild. La finestra virtuale consiste in un sottile foglio d'aria che ha le stesse caratteristiche termiche dell'aria. Questa scelta consente al software di considerare il canyon come una zona termica in cui vengono valutati gli effetti delle inter-riflessioni radiative. In ogni caso, siccome questo strato (canopy layer) non deve interferire con il trasferimento di calore tra l'ambiente del canyon e l'ambiente esterno, devono essere soddisfatte alcune condizioni:

• Conduzione: il canopy layer ha uno spessore di 0,001 mm di conduttività dell'aria pari a 0,026 W/(mK);

• Convezione: per evitare scambi di convezione attraverso il canopy layer tra l'aria del canyon stradale e l'aria esterna è stato imposto un valore CHTC pari a 0,001 W/m^2K;

• Irradiazione: il canopy layer è trasparente per radiazioni ad onde corte, ma nel campo della radiazione ad onde lunghe tutte le superfici all'interno del canyon (pareti, asfalto, ecc.) vedono questo strato d'aria, con la sua temperatura, come una superficie con cui scambiare calore, secondo la legge di Planck. Pertanto, il canopy layer costituisce un ostacolo per tutte le superfici affacciate nel canyon poiché non consente loro di vedere il cielo freddo.

Quindi, la temperatura di questa superficie virtuale dovrebbe essere uguale alla temperatura del cielo fittizio per rappresentare il cielo. TRNSYS 17 non dà la possibilità di assegnare una temperatura a qualsiasi superficie mentre consente di imporre un guadagno interno o esterno. Abbiamo deciso di seguire questa strada, determinando i valori giornalieri dei guadagni/dispersioni da forzare come input all'interno di questa superficie virtuale al fine di rendere la temperatura della superficie virtuale uguale alla temperatura del cielo freddo. Ciò è stato ottenuto imponendo l'equilibrio energetico mostrato in Fig. 31. Poiché lo strato di copertura (superficie 4), per quanto riguarda gli scambi radiativi, dovrebbe comportarsi come il cielo freddo, è possibile scrivere:

$$Q_{l,1-4} + Q_{l,2-4} + Q_{l,3-4} = Q_{l,4-sky} \qquad (7)$$

Siccome la superficie 4 perde direttamente verso il cielo, il termine nel secondo membro, considerando l'equazione (5), è:

$$A_4\sigma\varepsilon_4\left(T_4^4 - T_{fsky}^4\right) = Q_{l,4-sky} \qquad (8)$$

Dove A4 è l'area del canopy layer, σ è la costante di Stefan-Boltzmann, ε è l'emissività dello strato virtuale (pari ad 1 in questo caso), T4 è la temperatura del canopy layer ottenuta con TRNSYS e Tfsky è la temperatura fittizia del cielo ottenuta dal file di dati meteorologici di TRNSYS. Questo termine rappresenta quindi la dispersione oraria del calore verso il cielo forzata all'interno della superficie virtuale 4 nel software in modo che essa assuma la temperatura del cielo.

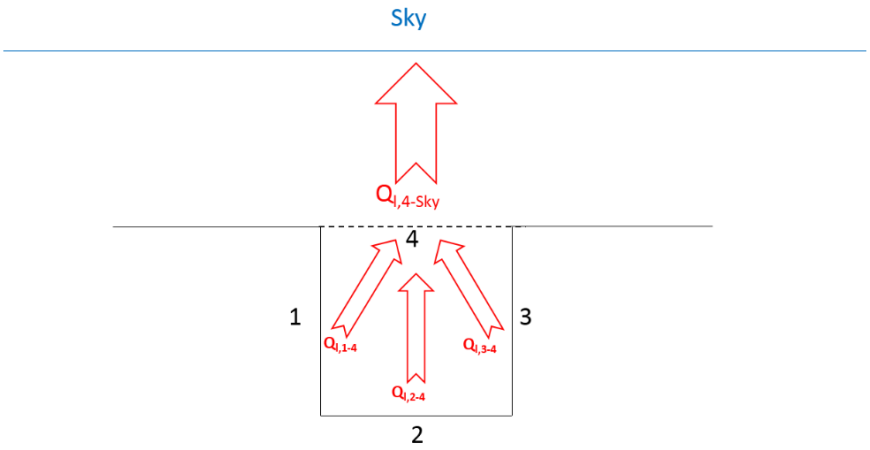


Figura 31. Radiation exchange model for the canopy layer: the sum of the losses towards surface 4 must match the loss towards the sky.

I modelli matematici realizzati in Trnsys simulano un modello semplificato di tessuto urbano (SCB) e un modello di edificio isolato (SAB).

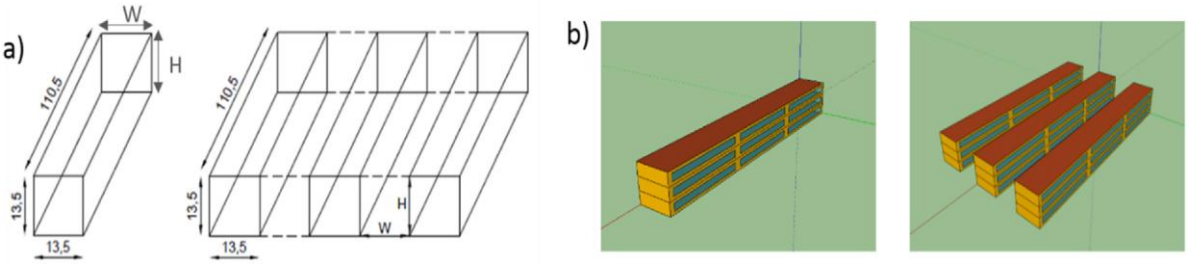


Figura 32. a) Geometrical features of building and canyons; b) 3D overview of SAB and SCB configurations.

Per SCB sono stati realizzati diversi casi al variare di H/W=0,5, 1 e 2. Il parametro geometrico H/W, denominato "canyon aspect ratio", è riferito al canyon tra gli edifici: H è la altezza del canyon e W è la sua larghezza. È importante notare che l'altezza del canyon coincide sempre con l'altezza dell'edificio, mentre la larghezza del canyon cambia. La Fig. 32a) mostra l'edificio nella sua configurazione standalone (SAB), mentre la Fig. 32b) mostra l'edificio nel suo contesto urbano (SCB), fiancheggiato da due canyon con H/W=1. Nelle simulazioni, abbiamo deciso di adottare due orientamenti principali per i canyon di strada: NS (edificio con le facciate rivolte ad ovest ed est) ed EW (edificio con le facciate rivolte a 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 similari ma anche per minimizzare gli effetti delle condizioni marginali sui lati corti dell'edificio. Sia l'altezza che la larghezza dell'edificio sono 13,5 m. Per quanto riguarda la superficie finestrata, questa è modellata pari al 50% o 25%. Le pareti laterali corte sono modellate adiabatiche assumendo che siano continue, modellando così una lunga fila di zone termiche identiche. In SCB l'edificio studiato è il centrale ed è circondato da altre due file di edifici. Le caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti dell'involucro dell'edificio sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. Main features of construction envelope elements.

Envelope element	Materials	Thickness (m)	U (W/m^2K)	g	α	ε
Walls	Plaster, brick, insulation	0.44	0.36		0.6	0.9
Roof	Plaster, concrete, screed, insulation	0.37	0.32		0.6	0.9
Pavement	Ceramics, concrete, isolation, plaster	0.54	0.34		0.6	0.9
Windows	Glass, wood	–	1.40	0.6		0.84

Tabella 2. Specific values of internal gains.

	Persons (W/m^2)	Devices (W/m^2)	Lights (W/m^2)
Radiative	1.51	0.35	3.5
Convective	3.01	1.05	1.5

I guadagni interni dovuti al sistema di illuminazione, ai dispositivi elettrici, agli utenti e gli orari di occupazione sono impostati in base all'uso residenziale come indicato in Tabella 2 [26]. I guadagni riportati nella Tabella 2 sono relativi alla superficie totale del pavimento. La presenza degli utenti è considerata per 24 ore al giorno. Il programma di utilizzo per i dispositivi elettrici è impostato su "on" dalle 8.00 alle 24.00 mentre per le luci è impostato su "on" dalle 17.00 alle 24.00. La velocità di ventilazione naturale è di 0,5 vol/h mentre si presume che il tasso di infiltrazione dell'involucro sia 0,2 vol/h; durante la notte si presume

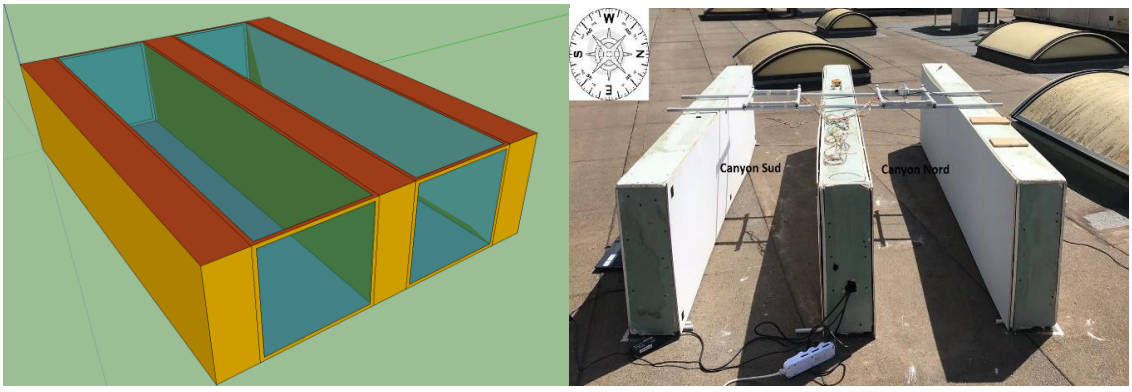
che sia presente solo il tasso di infiltrazione. Le esigenze di raffreddamento dell'ambiente e di riscaldamento sono determinate considerando le temperature dell'aria ambiente controllate costanti pari a 20 ° C durante l'inverno (il periodo di riscaldamento previsto a Roma dal 1 ° novembre al 15 aprile) e 26 ◦C durante l'estate.

2.6. Validazione del modello matematico

In questo capitolo ci si pone l'obiettivo di validare il modello matematico precedentemente descritto con i risultati del setup sperimentale a parità di condizioni al contorno. Si sono svolte quindi le analisi nei giorni corrispondenti le misure svolte sperimentalmente al fine di validare il modello matematico. Per fare questo in Trnsys è stato ricreato il file meteo con i valori della radiazione incidente sul piano orizzontale pari a quelli misurati con il piranometro come si può vedere nella colonna UP delle tabelle 4 e 5. La configurazione geometrica, nonché i coefficienti di assorbimento delle facciate principali che affacciano nei canyon urbani nei due casi (setup e Trnsys) coincidono.

Qui sotto le caratteristiche geometriche principali del modello:

Altezza [m]	*Larghezza [m]*	*Lunghezza [m]*	*H/W*
0.6	*0.2*	*2.5*	*1*



Vediamo nel dettaglio quali sono stati i giorni e le caratteristiche del setup di ciascun giorno:

Tabella 3. Configurazioni Setup

	Canyon NORD		**Canyon SUD**	
	Tinta	**Surf**	**Tinta**	**Surf**
24-lug	Bianco Barozzi RQ (ρ=0.86)	N	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	N
	Bianco Barozzi RQ (ρ=0.86)	S	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	S
26-lug	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	S	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	S
	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	N	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	N
29-ago	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	N	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.41)	N
	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	S	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.41)	S
	Canyon EST		**Canyon OVEST**	
	Tinta	**Surf**	**Tinta**	**Surf**
11-set	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	E	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	E
	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	O	Bianco Barozzi TG (ρ=0.88)	O
12-set	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	E	Bianco Barozzi RQ (ρ=0.86)	E
	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	O	Bianco Barozzi RQ (ρ=0.86)	O

La vernice Barozzi è una pittura al quarzo, utilizzata tantissimo per i muri che presentano imperfezioni, muffe e batteri ed è maggiormente indicata per esterni. Essa è composta da polveri di quarzo a granulometria differenziata, resine sintetiche e acqua. Questo tipo di vernice offre numerosi vantaggi in quanto è molto resistente alle intemperie, è un prodotto riempitivo ed idrorepellente, lavabile e resistente a diverse temperature. Per approfondire le caratteristiche delle vernici utilizzate si rimanda al capitolo 5.2.1.

Come si vede in tabella 3, sono state analizzate 4 diverse vernici diffusive al variare di ρ (coefficiente di riflessione): due di colore grigio e due bianche. I valori che si andranno a valutare saranno sempre i *down/up* ovvero il rapporto tra la radiazione uscente e quella entrante dal canopy layer; valore significativo per quella che poi sarà l'analisi sui materiali retroriflettenti. Le analisi svolte andranno dalle ore 11:00 alle ore 17:00.

2.6.1. Configurazione Est-Ovest

La configurazione è orientata Est-Ovest lungo l'asse principale del canyon, quindi in questo caso abbiamo un canyon sud e un canyon nord (facciate principali dell'edificio centrale che guardano a sud e a nord).

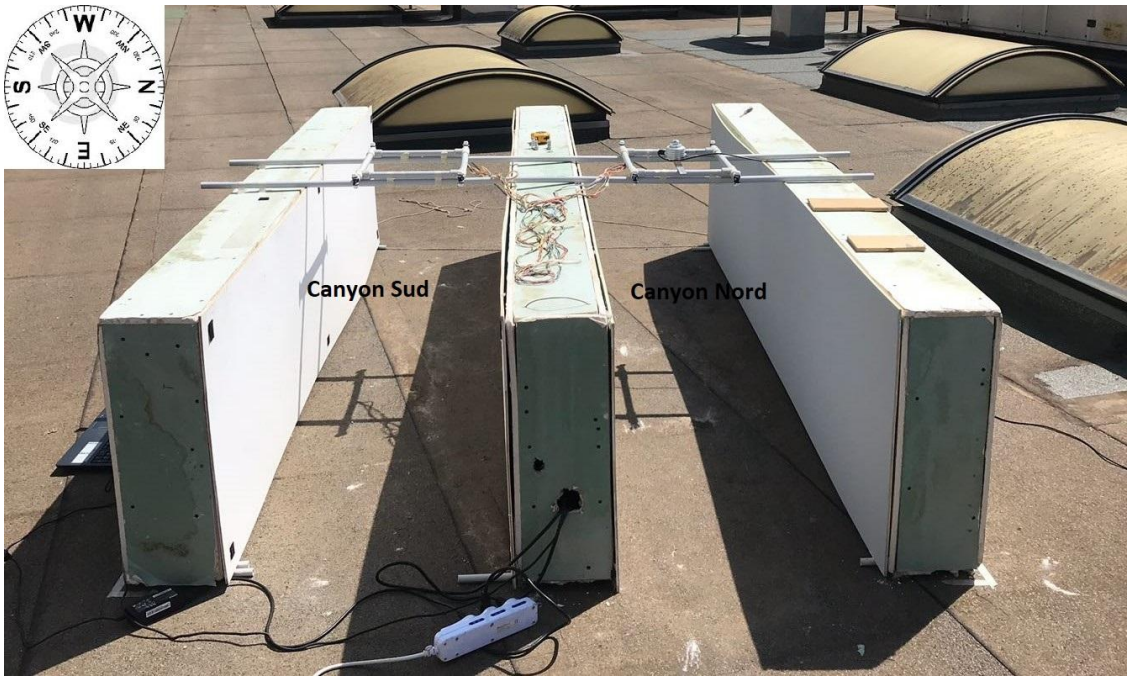


Figura 33. Foto Setup Sperimentale

1. 24 luglio

Canyon Nord: *Pannelli Bianchi Barozzi RQ ρ=0.86*

Canyon Sud: *Pannelli Grigi Barozzi RQ ρ=0.39*

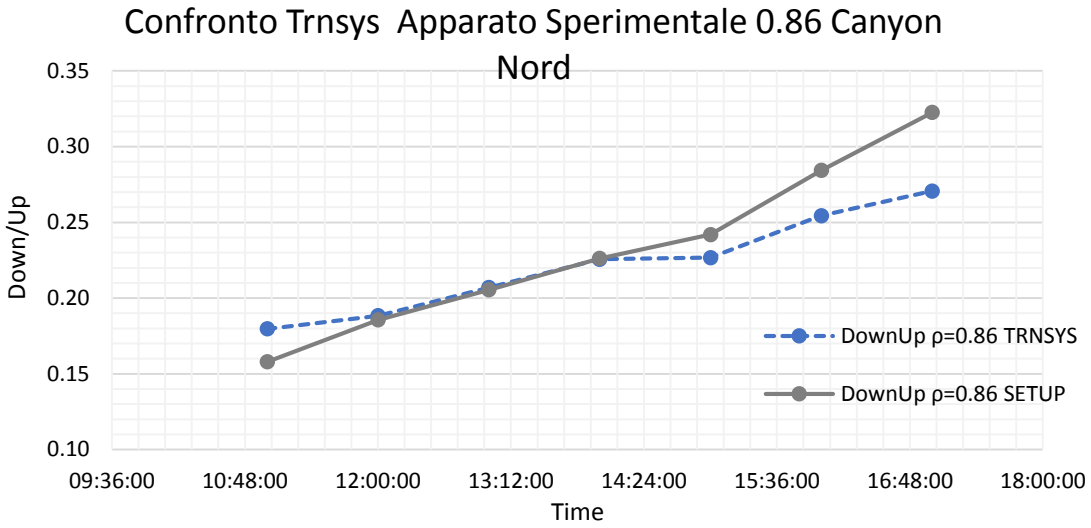
RQ sta per real-quartz ed indica la specifica tipologia di vernice (per le specifiche si rimanda al paragrafo 14.1.2.).

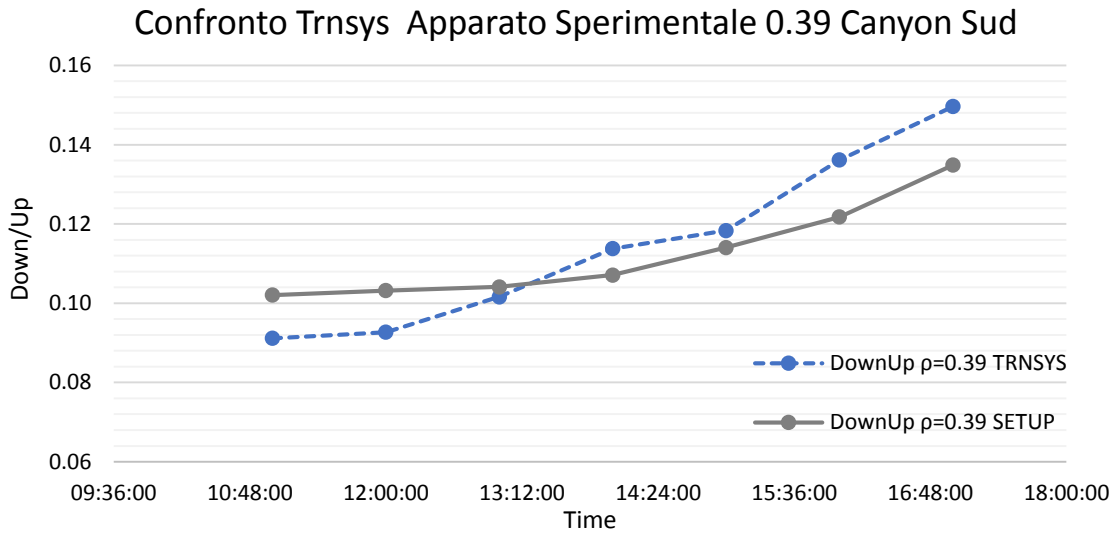
Tabella 4. Risultati analisi su Trnsys

TRNSYS			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.86	DownUp 0.39
11:00:00	753.00	0.18	0.09
12:00:00	837.00	0.19	0.09
13:00:00	878.00	0.21	0.10
14:00:00	876.00	0.23	0.11
15:00:00	818.00	0.23	0.12
16:00:00	718.00	0.25	0.14
17:00:00	508.00	0.27	0.15

Tabella 5. Risultati Setup Sperimentale

SETUP SPERIMENTALE			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.86	DownUp 0.39
11:00:00	753.00	0.158	0.102
12:00:00	837.00	0.186	0.103
13:00:00	878.00	0.206	0.104
14:00:00	876.00	0.226	0.107
15:00:00	818.00	0.242	0.114
16:00:00	718.00	0.284	0.122
17:00:00	508.00	0.323	0.135





Come vediamo dai due grafici riportati qui sopra la differenza tra il modello Trnsys e l'apparato sperimentale è minima per entrambi i canyon valutati. Per un confronto numerico vedere la Tabella 6.

Tabella 6. Errori Percentuali tra Apparato e Modello Trnsys

	Canyon Nord ρ=0.86	Canyon Sud ρ=039
Errore Percentuale Medio	5.5%	7.5%

In Tabella 7 è riportato l'albedo medio giornaliero misurato sperimentalmente e valutato con Trnsys: i due valori praticamente coincidono:

Tabella 7. Albedo Medio

	Setup Sperimentale 24 Luglio	Trnsys 24 Luglio
Riflettanza ρ	Albedo Medio Giornaliero	Albedo Medio Giornaliero
0.39	0.11	0.11
0.86	0.23	0.22

Possiamo quindi affermare che il modello è validato. L'errore infatti, non supera il 10%.

1. 26 Luglio

Stesso orientamento di prima ma sono stati sostituiti i pannelli del canyon Nord con degli altri aventi una riflettanza leggermente diversa, in questo caso pari a 0.88.

Canyon Nord: *Pannelli Bianchi Barozzi TG ρ=0.88*

Canyon Sud: *Pannelli Grigi Barozzi RQ ρ=0.39*

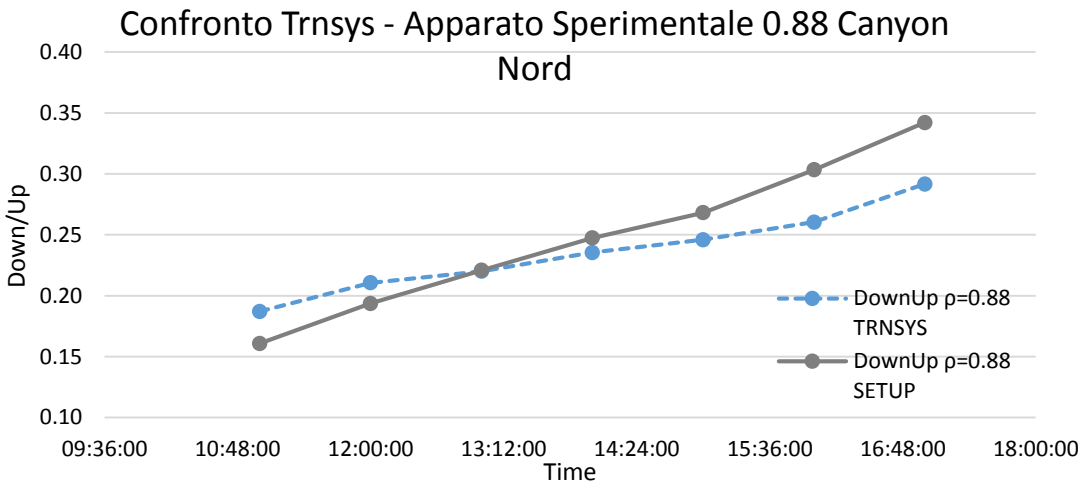
TG sta per Thermo-gum, indica la tipologia di vernice (per le specifiche si rimanda al paragrafo 14.1.2.).

Tabella 8. Risultati Trnsys

TRNSYS			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.39
11:00:00	747.00	0.19	0.09
12:00:00	844.00	0.21	0.10
13:00:00	894.50	0.22	0.10
14:00:00	850.00	0.24	0.12
15:00:00	785.00	0.25	0.12
16:00:00	672.00	0.26	0.14
17:00:00	522.00	0.29	0.16

Tabella 9. Risultati Setup Sperimentale

SETUP SPERIMENTALE			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.39
11:00:00	747.00	0.161	0.104
12:00:00	844.00	0.194	0.104
13:00:00	894.50	0.221	0.105
14:00:00	850.00	0.247	0.107
15:00:00	785.00	0.268	0.111
16:00:00	672.00	0.303	0.120
17:00:00	522.00	0.342	0.133



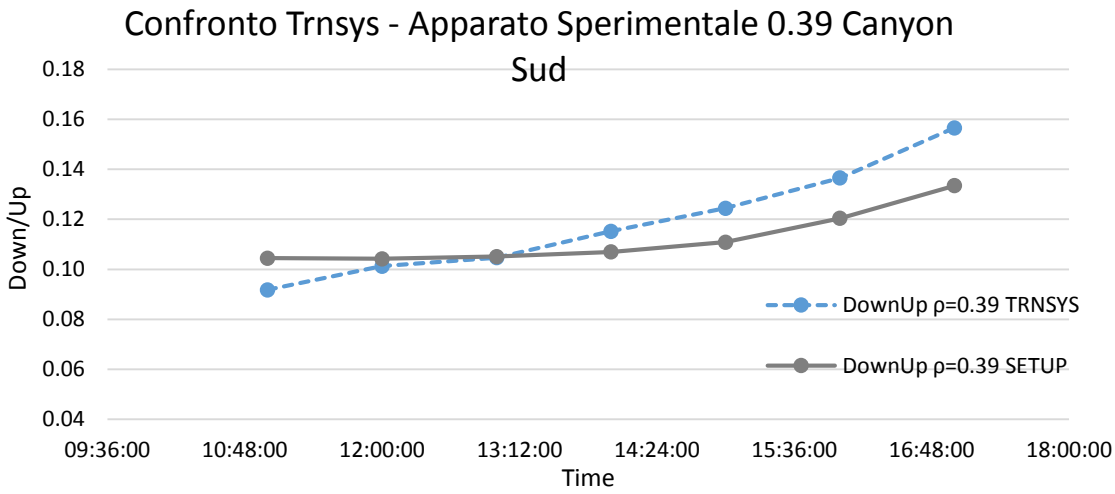


Tabella 10. Errori Percentuali tra Apparato e Modello Trnsys

	Canyon Nord ρ=0.88	Canyon Sud ρ=039
Errore Percentuale Medio	8.7%	8.1%

Tabella 11. Albedo Medio

	Setup Sperimentale 26 Luglio	Trnsys 26 Luglio
Riflettanza ρ	Albedo Medio Giornaliero	Albedo Medio Giornaliero
0.39	0.11	0.12
0.88	0.25	0.24

Come il caso precedente anche qui il confronto mostra piccole differenze percentuali tra i due casi.

2. 29 Agosto

Ultima giornata significatica con questo orientamento.

Canyon Nord: *Pannelli Bianchi Barozzi TG ρ=0.88*

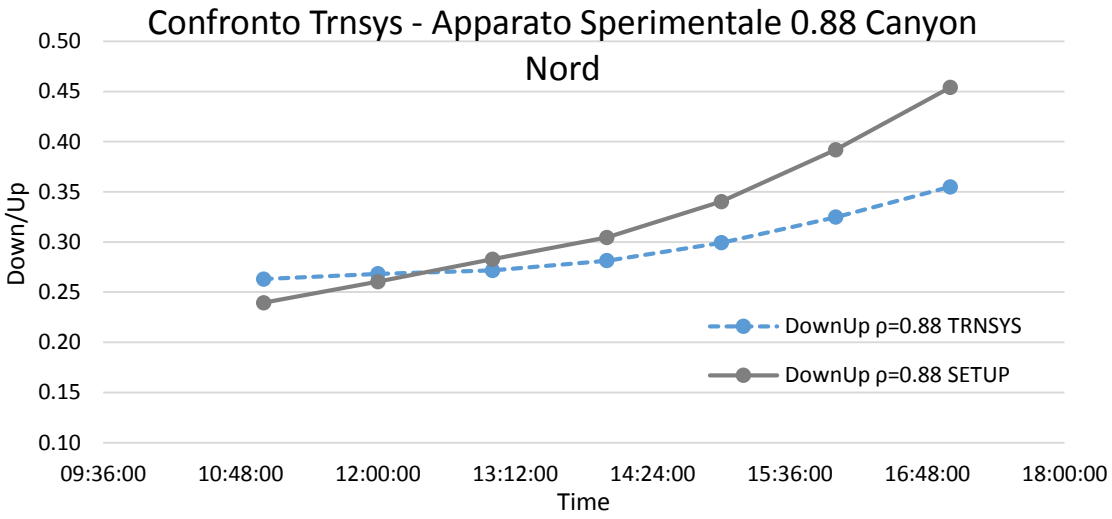
Canyon Sud: *Pannelli Grigi Barozzi RQ ρ=0.41*

Tabella 12. Risultati Trnsys

TRNSYS			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.41
11:00:00	679.00	0.26	0.12
12:00:00	773.00	0.27	0.12
13:00:00	766.00	0.27	0.13
14:00:00	791.60	0.28	0.14
15:00:00	720.00	0.30	0.15
16:00:00	602.00	0.32	0.17
17:00:00	423.00	0.35	0.20

Tabella 13. Risultati Setup Sperimentale

SETUP SPERIMENTALE			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.41
11:00:00	679.00	0.239	0.124
12:00:00	773.00	0.260	0.118
13:00:00	766.00	0.283	0.119
14:00:00	791.60	0.304	0.123
15:00:00	720.00	0.340	0.132
16:00:00	602.00	0.392	0.147
17:00:00	423.00	0.454	0.169



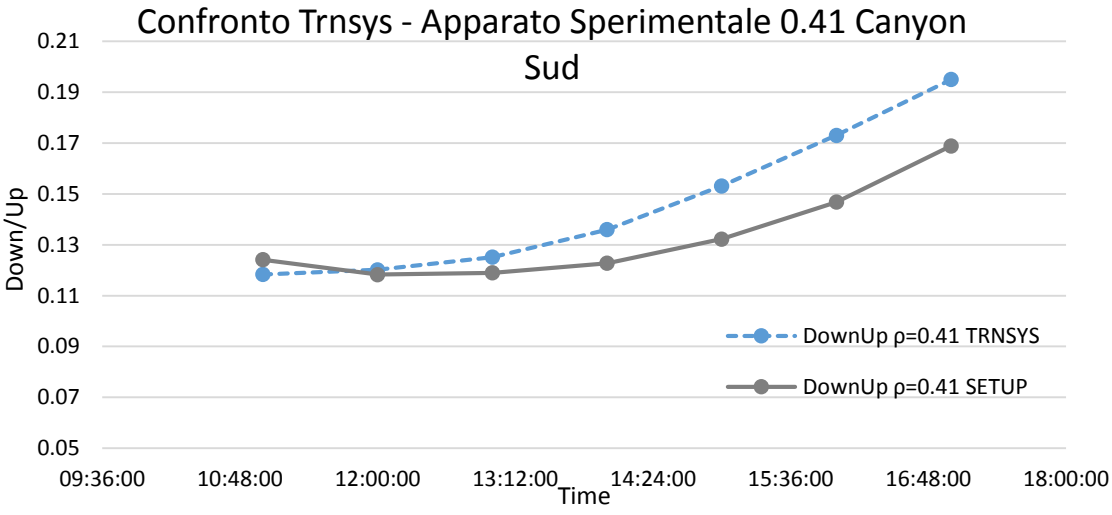


Tabella 14. Errori Percentuali Apparato e Modello Trnsys

	Canyon Nord ρ=0.88	Canyon Sud ρ=041
Errore Percentuale Medio	8.9%	9.3%

Tabella 15. Albedo Medio

	Setup Sperimentale 29 Agosto	Trnsys 26 Agosto
Riflettanza ρ	Albedo Medio Giornaliero	Albedo Medio Giornaliero
0.41	0.13	0.15
0.88	0.32	0.29

Anche per questi giorni i risultati si discostano di poco. Le percentuali calcolate si differenziano giorno per giorno anche a parità di colore/facciata. Questo è dovuto a differenti valori di radiazione diretta e diffusa. Una percentuale maggiore di radiazione diffusa ci fornisce valori dell'albedo più alti; ciò significa che in condizioni nuvolose la radiazione uscente su quella entrante è maggiore in percentuale rispetto alla condizione soleggiata in cui prevale la diretta. In valore assoluto, in condizioni di sole, sicuramente la radiazione è maggiore ma cambiano i rapporti e il modo in cui i materiali riflettono.

Abbiamo quindi valutato tre giornate differenti per un orientamento particolare dei canyon, ora andremo a vedere cosa succede girando di 90° il setup.

2.6.2. Configurazione Nord-Sud

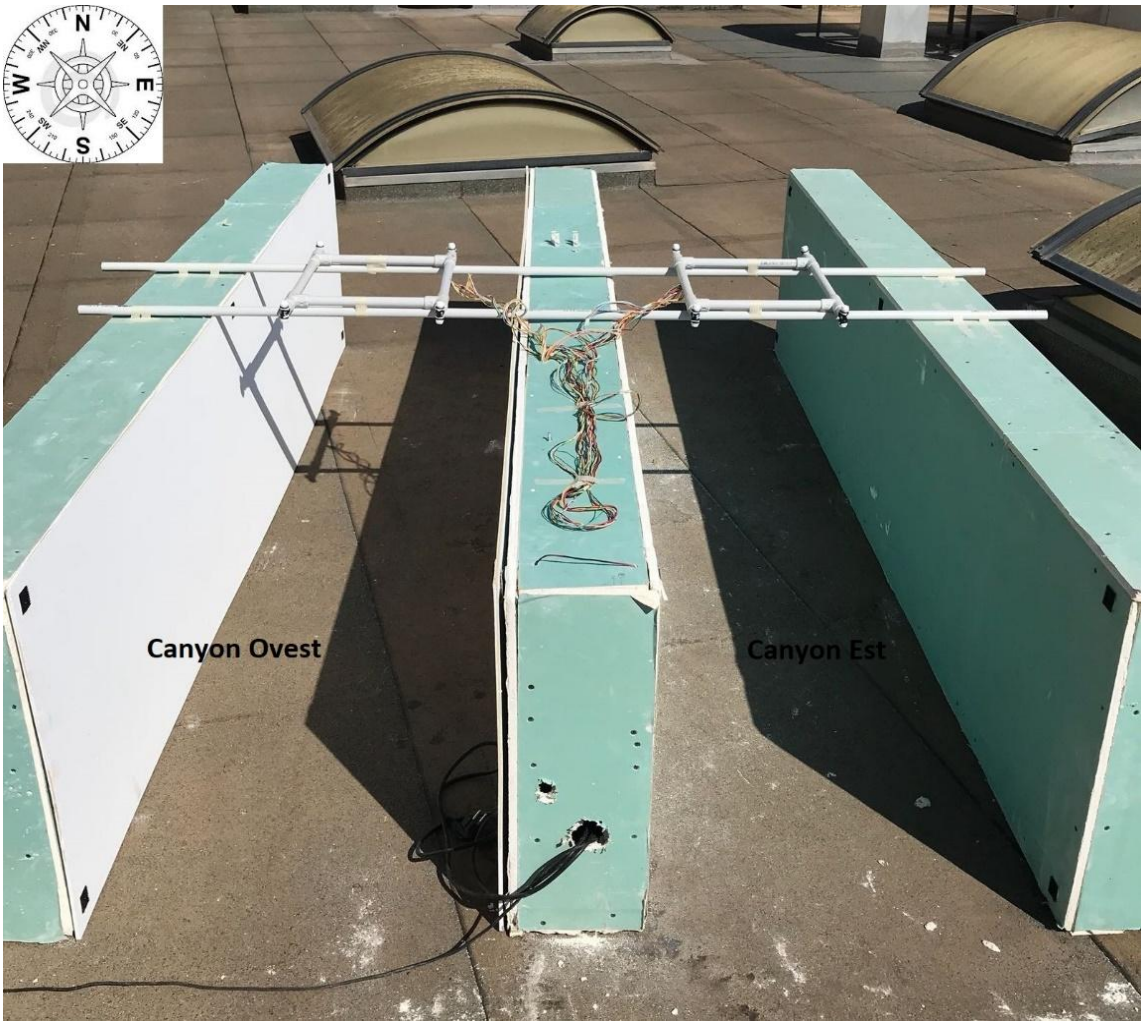


Figura 34. Orientamento Nord-Sud

1. 11 Settembre

Canyon Est: *Pannelli Grigi Barozzi RQ ρ=0.39*

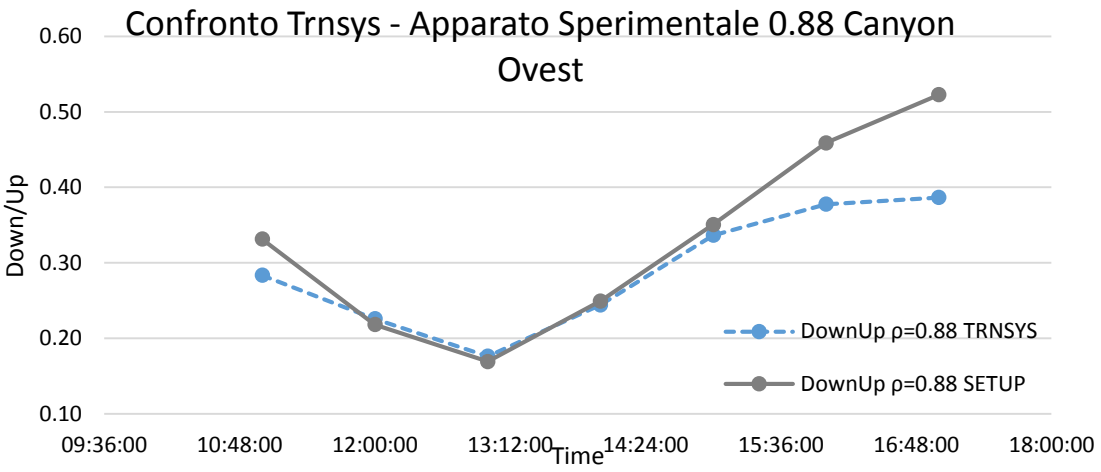
Canyon Ovest: *Pannelli Bianchi Barozzi TG ρ=0.88*

Tabella 16. Risultati Trnsys

TRNSYS			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.39
11:00:00	692.00	0.28	0.14
12:00:00	775.00	0.23	0.12
13:00:00	804.00	0.18	0.10
14:00:00	747.00	0.24	0.12
15:00:00	676.00	0.34	0.13
16:00:00	552.00	0.38	0.14
17:00:00	373.00	0.39	0.14

Tabella 17. Risultati Setup Sperimentale

SETUP SPERIMENTALE			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.88	DownUp 0.39
11:00:00	692.00	0.331	0.128
12:00:00	775.00	0.218	0.117
13:00:00	804.00	0.169	0.098
14:00:00	747.00	0.249	0.110
15:00:00	676.00	0.351	0.117
16:00:00	552.00	0.459	0.134
17:00:00	373.00	0.523	0.152



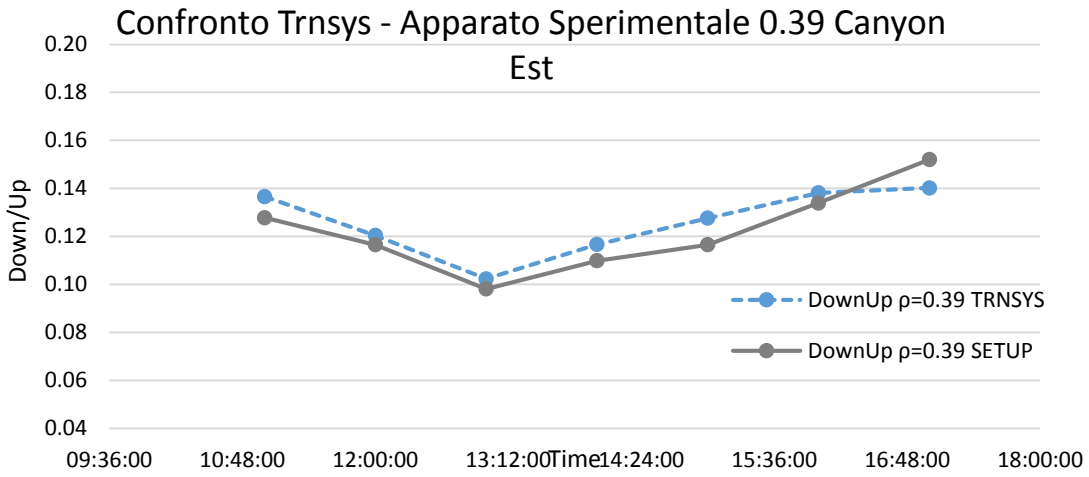


Tabella 18. Errore Percentuale tra Apparato e Modello Trnsys

	Canyon Ovest ρ=0.88	Canyon Est ρ=039
Errore Percentuale Medio	5.5%	9.3%

Tabella 19. Albedo Medio

	Setup Sperimentale 11 Settembre	Trnsys 11 Settembre
Riflettanza ρ	Albedo Medio Giornaliero	Albedo Medio Giornaliero
0.39	0.12	0.13
0.88	0.33	0.29

I valori sono in linea con i precedenti risultati.

2. 12 Settembre

Canyon Est: *Pannelli Grigi Barozzi RQ ρ=0.39*

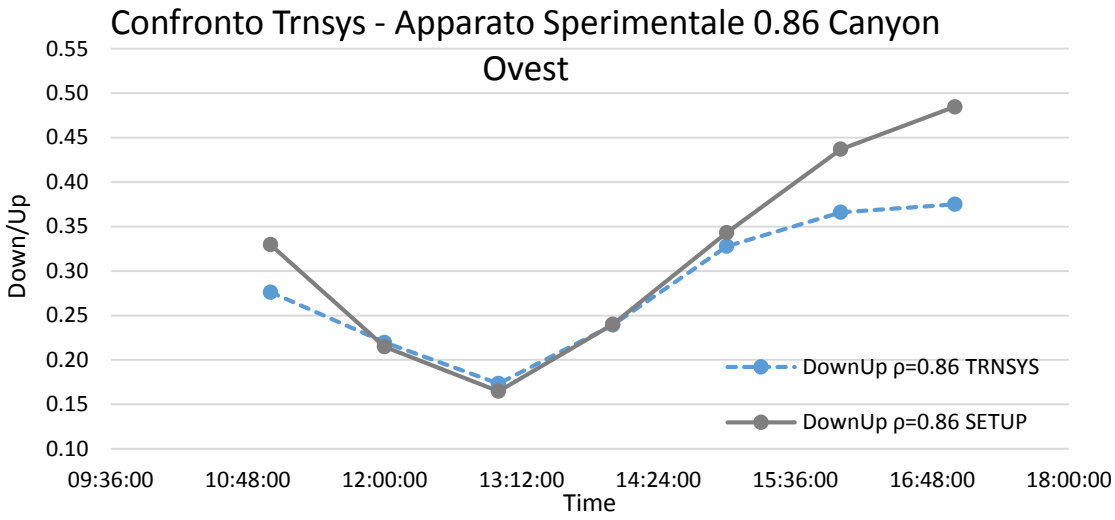
Canyon Ovest: *Pannelli Bianchi Barozzi RQ ρ=0.86*

Tabella 20. Risultati Trnsys

TRNSYS			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.86	DownUp 0.39
11:00:00	685.00	0.28	0.14
12:00:00	809.00	0.22	0.12
13:00:00	774.00	0.17	0.10
14:00:00	650.00	0.24	0.12
15:00:00	659.00	0.33	0.13
16:00:00	555.00	0.37	0.14
17:00:00	323.00	0.38	0.14

Tabella 21. Risultati Setup Sperimentale

SETUP SPERIMENTALE			
TIME	Up [W/m^2]	DownUp 0.86	DownUp 0.39
11:00:00	685.00	0.330	0.125
12:00:00	809.00	0.215	0.117
13:00:00	774.00	0.165	0.097
14:00:00	650.00	0.240	0.110
15:00:00	659.00	0.343	0.121
16:00:00	555.00	0.437	0.138
17:00:00	323.00	0.485	0.162



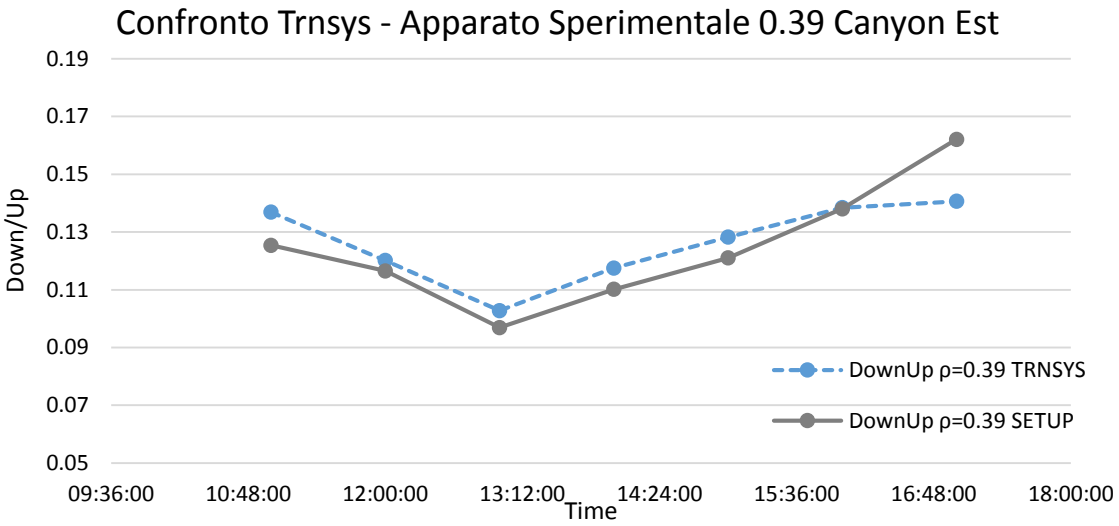


Tabella 22. Errore Percentuale tra Apparato e Modello Trnsys

	Canyon Ovest ρ=0.86	Canyon Est ρ=039
Errore Percentuale Medio	5.2%	7.4%

Tabella 23. Albedo Medio

	Setup Sperimentale 12 Settembre	Trnsys 12 Settembre
Riflettanza ρ	Albedo Medio Giornaliero	Albedo Medio Giornaliero
0.39	0.12	0.13
0.86	0.32	0.28

L’errore massimo che si osserva è di circa il 9%. Le prove sono state effettuate in cinque giorni differenti e con due diversi orientamenti, mostrando ogni volta risultati entro i limiti accettabili. Possiamo quindi concludere che quanto disegnato su SketchUp e modellato su Trnsys rispecchi piuttosto accuratamente l’apparato sperimentale costruito.

Il modello può dirsi quindi validato.

3. Risultati delle Simulazioni

3.1. 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 timestep 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 ad 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 ad un edificio isolato.

3.1.1. 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 35 mostra l'edificio nelle sue configurazioni stand-alone (a sinistra) e nel suo contesto urbano (edificio centrale a destra), fiancheggiato da due canyon stradali con H/W = 1.

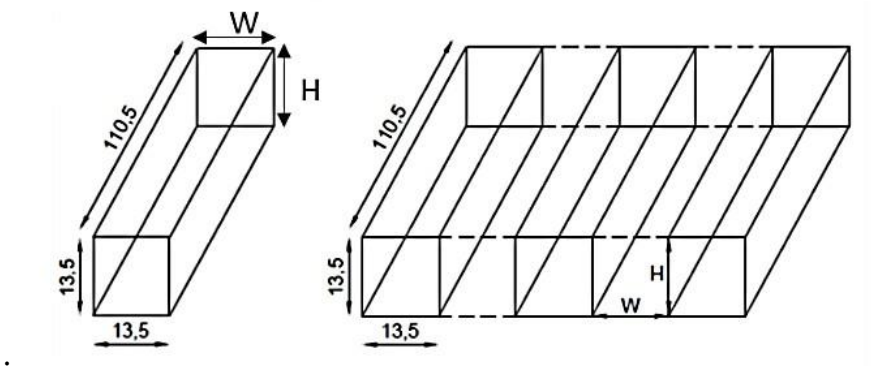


Figura 35. Caratteristiche geometriche degli edifici e dei canyon urbani

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. Le caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti costituenti le superfici del canyon urbano sono riportati nella seguente Tabella 24. Per quanto riguarda i dati climatici sono stati considerati quelli di Roma.

Tabella 24. Caratteristiche delle superfici costituenti il canyon urbano.

Elementi	Spessore *(m)*	g (fattore solare)	α (coefficiente di assorbimento)
Muri	0.44		0.6
Coperture	0.37		0.6
Pavimentazione	0.54		0.6
Finestre	-	0.6	

La logica seguita per le simulazioni è riportata nello schema in Figura 36.

Le simulazioni si basano sul confronto tra la configurazione di edificio isolato SAB e la configurazione di edificio in un contesto urbano (SCB(H/W=0,5), SCB(H/W=1), SCB(H/W=2)). L'analisi è stata eseguita variando l'orientamento dell'edificio (E-W e N-S). Come mostrato nei diagrammi, per la stagione estiva ho preso come riferimento, per l'analisi della radiazione solare e per le temperature delle facciate, i primi due giorni di luglio. Per quanto riguarda il fabbisogno di raffrescamento, ho considerato solo i giorni in cui la temperatura interna supera la temperatura di progetto pari a 26 ◦C. Per la stagione invernale, invece, ho preso come riferimento, per l'analisi della radiazione solare e per le temperature di facciata, i primi due giorni di gennaio. Per quanto riguarda la valutazione del fabbisogno di riscaldamento, la durata delle stagioni di riscaldamento sono legate alla zona climatica tabulata in UNI TS 11300.

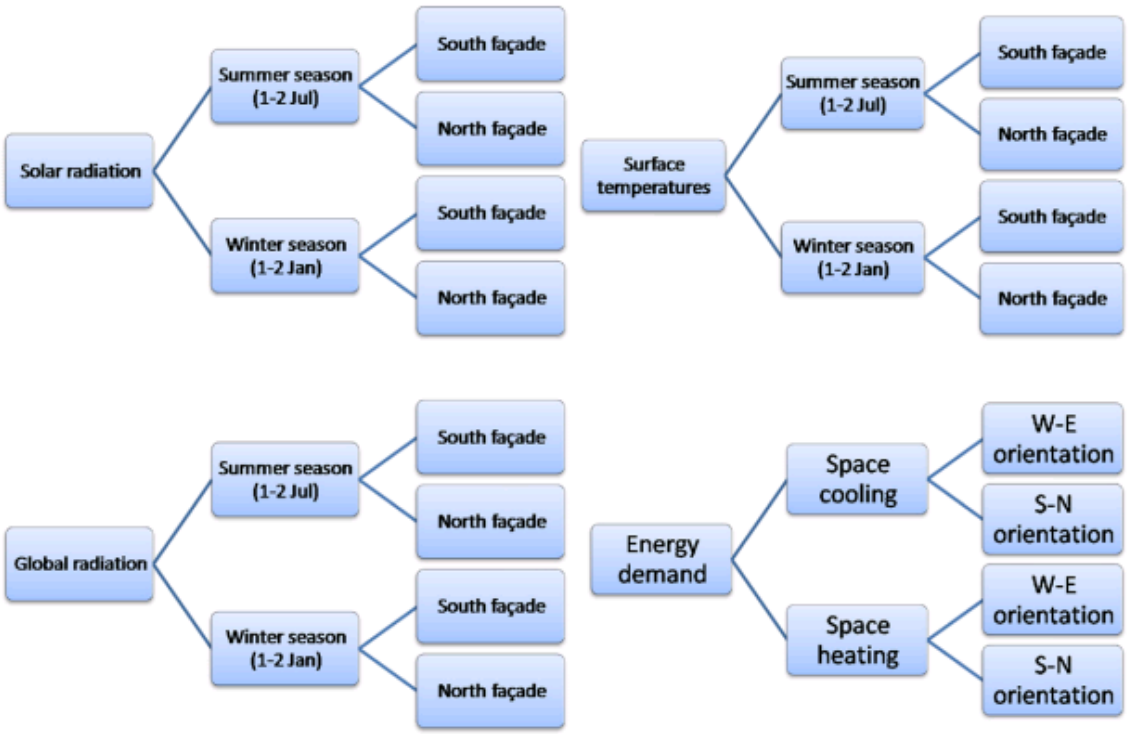


Figura 36. Diagramma delle simulazioni

3.1.2. Risultati delle simulazioni

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

- quantità totale di energia solare assorbita dalle facciate verticali dell'edificio sia in estate che in inverno;
- temperatura superficiale delle facciate dell'edificio sia in estate che in

inverno;

- variazione del fabbisogno di raffrescamento e riscaldamento dell'edificio tra configurazione SAB e SCB.

3.1.2.1 Analisi della radiazione solare assorbita normalizzata

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 37a), 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 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 37b, 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 raggiante 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 37c e Figura 37d, corrispondenti alla stagione invernale, si notano subito le somiglianze con gli andamenti dei carichi solari delle diverse configurazioni urbane considerate nel caso estivo.

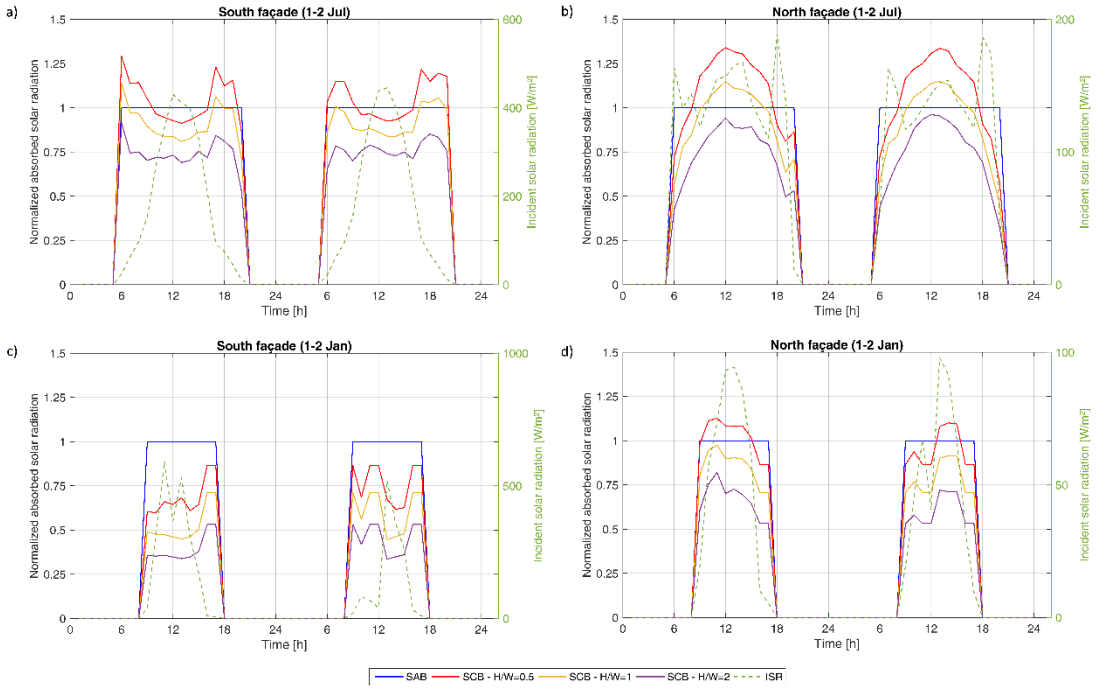


Figura 37. Radiazione solare normalizzata sulle facciate Sud (a) e Nord (b) durante la stagione estiva e sulle facciate Sud (c) e Nord (d) durante la stagione invernale.

La Figura 38a e la Figura 38b 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 38b, nelle ore precedenti al mezzogiorno, e sono spostati a destra per la facciata ovest, nelle ore pomeridiane (Fig 38a). 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, come si può vedere dalle Figura 38c e Figura 38d.

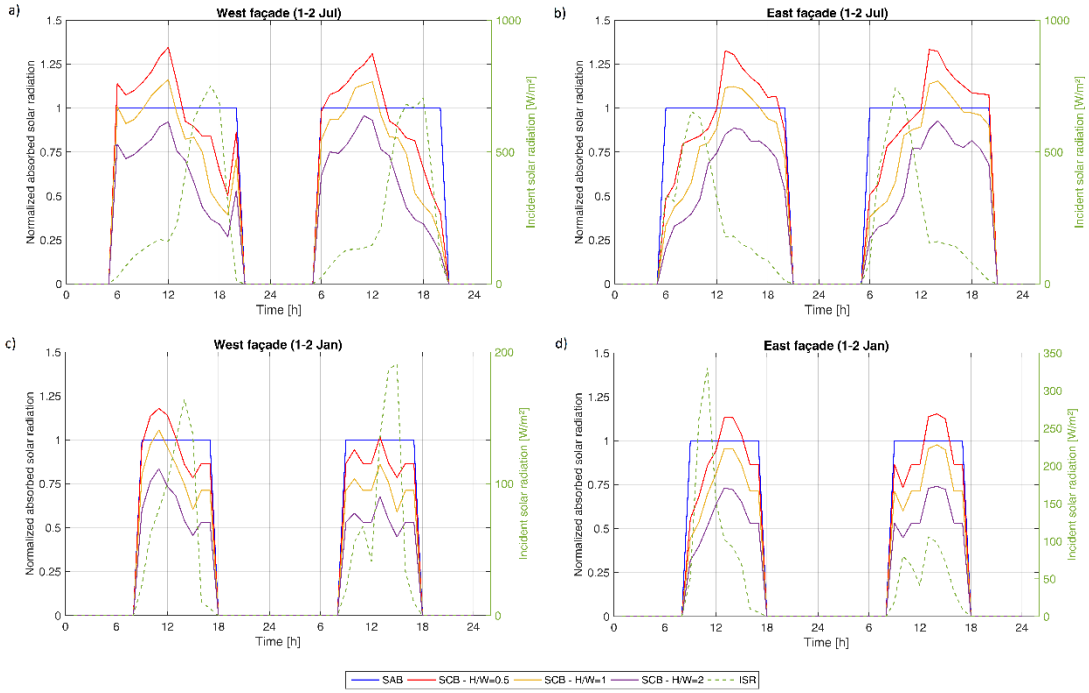


Figura 38. Radiazione solare normalizzata sulle facciate Ovest (a) ed Est (b) durante la stagione estiva e sulle facciate Ovest (c) ed Est (d) durante la stagione invernale.

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 37a e Figura 37b, Figura 38a) e Figura 38b), 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.

3.1.2.2 Analisi della radiazione globale assorbita

Passando ad analizzare i grafici delle tendenze giornaliere della radiazione globale (shortwave e longwave), cioè la radiazione netta assorbita dalle pareti, si nota una caratteristica importante:

- sulla facciata sud, nella Fig. 39a, la curva blu, che rappresenta il caso di un edificio isolato (SAB), tende a sovrapporsi alla curva della radiazione globale di

SCB(H/W=2). Nel caso della facciata nord, osservando la figura 40b, il flusso radiativo diminuisce anche al di sotto di quest'ultimo. In entrambi i casi, la ragione è che la frazione di cielo vista dalla facciata dell'edificio SAB è maggiore rispetto al caso dell'edificio in configurazione SCB. Infatti, considerando il contributo dello scambio radiativo ad onde lunghe, le dispersioni termiche verso il cielo dell'edificio sono predominanti.

Considerando il caso SAB (curva blu), il motivo per cui sulla facciata nord (Fig. 39b) la radiazione globale assorbita a metà giornata è sensibilmente più bassa di tutte le altre configurazioni (Fig. 39a), è dovuto a due fattori:

- la facciata nord protetta dagli edifici circostanti nelle configurazioni SCB non vede una frazione maggiore di cielo rispetto a SAB (freddo perché è orientato nell'emisfero nord);
- poiché non è circondato da ostacoli, non partecipa al fenomeno radiativo di scambi inter-riflessi sia nel campo visibile che nell'infrarosso.

In generale, l'aggiunta del contributo dovuto alllo scambio radiativo nell'infrarosso, comporta la dispersione nelle ore notturne che può portare a valori negativi della radiazione globale netta sulla facciata. In questo caso, il bilancio delle radiazioni, fornendo valori negativi, suggerisce che la facciata sta perdendo calore. Osservando le ore notturne (0: 00-6: 00, 20.00-28.00, 44.00-48.00) questi presupposti sono confermati con l'aggiunta di un altro aspetto più interessante: entrambe le facciate dell'edificio SCB(H/W=2) (curva magenta) presentano meno dispersioni rispetto agli altri, perché questa configurazione vede una frazione di cielo minore, ed è molto più influenzata dal fenomeno dell'intrappolamento radiativo. In Fig. 39c ed d, le tendenze della radiazione globale assorbita dalle facciate sud e nord, per la stagione invernale, evidenziano le stesse relazioni tra le variabili analizzate.

Osservando la Fig. 40a eb, sul canyon con l'asse orientato NS, si possono dedurre alcune considerazioni generali:

- durante il giorno, nelle ore in cui le facciate ricevono la radiazione solare diretta (tra le 16.00 e le 18.00 per la facciata ovest e intorno alle 10:00 per la facciata est), a partire dal caso SAB, la radiazione globale netta diminuisce man mano che ci avviciniamo a configurazioni di canyon più strette. Questo significa che la radiazione di picco più alta corrisponde al caso SAB e la più bassa al caso SCB(H/W=2);

- nelle ore in cui la facciata è ombreggiata, si verifica un'inversione delle considerazioni di cui sopra, ad es. i valori della radiazione globale netta assorbita dalla facciata ombreggiata dell'edificio SAB scendono al di sotto di tutti gli altri casi (la curva blu scende al di sotto di quella magenta). Durante la notte le considerazioni precedentemente fatte per le facciate orientate N-S sono ancora valide. Per la stagione invernale, i cui grafici sono riportati in Fig. 40c e d, sono valide le stesse considerazioni.

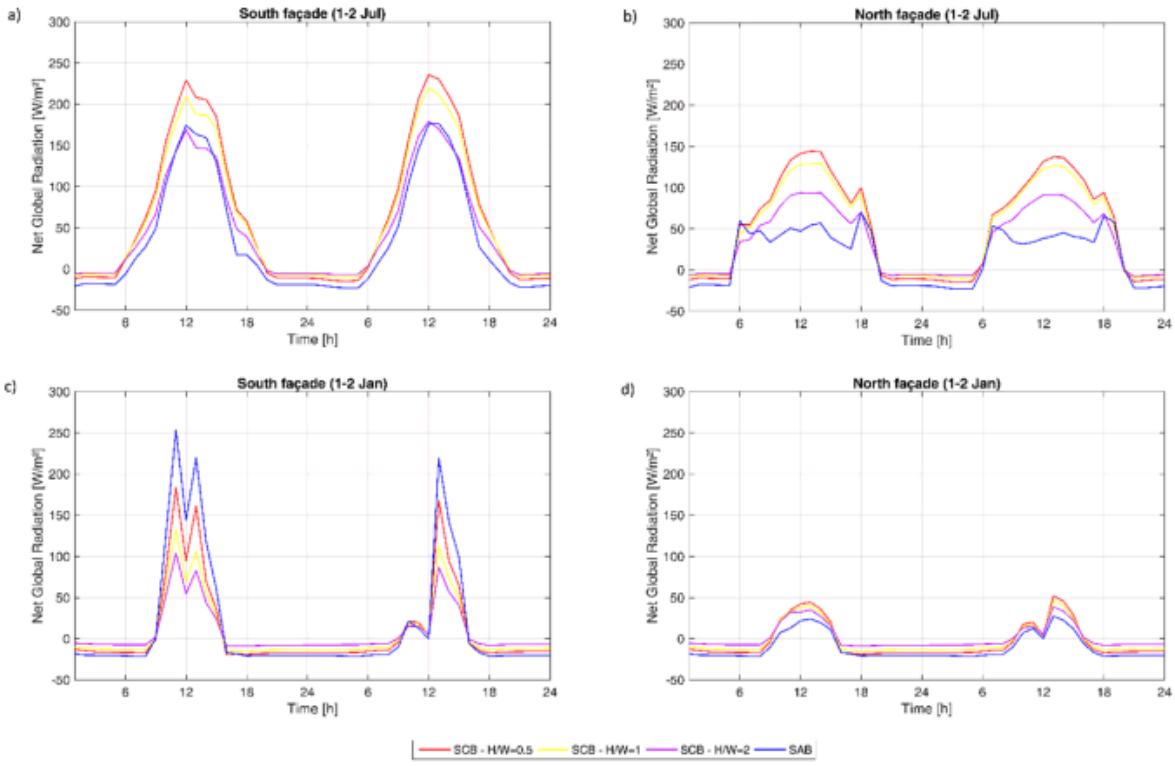


Figura 39. Radiazione globale netta assobita sulla facciata sud (a) e nord (b) durante la stagione estiva e sud (c) e nord (d) durante la stagione invernale

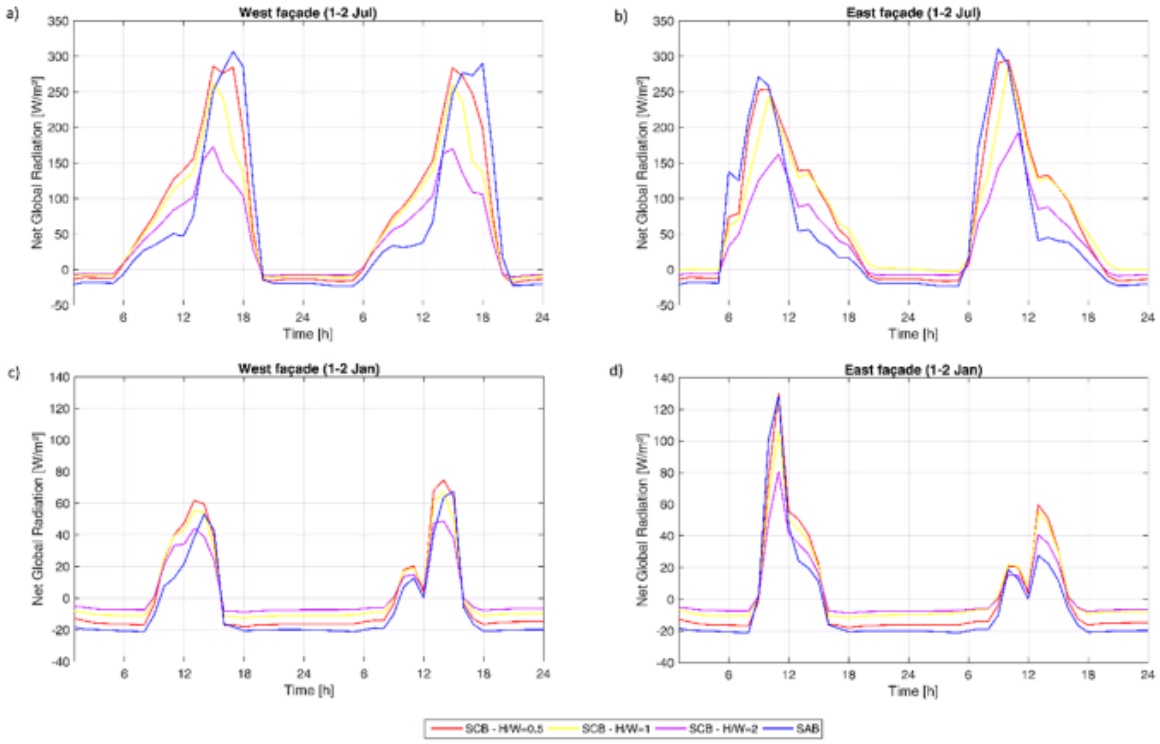


Figura 40. Radiazione globale netta assobita sulla facciata ovest (a) e est (b) durante la stagione estiva e ovest c) e est (d) durante la stagione invernale

3.1.2.3 Analisi delle temperature superficiali delle facciate

I valori della temperatura, mostrati in figura. 41a e b, seguono le tendenze delle radiazioni globali. In questi grafici è anche riportata la temperatura dell'aria nel canyon urbano. È interessante notare che, in Fig. 41b, i valori giornalieri della temperatura superficiale della facciata nord nel caso SAB tendono a ripercorrere la tendenza della temperatura dell'aria giornaliera. Nel caso invernale, Fig. 41c ed d, c'è una inversione di tendenza della temperatura della facciata sud per quanto riguarda l'edificio SAB. Questo è strettamente correlato all'aumento della radiazione globale che questa facciata riceve rispetto alla stessa facciata nelle altre configurazioni urbane (vedi Fig. 39d).

Per il canyon orientato verso N-S, come mostrato in Fig. 42a eb, i picchi di temperatura superficiale delle facciate di tutte le configurazioni considerate sono maggiori di circa 5 °C per l'orientamento ovest rispetto a quello est. La possibile spiegazione è dovuta a due fenomeni:

- la facciata est riceve radiazione solare diretta durante la mattina, quando la temperatura dell'aria è più bassa rispetto al pomeriggio, quando è la facciata ovest a ricevere la radiazione solare diretta;
- la facciata est riceve radiazione solare diretta durante la mattina, quando il sole è ancora basso, quasi ortogonale alla superficie verticale del muro (arriva meno radiazione solare sulla facciata est);
- nel pomeriggio la facciata ovest disperde le radiazioni ad onde lunghe verso la facciata est. In queste ore, la facciata est è ad una temperatura più elevata (Ts> 35◦C alle 16,00 per SCBH/W=0,5) rispetto alla facciata ovest (Ts ≈ 30◦C alle 10.00 per SCBH/W=0,5) al mattino, quando la facciata est disperde verso di lei. Considerazioni simili possono essere raggiunte osservando le figure 42 c e d, relative alla stagione invernale. La principale differenza è che l'andamento delle temperature superficiali delle facciate tende a sovrapporsi alla curva della temperatura dell'aria (curva verde tratteggiata).

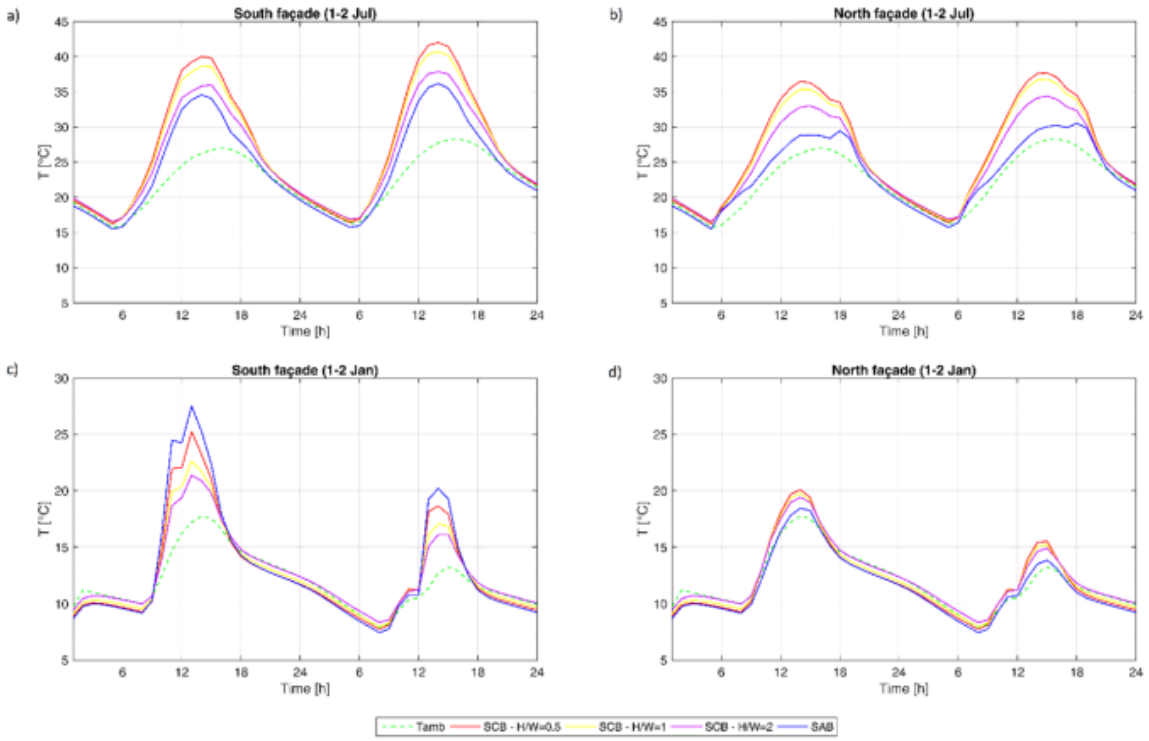


Figura 41. Temperatura superficiale della facciata sud (a) e nord (b) durante la stagione estiva e sud (c) e nord (d) durante la stagione invernale.

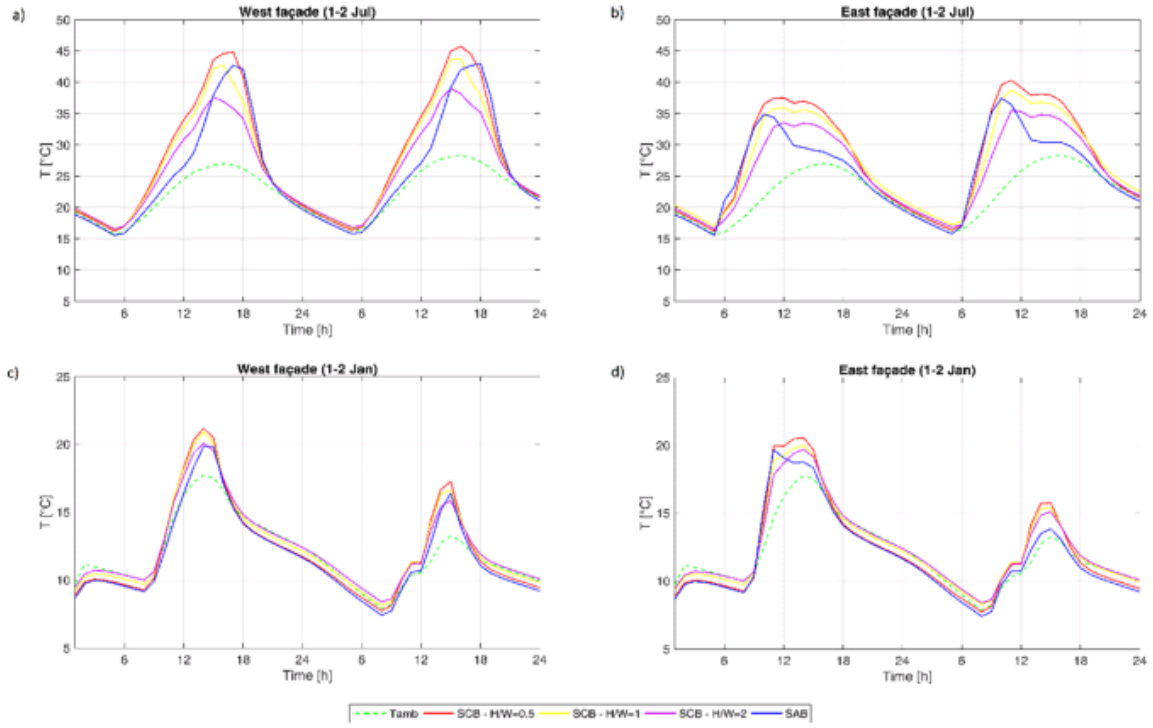


Figura 42. Temperatura superficiale della facciata ovest (a) e est (b) durante la stagione estiva e ovest (c) e est (d) durante la stagione invernale.

3.1.2.4 Fabbisogno di energia termica dell'edificio

Le figure 43a e b mostrano il fabbisogno di raffrescamento mentre le figure 43 c e d mostrano il fabbisogno di riscaldamento dell'edificio nelle sue diverse configurazioni urbane, sia nel caso del canyon orientato W-E sia nel caso dell'orientamento S-N. A partire dai dati della stagione estiva, in Fig. 43 a e b, è evidente che il fabbisogno di raffrescamento è più basso per la configurazione SCB(H/W=2). In effetti, in questo caso, l'edificio è fiancheggiato da canyon più stretti, quindi più al riparo dalle radiazioni solari dirette. Dal momento che l'edificio del caso studio ha le facciate principali con una superficie vetrata del 50%, la radiazione diretta rappresenta il parametro guida. Quindi, il canyon stretto, ostacolando l'arrivo della radiazione solare, fornisce benefici energetici nella stagione estiva. Con proporzioni appropriate, lo stesso fenomeno si verifica anche nel caso SCB(H/W=1) e SCB(H/W=0,5). Per l'edificio isolato, invece, nel caso dell'orientamento W-E, il fabbisogno di raffreddamento è inferiore rispetto al caso SCB(H/W=0,5), mentre è superiore rispetto agli altri due casi. Questo è dovuto al fatto che la configurazione SCB(H/W=0,5) è la più svantaggiata per ciò che riguarda lo scambio radiativo ad onde lunghe: permette infatti l'ingresso di molta più radiazione solare degli altri due casi SCB, comportandosi come il

caso SAB, ma la dissipazione di calore è inferiore. Nel caso dell'orientamento N-S, la domanda di raffrescamento per l'edificio SAB è maggiore di tutti gli altri casi. Ciò è dovuto alla grande superficie vetrata nella sua facciata principale: la facciata est durante la mattina e la ovest durante il pomeriggio sono fortemente irradiate e questa radiazione solare attraverso la finestra aumenta la richiesta di raffrescamento. Per quanto riguarda la domanda di riscaldamento (Fig. 43 c ed), le tendenze sono le stesse sia per W-E che per l'orientamento N-S. In generale, questo accade perché la radiazione solare guida le tendenze del fabbisogno energetico. Più radiazione solare raggiunge l'involucro dell'edificio, minore è il fabbisogno di riscaldamento necessario. La configurazione urbana meno vantaggiosa corrisponde all'edificio fiancheggiato dal canyon stretto (H/W=2), mentre i risultati migliori sono dati dalla configurazione SAB.

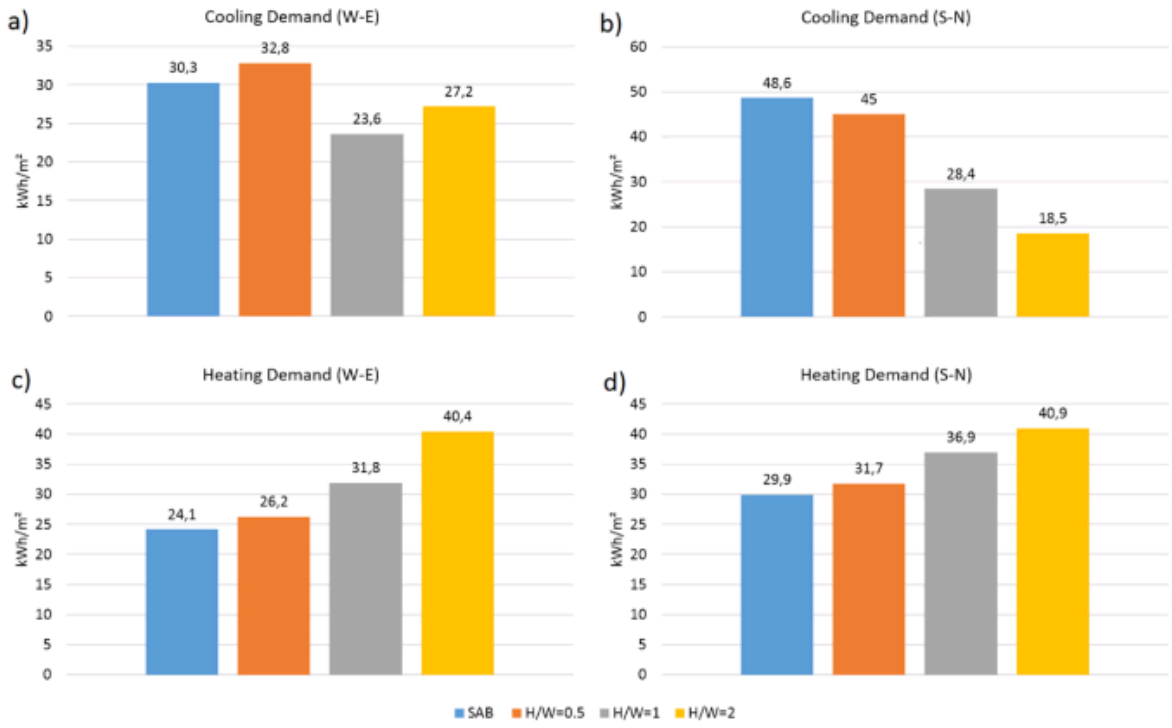


Figura 43. Fabbisogno di raffrescamento per le configurazioni di canyon orientate ovest-est a) e sud-nord b) e fabbisogno di riscaldamento per ovest-est c) e sud-nord d).

3.2. Impatto delle mutue riflessioni nel campo della shortwave tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici (ε=0)

A causa del fatto che 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.

3.2.1. 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 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.

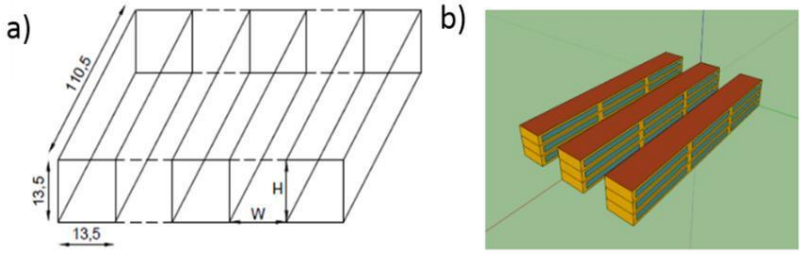


Figura 44. Gemoetria e vista 3D del canyon urbano simulato.

Le caratteristiche dell'edificio analizzato, per ciò che riguarda l'involucro, sono riportate in Tabella 25. 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 25. Principali caratteristiche degli elementi d'involucro

Elemento	Thickness *(m)*	U *(W/m² 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 26 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 ogni qualvolta la temperatura dell'aria nell'edificio sale al di sopra dei 26 °C.

Tabella 26. Valori specifici degli apporti di calore interni

	Persone (W/m²)	Apparecchiature *(W/m²)*	Illuminazione *(W/m²)*
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 all'irraggiamento nel campo della longwave sono stati 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. Ciò 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 ad 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, invece, 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 45 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).

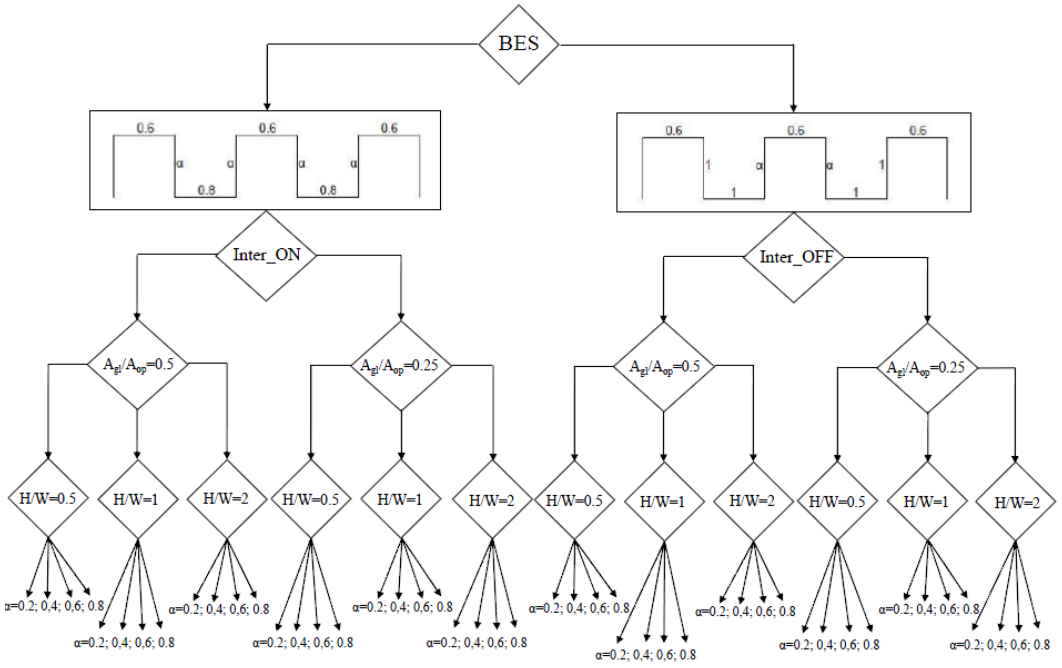


Figura 45. Schema delle simulazioni in funzione dei parametri utilizzati per l'analisi di sensibilità

3.2.2. 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 ad onda corta.

3.2.2.1. 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 ΔSol.Rad$_{\%}$ come segue:

$$\Delta Sol.Rad_{\%} = \frac{|Inter_{OFF} - Inter_{ON}|}{Inter_{OFF}} \text{ x } 100$$

In generale, osservando la Tabella 27 e Tabella 28 si può affermare che:

- Poiché il fattore di assorbimento solare α 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 ρ;
- 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 27. Variazione percentuale (%) della radiazione solare assorbita tra i casi Inter_ON e Inter_OFF per la stagione invernale.

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

Il contributo delle interiflessioni risulta essere maggiore sulla facciata nord rispetto alla facciata sud soprattutto nel periodo invernale (Tabella 27) durante il quale è la radiazione diffusa a prevalere sulla facciata nord. Nella Tabella 28, relativa alla stagione estiva, si nota un aumento dell'intensità delle inter-riflessioni per le facciate sud. La ragione di ciò è dovuta ad 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 28. Variazione percentuale (%) della radiazione solare assorbita tra i casi Inter_ON e Inter_OFF per la stagione estiva.

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

Tabella 29. Valori della radiazione solare assorbita (in MJ/m^2) nei casi Inter_ON e Inter_OFF durante la stagione invernale.

		Heating Season															
		S-N								W-E							
		West		East		West		East		South		North		South		North	
		Agl/Aop=0.5				Agl/Aop=0.25				Agl/Aop=0.5				Agl/Aop=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	181	151	178	148	184	146	183	144	317	294	117	78	324	294	125	72
	α=0.4	353	301	348	296	355	292	352	288	627	588	219	156	636	588	229	145
	α=0.6	518	452	510	444	514	437	509	432	931	881	309	234	939	882	311	217
	α=0.8	675	602	665	592	662	583	655	576	1230	1174	386	312	1236	1175	375	289
H/W=1	α=0.2	160	124	159	123	164	115	164	114	250	224	116	68	252	214	126	58
	α=0.4	303	247	301	245	303	230	302	228	486	447	209	135	481	427	216	116
	α=0.6	433	371	429	367	421	344	419	342	711	669	280	202	693	640	276	174
	α=0.8	551	494	546	488	523	458	520	455	929	891	332	269	894	852	308	231
H/W=2	α=0.2	133	91	132	90	136	78	135	78	190	156	104	47	186	137	123	44
	α=0.4	241	181	239	179	232	157	232	155	356	312	175	94	333	274	192	87
	α=0.6	330	271	327	268	305	235	303	233	507	467	220	140	460	410	225	130
	α=0.8	404	361	400	356	361	313	359	310	649	622	242	187	577	546	231	173

Tabella 30. Valori della radiazione solare assorbita (in MJ/m^2) nei casi Inter_ON e Inter_OFF durante la stagione estiva.

		Cooling Season															
		S-N								W-E							
		West		East		West		East		South		North		South		North	
		Agl/Aop=0.5				Agl/Aop=0.25				Agl/Aop=0.5				Agl/Aop=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	226	273	225	283	221	282	220	272	228	172	120	276	223	178	113
	α=0.4	537	452	533	449	546	443	544	440	535	455	331	239	538	446	336	226
	α=0.6	787	678	781	673	790	664	786	660	791	683	479	359	788	669	476	339
	α=0.8	1026	904	1018	897	1017	885	1012	880	1039	910	616	478	1027	892	600	452
H/W=1	α=0.2	242	186	241	184	255	177	254	176	260	213	169	106	266	203	177	93
	α=0.4	459	371	456	368	469	353	468	351	502	425	312	212	501	406	314	186
	α=0.6	655	556	651	551	652	530	649	526	728	637	434	318	713	608	418	278
	α=0.8	833	740	827	734	810	705	806	701	943	848	535	423	910	810	495	371
H/W=2	α=0.2	200	135	200	135	210	121	210	121	219	167	151	80	233	159	185	82
	α=0.4	361	270	361	270	360	241	360	241	407	333	263	160	413	318	297	163
	α=0.6	494	404	494	404	472	362	472	361	572	499	344	239	563	476	363	244
	α=0.8	606	537	606	537	559	481	558	481	723	664	400	318	697	634	396	323

Nella Tabella 29 e nella Tabella 30 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 27 e Tabella 28.

3.2.2.2. 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 come 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_{gl}/A_{op} come evidenziato in ciascuna didascalia. Figura 46a e Figura 46b mostra i risultati di un edificio orientato S-N con A_{gl}/A_{op} = 0.5. Guardando la Figura 46a i rapporti tra l a domanda di riscaldamento in Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 0.937 e 0.947 mentre per H/W=2, variano tra 0.935 e 0.98. In generale, per

questa configurazione, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di riscaldamento varia tra -7% e -2%. Continuando nell'analisi, la Figura 46b mostra che i rapporti tra il fabbisogno di raffrescamento in Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 1.125 e 1.170 mentre per H/W=2, variano tra 1.08 e 1.25. Quindi, per la configurazione H/W=2, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffrescamento varia tra + 8% e 25%.

Le Figura 47a e Figura 47b mostra i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato S-N con A_{gl}/A_{op}=0.25. Guardando la Figura 47a i rapporti tra fabbisogno di riscaldamento in Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 0.944 e 0.962 mentre per H/W=2, variano tra 0.94 e 0.984. Per questa configurazione, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di riscaldamento varia da -6.5% a -1.5%. La Figura 47b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffrescamento in Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 1.125 e 1.170 mentre per H/W=2, variano tra 1.08 e 1.25. In generale, per la configurazione H/W=2, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffrescamento varia tra + 8% e 35%.

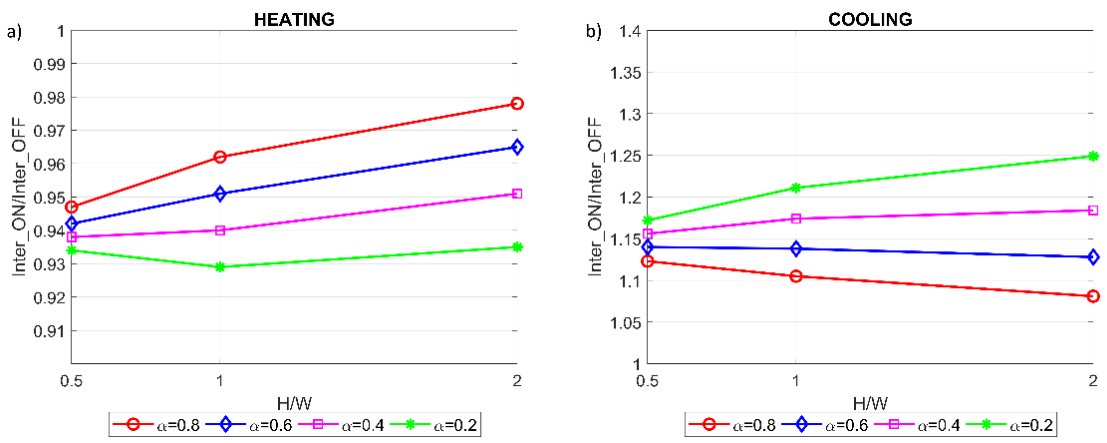


Figura 46. Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter_ON e Inter_OFF: a) riscaldamento e b) raffrescamento, in funzione di H/W, con Agl/Aop=0.5 per il canyon orientato S-N.

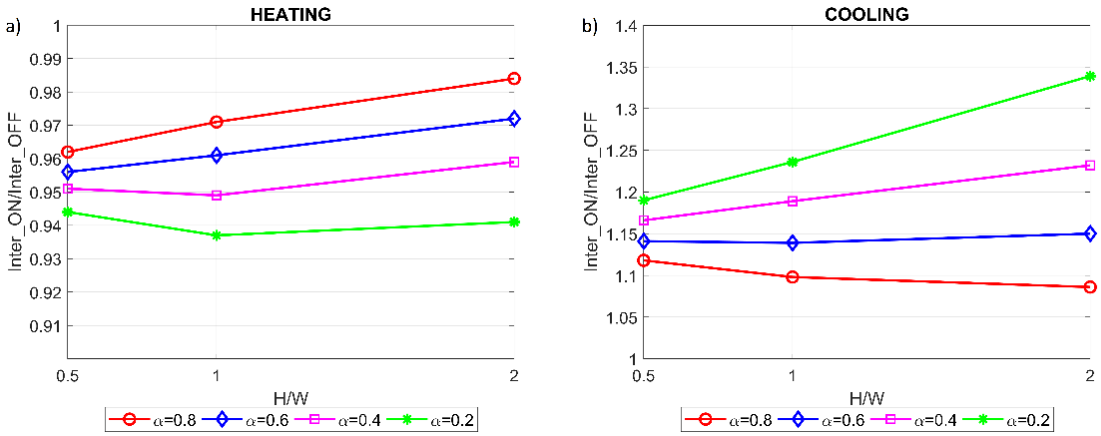


Figura 47. Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter_ON e Inter_OFF: a) riscaldamento e b) raffrescamento, in funzione di H/W, con Agl/Aop=0.25 per il canyon orientato S-N.

Le Figura 48a e Figura 48b mostra i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato a W- E con A_{gl}/A_{op}=0.5.

Analizzando la Figura 48a i rapporti tra fabbisogno di riscaldamento tra caso Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 0.932 e 0.952 mentre per H/W=2, variano tra 0.93 e 0.98. Per questa configurazione, l'impatto delle mutue riflessioni sulla domanda di riscaldamento varia tra -7% e -2%. Ancora, la Figura 48b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffrescamento tra caso Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano tra 1.18 e 1.23 mentre per H/W=2, variano tra 1.08 e 1.25. Quindi, per la configurazione H/W=2, l'impatto delle inter-riflessioni sul fabbisogno di raffrescamento varia tra + 8% e 25%.

Figura 49a e Figura 49b mostra i risultati dell'edificio inserito nel canyon orientato a W-E con A_{gl}/A_{op}=0.25.

Guardando la Figura 49a il 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 tra -7,5% e -2,5%. La Figura 49b mostra che i rapporti tra fabbisogno di raffrescamento tra caso Inter_ON e Inter_OFF, per H/W=0.5, variano 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 tra + 10% e 25%.

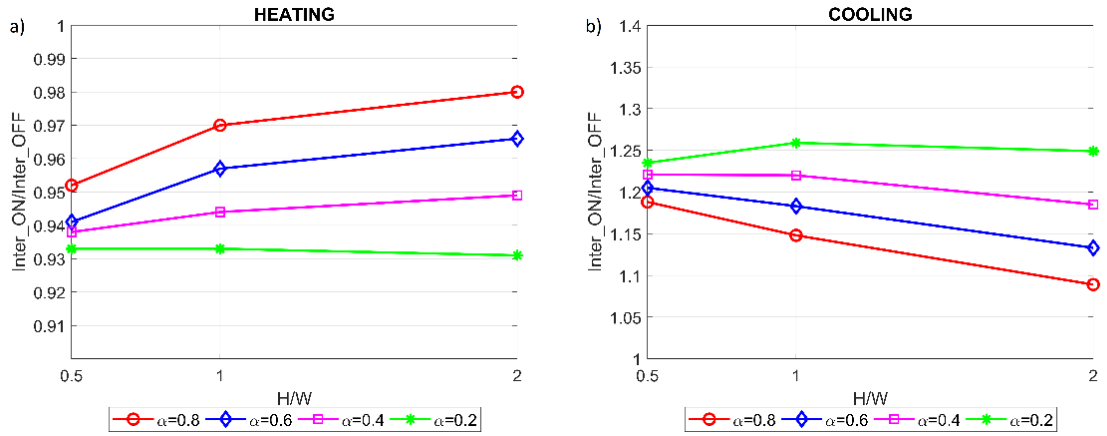


Figura 48. Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter_ON e Inter_OFF: a) riscaldamento e b) raffrescamento, in funzione di H/W, con Agl/Aop=0.5 per il canyon orientato W-E.

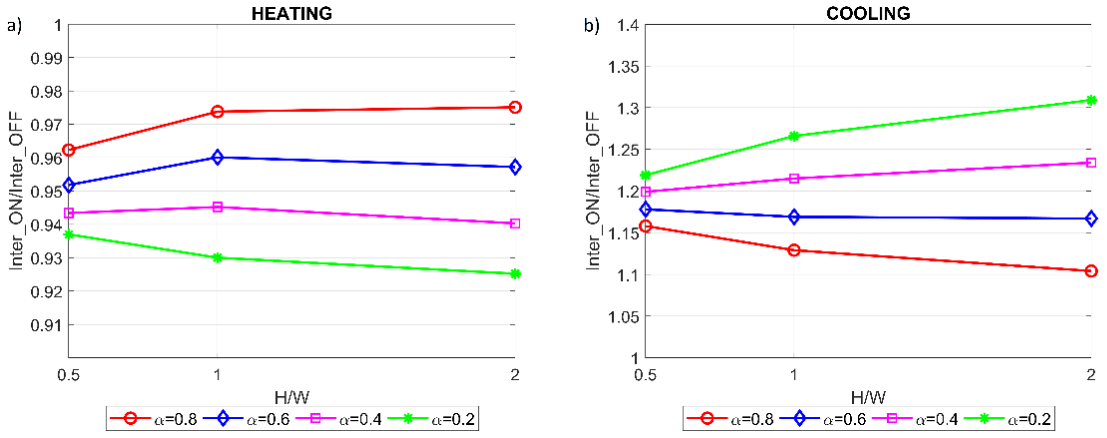


Figura 49. Rapporto tra i fabbisogni di energia termica nel caso Inter_ON e Inter_OFF: a) riscaldamento e b) raffrescamento, in funzione di H/W, con Agl/Aop=0.25 per il canyon orientato W-E.

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 47b, per il canyon stradale orientato S-N con A_{gl}/A_{op}=0.25, per H/W=2 e α=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 α=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, maggiore 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 α influenza progressivamente le richieste di energia termica. Un altro dato generico, osservando i grafici, è che per lo stesso rapporto H/W e α, 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 α = 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 α=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 α, 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 ad 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.

3.3. Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici al variare della città

3.3.1. Modello di simulazione

In questo documento è stata analizzata la dipendenza delle riflessioni multiple ad onde corte sulla richiesta di riscaldamento e raffrescamento di un edificio a tre piani per uso residenziale per tre città, quindi per tre diverse zone climatiche: Rome, Palermo and Krakow. Le simulazioni sono state eseguite per un edificio considerato in un contesto urbano, adiacente su entrambi i lati principali ad un canyon. Il software BES utilizzato per eseguire le simulazioni numeriche è ancora una volta TRNSYS 17.0.

Poiché lo scopo finale di questo lavoro è quello di indagare l'influenza dell'effetto di intrappolamento radiativo nel canyon sul fabbisogno energetico di un edificio, lo spazio tra gli edifici è stato modellato come una "falsa" zona termica con pareti virtuali, così come detto precedentemente. Per quanto riguarda le caratteristiche dell'edificio studiato, la lunghezza è di 110.5 m, in quanto uno degli scopi era quello di rappresentare un edificio lungo con appartamenti adiacenti simili ma anche di minimizzare gli effetti delle condizioni al contorno sui lati corti dell'edificio. Sia l'altezza che la larghezza dell'edificio è 13.5 m. La superficie finestrata sulle facciate lunghe degli edifici è il 50% della superficie opaca. L'aspect ratio H/W è pari a 1 e l'orientamento degli edifici è Sud-Nord (facciate lunghe che affacciano sul canyon sono orientate est-ovest). Le pareti laterali corte sono modellate adiabatiche presumendo che siano continue, modellando così una lunga fila di zone termiche identiche. L'edificio centrale sotto analisi è circondato da altre due file di edifici, geometricamente identiche all'edificio studiato.

L'obiettivo di questa analisi è valutare l'influenza delle sole riflessioni ad onda corta sulla domanda di energia termica dell'edificio al variare della zona climatica. Per questo motivo, come nella simulazione precedene, i fenomeni di scambio radiativo ad onde lunghe sono stati disattivati imponendo l'emissività pari a 0. Impostando il modello in questo modo, le perdite di radiazione ad onda lunga verso il cielo e le altre superfici sono state disattivate e il metodo della "falsa" zona dà solo la possibilità di indagare l'influenza del contributo delle inter-riflissione nel solo campo della shortwave.

Il modello senza inter-riflessioni è un modello in cui gli elementi dell'involucro dell'edificio in fase di studio non ricevono alcuna radiazione riflessa dalle superfici circostanti. Significa che tutte le superfici del canyon stradale attorno all'edificio hanno un fattore di assorbanza pari a 1: questo modello è denominato City_OFF. Il modello denominato City_ON è il modello in cui sono presenti le riflessioni multiple ad onda corta. In questo modello, il valore dei fattori di riflettanza della pavimentazione stradale del canyon è costante (ρ=0.2). Le simulazioni sono state eseguite al variare dei fattori di riflettanza sulle facciate dell'edificio da ρ=0.2 a ρ=0.8. La logica seguita per le simulazioni è riportata nello schema in Figura 50.

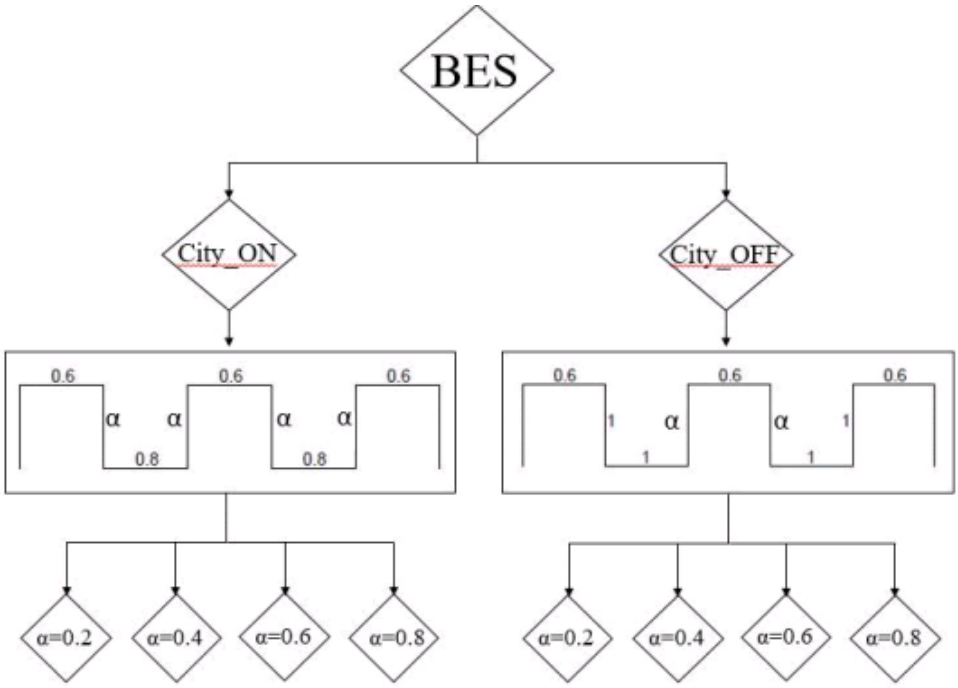


Figura 50. Schema delle simulazioni in funzione dei parametri utilizzati per l'analisi di sensibilità

3.3.2. Risultati delle simulazioni

3.3.2.1. Analisi della radiazione solare assorbita

I risultati mostrano: i) la radiazione totale dell'energia solare assorbita tra il caso City_ON e City_OFF sia per la stagione estiva che per la stagione invernale, a partire dalla quale è stata calcolata la percentuale della radiazione solare assorbita tra i due modelli; ii) le richieste di raffrescamento e di riscaldamento normalizzate dell'edificio nel modello City_ON e del modello City_OFF. Le analisi sono state eseguite nelle città di Roma, Palermo e Cracovia.

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

Tabella 31. Valori di energia solare assorbita (in MJ/m^2) nei modelli City_ON e City_OFF e variazione percentuale dell'energia solare assorbita tra i due casi per la stagione di riscaldamento e raffrescamento.

		Building Facade											
		Tot Rad [MJ/m^2]								% Rad			
		Heating Season				Cooling Season				Heating Season		Cooling Season	
		West		East		West		East					
		ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	West	East	West	East
Roma	α=0.2	159.8	123.9	158.6	122.6	241.9	185.9	240.5	184.3	22.4%	22.7%	23.1%	23.4%
	α=0.4	303.2	247.4	300.9	244.8	459.0	371.3	274.8	272.7	18.4%	18.6%	19.1%	19.3%
	α=0.6	432.8	370.6	429.2	366.8	655.1	556.1	650.8	551.5	14.4%	14.6%	15.1%	15.3%
	α=0.8	550.6	493.5	545.6	488.3	833.2	740.5	827.2	734.3	10.4%	10.5%	11.1%	11.2%
Palermo	α=0.2	170.7	132.3	167.6	128.7	250.1	192.7	244.3	185.9	22.5%	23.2%	23.0%	23.9%
	α=0.4	324.2	264.3	317.6	257.0	475.1	384.9	462.9	371.2	18.5%	19.1%	19.0%	19.8%
	α=0.6	463.0	395.9	452.9	384.9	678.7	576.5	659.7	556.1	14.5%	15.0%	15.1%	15.7%
	α=0.8	589.3	527.1	575.3	512.5	863.9	767.6	837.7	740.4	10.6%	10.9%	11.1%	11.6%
Cracovia	α=0.2	88.5	69.3	85.1	65.3	177.8	137.4	174.8	133.9	21.7%	23.2%	22.7%	23.4%
	α=0.4	168.2	138.4	161.1	130.5	337.7	274.5	331.4	267.5	17.7%	19.0%	18.7%	19.3%
	α=0.6	240.5	207.3	229.5	195.4	482.2	411.2	472.5	400.7	13.8%	14.8%	14.7%	15.2%
	α=0.8	306.4	276.1	291.2	260.2	613.7	547.5	600.2	533.5	9.9%	10.6%	10.8%	11.1%

In Tabella 31, nella parte sinistra, sono riportati i valori della radiazione solare assorbita totale annua per l'intero periodo stagionale. Questi valori sono stati utilizzati per la determinazione delle variazioni percentuali tra i casi City_ON e City_OFF, riportate nella parte destra della Tabella 31.

La differenza percentuale (ΔSol.Rad$_{\%}$) tra l'energia solare assorbita nel caso City_ON rispetto al caso City_OFF, è definita come segue:

$$\Delta Sol.Rad_{\%} = \left(\frac{Inter_ON - Inter_OFF}{Inter_ON}\right) \times 100$$

In generale, osservando la Tab. 31 si può dire che:

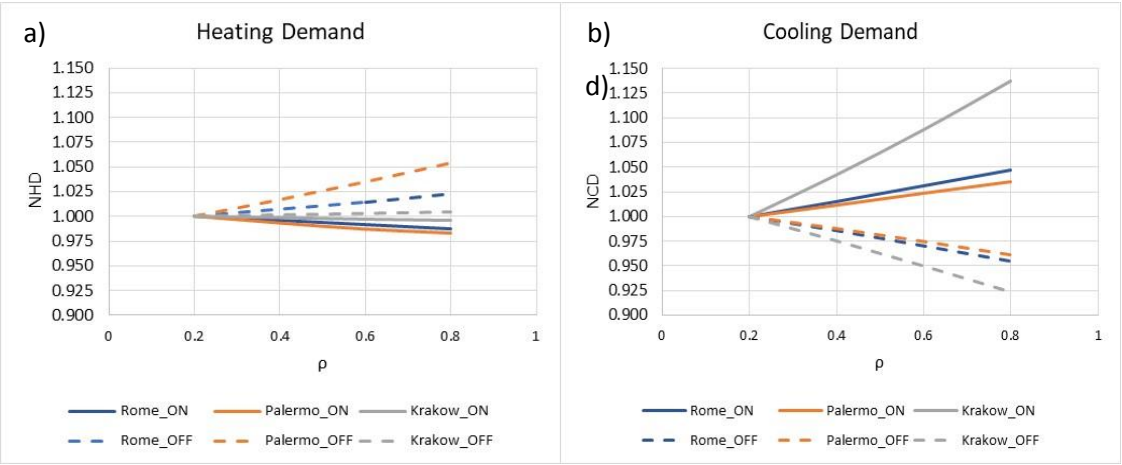
- all'aumentare del fattore di assorbimento solare α aumenta, in tutte le configurazioni, la radiazione assorbita dalle pareti dell'edificio sia per il caso City_ON che per il caso City_OFF. Congruentemente, all'aumentare di α e quindi al ridurre del coefficiente di riflettanza ρ=1-α, la radiazione solare riflessa è minore, di conseguenza risulta essere minore anche il contributo delle interiflessioni;

- le facciate est e ovest dell'edificio di fronte al canyon urbano subiscono lo stesso aumento dell'assorbimento di radiazioni, a causa della loro esposizione simmetrica rispetto al percorso solare quotidiano;
- a parità di ρ la radiazione solare complessiva che colpisce le facciate è maggiore a Palermo rispetto Roma e Cracovia, soprattutto nella stagione estiva. Di conseguenza anche la percentuale delle interiflessioni è maggiore a Palermo.

3.3.2.2. Fabbisogno di energia termica dell'edificio

Lo scopo finale del lavoro è quello di valutare l'impatto delle interiflessioni che si sviluppano nel canyon sui fabbisogni energetici degli edifici per Roma, Palermo e Cracovia. In questa sezione vengono mostrati i grafici della richiesta termica nei casi City_ON e City_OFF al variare della città e del coefficiente di riflettanza solare ρ. I dati riportati mostrano come il contributo delle inter-riflessioni influenzi le richieste di riscaldamento e raffrescamento quando ρ varia.

In Fig. 51a e b, per apprezzare meglio l'andamento della richiesta termica al variare del coefficiente di riflettanza si è deciso di normalizzarla rispetto al caso ρ=0.2 nei casi City_ON e City_OFF.



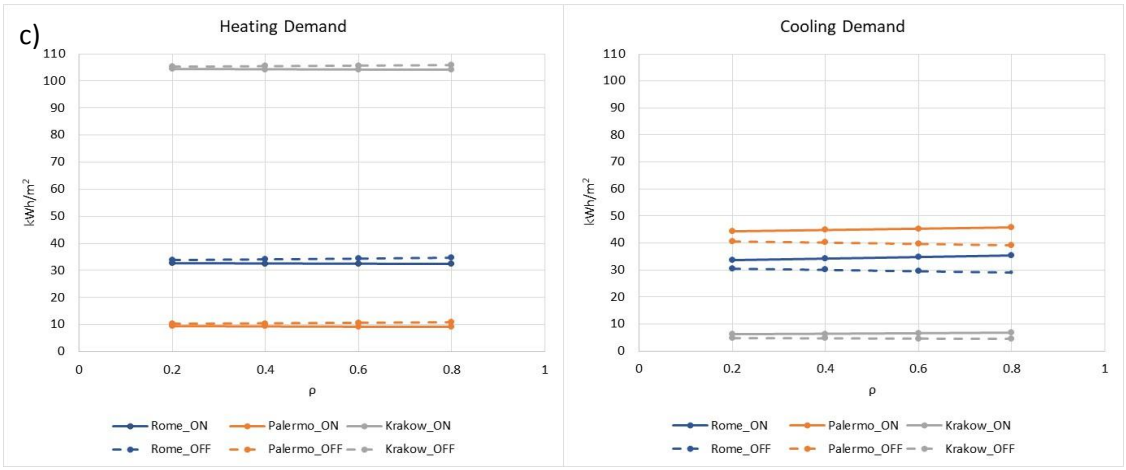


Figura 51. Fabbisogno di riscaldamento normalizzato a), fabbisogno di raffrescamento normalizzato b), fabbisogno di riscaldamento in valori assoluti c), fabbisogno di raffrescamento in valori assoluti d).

La Fig. 51 a) mostra, in inverno, un aumento del fabbisogno di riscaldamento all'aumentare del coefficiente di riflettanza ρ per il modello City_OFF (meno radiazione solare assorbe l'edificio e maggiore è la richiesta di riscaldamento), ma diminuisce per il modello City_ON. Questa inversione di tendenza è dovuta proprio al contributo delle interiflessioni. Come si è visto nella Tab. 31, infatti, all'aumentare di ρ il contributo delle interiflessioni è maggiore e ciò comporta una diminuzione della domanda di riscaldamento (ciò che comanda il fabbisogno è proprio il contributo delle interiflessioni). In generale la domanda di riscaldamento normalizzata varia in un range tra 1.05 e 0.98. La Fig. 51b) mostra come la situazione si ribalta per la richiesta di raffrescamento nel periodo estivo. All'aumentare di ρ il fabbisogno aumenta per il caso City_ON, ovvero quando consideriamo il contributo delle interiflessioni e diminuisce nel caso City_OFF per quanto detto precedentemente (vedi Tab. 31). In generale la domanda di raffrescamento normalizzata varia in un range tra 1.14 e 0.92.

Nella figura 51 c e d, che mostra la richiesta termica in valore assoluto, gli andamenti della richiesta termica al variare di ρ sono gli stessi per quanto detto prima. In particolare, nelle Figure 51 c e d, si vede come il contributo delle interiflessioni incide sul fabbisogno dell'edificio al variare delle 3 città oggetto di studio. In Fig. 51c) per la configurazione di Roma, l'impatto delle inter-riflessioni sulla domanda di riscaldamento varia tra -3.8% e -7.1%, per Palermo tra -8.1% e -14.3% e infine per Cracovia tra -1% e -1.8%. La Fig. 51d) mostra, per la configurazione di Roma, che l'impatto delle interiflessioni sulla domanda di raffrescamento varia tra 10.5% a 21.1%, per Palermo tra 8.7% e 17.1% e infine per Cracovia tra 25.1% e 54% (una percentuale così alta è dovuta al fatto che i relativi valori assoluti sono

molto piccoli, circa 6 kWh/m^2). Per una stessa città, a parità di ρ, la differenza percentuale del fabbisogno tra City_ON e City_OFF in inverno è minore rispetto all'estate (7.1% rispetto 21.1%) perchè d'inverno è maggiore il peso della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio piuttosto che il carico solare e quindi il contributo delle interiflessioni. La differenza di temperature tra interno ed esterno dell'edificio è maggiore d'inverno piuttosto che d'estate. Pertanto nella definizione del carico termico essa avrà un peso maggiore rispetto all'irraggiamento e quindi anche al fenomeno delle inter-riflessioni nel caso invernale.

3.4. Impatto delle mutue riflessioni tra le superfici di un canyon urbano sulla richiesta di energia termica degli edifici (ε≠0)

Come visto in precedenza, a causa del fatto che 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, considerando però questa volta anche il contributo della radiazione nella longwave. 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 aspect ratio H/W=1, con due diversi orientamenti (N-S e W-E), con tre valori dei rapporti superfici trasparenti/opache (A_{gl}/A_{op}=0.5, 0.25 e 0) 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.

3.4.1. 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 m^2. La geometria degli edifici e dei canyon è la stessa dell'analisi effettuata nel paragrafo precedente. Ciò che cambia è la presenza o meno delle inter-riflessioni tra le superfici del canyon urbano.

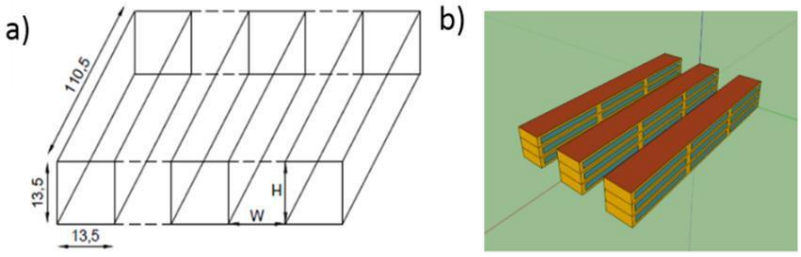


Figura 52. Gemoetria e vista 3D del canyon urbano simulato.

Le caratteristiche dell'edificio analizzato, per ciò che riguarda l'involucro, sono riportate in Tabella 32. 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 32. Principali caratteristiche degli elementi d'involucro

Elemento	Thickness *(m)*	U *(W/m² 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 33 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 33. Valori specifici degli apporti di calore interni

	Persone (W/m²)	Apparecchiature *(W/m²)*	Illuminazione *(W/m²)*
Radiativi	1.51	0.35	3.5
Convettivi	3.01	1.05	1.5

La domanda di energia termica dell'edificio sia per il riscaldamento che per il raffreddamento dipende dalle temperature delle sue facciate. Queste temperature sono influenzate dallo scambio radiativo sia ad onde corte che ad onde lunghe (oltre alla convezione e alla conduzione). L'obiettivo è valutare l'influenza delle riflessioni delle onde corte e delle onde lunghe sulla domanda di energia termica dell'edificio. Per questo motivo, sono stati definiti

due diversi modelli, denominati Inter_ON e Inter_OFF. Il primo tiene conto delle molteplici riflessioni che si sviluppano all'interno del canyon. Nel modello Inter_OFF, invece, le facciate dell'edificio centrale non ricevono alcuna radiazione riflessa dalle superfici circostanti, avendo impostato il loro coefficiente di assorbanza α uguale a uno e la loro emissività ε uguale a zero. Al fine di simulare e valutare correttamente il contributo termico effettivo dovuto alla radiazione solare incidente sulle superfici dell'involucro dell'edificio, il file meteo è stato modificato mediante un fattore correttivo β (pari a 0,2, 0,4, 0,6, 0,8). Questo fattore è stato scelto al fine di rappresentare i valori tipici del fattore di assorbanza per materiali edili comuni.

Nel caso di una superficie trasparente diversa da zero, il fattore di ombreggiamento della finestra è stato opportunamente modificato per mantenere costante la quantità di radiazione solare che entra nell'edificio attraverso essa. Questa funzione ci consente di confrontare i risultati per entrambi i casi Inter_ON e Inter_OFF.

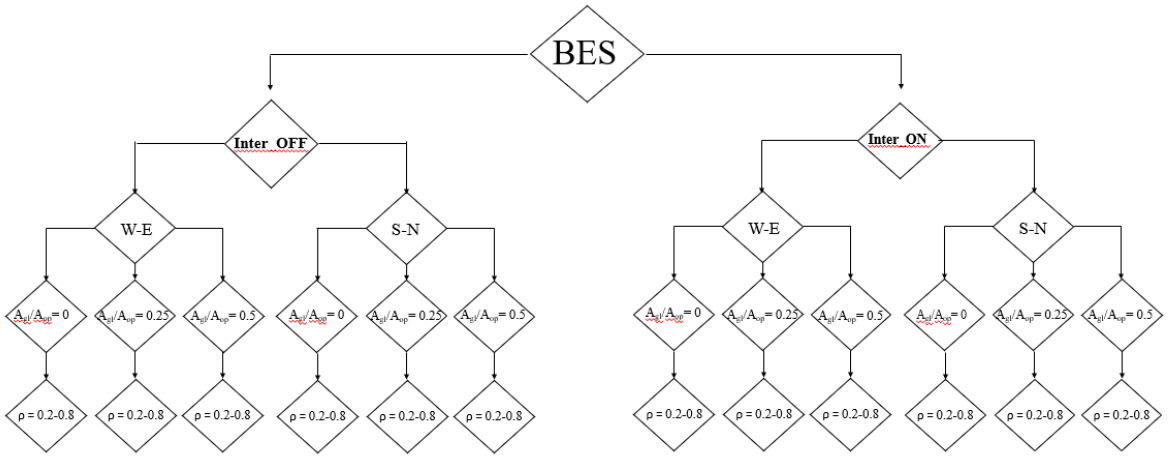


Figura 53. Schema della simulazione

3.4.2. Risultati delle simulazioni

3.4.2.1. Analisi della radiazione solare assorbita

Nella Tabella 34, sul lato sinistro, è mostrata la radiazione solare assorbita totale per entrambe le stagioni e per entrambi gli orientamenti. Questi valori vengono utilizzati per determinare le variazioni percentuali tra i casi Inter_ON e Inter_OFF, riportate nella parte destra della stessa tabella. Tale differenza è definita come segue:

$$\Delta Sol.Rad_{\%} = \left(\frac{Inter_ON - Inter_OFF}{Inter_ON}\right) \times 100$$

In generale, osservando la Tabella 34 si può affermare che:

- all'aumentare del fattore di assorbimento solare α, indipendentemente dalla stagione, aumenta la radiazione assorbita dalle pareti dell'edificio, sia per i casi Inter_ON che Inter_OFF. Di conseguenza, con l'aumento di α e la conseguente riduzione del coefficiente di riflettanza ρ = 1-α, la radiazione solare riflessa è minore, quindi anche il contributo delle inter-riflessioni è ridotto;
- l'aumento del contributo ρ delle riflessioni può aumentare fino al 50% e oltre, in particolare per la facciata esposta a nord;
- le facciate est e ovest dell'edificio centrale subiscono lo stesso aumento della radiazione solare assorbita, a causa della loro esposizione simmetrica al percorso solare quotidiano;
- la facciata esposta a sud dell'edificio centrale assorbe fino al 50% in più di radiazione solare rispetto a quella rivolta a nord.

Tabella 34. Values of absorbed solar energy (in MJ/m^2) in Inter_ON and Inter_OFF and Percentage variation of absorbed solar energy between Inter_ON and Inter_OFF cases for heating and cooling season.

		Building Façade											
		Tot Rad [MJ/m^2]								% Rad			
		Heating Season				Cooling Season				Heating Season		Cooling Season	
		West		East		West		East					
		ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	West	East	West	East
S-N	ρ=0.8	202.4	125.0	200.1	122.4	311.8	187.1	309.5	184.4	38%	39%	40%	40%
	ρ =0.6	353.0	249.6	348.3	244.4	540.5	373.5	535.7	368.2	29%	30%	31%	31%
	ρ =0.4	467.2	373.8	459.9	365.9	710.3	559.1	702.9	551.1	20%	20%	21%	22%
	ρ =0.2	554.5	497.5	544.4	487.1	836.3	744.0	826.0	733.3	10%	11%	11%	11%
		North		South		North		South		North	South	North	South
W-E	ρ=0.8	146.9	66.3	281.8	222.0	247.0	104.5	338.5	210.0	55%	21%	58%	38%
	ρ =0.6	240.9	132.1	521.1	443.7	401.3	208.1	591.1	419.3	45%	15%	48%	29%
	ρ =0.4	297.1	197.5	732.2	664.9	488.3	311.0	783.1	627.9	34%	9%	36%	20%
	ρ =0.2	323.9	262.4	924.9	885.6	522.8	413.1	930.1	835.6	19%	4%	21%	10%

3.4.2.2. Fabbisogno di energia termica dell'edificio

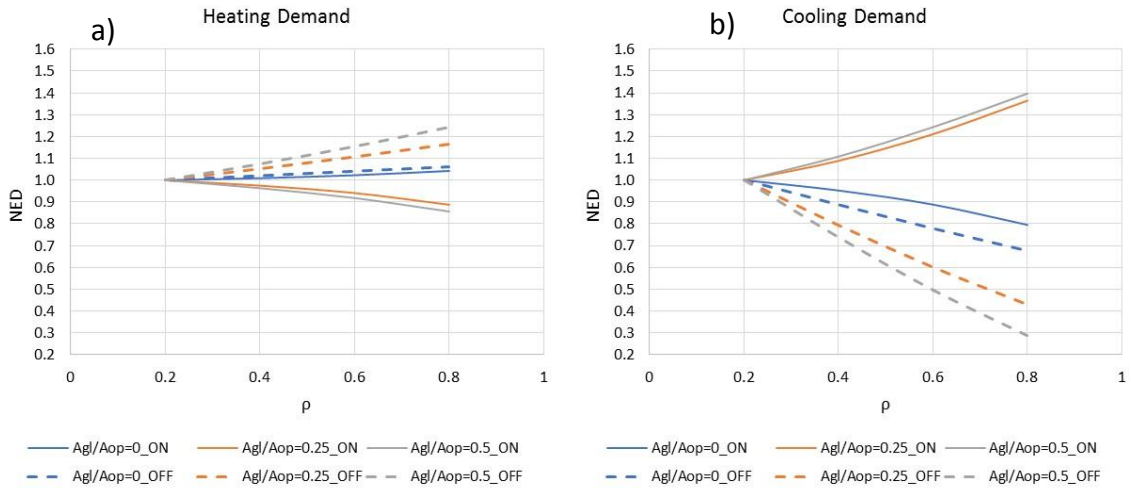


Figura 54. Normalized Heating Demand (a) and Normalized Cooling Demand (b) for South-North orientation

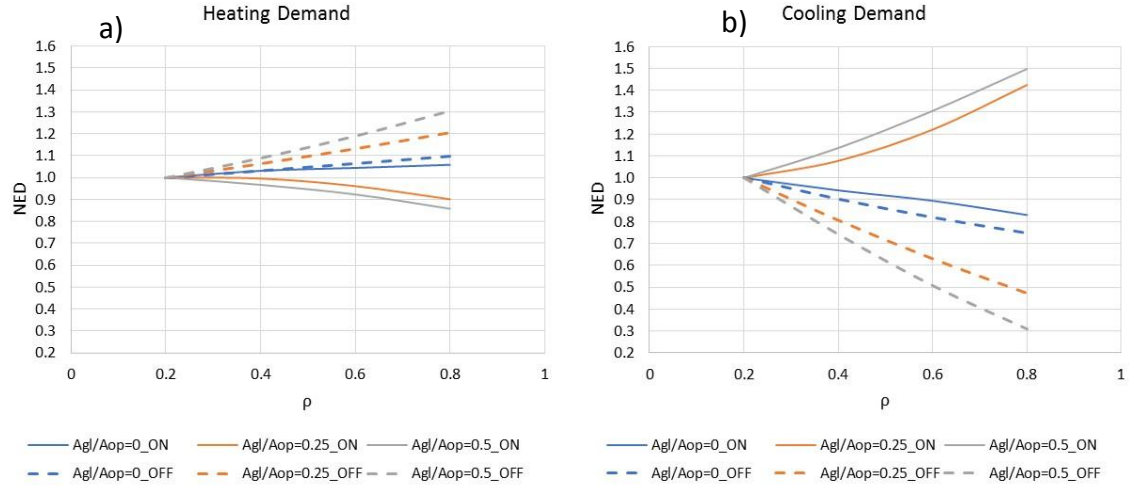


Figura 55. Normalized Heating Demand (a) and Normalized Cooling Demand (b) for West-East orientation

Lo scopo di questa simulazione è quello di valutare l'influenza delle inter-riflessioni che si sviluppano all'interno di un canyon sul fabbisogno energetico degli edifici variando il coefficiente di riflettanza delle facciate. Le figure 54 e 55 mostrano la differenza normalizzata nella domanda di energia (NED), rispetto al caso ρ=0,2, tra i casi Inter_OFF e Inter_ON per i tre modelli con diverso rapporto A_{gl}/A_{op} e per entrambi gli orientamenti.

Per entrambi gli orientamenti, i risultati mostrano l'influenza delle inter-riflessioni sulle richieste di riscaldamento e raffrescamento, variando il coefficiente ρ da 0,2 a 0,8. Per il caso invernale, le figure 54 (a) e 55 (a) mostrano una diminuzione della domanda di riscaldamento

per il modello Inter_ON con rapporto A_{gl}/A_{op} diverso da zero, all'aumentare di ρ, fino a -15% per l'orientamento S-N. Ciò è dovuto al fatto che meno radiazione solare viene assorbita dall'edificio, più si riflette. Quindi quando l'influenza delle inter-riflessioni è maggiore, la richiesta di riscaldamento diminuisce. Questo fenomeno diventa sempre più grande all'aumentare della porzione di superficie trasparente dell'edificio. Nel caso limite di un edificio senza superficie trasparente, come previsto, l'influenza delle riflessioni multiple è piuttosto ridotta, come dimostrato dalla riduzione percentuale quasi trascurabile nelle figure 54 (a) e 55 (a). In questo caso particolare la richiesta di riscaldamento è ancora leggermente in aumento con il coefficiente ρ, sia per i modelli Inter_ON che per Inter_OFF.

Nelle figg. 54 (b) e 55 (b), una tendenza opposta è mostrata per la stagione estiva. L'influenza delle inter-riflessioni aumenta all'aumentare del coefficiente di riflessione ρ e ciò porta ad un aumento della domanda di raffrescamento fino al 50% rispetto al caso ρ= 0,2. Il fenomeno si amplifica per valori maggiori del rapporto A_{gl}/A_{op}.

Al fine di evidenziare l'effetto della radiazione ad onde lunghe sulla domanda di energia dell'edificio nel caso in cui si considerino le inter-riflessioni, è stata effettuata un'ulteriore analisi. Le richieste di riscaldamento e raffrescamento normalizzate rispetto al caso ρ=0,2 sono mostrate in Fig. 56 e in Tabella 35.

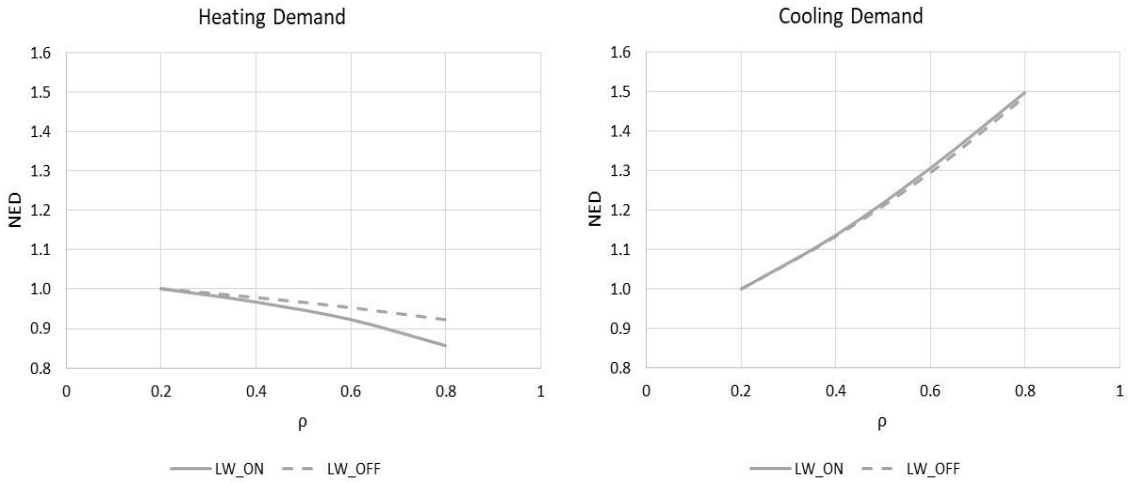


Figura 56. Normalized Heating Demand (a) and Normalized Cooling Demand (b) for West-East orientation and Agl/Aop=0.5

Tabella 35. Percentage difference in heating and cooling demand by varying ρ between LW_ON and LW_OFF cases

	Diff%			
ρ	0.2	0.4	0.6	0.8
Heat	0.6	0.5	2.6	6.8
Cool	2.0	1.9	2.3	1.7

In questo caso, sono state eseguite simulazioni per l'orientamento Ovest-Est al variare di ρ e per un rapporto A_{gl}/A_{op}=0,5. In particolare, per ρ=0,8, nel periodo invernale, i risultati mostrano che considerando l'effetto della radiazione ad onde lunghe, si ha una riduzione della domanda di riscaldamento fino a quasi il -7% (Tab. 35).

4. Proposte per la mitigazione del fenomeno dell'UHI

L'isola di calore è un fenomeno che condiziona inevitabilmente l'ambiente cittadino e la qualità della vita della popolazione urbana. Nonostante le maggiori temperature esistenti in città possano essere considerate un effetto positivo durante il periodo invernale, poiché riducono il carico di riscaldamento, le conseguenze negative dell'UHI sembrano superarne i benefici. E' durante la stagione estiva infatti che si verifica la massima richiesta annuale di potenza elettrica e l'effetto isola di calore contribuisce a incrementare l'entità della domanda. L'utilizzo massiccio degli impianti di condizionamento, oltre a provocare maggiori emissioni di calore antropogenico che aumentano ulteriormente la temperatura, determina maggiori emissioni di gas serra e di inquinanti, riducendo la qualità dell'aria. Entrambe questi effetti danneggiano la salute umana e contribuiscono a generare stati di malessere soprattutto nei soggetti più deboli, come bambini e anziani. Infine l'elevata temperatura delle superfici riscalda in maniera anomala l'acqua piovana che defluisce poi in ruscelli, fiumi stagni e laghi; tale inquinamento termico dell'ecosistema influisce negativamente sul metabolismo e la riproduzione di molte specie acquatiche [1]. Il fenomeno isola di calore è da decenni oggetto di studio da parte dei ricercatori, mentre è più recente la preoccupazione della comunità verso le conseguenze negative sopra elencate. Questo interesse nei confronti dell'UHI ha contribuito a promuovere lo sviluppo di strategie per la riduzione dell'effetto; dal momento che l'origine dello squilibrio termico urbano è la modifica del bilancio energetico superficiale, le azioni di mitigazione devono influire sui termini del bilancio e avvicinarli ai valori rurali. In particolare gli interventi dovrebbero:

- ridurre il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana ΔQS, tramite modifica della geometria urbana e attraverso l'utilizzo di materiali con minor ammettenza termica;
- ridurre la radiazione netta Q^*, aumentando l'albedo delle superfici e modificando la geometria degli edifici;
- ridurre il rapporto di Bowen β, cioè trasformare parte del flusso di calore sensibile QH in flusso di calore latente QE, aumentando la permeabilità delle superfici e la presenza di vegetazione;
- ridurre il flusso di calore antropogenico QF, 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 nelle diverse città in maniera differente all'effetto. Non esiste quindi una "ricetta" universale per la mitigazione dell'effetto UHI e alcune azioni si potrebbero rivelare inefficaci o addirittura controproducenti se applicate senza aver considerato le specificità locali [16]. 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 (2005) [17] stima che la temperatura estiva massima di Los Angeles si abbasserebbe di 2-3 K se venissero piantati tre alberi per ogni casa e se i due terzi della superficie urbana incrementasse la propria albedo.

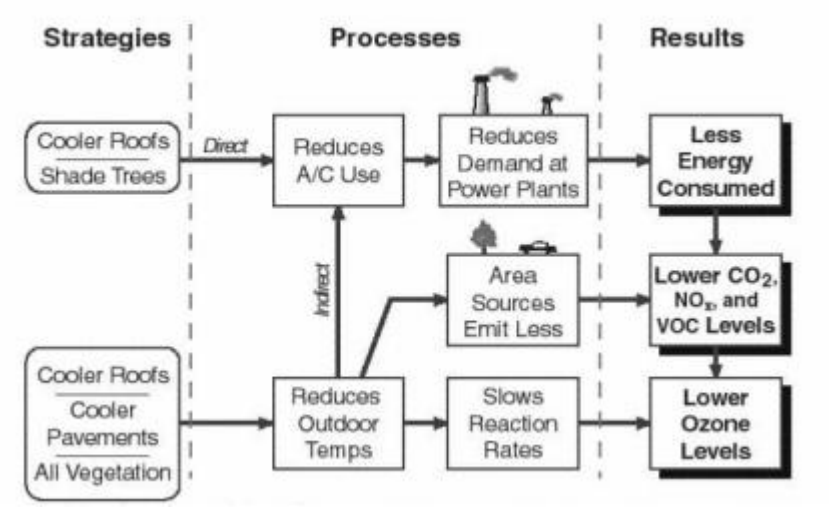


Figura 57. Le tecniche di mitigazione dell'effetto isola di calore urbana procurano benefici alle singole abitazioni (diretti) e all'intera città (indiretti), poiché possono ridurre la temperatura urbana, le emissioni di inquinanti e di gas serra (Akbari 2005).

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 economici 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 (Figura 57). 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 dimuiscono poi la formazione di smog fotochimico, prodotto in seguito a reazioni che coinvolgono gli ossidi di azoto (NOx) 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 [17]. Nei paragrafi successivi verranno esposte le tecniche di mitigazione considerate maggiormente efficaci nel contrastare il fenomeno dell'isola di calore urbana; Cool roofs; Cool pavements; Aree verdi; Green roofs. Le prime due tecniche utilizzano dei materiali o dei rivestimenti "freddi" in grado di riflettere gran parte della radiazione solare, mentre le ultime due ottengono una riduzione del calore sensibile tramite l'aumento del flusso di calore latente e grazie all'ombreggiamento prodotto dalle piante.

4.1. Cool Roofs

I materiali utilizzati nella costruzione di abitazioni e strutture nelle città influenzano in maniera significativa il bilancio energetico superficiale. Le superfici urbane assorbono infatti una maggiore quota della radiazione solare ed infrarossa; tale l'energia assorbita viene successivamente dissipata nell'ambiente attraverso i processi di raffreddamento radiativo e convettivo, incrementando la temperatura atmosferica. Una riduzione delle temperature epidermiche delle coperture urbane produrrebbe dei benefici diretti ai singoli edifici e indiretti all'intero territorio urbano, poiché i tetti occupano il 20-25% della superficie totale urbana, secondo una statistica relativa ad alcune città americane riportata da [18]. E' possibile raggiungere questo obiettivo promuovendo l'utilizzo nei tetti di materiali in grado di riflettere una quota maggiore di radiazione (maggiore albedo) rispetto a quelli tradizionali

e caratterizzati da elevata emissività. Le coperture urbane con queste caratteristiche vengono definite cool roofs, dal momento che possono raggiungere temperature superficiali inferiori di 28-33 °C rispetto ai materiali abituali e superori di solo 6-11 °C rispetto alla temperatura dell'aria. Le leggi della fisica esprimono l'impossibilità di ottenere un'elevata emissività ed un'elevata riflessione alla stessa lunghezza d'onda. Un aumento di emissività determina infatti una diminuzione di riflettanza, poiché la radiazione che raggiunge una superficie non trasparente si suddivide tra quota riflessa ed assorbita e per una determinata lunghezza d'onda l'emissività è pari al coefficiente d'assorbimento (Legge di Kirchoff). La realizzazione di cool roofs è tuttavia possibile utilizzando materiali con un comportamento selettivo, caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione della radiazione visibile e da un'elevata emissività nell'infrarosso. Come osservabile in Figura 58, una copertura tradizionale (black roofs), seppur dotata di emissività elevata, può raggiungere temperature prossime agli 85 °C durante una calda giornata estiva, poiché riflette solo il 5% della radiazione. La temperatura epidermica è leggermente inferiore nel caso di un tetto metallico, dotato di maggior albedo ma in grado di emettere solo il 25% della radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura. Al contrario godrà di una temperatura piuttosto inferiore un tetto avente elevati valor sia di albedo sia di emissività (cool roofs). Entrambe le proprietà influenzano quindi la temperatura di equilibrio di una superficie Tsurface, che confrontata a parità di radiazione con quella di equilibrio di un materiale nero di riferimento Tblack (albedo a=5% ed emissività ε=90%) e con quella di un materiale bianco standard Twhite

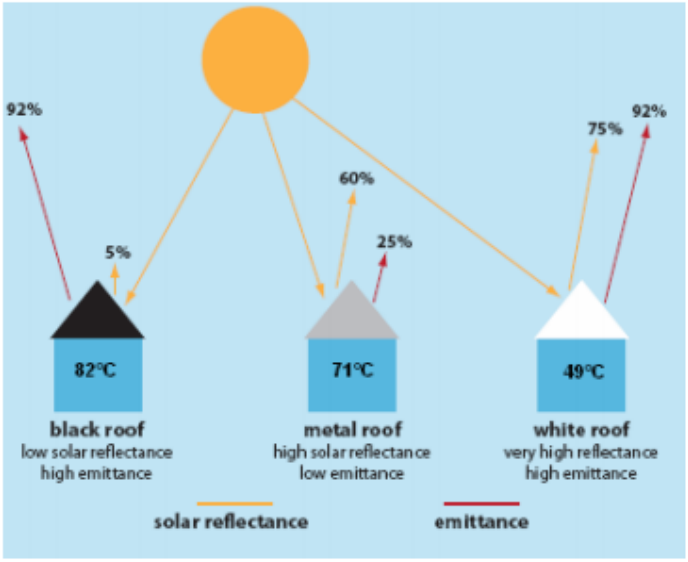


Figura 58. Albedo, emissività e temperatura epidermica di equilibrio di differenti coperture urbane in una calda giornata estiva (Chin et al. 2008)

(a=80% ed ε= 90%) può essere utilizzata per valutare la capacità del materiale di mantenersi "freddo" attraverso il Solar Reflectance Index (SRI), definito da Santamouris et al. (2001) [19]:

$$SRI = \frac{T_{black} - T_{surface}}{T_{black} - T_{white}} \cdot 100$$

L'SRI ha il pregio di combinare in un unico parametro le proprietà radiative (albedo ed emissività); materiali con elevati valori di SRI sono in grado di raggiungere temperature di equilibrio inferiori rispetto a materiali aventi SRI minore. E' possibile suddividere le coperture degli edifici in due categorie, caratterizzate da materiali diversi e quindi oggetto di interventi differenti per la realizzazione di cool roofs: tetti a bassa inclinazione (inferiore a 9.5°) e ad alta inclinazione. Le coperture a bassa inclinazione sono presenti nella maggior parte degli edifici industriali, commerciali e dei condomini cittadini. La trasformazione di un tetto piano in un cool roof è possibile principalmente attraverso il rivestimento dello stesso con vernici o con speciali membrane. L'applicazione di uno strato spesso di pittura non metallica molto chiara, in grado di riflettere la radiazione solare visibile, è appropriato se la copertura esistente è in buone condizioni. Particolari additivi nelle vernici migliorano inoltre l'adesione, la durabilità e la capacità di auto-pulizia con l'acqua piovana; il deposito di polvere e sporco sulle superfici produce infatti una diminuzione dell'albedo. Se al contrario la copertura necessita di opere di manutenzione, è consigliabile l'applicazione di speciali membrane caratterizzate da elevato SRI, che vengono incollate o fissate meccanicamente al tetto. Il mercato dei tetti ad alta inclinazione, situati prevalentemente in edifici residenziali, offre prodotti differenti: la visibilità delle coperture impone infatti delle attenzioni di tipo estetico nella realizzazione dei cool roofs [20]. I materiali utilizzati per questa tipologia di coperture non sono necessariamente di colore chiaro, sono invece presenti in un'ampia gamma di colorazioni. I ricercatori hanno sviluppato infatti i cool colors, che contengono dei pigmenti in grado di riflettere la radiazione solare nello spettro infrarosso. Tegole o tetti metallici cool non bianchi, posseggono generalmente un'albedo inferiore rispetto alle soluzioni utilizzate per i tetti a bassa inclinazione ma sono all'apparenza indistinguibili dai materiali tradizionali [18]. La presenza di un cool roof consente un minor trasferimento di calore dal tetto, rendendo più confortevole la temperatura interna in estate e limitando la necessità di energia per il raffrescamento. Molti studi sono stati eseguiti al fine di quantificarne i benefici diretti e indiretti, non bisogna tuttavia dimenticare che l'entità

dei risparmi ottenibili varia in funzione del clima locale e dalle specifiche caratteristiche degli edifici [18]. Haberl e Cho (2004) [21] hanno considerato 27 articoli presenti in letteratura, riscontrando risparmi energetici per il condizionamento ottenuti con i materiali freddi variabili tra il 2% e il 44% con una media del 20%, mentre Santamouris et al. (2001) [19] riportano riduzioni del 3-35% osservando valori maggiori in vecchi edifici poco isolati. L'utilizzazione su larga scala dei cool roofs potrebbe comportare come beneficio indiretto la riduzione della temperatura esterna e sebbene sia complesso da stimare alcuni ricercatori hanno effettuato delle simulazioni; Taha (1997) [22] afferma che un incremento dell'albedo da 0.25 a 0.4 potrebbe abbassare la temperatura cittadina di 4 °C. Ulteriori effetti positivi della diffusione dei cool roofs sono la riduzione della potenza di picco e dello smog fotochimico. Akbari (2005) [17] dichiara che gli Stati Uniti potrebbero godere di una diminuzione del 2.5% della potenza di picco (7 GW) e che lo smog a Los Angeles sarebbe inferiore del 10-20% se i materiali freddi venissero largamente utilizzati. Nonostante la presenza dei cool roofs porti benefici durante l'estate, è importante osservare che nel periodo invernale la maggior albedo comporta maggiori costi per il riscaldamento. Diversi studi dimostrano tuttavia che nei climi temperati e caldi i vantaggi superano gli svantaggi, poiché d'inverno vi sono meno ore di luce, maggior nuvolosità ed il sole è ad altezze inferiori [23].

4.2. Cool Pavements

Le superfici orizzontali cittadine sono quelle maggiormente influenzate dalla radiazione solare dal momento che possono raggiungere temperature epidermiche piuttosto elevate. Un ampio utilizzo di cool roofs permetterebbe di ottenere benefici significativi, tuttavia la maggior parte dell'area cittadina è coperta da un'altra tipologia di superfici: le pavimentazioni. Ferguson et al. (2008) [24] stimano infatti che la superficie occupata in varie città americane da pavimentazioni (come ad esempio strade, parcheggi e marciapiedi) sia il 30-45% dell'area totale. Tali superfici durante il giorno assorbono ed accumulano energia solare, che viene smaltita nella notte attraverso i processi di raffreddamento radiativo e convettivo. La modifica delle proprietà delle pavimentazioni rappresenta per questo un importante intervento nella mitigazione dell'UHI. Mentre il bilancio energetico dei tetti è condizionato principalmente da albedo ed emissività, le caratteristiche che influenzano il bilancio delle pavimentazioni sono più numerose; in aggiunta alle proprietà radiative infatti anche permeabilità, inerzia termica e convezione impattano sulla temperature epidermiche [19]. L'utilizzo di materiali con proprietà differenti rispetto a quelle di asfalto e calcestruzzo

(i materiali tipicamente utilizzati) può garantire temperature superficiali inferiori e una minor quota di calore immagazzinato. Questi obiettivi possono essere raggiunti attraverso l'utilizzo di cool pavements, pavimentazioni che riflettono una maggior percentuale della radiazione solare e possono essere permeabili.

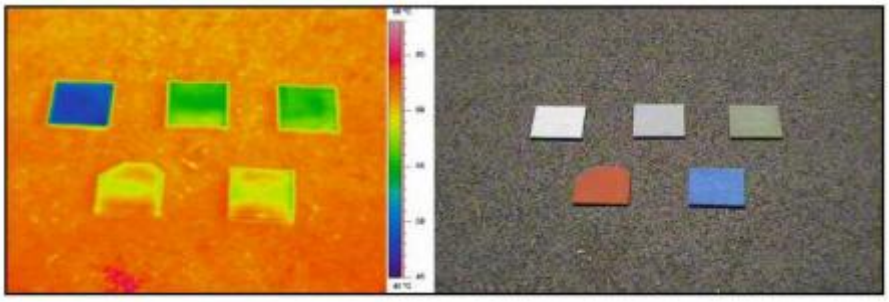


Figura 59. L'aggiunta di additivi coloranti all'asfalto permette di ottenere temperature superficiali inferiori di 15 °C (bianco), 7 °C (verde, grigio) e 3 °C (rosso, blu) rispetto ad un asfalto tradizionale nero (Fanchiotti e Carnielo 2011)

L'albedo, come per i cool roofs, sembra essere il maggior fattore di influenza delle temperature superficiali. La quota riflessa dei materiali tradizionali è del 5-40% ma attraverso l'aggiunta di additivi coloranti alle pavimentazioni (Figura 59), anche durante interventi di manutenzione sullo strato superficiale, essa può essere elevata fino al 75% [24]. La diffusione commerciale di questi pigmenti non si è verificata anche per possibili problemi di abbagliamento durante la guida e per l'inadeguatezza di un'elevata riflessione in luoghi di stazionamento delle persone. Per questo motivo vi è stato un impegno, similmente a quanto verificato per i cool roofs, nella realizzazione di materiali con elevata albedo ma bassa riflessione nel visibile; a tal proposito [19] riporta l'esistenza di un asfalto all'apparenza tradizionale ma con temperature epidermiche inferiori di 15 °C, grazie a una riflettività infrarossa del 86% e una visibile solamente del 23%. Sebbene l'emissività sia una proprietà radiativa che influenza considerevolmente il bilancio energetico, non è una variabile modificata dai cool pavements poiché le pavimentazioni tradizionali posseggono una buona capacità di emettere radiazione. Una proprietà di notevole importanza che i cool pavements possono modificare è invece l'impermeabilità delle superfici. Pavimentazioni permeabili sono in grado di permettere la discesa dell'acqua verso il terreno sottostante, beneficiando del raffreddamento evaporativo. Tuttavia superfici porose asciutte possono limitare il trasferimento di calore verso il sottosuolo a causa della loro struttura, portando a temperature superficiali maggiori ma un minor accumulo termico, maggior responsabile dell'UHI notturna. L'applicazione di pavimentazioni porose è ancora oggetto di ricerche e

deve essere valutata nello specifico a seconda del campo di applicazione [24]. I benefici ottenibili dall'utilizzo dei cool pavements sono solamente indiretti, poiché contribuiscono all'abbassamento delle temperature esterne. Ferguson et al. (2008) [24] affermano che un incremento dell'albedo di 0.1 ridurrebbe la temperature epidermica di 4 °C, mentre Santamouris (2001) [19] dichiara che aumentando la riflessività della città di Los Angeles dal 10% al 35% la temperatura dell'aria si abbasserebbe di 0.6 °C. Le minori temperature superficiali limiterebbero poi l'alterazione termica delle acque meteoriche, riducendo lo shock termico per l'ecosistema acquatico. Inoltre se superfici permeabili fossero largamente presenti in città, il deflusso dell'acqua piovana potrebbe diminuire fino al 90%, determinando inferiori costi di pompaggio. Migliorerebbe infine la qualità della vita urbana: minori temperature superficiali determinerebbero migliori condizioni microclimatiche, la permeabilità delle strade aumenterebbe la sicurezza alla guida e il rumore prodotto degli autoveicoli verrebbe ridotto [24].

4.3. Aree Verdi e Vegetazione

La mitigazione dell'isola di calore urbana può essere effettuata incrementando la presenza di parchi e piante. Molte aree urbane espandendosi hanno invece rinunciato ad alberi e spazi verdi, nonostante vi siano aree che possono essere utilizzate per ospitarli. La diffusione di alberi e vegetazione può contribuire alla diminuzione delle temperature urbane grazie all'ombreggiamento e all'evapotraspirazione. La radiazione solare che oltrepassa una pianta è infatti ridotta del 10-80% d'estate e del 10-30% d'inverno, quando alcune piante non posseggono le foglie. Nelle vicinanze di un'area verde inoltre la quota di calore sensibile è inferiore, poiché parte della radiazione solare viene utilizzata per vaporizzare l'acqua invece di determinare un aumento di temperatura. L'ombreggiamento di un'abitazione prodotto da alberi di alto fusto, in grado di adombrare anche il tetto, diminuisce la temperatura delle superfici anche di 25 °C; la conseguenza è un risparmio energetico per il raffrescamento del 7-47% ed è maggiore quando le piante sono posizionate ad ovest rispetto alla casa [25]. Se un numero elevato di alberi fosse posizionato nei parcheggi e ai lati delle strade tutta la comunità cittadina godrebbe di una diminuzione di temperatura esterna come beneficio indiretto. Non bisogna trascurare inoltre il possibile contributo di parchi, all'interno dei quali i processi di evapotraspirazione sono maggiori del 300% [12], le temperature massime dell'aria sono inferiori di 2.5 °C (Gomez, Gaj e Reing 1998) e i gradi giorno di raffrescamento annuo sono inferiori del 40% rispetto alle aree urbane [19]. Alcuni studi

dimostrano che l'effetto di raffrescamento può estendersi fino a 200-400 m dai parchi [26] e che dovrebbero essere quindi largamente diffusi per apportare benefici su ampie zone. Tuttavia i vantaggi ottenibili dall'aumento della presenza di alberi nelle zone urbane non si limitano alla riduzione della temperatura ambientale. Bell, Cole et al. (2008) [25] dichiarano infatti che la presenza di alberi incrementa il valore estetico ed economico di una proprietà, contribuisce alla stabilizzazione del suolo, attenua il rumore urbano e fornisce un habitat a molte specie animali. Infine anche la qualità dell'aria viene influenzata positivamente dalla vegetazione: molti inquinanti vengono assorbiti o aderiscono alle superfici vegetali, il processo di fotosintesi riduce l'anidride carbonica atmosferica e la diminuzione della domanda di energia elettrica per il raffrescamento riduce ulteriormente l'emissione di inquinanti e di gas serra.

4.4. Green Roofs

Nelle aree urbane, in cui gli edifici sono molti e ravvicinati, lo spazio per la realizzazione di parchi ed aree verdi potrebbe non essere disponibile. E' possibile comunque sfruttare l'ampia superficie urbana occupata dalle coperture delle costruzioni, che in diverse città americane Chin et al. (2008) [18] stimano essere il 20-25%, per la realizzazione di green roofs: un tetto ricoperto da uno strato di vegetazione. La diffusione dei tetti verdi negli edifici urbani è considerata una promettente tecnica di mitigazione dell'UHI; la riduzione dell'albedo e l'incremento dei processi di evapotraspirazione permettono infatti di limitare le temperature epidermiche delle superfici, quindi di ridurre il flusso di calore entrante e il riscaldamento dell'aria. Ad esempio Bell, Berghage et al. (2008) [27] riportano che a Chicago mentre la temperatura di un tetto convenzionale era di 76 °C, quella di vicino un green roof variava tra 33 °C e 48 °C e consentiva una temperatura inferiore di 4 °C dell'aria sovrastante.

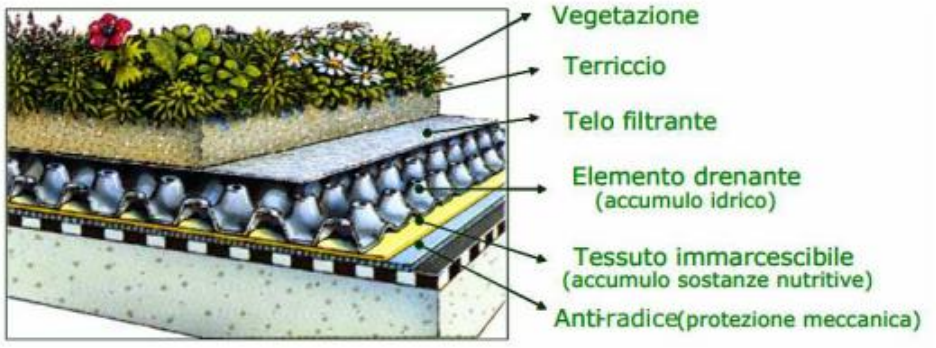


Figura 60. Differenti strati presenti in un green roof (Lazzarin, Castellotti e Busato 2004) [28]

La realizzazione dei tetti verdi tuttavia è un intervento costoso rispetto ad altri azioni di mitigazione, poiché è necessaria una struttura composta da diversi strati in grado di offrire alla vegetazione condizioni di vita stabili ed evitare effetti negativi all'edificio. Ogni strato installato assolve una specifica funzione (Figura 60): una membrana impermeabile e una guaina antiradice impediscono il degrado dei materiali sottostanti, un elemento drenante riceve l'acqua in eccesso dal terriccio e uno strato filtrante trattiene il terreno di coltura mentre permette il passaggio dell'acqua piovana. La tipologia di vegetazione che può essere accolta dal green roof è funzione dello spessore dello strato di terriccio, dei carichi sopportabili dal solaio e del grado di manutenzione che si è disposti ad effettuare; sulla base di queste caratteristiche i tetti verdi vengono classificati in estensivi ed intensivi (Figura 61). Si definiscono estensivi i tetti verdi che richiedono limitata manutenzione: sono realizzabili anche su coperture con inclinazione di 30° ma la varietà di piante che ospitano non è elevata poiché la scelta avviene tra specie resistenti alla siccità e a sviluppo contenuto. Al contrario i green roofs intensivi sono simili a parchi e possono ospitare qualsiasi tipologia di piante. Per contro necessitano di maggiore manutenzione ed irrigazione, il costo di installazione è superiore e non possono essere realizzati con interventi di retrofitting poiché gli elevati carichi statici e dinamici richiedono un'apposita progettazione.

Figura 61. Le tipologie di green roofs: estensivo (sinistra) ed intensivo (destra) Molti studi sono stati effettuati sull'effetto di raffrescamento che i tetti verdi sono in grado di produrre. Lazzarin, Castellotti e Busato (2004)

hanno studiato i benefici procurati da un green roof realizzato nell'ospedale di Vicenza; durante l'estate in condizioni di terreno secco il carico termico entrante nell'edificio era inferiore fino al 60% rispetto a un tetto convenzionale, mentre in condizioni di suolo bagnato i processi di evapotraspirazione hanno addirittura provocato l'inversione della direzione del flusso termico. L'impatto dei tetti verdi può inoltre interessare un'intera città in caso di

utilizzo diffuso. Bell, Berghage et al. (2008) [27] riportano che se a Chicago il 50% dei tetti fosse trasformato la temperatura esterna diminuirebbe di 0.1 -0.8 °C e irrigandoli si potrebbe ottenre una diminuzione di temperatura fino a 2 °C. I benefici derivanti dall'installazione di un green roofs non si limitano alla mitigazione dell'effetto UHI; i numerosi effetti positivi sono quelli esposti nel paragrafo precedente ottenibili dall'aumento della vegetazione, ma senza la limitazione di dover disporre necessariamente di suolo non impegnato da edifici.

4.2. Materiali Retro-Riflettenti

4.2.1. 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 rinviato verso la sorgente che lo ha emesso. L'angolo di riflessione dipende dalle caratteristiche di rifrazione del materiale.

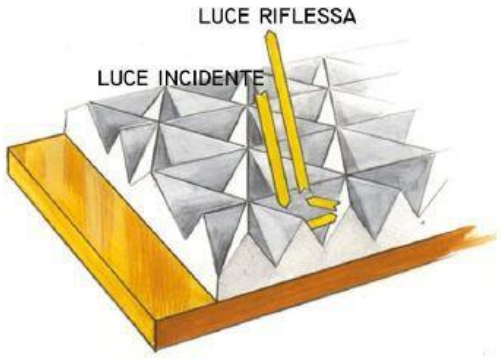


Figura 62. Modalità di riflessione materiali RR monocomponenti

- 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 rinviato verso la sorgente che lo ha emesso.

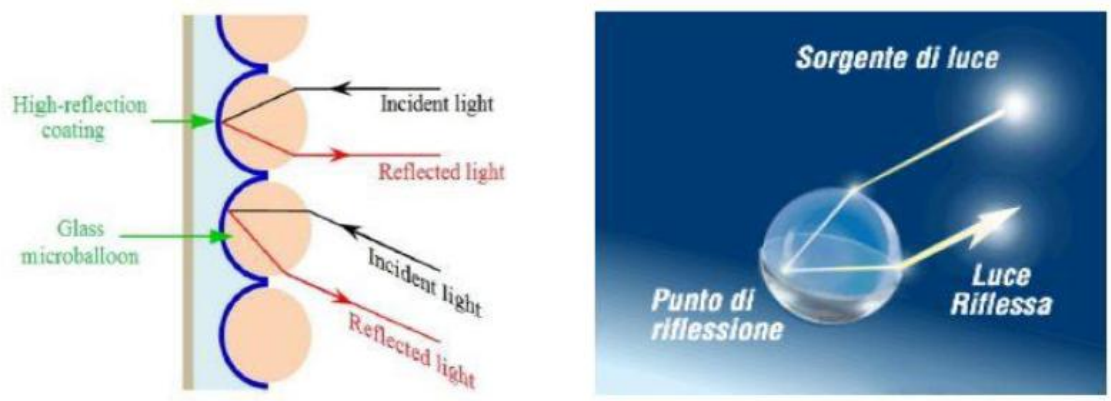


Figura 63. Modalità di riflessione materiali RR con sistemi ottici bicomponenti

A differenza delle tinte RR a microsfere 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 microsfere 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 microsfere, 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 microsfere 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 microsfere di vetro difettose;
- granulometria;
- contenuto di sostanze pericolose;
- resistenza agli agenti chimici.

L'operazione di applicazione delle microsfere di vetro risulta essere particolarmente delicata poiché è necessario garantire un adeguato inserimento delle microsfere, 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): β
- l'angolo di divergenza: α
- il coefficiente areico di intensità luminosa (R')
- la luminanza
- la riflettanza

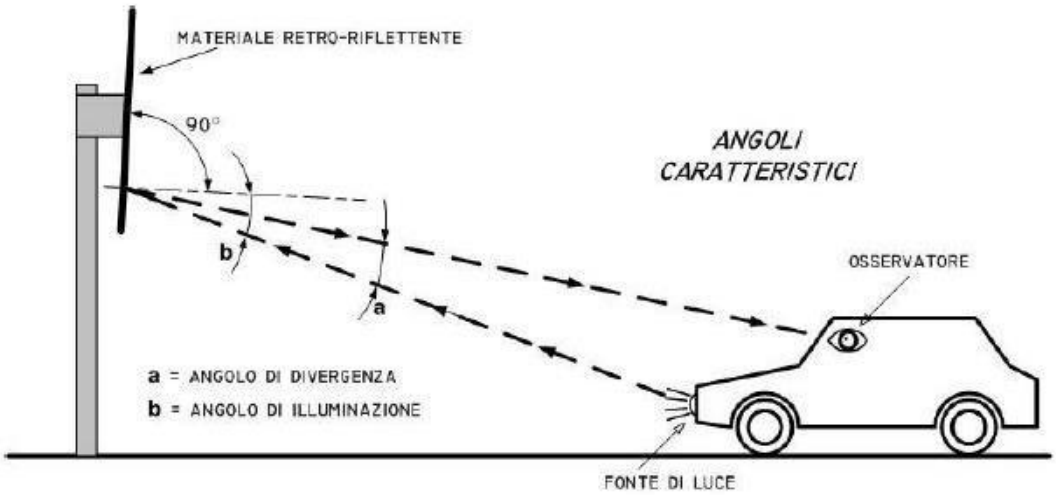


Figura 64. Angoli caratteristici per materiali retroriflettenti

Dove l'angolo di illuminazione (β) è l'angolo compreso tra il fascio di luce incidente e la direzione perpendicolare alla superficie del materiale rifrangente, e l'angolo di divergenza (α) 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 del mio studio è fornire risultati sperimentali utili per la comprensione delle potenzialità dell'utilizzo di materiali RR, in forma di pittura, concepito per rivestire le facciate degli 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 mia 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.

4.2.2. 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:

$$\rho_{\theta} = F(\theta_{inc})$$

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).

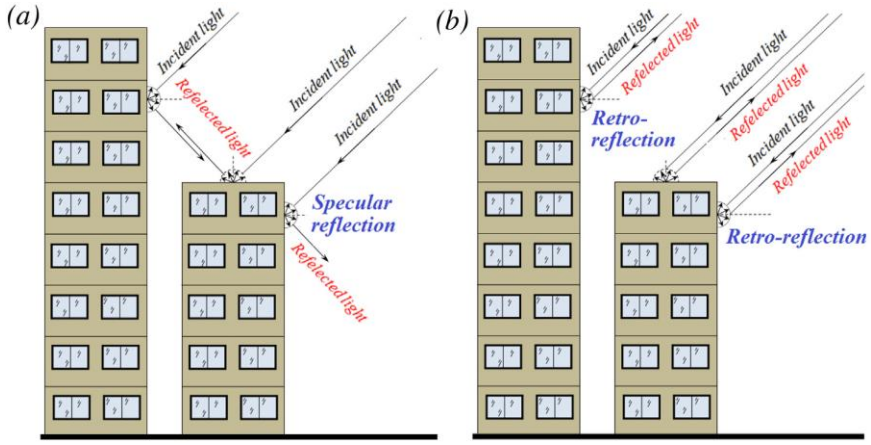


Figura 65. a) Materiali riflettenti b) Materiali retroriflettenti

5. Verifica strumentale e misure

5.1. 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 gonio- fotometriche 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.

5.1.1. La funzione BT(R)DF

La maggior parte dei goniofotometri misurarano 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. 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, questa BT(R)DF può essere descritta come segue:

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

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

σ, λ sono la polarizzazione e la lunghezza d'onda della radiazione;

θ_i,φ_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 (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 quasi-spettrali BT(R)DF, 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 quasi-spettrali BT(R)DF 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 Goniofotometri misurano solo la funzione fotometrica della BT(R)DF, come definita dalla CIE, la quale può essere descritta matematicamente come segue:

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

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

θ_i,φ_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.

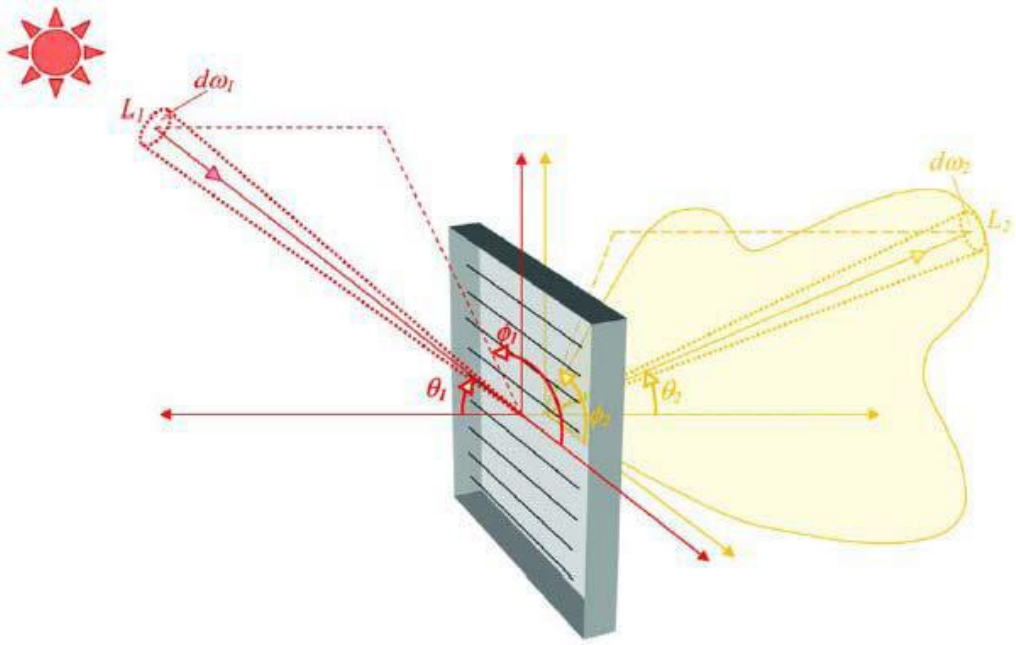


Figura 66. Rappresentazione della BT(R)DF

Le unità di misura della BTDF sono espresse per steradiante o sr-1. Le componenti della BTDF sono mostrate nella Figura 66 mentre nella Figura 67 sono mostrate le componenti delle BRDF di materiali opachi con comportamento vario.

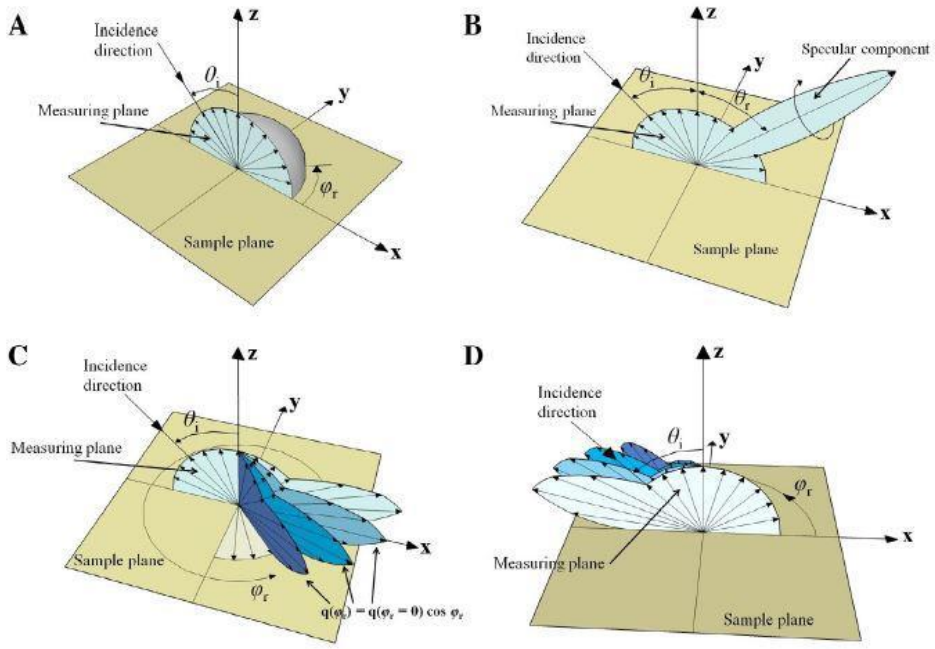


Figura 67. Componenti delle BRDF per materiale lambertiano (A), speculare misto (B e C) e RR misto (D).

La misura della BTDF fotometrica richiede perciò la conoscenza degli angoli di incidenza della radiazione (θ_1,φ_1), l'illuminamento totale sul campione (indicato nella Figura 67 come L_1*dw_1*cos $\theta 1$)), la luminanza L_2 trasmessa (o riflessa) dal campione nella direzione (θ_2,φ_2). La BT(R)DF può così essere calcolata per tutti gli angoli noti utilizzando l'equazione su scritta.

5.1.2. 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 finestrature di nuova concezione. È stato suggerito che la conoscenza dettagliata delle proprietà ottiche delle finestrature, è necessaria "per ottimizzare l'uso e la produzione avanzata di sistemi di finestratura, 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 finestratura 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 l'illuminazione e di calcolo del carico termico per gli edifici, possono descrivere in modo particolareggiato le prestazioni di questi sistemi supportati dalla BTDF. 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 finestrature 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.

5.1.3. 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) ρ, trasmissione τ ed assorbimento α come segue:

$$\rho = \frac{dE_{ref}}{dE_{inc}}$$

$$\tau = \frac{dE_{tra}}{dE_{inc}}$$

$$\alpha = \frac{dE_{abs}}{dE_{inc}}$$

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:

$\rho + \tau + \alpha = 1$

e inoltre, per un corpo opaco, ovvero che ha τ=0:

$\rho + \alpha = 1$

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

5.1.3.4. Goniofotometro del LIFT

Il Goniofotometro in dotazione al LIFT (Laboratorio interdipartimentale di Fisica Tecnica) è un Goniofotometro a scansione, montato in assetto gonioriflettometrico. 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°.

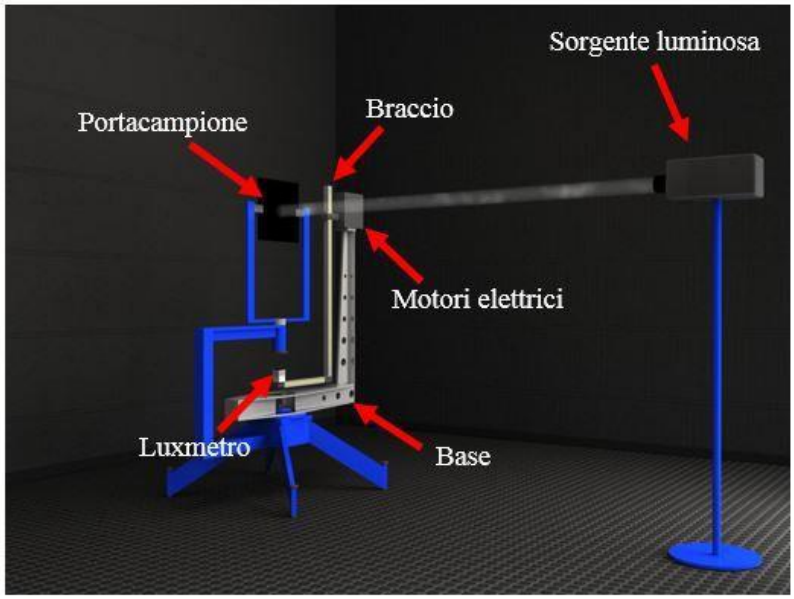


Figura 68. Rappresentazione dell'apparato in dotazione al LIFT.

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(λ). La risoluzione dello strumento è di 1 lux con un'incertezza pari a 0,5 lux ed un range di misura che spazia tra 0 e 5000 lux. La sua sensibilità è di 5 – 500 $mV\ lux$ e ha un segnale di uscita con range $0 \div 10\ V$. Assorbe una corrente di 10 mA con una temperatura operativa compresa tra $-20\ °C\ e\ +60\ °C$. Il valore di saturazione del luxmetro è di circa 5000 lux, oltrepassati i quali, i valori misurati risultano bloccati su questo valore.

Figura 69. Luxmetro HD 2021T

A distanza fissa di 1300 mm dal porta-campione è posta una sorgente luminosa, una lampada professionale con 400 W di potenza della *LOT Quantum Design* mod. *LSN6016*, che presenta uno spettro di emissione compreso tra i 350 e 1200 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 mm, illumina il provino.

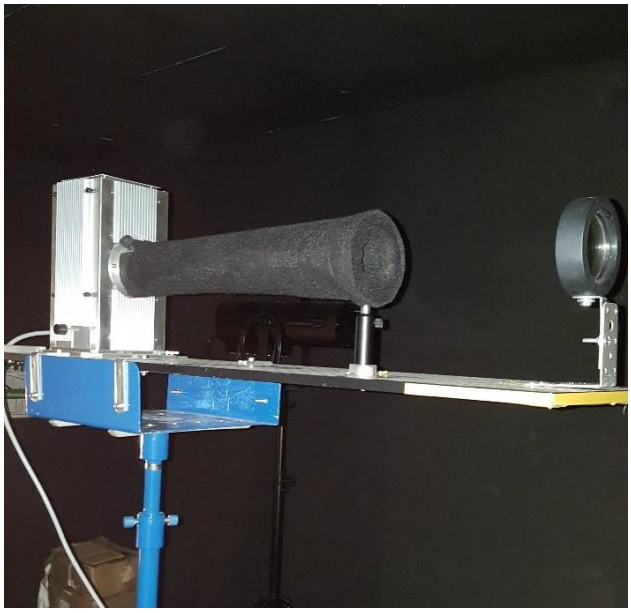


Figura 70. Sorgente luminosa con banco ottico di focalizzazione

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 Goniofotometro, mediante un videoterminale che permette di lavorare sia in automatico che in manuale.

5.1.3.4.1. 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 Goniofotometro 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.

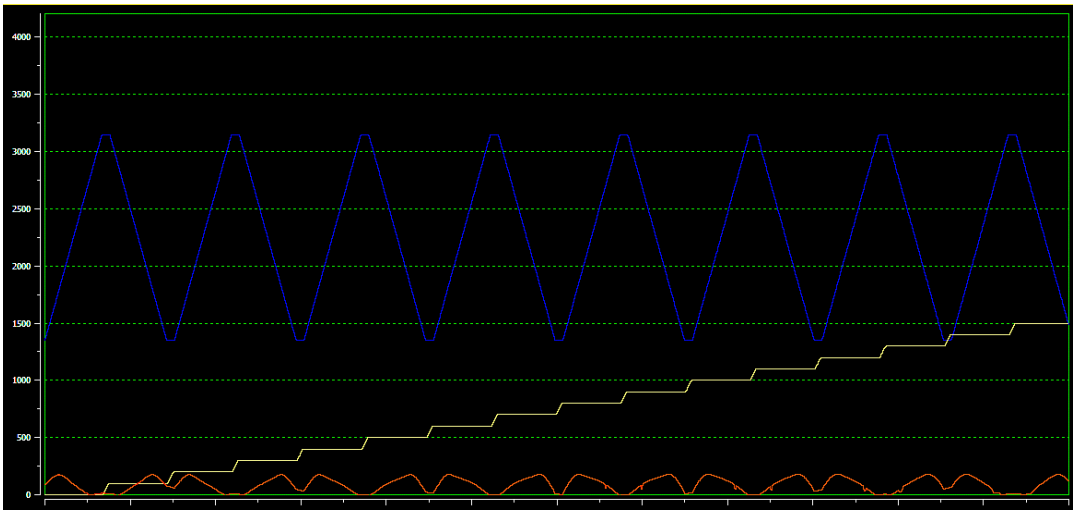


Figura 71. Esempio di visualizzazione dati del software d'acquisizione: Curva blu-braccio, curva gialla- base, curva rossa-lux

5.1.3.5. 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 72 - 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.

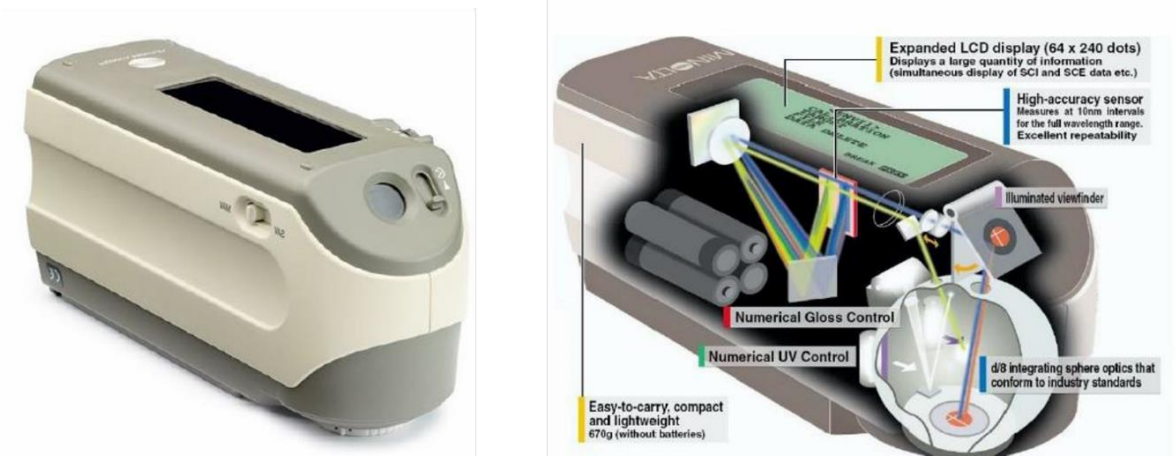


Figura 72. Spettrofotometro CM 2600D: componenti e principio di funzionamento

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 dai 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 interriflessioni

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:

$$SCI - SC = SCE$$

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

$$\frac{E_{sfera\ campione}}{E_{sfera\ riferimento}}$$

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:

$$\rho = \frac{E_{riflesso}}{E_{incidente}} \qquad\qquad \rho_{campione} = \frac{E_{campione} - E_N}{E_B - E_N}$$

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 λ si ottiene:

$$\rho_{campione} = (\lambda) \cdot C$$

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

$$\rho_{campione}(\lambda)_1 \cdot C(\lambda)_1 = \rho_{misura}\ (\lambda)$$

Si faccia presente che lo spettrofotometro impiegato consente di misurare solo le lunghezze d'onda nel campo del visibile, perciò si è dovuto necessariamente ipotizzare 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.

5.2. Misure in laboratorio

5.2.1. Campioni analizzati

Le misure eseguite riguardano un campione di spectralon e un campione con vernice con sfere di vetro retro-riflettente. I test sono stati effettuati per analizzare le modalità di distribuzione spaziale delle riflessioni (emettenza) e per la determinazione della riflettanza. I grafici polari riportati mostrano la distribuzione della radiazione riflessa (emettenza) per angoli azimutali pari a 80° (ovvero sul piano di mezzeria del fascio incidente).

5.2.1.1. 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, ovverosia 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.

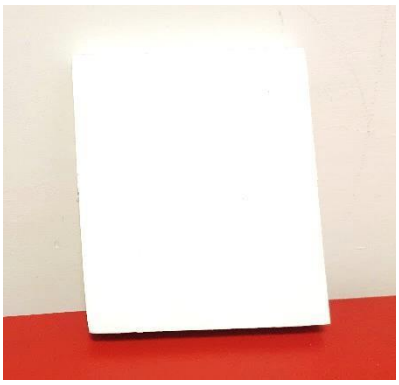


Figura 73. Campione di Spectralon a disposizione del LIFT

5.2.1.2. 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.

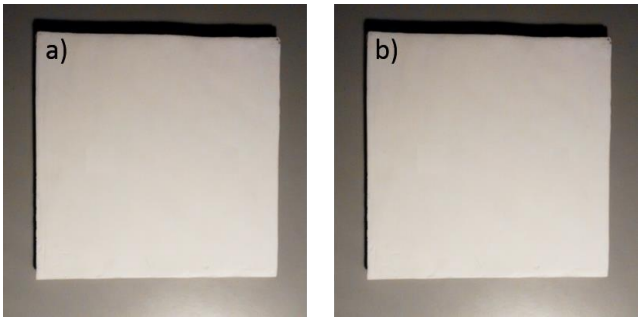


Figura 74. Campioni di a) vernice al quarzo e b) vernice cool termoisolante.

5.2.1.3. 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 microsfere 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 microsfere di vetro di diametro compreso tra i 35 µm ed i 50 µm, con rotondità del 95% ed un indice di rifrazione pari a 2.2.

Figura 75. Preparazione del campione

Inoltre, le microsfere 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 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 poliuretanico 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 all'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 76 è possibile esaminare il campione terminato, pronto per il posizionamento sul porta-campione del Goniofotometro.

Figura 76. Campione di tinta retro-riflettente

5.2.2. Risultati delle misure di laboratorio

Durante la sua movimentazione, il *braccio* del Goniofotometro, 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°, 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 77 si può osservare questo fenomeno analizzato sullo *Spectralon* per un angolo di incidenza del fascio luminoso sul campione pari a 8°.

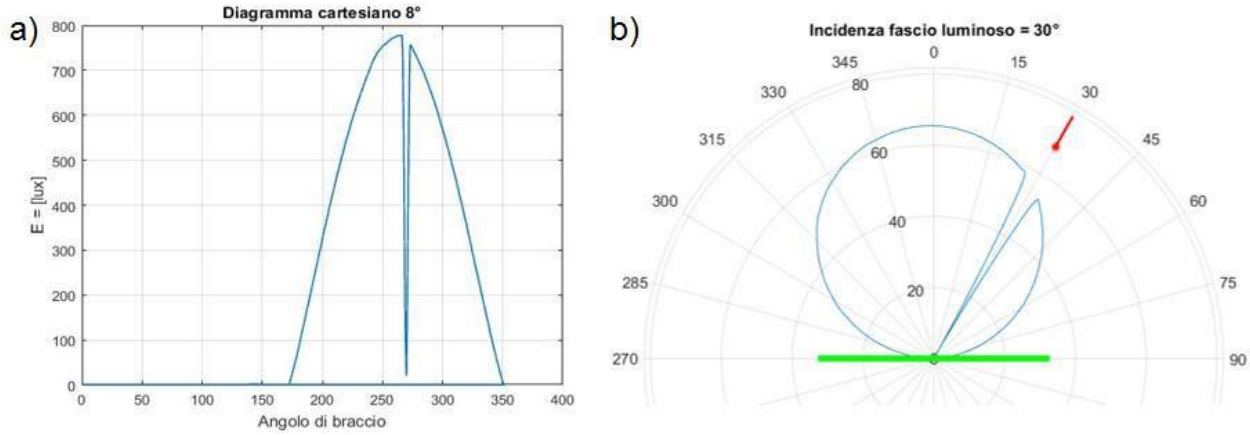


Figura 77. Caduta dei valori per interferenza del braccio con il fascio: Spectralon cartesiano 8° e polare 30°.

Nella Figura 78 si può vedere la sovrapposizione di tutti i diagrammi per ogni *base* superiore ai 75°; la finestra di oscuramento è tanto più ampia quanto cresce il valore dell'angolo di *base*.

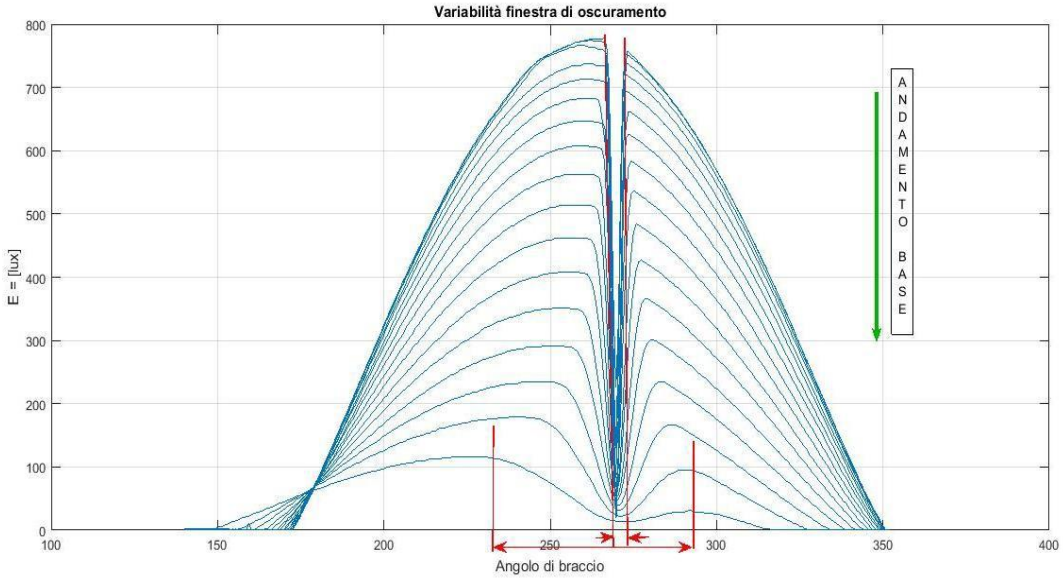


Figura 78. Rappresentazione della variabilità della finestra di oscuramento

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 79.

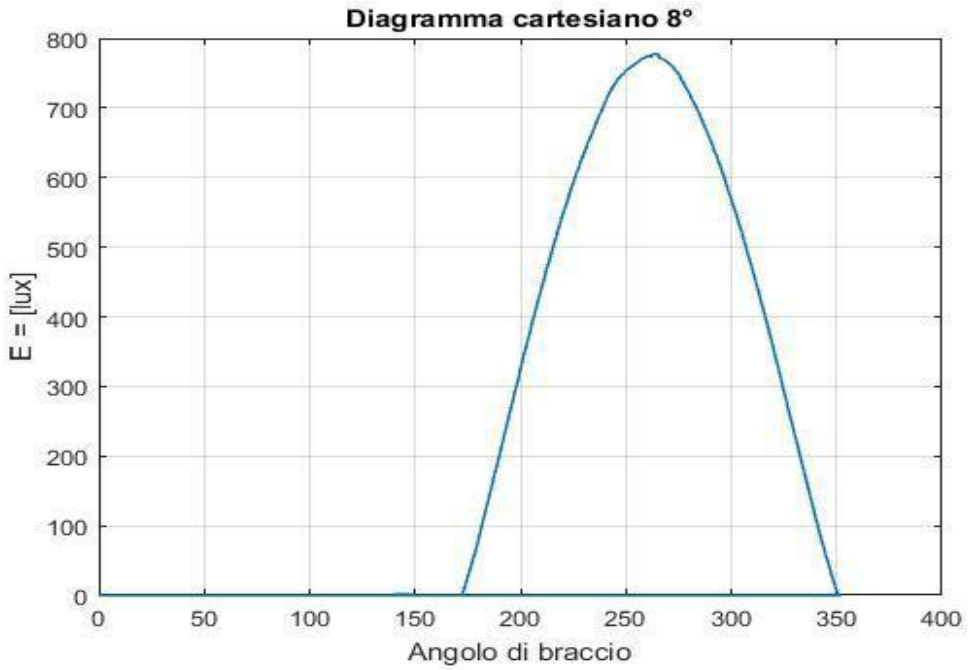


Figura 79. Dopo il post-processing

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 Goniofotometro 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.

5.2.2.1. 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.

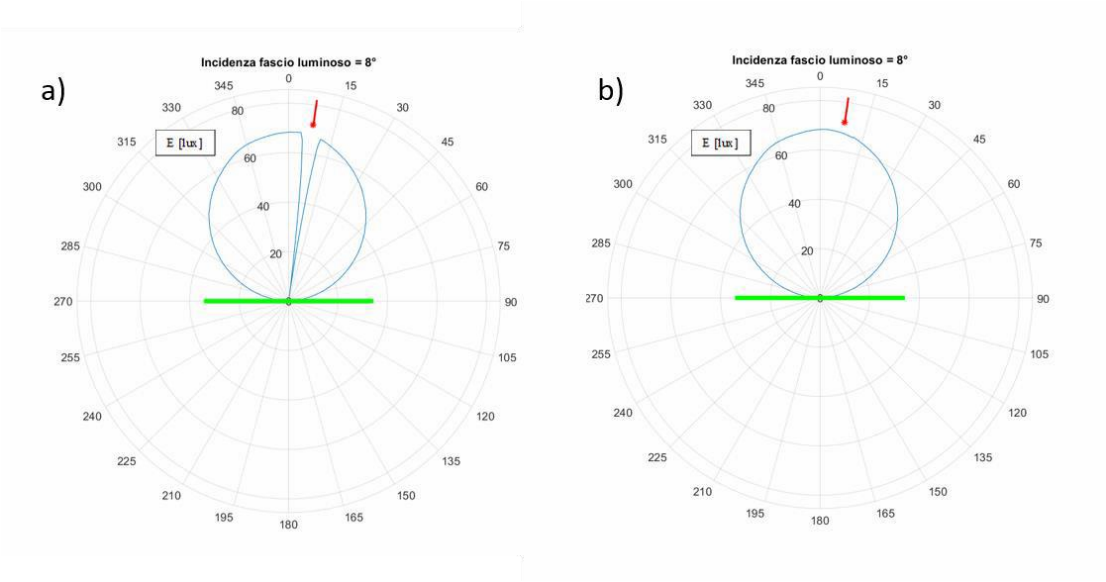


Figura 80. Diagramma polare spectralon incidenza 8°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

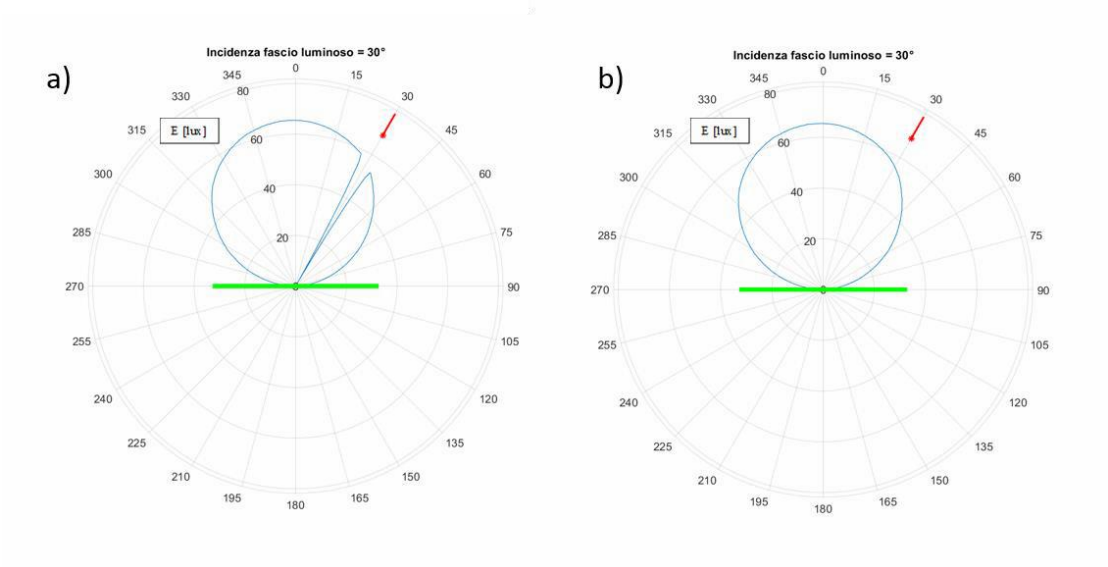


Figura 81. Diagramma polare spectralon incidenza 30°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

5.2.2.2. Diagrammi polari tinta Retro-Riflettente

Per la tinta retroriflettente con tecnologia a microsfere 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.

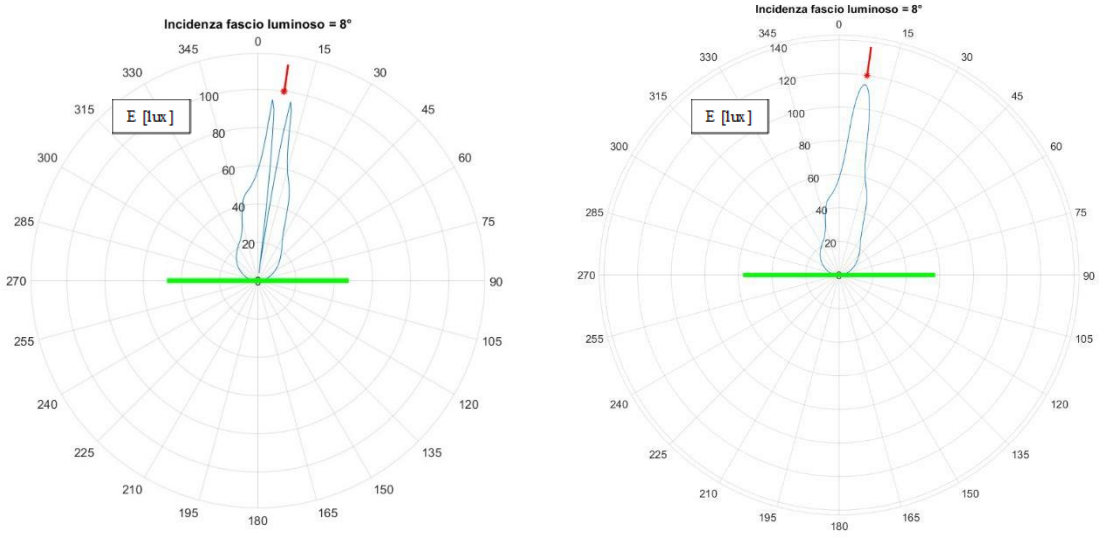


Figura 82. Diagramma polare materiale RR incidenza 8°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

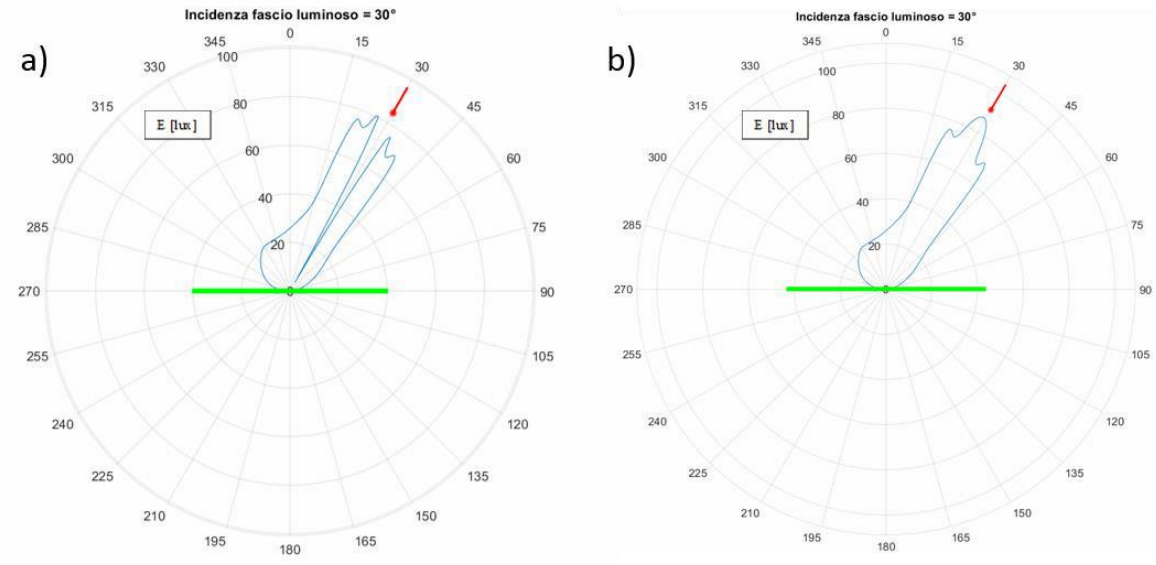


Figura 83. Diagramma polare materiale RR incidenza 30°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

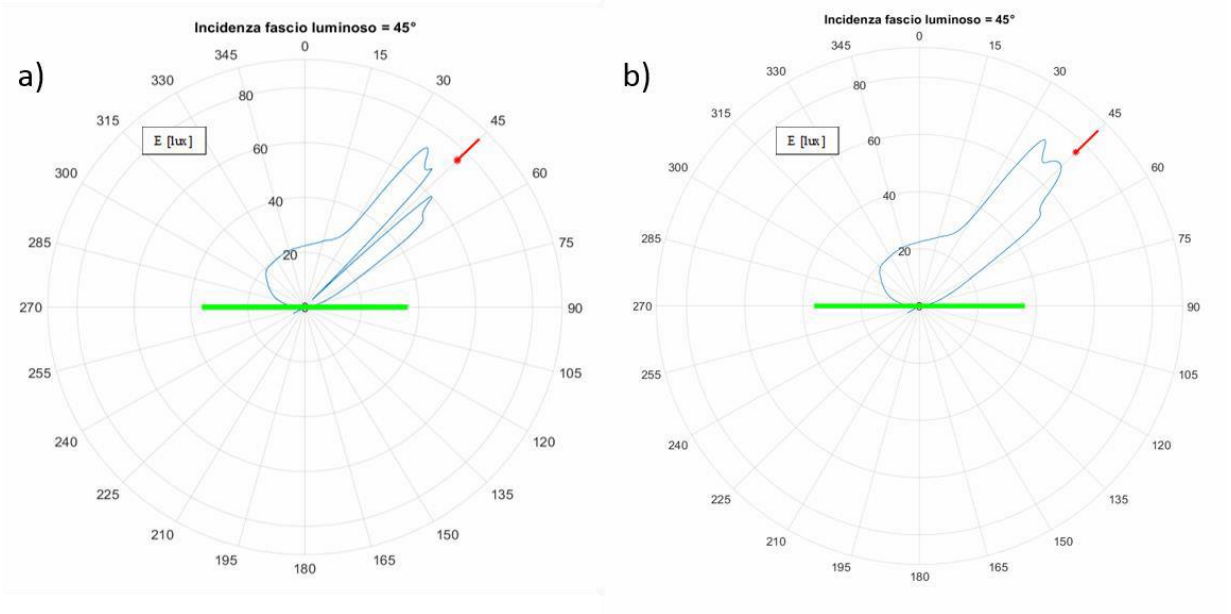


Figura 84. Diagramma polare materiale RR incidenza 45°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

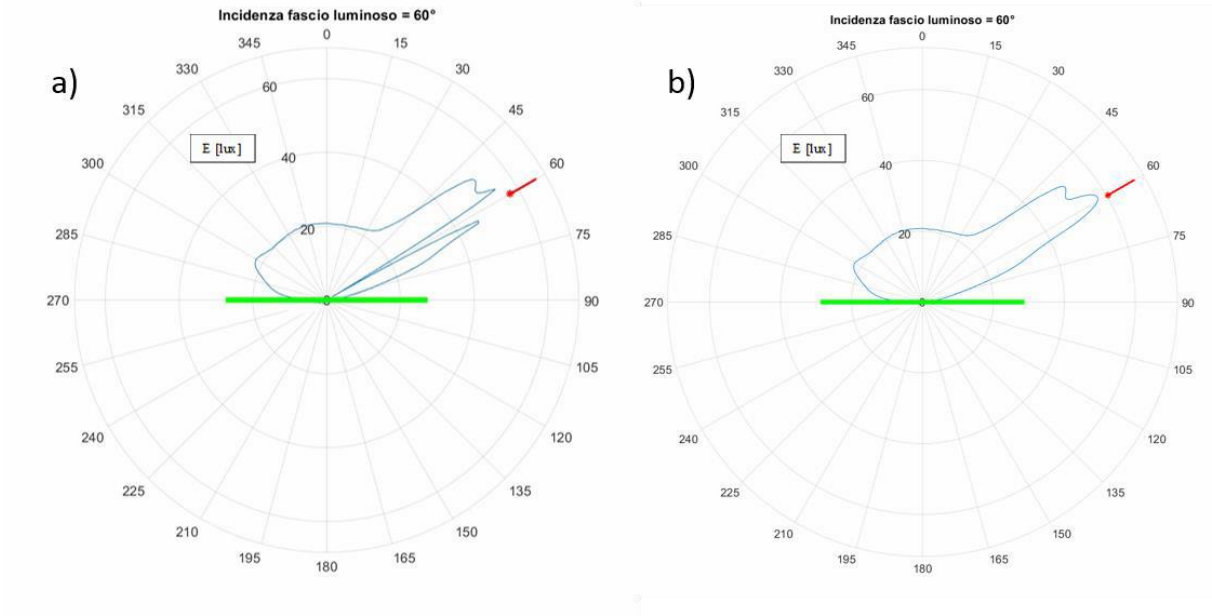


Figura 85. Diagramma polare materiale RR incidenza 60°: a) dato grezzo, b) dato corretto.

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.

5.2.2.3. Diagrammi polari vernice al quarzo

Per la pittura al quarzo e per la vernice cool sono state effettuate le misure per angoli di incidenza di 8°, 30°, 45° e 60° dal momento che il campione è stato preparato della misura di 20x20cm. Il campione si comporta come un materiale lambertiano. Nelle Figure 86 e 87 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).

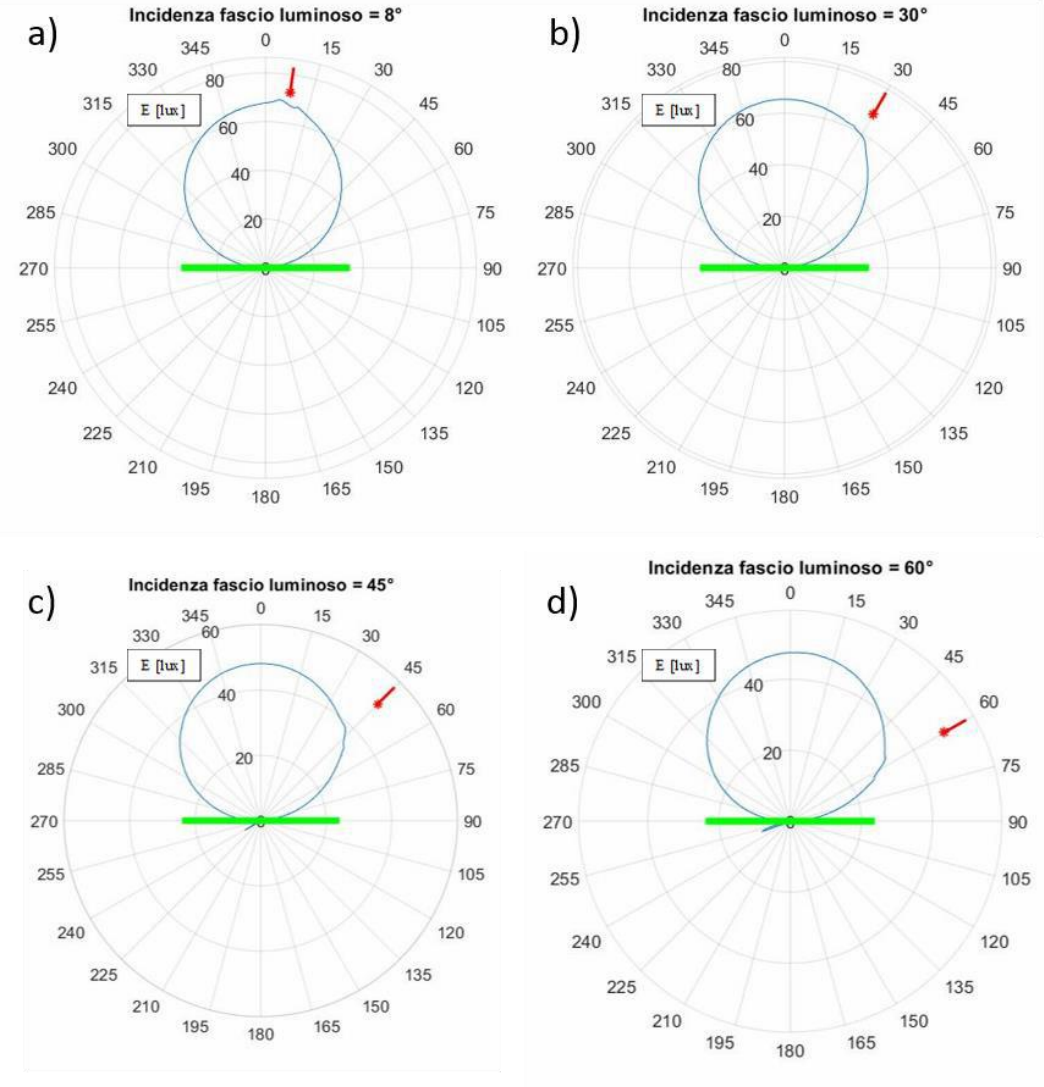


Figura 86.Diagrammi polari vernice al quarzo: a) incidenza 8°, b) incidenza 30°, c) incidenza 45°, d) incidenza 60°

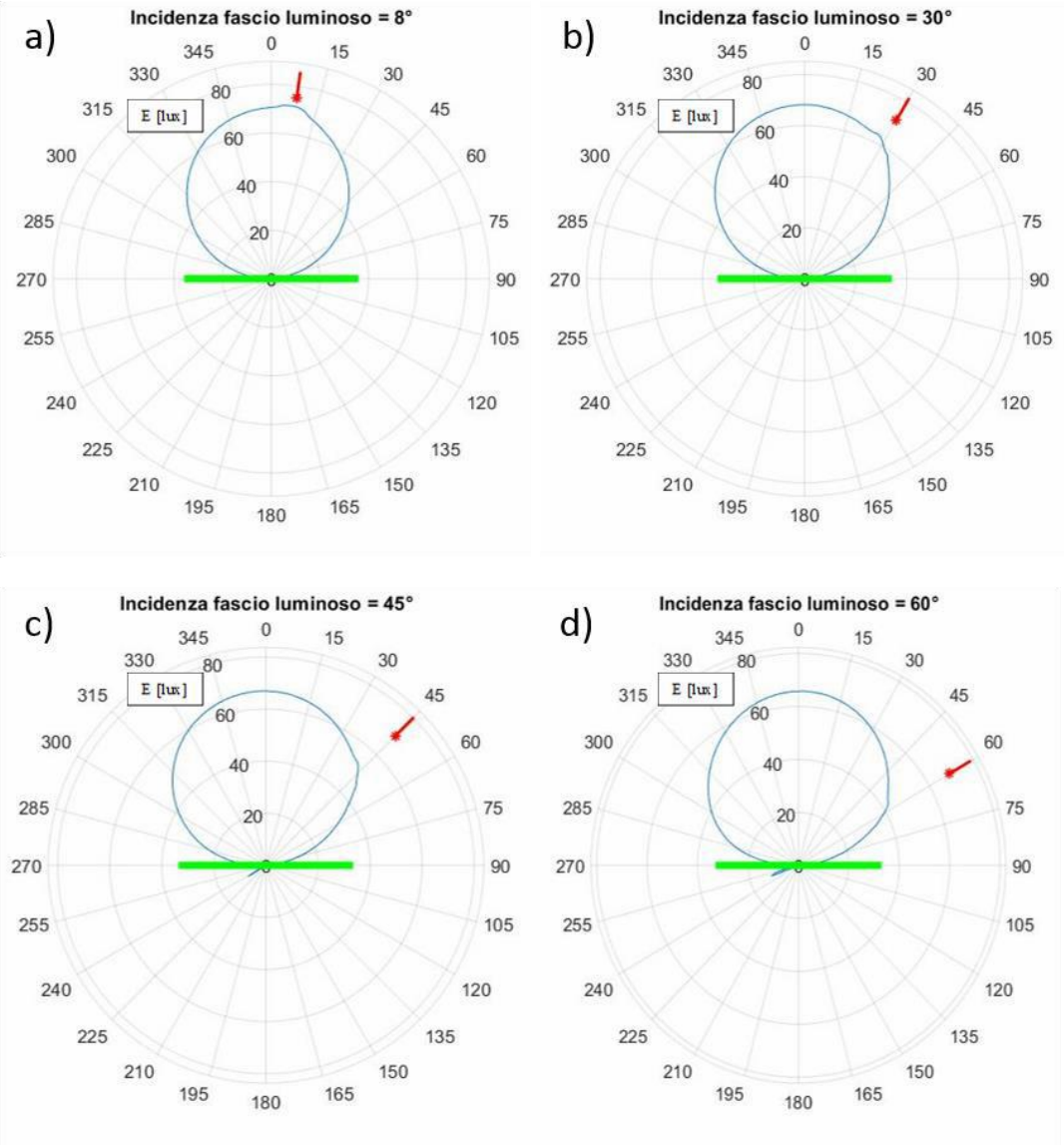


Figura 87. Diagrammi polari vernice cool: a) incidenza 8°, b) incidenza 30°, c) incidenza 45°, d) incidenza 60°.

5.2.2.4. Calcolo dell'energia riflessa

Partendo dalla definizione di flusso luminoso e dal sistema di riferimento utilizzato in Figura88:

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

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

Passando agli integrali si ottiene:

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

Dove:

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

E(θ,φ) rappresenta i valori di illuminamento misurati dal luxmetro;

dA rappresenta la calotta sferica infinitesima;

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

φ rappresenta l'angolo di *braccio;*

θ rappresenta l'angolo di base;

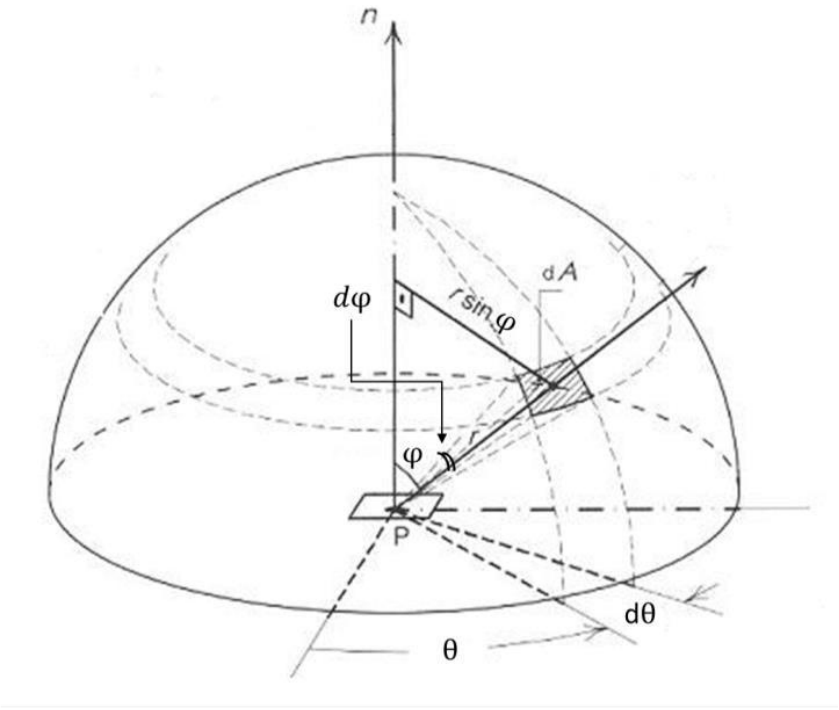


Figura 88. Sistema di riferimento per l'impostazione del calcolo del flusso luminoso riflesso dal campione.

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

$$E(\theta, \varphi) = costante = E$$

$$\phi_{r_E_C} = E \cdot r^2 \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{\varphi=0}^{\varphi=\pi} \sin\varphi\ \ d\theta\, d\varphi$$

$$\phi_{r_E_C} = E \cdot r^2 \cdot [-\cos\varphi]_0^{\pi} \cdot [\theta]_0^{2\pi} = E \cdot r^2 \cdot 2 \cdot 2\pi$$

$$\phi_{r_E_C} = 4\pi r^2 \cdot E$$

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

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

Dove:

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

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi_{i+1}+\varphi_i}{2}$$

$$\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i$$

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:

$$\rho_{campione} = \frac{\phi_{riflesso}}{\phi_{incidente}}$$

5.2.2.5. 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 ± 3 *lux*, ed una risoluzione di 1 *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 89 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.

Figura 89. Luxmetro "Testo 540"

I 9 punti evidenziati in Figura 90 sullo spot luminoso ellittico indicano le posizioni in cui è stato prelevato il valore di illuminamento con il luxmetro da campo.

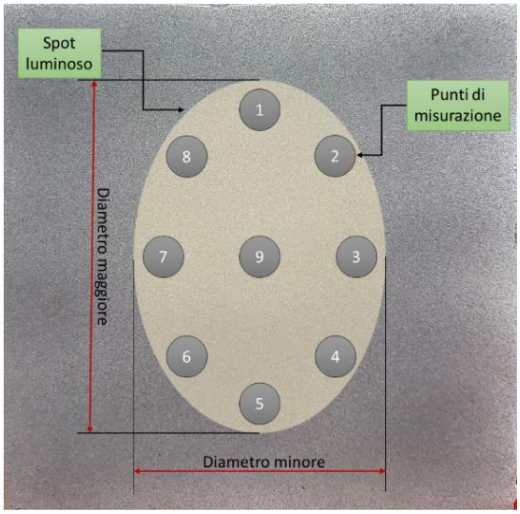


Figura 90. Spot luminoso ellittico sul campione e punti di prelevazione dei valori di illuminamento

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:

$$\phi_{medio\ incidente} = E_{medio\ incidente} \cdot A_{spot}$$

$$A_{spot} = \pi \cdot \frac{D_{magg}}{2} \cdot \frac{D_{min}}{2}$$

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.

5.2.2.6. 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 36:

Tabella 36. Valori di riflettanza per vernice al quarzo lambertiana e retroriflettente

VERNICE AL QUARZO				
	Area spot (m^2)	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
8°	0.0049	189.2	222.2	85.1
30°	0.0055	184.6	209.5	88.1
45°	0.0071	136.4	205.7	66.2
60°	0.0102	136.9	188.7	72.5

VERNICE RETRO-RIFLETTENTE				
	Area spot (m^2)	Flusso riflesso (lm)	Flusso incidente (lm)	Riflettanza (%)
8°	0.0049	84.9	222.2	38.2
30°	0.0055	81.9	209.5	39.1
45°	0.0071	80.4	205.7	39.1
60°	0.0102	79.8	188.7	42.3

5.2.2.7. Risultati Spettrofotometria LIFT

I risultati dell'analisi spettrale dei campioni a disposizione sono riportati in Figura 91. 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°. 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 37. 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

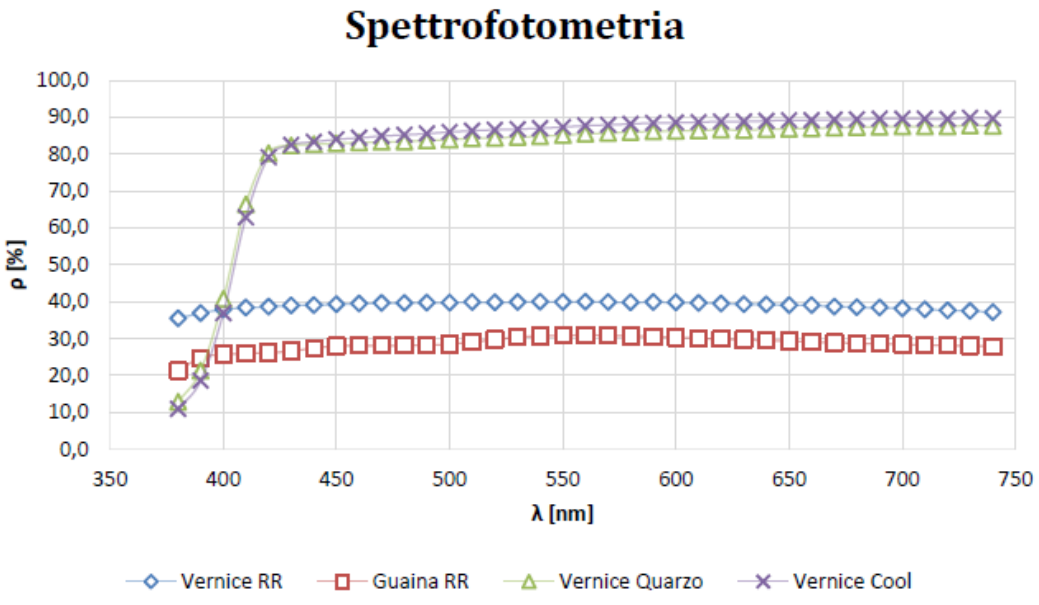


Figura 91. Risultati della spettrofotometria

5.3. Misure sperimentali

Le misure riguardanti la valutazione dei materiali retro-riflettenti sono state effettuate con la configurazione riportata nello schema in Figura 92.

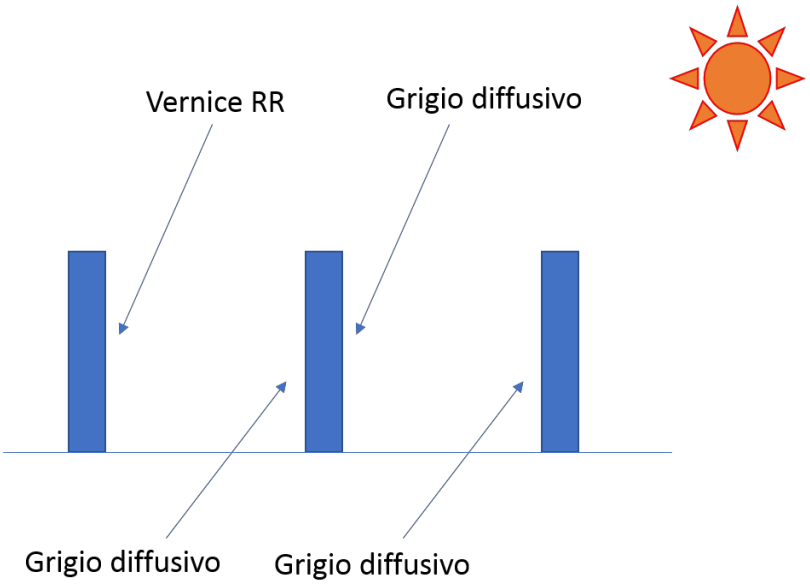


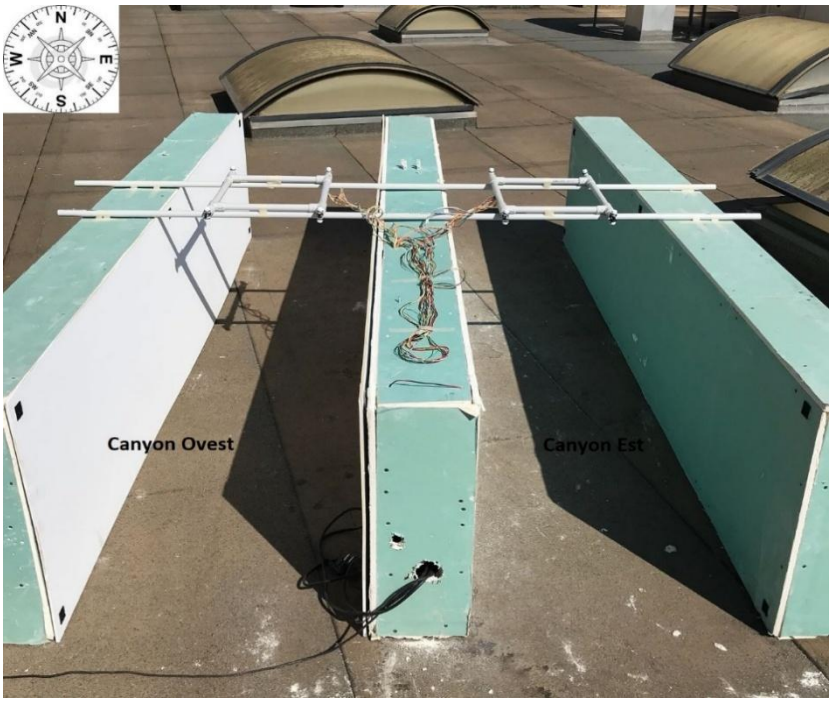
Figura 92. Configurazione del setup con pannello con vernice RR.

Nelle giornate del 6, 25, 26 e 29 settembre sono state effettuate misure in parallelo sui due canyon. Un pannello con vernice RR con coefficiente di riflessione a 8° pari a 0.38 è stato installato sulla superficie affacciata a est di uno dei due canyon. Tutti gli altri pannelli presentavano una vernice grigia tradizionale diffusiva con valore del coefficiente di riflessione pari a 0.38. In tal modo, viste le stesse condizioni del coefficiente di riflessione delle pareti nei due canyon, le differenze che si sarebbero riscontrate dai dati sperimentali avrebbero dovuto riferirsi al solo effetto retroriflettente della vernice RR.

Tabella 38. Tabella riassuntiva misurazioni

	CONFIGURAZIONE			
	Canyon EST		**Canyon OVEST**	
06-set	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**E**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**E**
	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**O**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**O**
25-set	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**E**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**E**
	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**O**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**O**
26-set	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**E**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**E**
	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**O**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**O**
29-set	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**E**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**E**
	Grigio Barozzi RQ + NxtRef (ρ=0.39)	**O**	Grigio Barozzi RQ (ρ=0.39)	**O**

Canyon con facciate orientate Est-Ovest



6 Settembre

Tabella 39. Misure di Albedo sul canopy layer, canyon Est e canyon Ovest

TIME	Albedo RR	Albedo LAMB
11:30:00	11.72	11.54
12:00:00	11.14	10.15
12:30:00	9.83	8.83
13:00:00	9.39	8.39
13:30:00	9.88	8.96
14:00:00	10.59	9.68
14:30:00	10.82	10.53
15:00:00	11.34	11.23
15:30:00	11.99	11.81
16:00:00	12.77	12.60
16:30:00	13.32	13.29
17:00:00	14.06	14.30

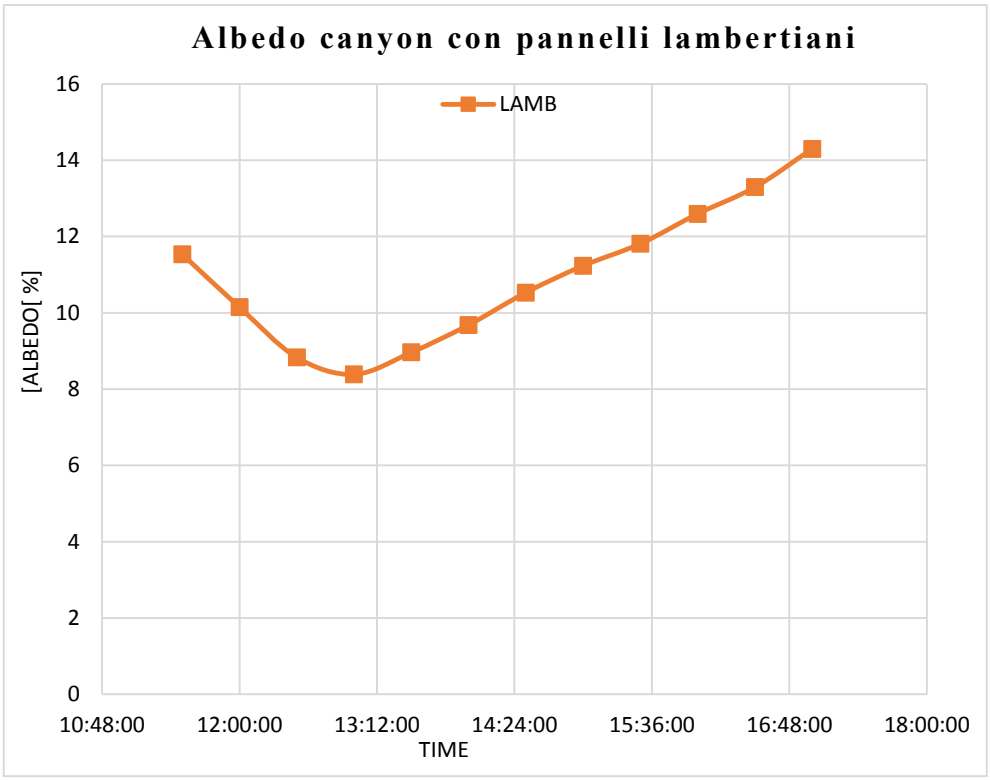


Figura 93. Misure di Albedo sul canopy layer, del canyon Ovest

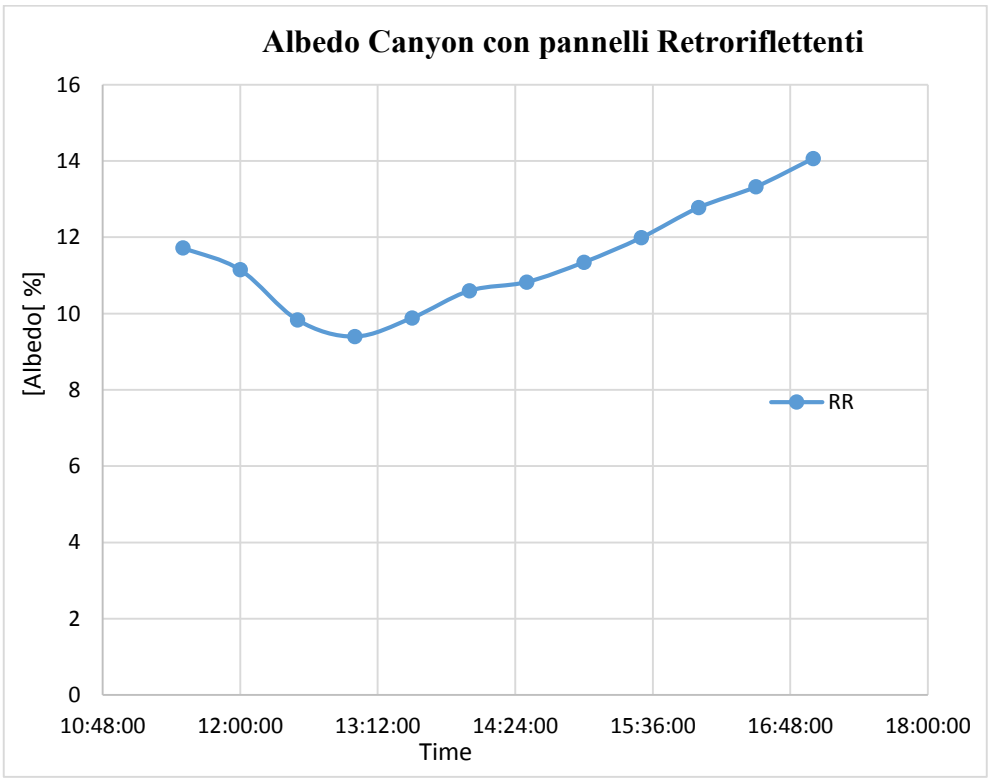


Figura 94. Andamento Albedo sul canopy layer del canyon Est

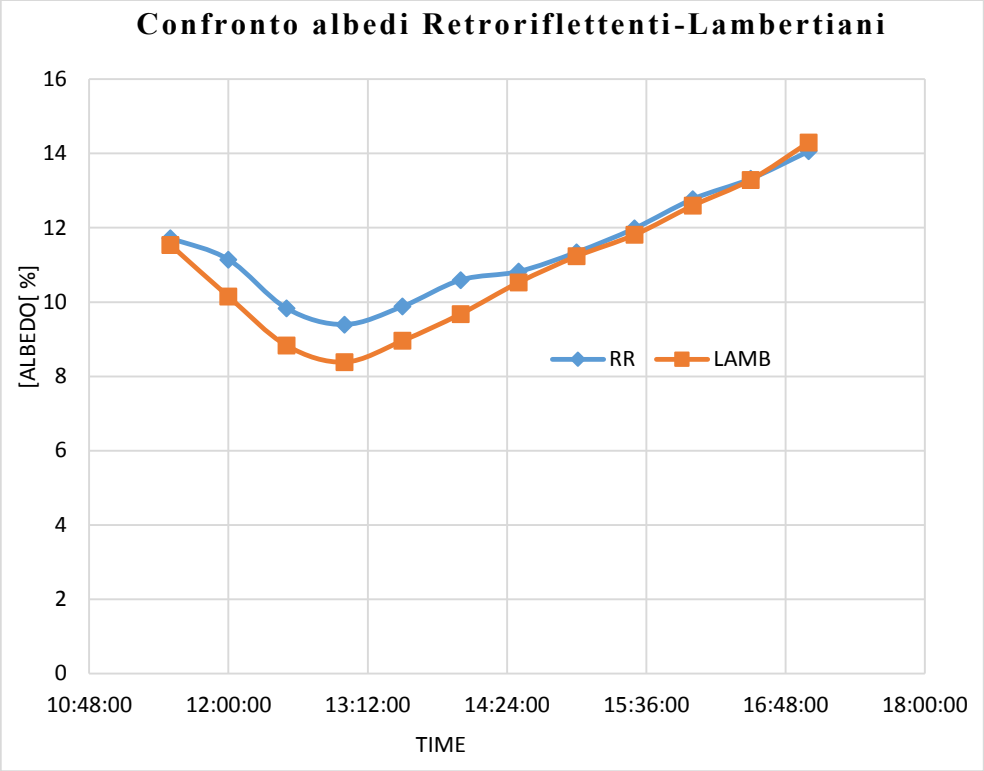


Figura 95. Andamento Albedo sul canopy layer Canyon Est e Canyon Ovest

Scarto medio= 1.01%

25 Settembre

Tabella 40. Misure di Albedo sul canopy layer Canyon Est e Canyon Ovest

TIME	Albedo RR	Albedo LAMB
11:00:00	13.75	12.79
12:00:00	12.03	11.04
13:00:00	11.39	9.76
14:00:00	10.28	8.93
15:00:00	13.89	13.45
16:00:00	15.24	15.30
17:00:00	16.98	16.99

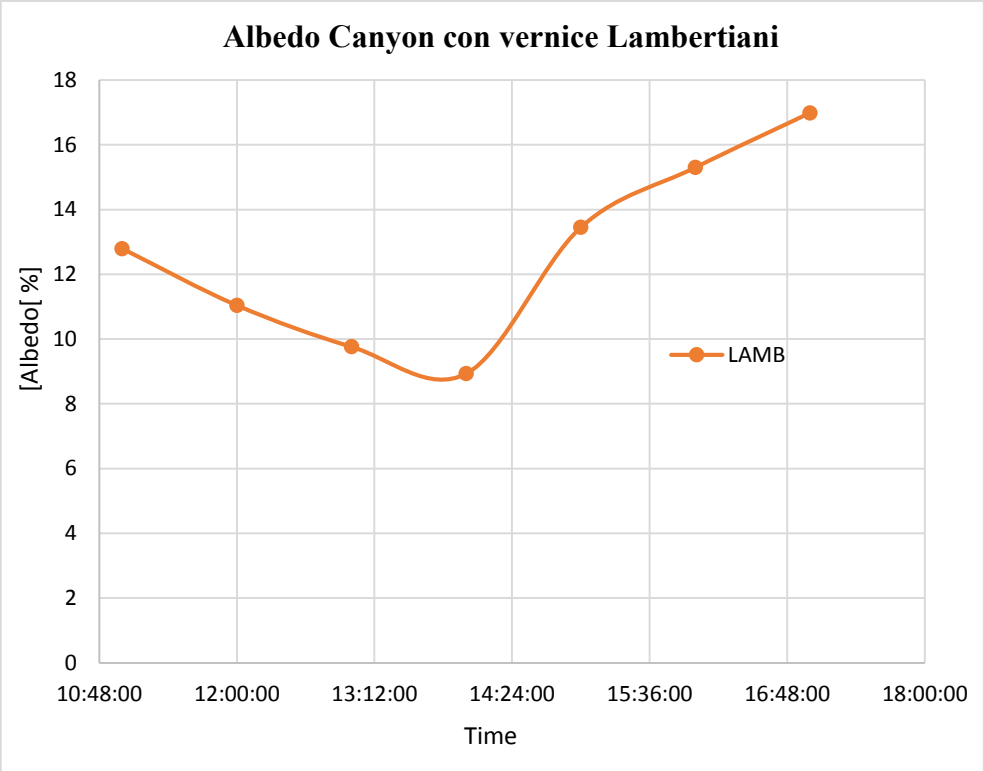


Figura 96. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Ovest

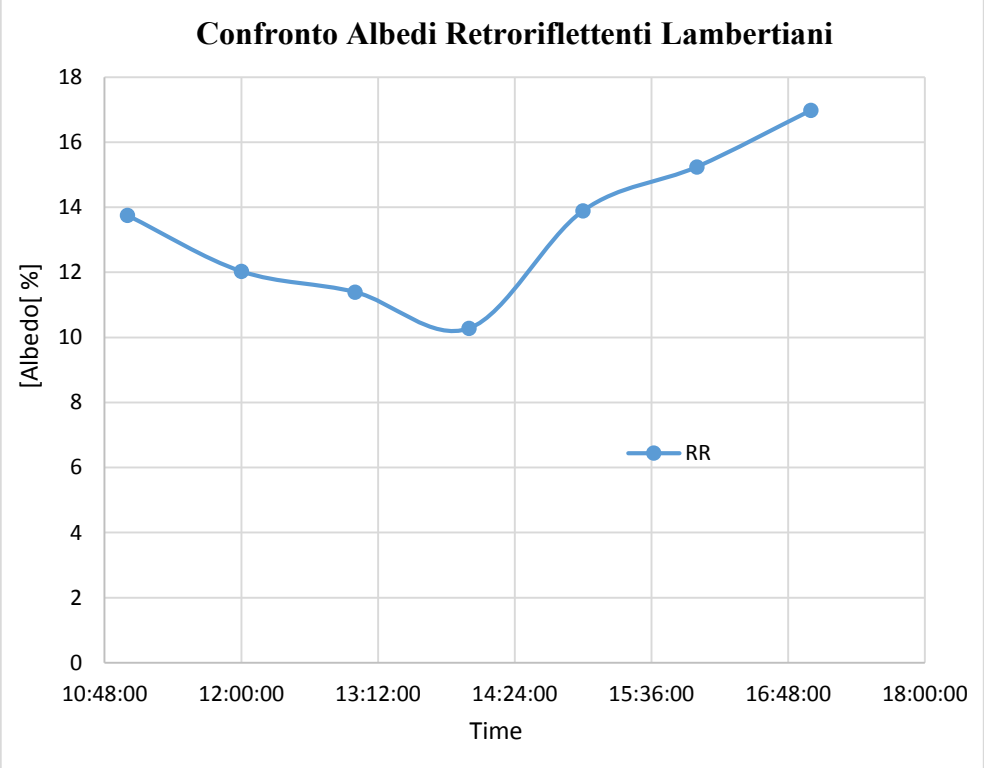


Figura 97. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Est.

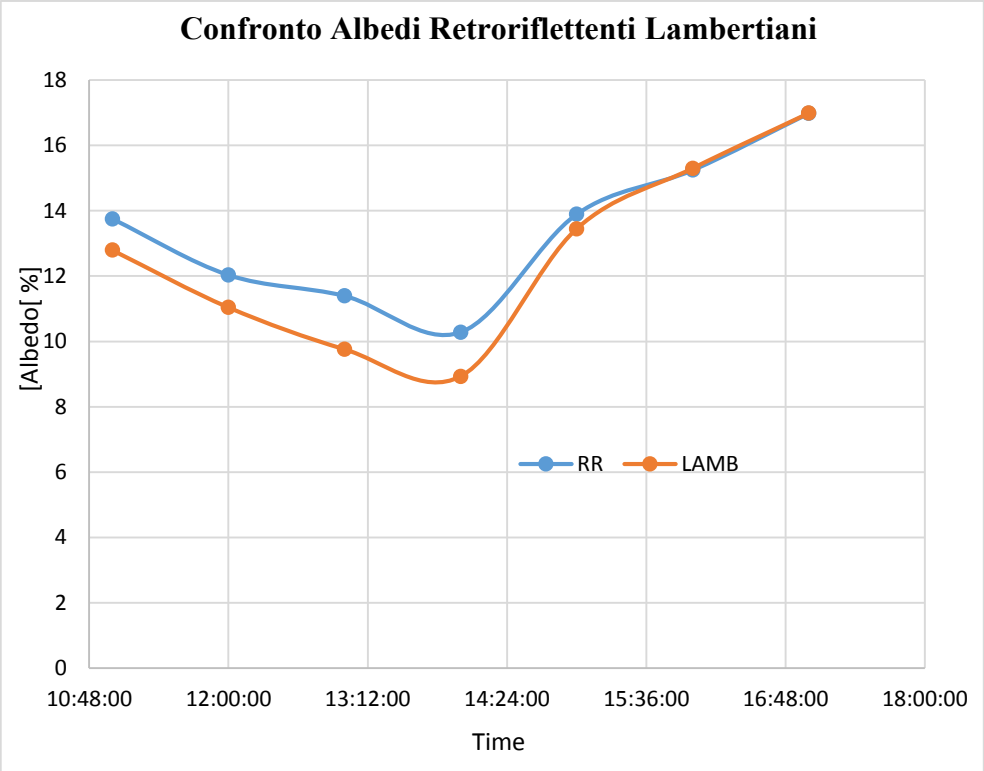


Figura 98. Andamento Albedo sul canopy layer Canyon Est e Canyon Ovest

Scarto Medio=2.03%

26 Settembre

Tabella 41. Misure di Albedo sul canopy layer Canyon Est e Canyon Ovest

TIME	Albedo RR	Albedo LAMB
11:00:00	13.38	12.89
12:00:00	11.89	11.47
13:00:00	11.24	10.44
14:00:00	12.17	11.39
15:00:00	13.85	13.28
16:00:00	15.30	15.33
17:00:00	17.14	17.25

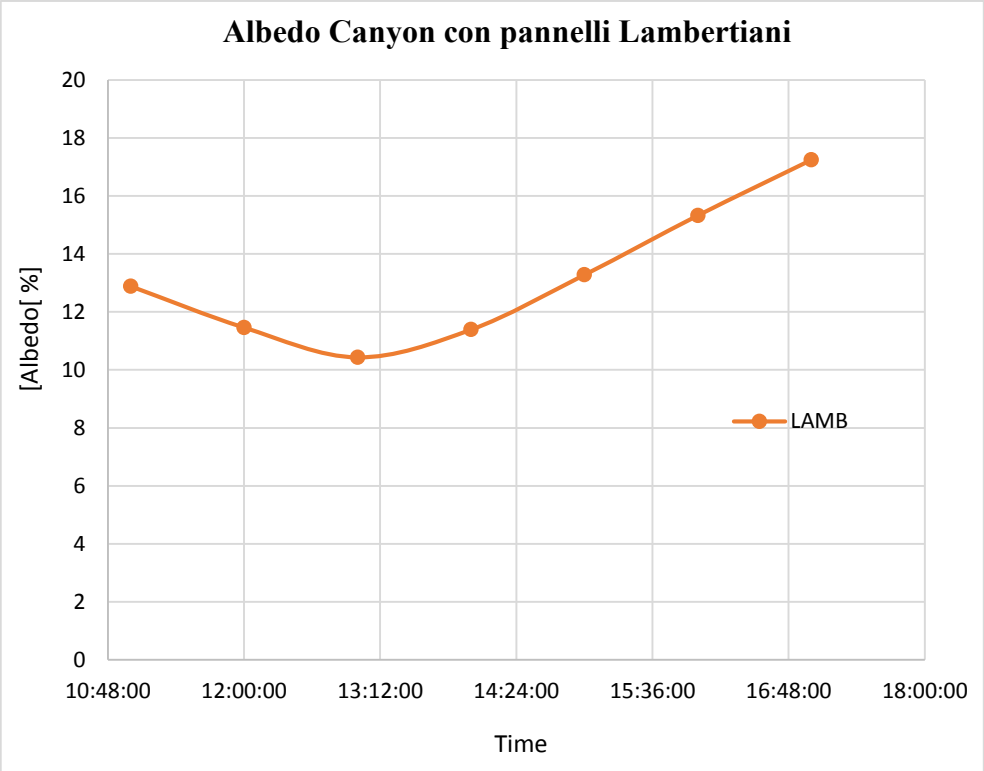


Figura 99. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Ovest

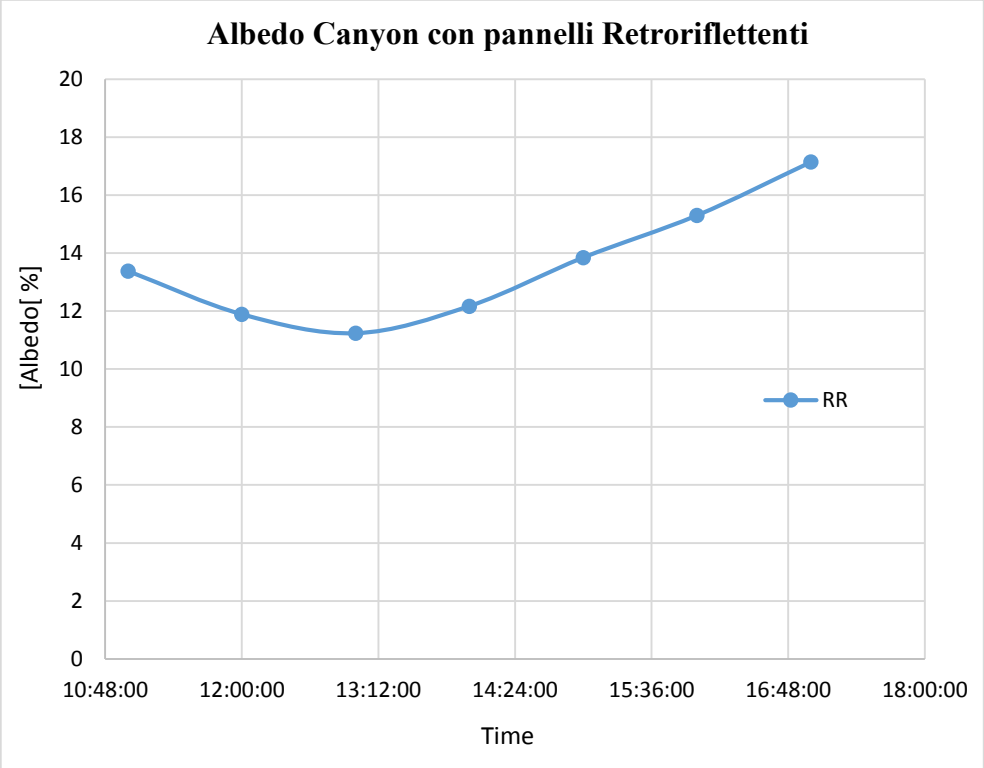


Figura 100. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Est

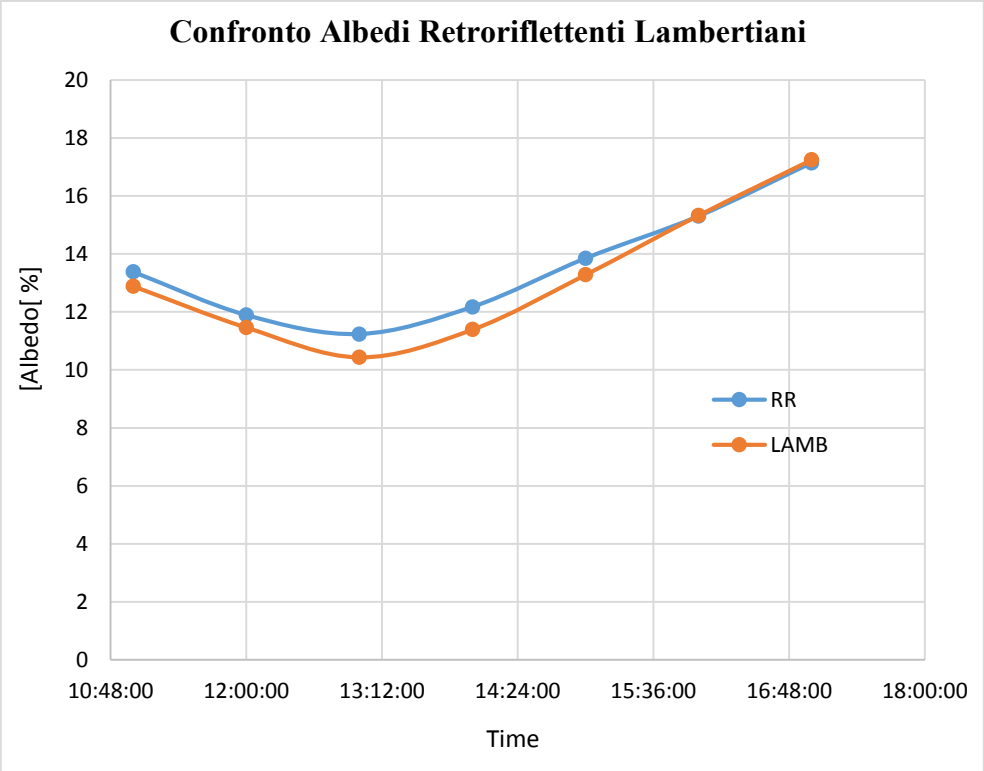


Figura 101. Andamento Albedo sul canopy layer dei Canyon Est e Canyon Ovest

Scarto Medio=1.18%

29 Settembre

Tabella 42. Misure di Albedo sul canopy layer Canyon Est e Canyon Ovest

TIME	Albedo RR	Albedo LAMB
10:00:00	15.07	15.25
10:30:00	13.41	13.26
11:00:00	12.64	12.42
11:30:00	12.15	11.60
12:00:00	11.47	10.40
12:30:00	10.63	9.31

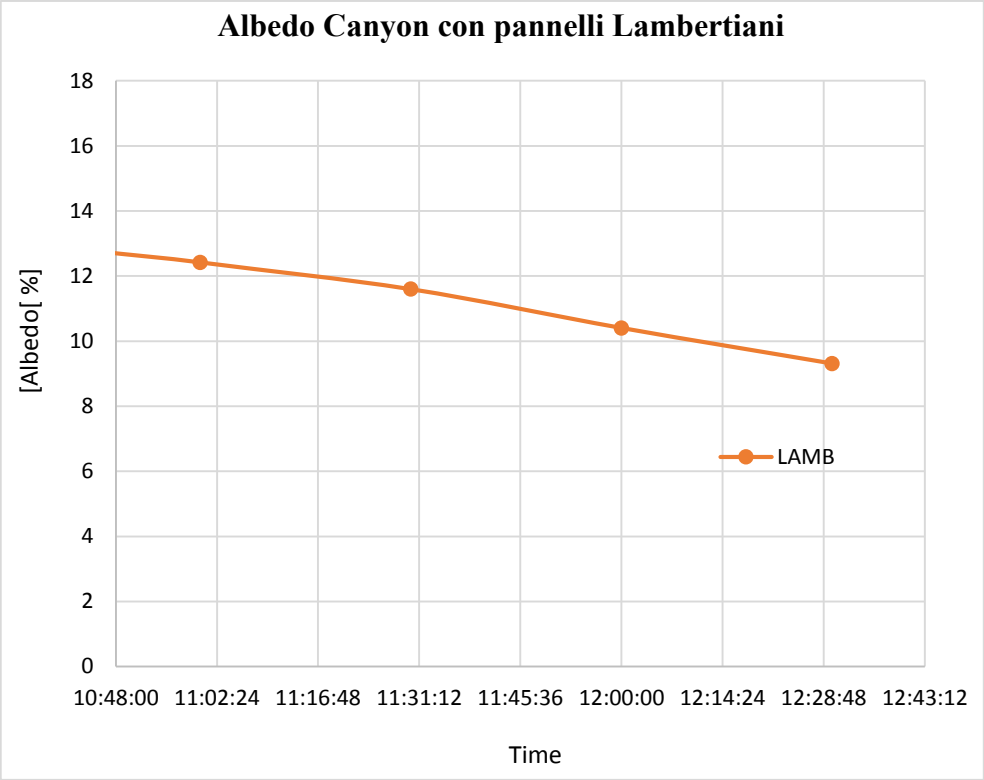


Figura 102. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Ovest

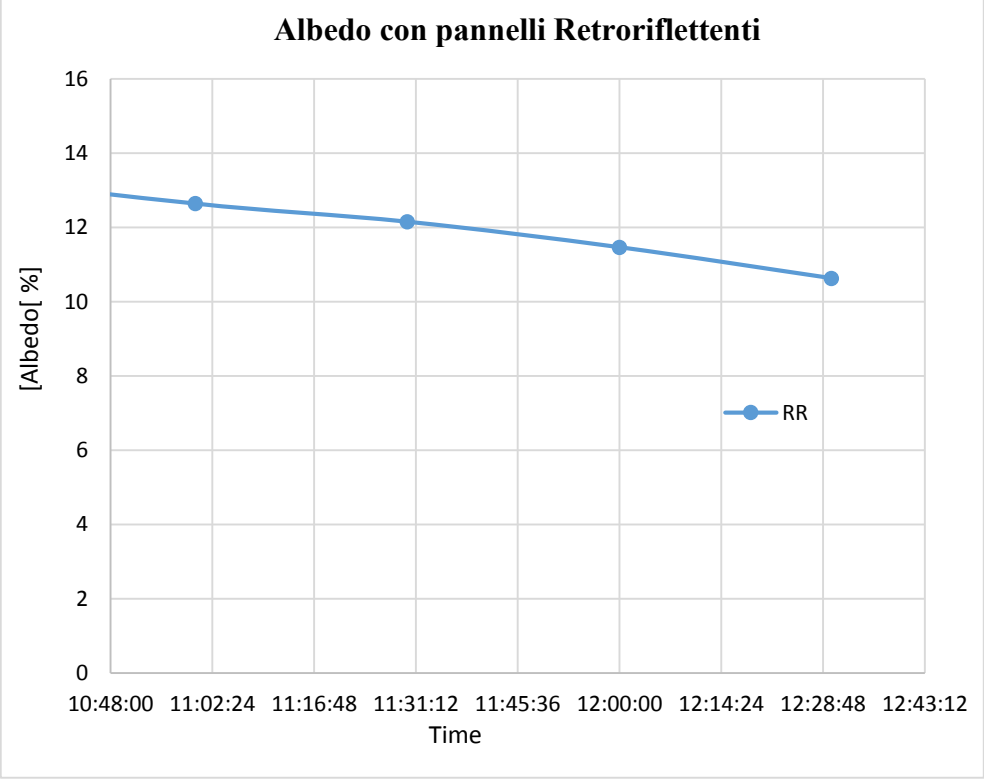


Figura 103. Andamento Albedo sul canopy layer del Canyon Est

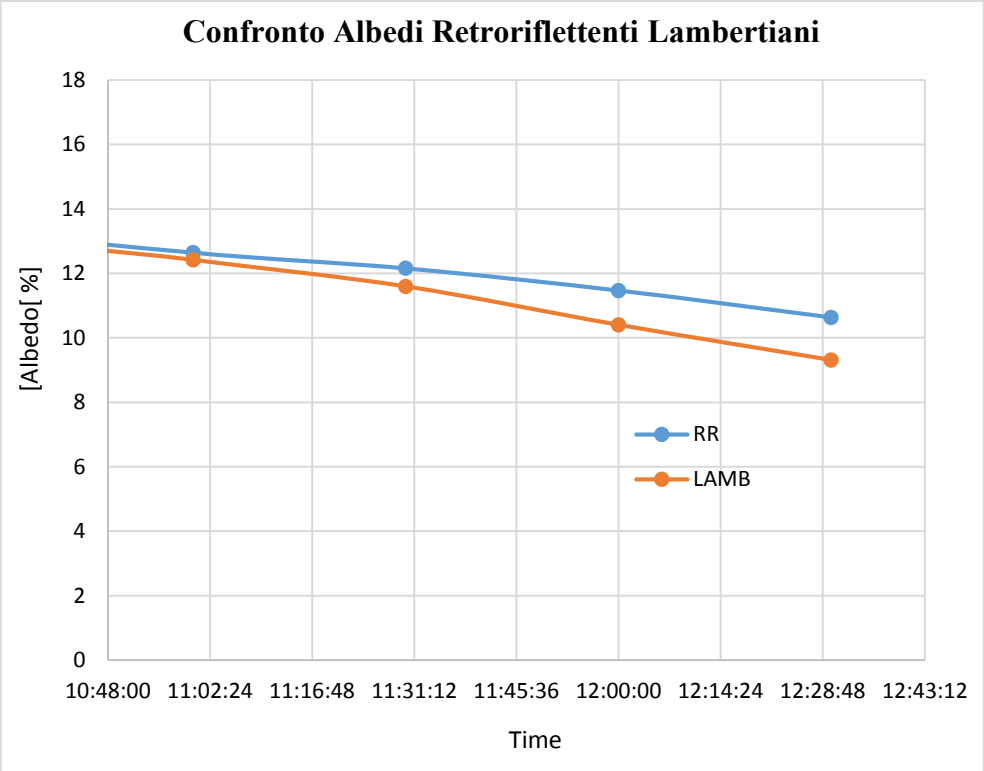


Figura 104. Andamento Albedo sui canopy layer del Canyon Ovest e Est

Scarto Medio=1.32%

Da tutti i grafici si può notare che il valore di Albedo del Canyon Est, con vernice retroriflettente, nelle ore centrali della giornata è più alto.

Ciò è dovuto al comportamento dei materiali retroriflettenti che, come ho anche dimostrato nelle prove di laboratorio, hanno una forte dipendenza dall'angolo di incidenza della radiazione solare. Quindi per gli angoli di incidenza più elevati il proprio valore di riflettanza aumenta. Questo fa sì che i materiali retroriflettenti riescano a riflettere al di fuori del canyon urbano una radiazione maggiore dei materiali lambertiani. Quindi riflettendo più radiazione il valore di Albedo cresce poiché a parità di radiazione incidente cresce la radiazione riflessa.

Nella mattina e nel pomeriggio, invece, i due materiali sembrano comportarsi nella stessa maniera e non leggiamo particolari differenze in termini di Albedo.

Questo probabilmente è dovuto alla posizione dei sensori e al loro angolo di vista: in base all'inclinazione dell'angolo di incidenza di queste ore hanno infatti più difficoltà a leggere la radiazione uscente.

Quello che certamente notiamo da queste misure è il diverso comportamento dei materiali retroriflettenti, i quali aiutano a ridurre il fenomeno di intrappolamento radiativo nel canyon urbano, con conseguenti benefici non soltanto agli edifici sulle quali è applicata ma anche al comfort all'interno del canyon urbano stesso, andando ad intervenire proprio sul fenomeno dell'isola di calore urbana.

Infine, nella giornata del 3 agosto sono state effettuate misure in parallelo sui due canyon. Un pannello con vernice RR con coefficiente di riflessione a 8° pari a 0.38 è stato installato sulla superficie affacciata a sud di uno dei due canyon. Tutti gli altri pannelli presentavano una vernice grigia tradizionale diffusiva con valore del coefficiente di riflessione pari a 0.38. Anche in questo caso, viste le stesse condizioni del coefficiente di riflessione delle pareti nei due canyon, le differenze che si sarebbero riscontrate dai dati sperimentali avrebbero dovuto riferirsi al solo effetto retroriflettente della vernice RR.

In Figura 105 sono riportati, in funzione della radiazione solare entrante nel canyon attraverso il canopy layer, i valori dell'albedo (exiting over entering ratio). I valori riferiti al canyon in configurazione retro-riflettente sono rappresentati in blu attraverso crocette (RR); quelli riferiti al canyon con tinte tradizionali diffusive sono rappresentati in rosso attraverso triangolini (CR).

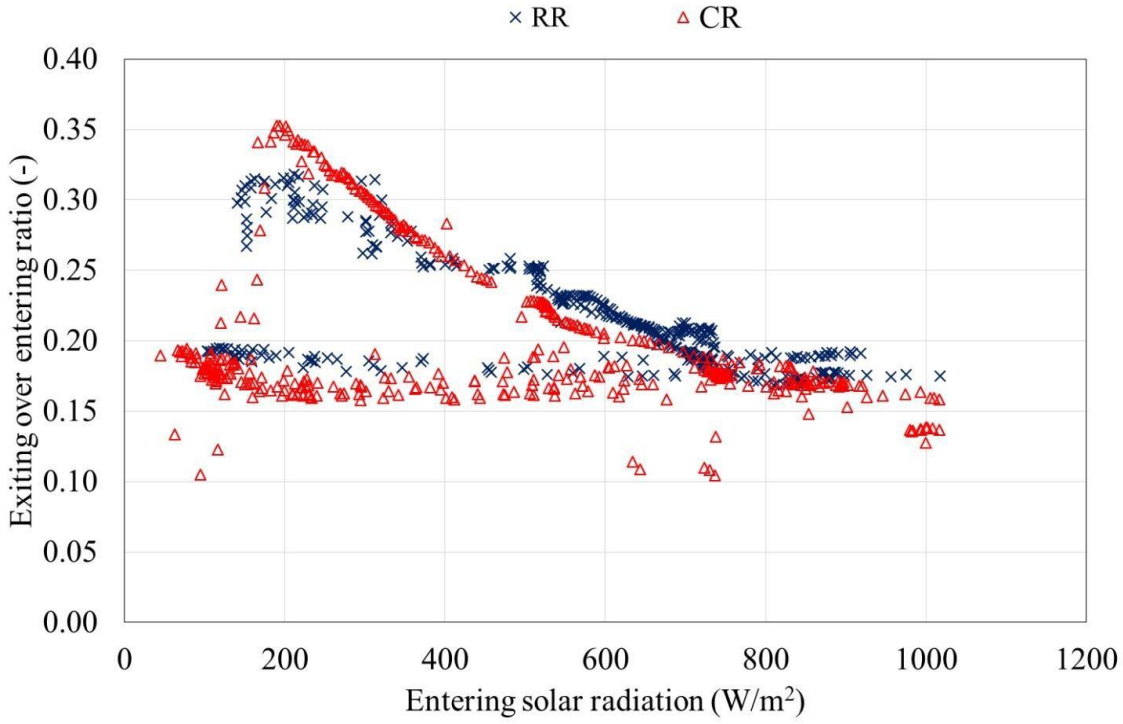


Figura 105. Risultati sperimentali delle misure effettuate in parallelo tra canyon in configurazione RR e canyon in configurazione diffusiva.

Andando ad analizzare criticamente gli andamenti si può dedurre che:

- In prossimità dei valori di radiazione entrante maggiore (da 400 W/m^2 in su), l'effetto retroriflettente genera una maggiore riflessione della radiazione entrante attraverso il canopy layer. Questo può essere spiegato dal fatto che i valori di radiazione entrante maggiore si verificano nelle ore del giorno in cui la radiazione incide sulle superfici verticali con angoli di incidenza maggiori;
- Al di sotto di 400 W/m^2 si verificano due situazioni:
    a) per valori di albedo superiori a 0.20 i sensori non vedono la componente retro-riflessa a causa della loro posizione; questi dati sono relativi alle condizioni di irradiazione della mattina e della sera in cui la componente retroriflettente non colpisce i sensori inferiori nei dispositivi di misura;
    b) i valori quasi sovrapposti di RR e CR da 50 a 700 W/m^2 sono relativi a condizioni di copertura nuvolosa parziale del cielo; in questo caso, seppur rimanendo leggermente superiore rispetto al materiale diffusivo, la riflessione RR viene in parte disattivata dalla parziale scomparsa di radiazione diretta incidente.

Concludendo, i risultati lasciano percepire la dipendenza della riflessione dei materiali RR dall'angolo di incidenza della radiazione incidente, in quanto nell'arco della giornata, passando da 50 a 900 W/m^2 di radiazione incidente, i valori dell'albedo tra configurazione RR e CR si invertono intorno a valori pari a 400 W/m^2.

6. Conclusioni

La mia 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 materiali che hanno come caratteristica principale quella di riflettere la radiazione solare nella stessa direzione da cui essa proviene. In tal modo, il fenomeno dell'intrappolamento radiativo all'interno dell'ambiente urbano viene 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 ripetute 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 ho validato il mio modello numerico di canyon urbano implementato in TRNSYS con la realizzazione di un setup sperimentale in scala 1:30. Il modello matematico ha la potenzialità di considerare le riflessioni multiple della radiazione solare ad onda lunga e corta che si sviluppano all'interno di un canyon urbano grazie alla modellazione dello stesso come una zona termica chiusa e alla teoria dei fattori di Gebhart. In una prima fase della tesi si sono valutate le differenze sulla radiazione assorbita e le temperature superficiali delle facciate di un edificio che si trova in un contesto urbano e un edificio isolato, nonché i diversi fabbisogni energetici. L'analisi, in generale, è stata eseguita per diverse configurazioni geometriche, ovvero al variare dell'aspect ratio H/W, per i due principali orientamenti, al variare del coefficiente di assorbimento delle facciate verticali dell'edificio e al variare del rapporto tra la superficie finestrata e la superficie opaca.

I risultati mostrano che durante la stagione di raffrescamento, SCB(H/W=0,5) è la configurazione più svantaggiata per ciò che riguarda lo scambio radiativo ad onde lunghe: essa riceve più radiazione solare rispetto alle altre configurazioni SCB, comportandosi in maniera simile al caso SAB, ma al contrario di quest'ultimo la dissipazione del calore verso il cielo è ostruita dagli edifici vicini.

Per quanto riguarda la domanda di riscaldamento, la configurazione più svantaggiosa è SCB(H/W=2), per entrambi gli orientamenti.

Per ciò che concerne i flussi radiativi durante la notte, la dispersione termica delle facciate-verso il cielo è maggiore in SAB rispetto le configurazioni SCB, per tutti gli H/W considerati. Questo è il motivo per cui le temperature delle facce SAB risultano sempre inferiori alle configurazioni SCB. Nelle ore in cui la facciata viene colpita dalla radiazione diretta, la configurazione SAB riceve radiazioni globali più elevate di tutte le altre configurazione SCB, tranne durante l'inverno sulle facciate est e ovest per i canyon orientati S-N.

Il contributo delle interfilessioni si intensifica principalmente durante la stagione estiva sulle facciate ovest e est (canyon orientato S-N) nelle ore in cui la facciata è in ombra. Come previsto, l'entità dei flussi radiativi determina la temperatura delle facciate dell'edificio.

Infine, per questa prima simulazione, è stato valutato e confrontato il fabbisogno di raffrescamento e riscaldamento dell'edificio nelle due configurazioni SCB e SAB nella città di Roma. Si è riscontrato che la richiesta di raffrescamento per la configurazione SAB, per l'edificio orientato W-E, è superiore a SCB(H/W=2) (+ 43,6%) e SCB(H/W=1) (+ 22,1%), mentre è inferiore rispetto alla configurazione SCB(H/W=0,5) (-8,3%). Per l'edificio orientato S-N, la richiesta di energia per il raffrescamento di SAB è superiore a tutte le configurazioni SCB: + 7,4% rispetto a SCB(H/W=0,5), + 41,6% rispetto a SCB(H/W=1) e + 61,9% rispetto a SCB(H/W=2). Tra le tre configurazioni SCB il il fabbisogno energetico per il raffrescamento diminuisce di circa il 47,9% passando da SCB(H/W=0,5) a SCB(H/W=2) per orientamento W-E e circa 58,9% per S-N. Per quanto riguarda il fabbisogno di riscaldamento, si è riscontrato che la configurazione più svantaggiosa è il caso SCB(H/W=2), per entrambi gli orientamenti. Passando dalla configurazione SAB a SCB(H/W=2) si verifica un aumento della domanda di riscaldamento, sia per l'edificio orientato W-E (67,6%) che per l'edificio S-N (26,9%).

Nella seconda fase della mia tesi mi sono concentrata sul peso delle interiflessioni sul fabbisogno energetico di un edificio inserito in un canyon urbano. Per fare ciò ho realizzato due modelli: Inter_ON in cui sono presenti le interiflessioni e Inter_OFF in cui, per una specifica impostazione dell'albedo, le interiflessioni non sono considerate. Dal confronto di questi due modelli emerge il peso del contributo delle interiflessioni sul calcolo del fabbisogno energetico di un edificio inserito in un contesto urbano. Sono state quindi eseguite due diverse simulazioni. Nella prima si considera solo il campo della radiazione ad onde corte, nella seconda anche la radiazione ad onda lunga.

Per quanto riguarda la prima simulazione, è stata eseguita un'analisi di sensibilità al variare di alcuni parametri come H/W, l'orientamento del canyon, il rapporto superfici trasparenti/opache (Ap_{gl}/Ap_{op}) e il coefficiente di assorbimento solare. Il confronto tra i risultati dei modelli Inter_ON e Inter_OFF ha mostrato un aumento della domanda di raffrescamento fino al 35%, per il canyon orientato S-N con A_{gl}/A_{op} =0,25, per H/W=2 e α=0,8 e una diminuzione della domanda di riscaldamento fino al 7,5%, per canyon orientati sud-ovest con A_{gl}/A_{op} =0,25, per H/W=2 e α=0,8.

Si è evidenziato, quindi, che più stretto è il canyon, più intenso è il fenomeno dell'intrappolamento radiativo che porta ad aumenti delle richieste di raffrescamento molto più elevati rispetto alla diminuzione delle esigenze di riscaldamento.

Un altro punto importante è che per lo stesso rapporto H/W e α, l'impatto delle riflessioni sulla domanda di energia termica è maggiore nel modello con meno superficie trasparente sulla facciata.

Poiché i cambiamenti nelle richieste di energia termica sono dovuti sia allo scambio radiativo ad onde corte che ad onde lunghe, i risultati di questa analisi ad onde corte non dovrebbe essere vista come direttamente applicabile alle situazioni del mondo reale ma piuttosto come una guida concettuale per la comprensione degli effetti delle interazioni ad onde corte tra gli edifici, suggerendo che, nella progettazione di un nuovo edificio, le interazioni con l'ambiente circostante dovrebbero essere incluse come parametro guida.

Un ulteriore sviluppo di questo lavoro è stato infine integrare le inter-riflessioni ad onde lunghe nel codice BES per completare l'analisi dell'influenza dell'interazione reciproca radiativa tra gli edifici sulla loro domanda di energia termica.

In questo caso, il confronto tra i risultati dei due modelli (Inter_ON e Inter_OFF), evidenzia un aumento della domanda di riscaldamento per il caso invernale, al crescere del coefficiente di riflettanza ρ, per il modello Inter_OFF. Una tendenza opposta è mostrata per il caso Inter_ON, ad eccezione del caso di edificio senza superficie trasparente. In estate, invece, all'aumentare di ρ, la domanda di raffrescamento diminuisce per il caso Inter_OFF, mentre aumenta per il caso Inter_ON, ad eccezione dell'edificio con $A_{gl}/A_{op}=0$. Questo accade proprio a causa delle inter-riflessioni. Fissando $\rho = 0{,}2$, per analizzare il fenomeno al suo massimo effetto, le simulazioni mostrano un aumento della domanda di raffrescamento fino al 50% e una diminuzione della domanda di riscaldamento fino al 15%. Per quanto è stato appena detto, l'analisi mostra l'errore percentuale che si commette nella valutazione del fabbisogno energetico se l'effetto delle inter-riflessioni non viene preso in considerazione. In generale, durante l'estate il fenomeno della trappola radiativa è maggiore che in inverno. Ciò comporta una crescita maggiore della domanda di raffrescamento piuttosto che della domanda di riscaldamento. La ragione di ciò è che in inverno la differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno dell'edificio è maggiore che in estate. Pertanto, quando si definisce il carico termico dell'edificio, il caso estivo ha un'influenza maggiore rispetto alle riflessioni radiative. Alla luce dei risultati, questo lavoro suggerisce di considerare come parametri guida per definire il fabbisogno energetico di nuovi edifici anche le loro interazioni con l'ambiente circostante. Questo al fine di tener conto di ogni possibile soluzione per ottimizzare le prestazioni energetiche dell'edificio stesso.

Questi risultati numerici sono stati in parte confermati da misure sperimentali effettuate su un modello di canyon urbano in scala 1:30 sviluppato all'esterno dell'università di Roma Tre. Il setup ha fornito risultati che indicano un incremento della radiazione riflessa verso il cielo, quando ad un materiale lambertiano viene preferito un materiale RR. Tra gli sviluppi futuri si prevede 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.

Appendice

Il protocollo di Kyoto

Nel 1997 la necessità di regolare l'impatto delle attività antropiche sull'ambiente e di contenere la produzione dei gas ritenuti responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento globale del pianeta portò alla firma da parte di 160 paesi del protocollo di Kyoto, nel quale si definivano alcuni metodi per giungere in un certo lasso di tempo ad una riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera. Il protocollo previde che, in un periodo di tempo compreso tra il 2008 e il 2012, i paesi industrializzati riducessero le emissioni di gas serra di almeno il 5% rispetto ai livelli misurati nel 1990, anno di riferimento.

Con il trattato di Kyoto, oltre a voler affrontare le problematiche ambientali, la comunità internazionale iniziò a volgere la propria attenzione verso la necessità di diminuire i costi legati al consumo di materie prime e quindi di energia.

L'Unione Europea aderì al protocollo di Kyoto e tutti gli stati membri si impegnarono pertanto a rispettarne i vincoli e le scadenze. In Europa il settore dell'edilizia civile è certamente il più rilevante dal punto di vista del suo impatto sull'ambiente, per quanto riguarda sia la produzione di sostanze climalteranti che i consumi energetici. In base ai dati presentati dalla stessa UE infatti l'impiego di energia legato a questo settore incide per più del 40% sull'intero fabbisogno europeo.

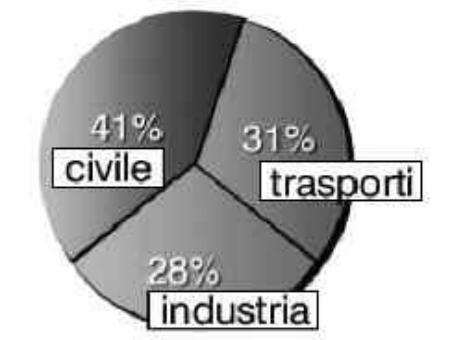


Figura 106. Ripartizione dei consumi nella Comunità Europea in base all'uso finale

All'interno del settore civile, i principali utilizzi energetici possono essere così suddivisi:

- climatizzazione degli ambienti: riscaldamento e raffrescamento;
- produzione di acqua calda sanitaria;
- ventilazione e trattamento dell'aria;
- illuminazione;

- elettrodomestici ed apparecchiature elettroniche;
- cottura.

Tra i punti elencati la prima voce rappresenta largamente il contributo più rilevante.

Alla luce di questi dati, si comprende il motivo per cui a livello europeo e nazionale, si è scelto di sviluppare un quadro legislativo volto all'abbattimento dei consumi energetici nel settore edile, ovvero ad un miglioramento dell'*efficienza energetica* degli edifici.

Nei successivi paragrafi si propone una sintesi schematica degli sviluppi normativi che hanno seguito il protocollo di Kyoto, con particolare attenzione all'Italia dove, dopo la Legge n. 10/1991, solo a partire dal 2005 si è cominciato a definire un quadro legislativo dell'argomento.

Il contesto normativo in Europa e in Italia

A livello europeo, l'intenzione di limitare le emissioni nocive in atmosfera ed i consumi energetici del comparto edile è stata esplicitata con l'emanazione di alcune direttive, tra cui si ricordano in particolare:

– la direttiva europea 2002/91/CE del 2002: questo documento, a cui i paesi membri devono far riferimento, contiene le linee guida generali in materia di rendimento energetico delle costruzioni;

– la direttiva europea 2006/32/CE del 2006, comprendente alcune disposizioni relative all'efficienza degli usi finali di energia ed ai servizi di fornitura energetica;

– la direttiva europea 2010/31/CE del 2010, in sostituzione della direttiva 2002/91/CE che sarà definitivamente abrogata dall'01/02/2012. Questo documento promuove il miglioramento della prestazione energetica degli edifici tenendo conto sia delle condizioni climatiche esterne e degli ambienti interni, sia dell'efficacia sotto il profilo dei costi.

I contenuti della direttiva 2002/91/CE sono stati recepiti in Italia tramite il D.Lgs. n. 192/2005, poi integrato e modificato dal D.Lgs. n. 311/2006: *"Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa alrendimento energetico nell'edilizia"*, entrato in vigore a partire dal 2 Febbraio 2007.

L'attuazione completa del D.Lgs. n. 192/2005 (articolo 4) prevedeva che, entro breve tempo dalla pubblicazione del decreto (120 giorni dall'entrata in vigore), il legislatore avrebbe dovuto provvedere all'emanazione di alcuni decreti attuativi, contenenti indicazioni essenziali sui criteri di calcolo da adottare, i requisiti minimi da rispettare per gli impianti ed

i criteri generali di prestazione energetica delle costruzioni. Solo recentemente (dopo 4 anni) il legislatore ha provveduto ad attuare alcuni dei punti previsti negli articoli 4, 5 e 6 del D.Lgs. n. 192/2005 e s.m. (successive modificazioni), con due importantissimi decreti:

– in data 10 giugno 2009 è stato pubblicato su Gazzetta Ufficiale il *D.P.R. n. 59/2009*, in attuazione di alcuni dei punti previsti nell'articolo 4 del D.Lgs. n. 192/2005;

– in data 10 luglio 2009 sono state pubblicate su Gazzetta Ufficiale le *"Linee guida nazionali sulla certificazione energetica degli edifici"*, che definiscono le procedure applicative per eseguire la certificazione energetica degli edifici, in attuazione di alcuni punti dell'articolo 5 e dell'articolo 6 del D.Lgs. n. 192/2005.

I contenuti della direttiva 2006/32/CE sono stati recepiti in Italia con il D.Lgs. n. 115/2008, *"Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE"*, in vigore dal 4 luglio 2008. Tra i principali contenuti di questo decreto si ricordano alcuni regolamenti volti all'ottenimento di bonus volumetrici per incentivare il progetto di edifici energeticamente efficienti e la riqualificazione degli edifici esistenti, la scelta delle norme UNI TS 11300 come metodologia condivisa di calcolo nazionale, i requisiti dei soggetti per l'esecuzione delle diagnosi e delle certificazioni energetiche.

La direttiva 2010/31/CE è entrata in vigore il 9 luglio 2010 e ha abrogato la direttiva 2002/91/CE (con effetto dall'1 febbraio 2012). Questo documento ha lo scopo di incrementare l'efficienza energetica nel settore edilizio per raggiungere entro il 2020 una riduzione di almeno il 20% sui consumi di energia, visto che, come si è già avuto modo di notare nel §1.1, il settore dell'edilizia civile è attualmente la principale causa in Europa della produzione di Co2, con un'incidenza del 40% sui costi energetici totali.

La direttiva contiene disposizioni che prevedono l'introduzione di una metodologia comune in ambito europeo per calcolare le prestazioni energetiche degli edifici e disposizioni inerenti le soglie minime dei parametri energetici per le costruzioni. In particolare tali limiti saranno aggiornati con scadenza quinquennale dai singoli stati membri dell'Unione, tenendo conto delle possibili innovazioni tecnologiche del settore edilizio, dei costi e delle condizioni climatiche e locali. È interessante osservare che il rispetto delle nuove prescrizioni di efficienza energetica dovrà essere esteso non solo agli edifici di nuova costruzione, ma anche agli edifici già costruiti e a quelli in fase di ristrutturazione. Gli stati membri dovranno predisporre le norme di applicazione alla direttiva entro il 2012, mentre entro il 30 giugno

2011 dovranno definire alcuni strumenti di finanziamento per incentivare l'utilizzo di sistemi ad energia "quasi zero".

In questo capitolo viene fornita una descrizione generale del quadro legislativo nazionale in materia di certificazione energetica, con qualche dettaglio sul contenuto delle leggi ora citate e dei principali decreti pubblicati sull'argomento. Si rimanda al testo delle norme per ulteriori approfondimenti. Tutti i testi delle leggi e dei decreti sono pubblici e scaricabili gratuitamente dalla rete internet. Le norme tecniche UNI sono invece acquistabili dal sito dell'ente normatore.

DIRETTIVA 2010/31/CE punto 9

La prestazione energetica degli edifici dovrebbe essere calcolata in base ad una metodologia che potrebbe essere differenziata a livello nazionale e regionale. Ciò comprende, oltre alle caratteristiche termiche, altri fattori che svolgono un ruolo di crescente importanza, come il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento, l'impiego di energia da fonti rinnovabili, gli elementi passivi di riscaldamento e rinfrescamento, i sistemi di ombreggiamento, la qualità dell'aria interna, un'adeguata illuminazione naturale e le caratteristiche architettoniche dell'edificio. Tale metodologia di calcolo dovrebbe tener conto della prestazione energetica annuale di un edificio e non essere basata unicamente sul periodo in cui il riscaldamento è necessario. Essa dovrebbe tener conto delle norme europee vigenti.

Il d.p.r. n. 59/2009

Il D.P.R. n. 59/2009 attua l'articolo 4 (comma 1, lettere *a)* e *b*) del D.Lgs. n. 192/2005 e s.m. ed in particolare definisce:

– le *metodologie di calcolo* da impiegare per la valutazione dei fabbisogni e delle prestazioni energetiche degli edifici;

– i *requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici* per la climatizzazione invernale, per la climatizzazione estiva (novità rilevante rispetto al passato) e per la produzione di acqua calda ad usi sanitari (articolo 4).

Il D.P.R. n. 59/2009 è composto da 8 articoli e 1 allegato:

– articolo 1: contiene l'ambito di intervento e le finalità del D.P.R.;

– articolo 2: contiene alcune definizioni generali utili per la comprensione del decreto;

– articolo 3: impone le UNI TS 11300 quali norme di riferimento per il calcolo;

– articolo 4: confermando quanto già presente nell'allegato C del D.Lgs. n. 192/2005 e s.m., definisce i requisiti della prestazione energetica degli edifici nuovi ed esistenti, per trasmittanza termica, indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale e rendimento globale medio stagionale. Introduce inoltre un valore limite della prestazione energetica per il raffrescamento dell'edificio e classifica le strutture disperdenti in funzione della trasmittanza termica periodica, valutandone l'efficacia a contenere l'oscillazione termica durante la stagione estiva;
– articolo 5: definisce i criteri generali e i requisiti per l'esercizio, la manutenzione e l'ispezione degli impianti termici;
– articolo 6: definisce le funzioni delle regioni e delle province autonome, le quali nel rispetto dell'articolo 17 del D.Lgs. n. 192/2005 (clausola di cedevolezza) e dei principi fondamentali della direttiva 2002/91/CE possono:
– definire autonomamente le metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici, fermo restando che esse facciano riferimento a quanto indicato nel DPR;
– fissare autonomamente i requisiti minimi di prestazione energetica, purché più stringenti rispetto a quelli indicati nell'articolo 4 del D.P.R..
Le regioni e le province autonome, che all'entrata in vigore del D.P.R. abbiano già recepito la direttiva 2002/91/CE, sono comunque tenute a conformare alle indicazioni nazionali la propria legislazione in materia di efficienza energetica degli edifici;
– articolo 7: stabilisce che gli strumenti di calcolo che implementano la procedura UNI TS 11300 siano dotati di certificazione da parte di ente incaricato. In particolare è richiesto che i software commerciali garantiscano uno scostamento massimo di ±5% sulla valutazione degli indici di prestazione energetica, rispetto ai risultati calcolati con strumento nazionale di riferimento predisposto dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI);
– articolo 8: stabilisce che la copertura finanziaria del D.P.R. non necessita di nuovi o maggiori oneri a carico della finanza pubblica;
– allegato: viene riportato l'elenco delle norme tecniche UNI di riferimento per l'applicazione della metodologia di calcolo (vedi §1.7).

D.P.R. n. 59/2009, articolo 3

Metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici e degli impianti

1. Ai fini dell'articolo 4, comma 1, lettere *a)* e *b)*, del D.Lgs. n. 192/2005, per le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici si adottano le norme tecniche nazionali,

definite nel contesto delle norme EN a supporto della direttiva 2002/91/CE, della serie UNI TS 11300 e loro successive modificazioni.
2. Ai fini della certificazione degli edifici, le metodologie per il calcolo della prestazione energetica, sono riportate nelle linee guida nazionali di cui al decreto del Ministro dello sviluppo economico, adottato ai sensi dell'articolo 6, comma 9, del D.Lgs. n. 192/2005.

Le linee guida alla certificazione energetica

Il 10 luglio 2009 è stato pubblicato in Gazzetta Ufficiale il Decreto ministeriale 26/06/2009, contenente le "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".
Tra le principali novità contenute nelle linee guida si citano:
– articolo 5, comma 1: al fine di monitorare e migliorare l'applicazione della normativa sulla certificazione energetica degli edifici, viene istituito un tavolo di confronto e coordinamento presso il ministero degli affari regionali e delle autonomie locali;
– allegato A, punti 4 e 5 e allegato 3: vengono illustrate le metodologie di calcolo dei parametri indici di prestazione energetica degli edifici, distinguendo tra *metodo di calcolo di progetto e metodo di calcolo da rilievo sull'edificio,* che prevede a sua volta tre livelli di approfondimento. È inoltre specificato chiaramente che è obbligatorio fare riferimento alle norme UNI TS 11300 per entrambi i metodi.
– allegato A, punto 6: definisce i parametri per una valutazione qualitativa delle caratteristiche dell'involucro edilizio ai fini della climatizzazione estiva;
– allegato A, punto 7 e allegato 4: introducono le classi prestazionali, secondo le quali è possibile classificare l'edificio dal punto di vista dei consumi energetici. L'efficienza dell'edificio è valutabile su tre livelli: prestazione energetica globale EPgl, prestazione energetica per la climatizzazione invernale EPi e per la produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari EPacs;
Decreto ministeriale 26 giugno 2009 – Allegato A, paragrafo 5

Metodo calcolato di progetto

Per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale EPi e per la produzione dell'acqua calda sanitaria EPacs, attuativo del "Metodo calcolato di progetto o di calcolo standardizzato" di cui al punto 1 del paragrafo 4, si fa riferimento […] alle norme della serie UNI TS 11300 e loro successive modificazione e integrazioni.

Metodi di calcolo da rilievo sull'edificio

Per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale EPi e per la produzione dell'acqua calda sanitaria EPacs, attuativo del "Metodo di calcolo da rilievo sull'edificio", sono previsti i seguenti tre livelli di approfondimento:

1. In merito al metodo di cui al punto 2i *(mediante procedure di rilievo sul sistema edificio-impianto),* per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale EPi e per la produzione

dell'acqua calda sanitaria EPacs, si fa riferimento alle norme tecniche UNI TS 11300 e alle relative semplificazioni previste per gli edifici esistenti. […] Questa procedura è applicabile a tutte le tipologie edilizie di edifici esistenti indipendentemente dalla loro dimensione.

2. In merito alla metodologia di cui al punto 2ii *(per analogia costruttiva con altri edifici)* per il calcolo degli indici di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale EPi e per la produzione dell'acqua calda sanitaria EPacs, si fa riferimento al metodo di calcolo DOCET, predisposto da CNR ed ENEA sulla base delle norme tecniche UNI TS 11300. Questa procedura è applicabile agli edifici residenziali esistenti con superficie utile fino a 3000 m2.

3. In merito alla metodologia di cui al punto 2iii *(sulla base dei principali dati climatici, tipologici, geometrici ed impiantistici)* per il calcolo dell'indice di prestazione energetica dell'edificio per la climatizzazione invernale EPi si utilizza come riferimento il metodo semplificato di cui all'allegato 2, mentre per il calcolo dell'indice energetico per la produzione dell'acqua calda sanitaria EPacs alle norme UNI TS 11300 per la parte semplificata relativa agli edifici esistenti. Questa procedura è applicabile agli edifici residenziali esistenti con superficie utile fino a 1000 m2.

Lo scopo delle linee guida, attese per anni, è quello di rendere omogenea, coordinata ed immediatamente operativa la certificazione energetica su tutto il territorio nazionale.

– allegato A, punto 9: è introdotta per gli edifici esistenti aventi superficie utile inferiore o uguale a 1000 m2, oggetto di compravendita o locazione, la possibilità da parte del proprietario di redigere documento di autodichiarazione, in cui si afferma che l'edificio è in classe energetica G e che ad esso corrispondono elevati costi relativi al consumo di energia;

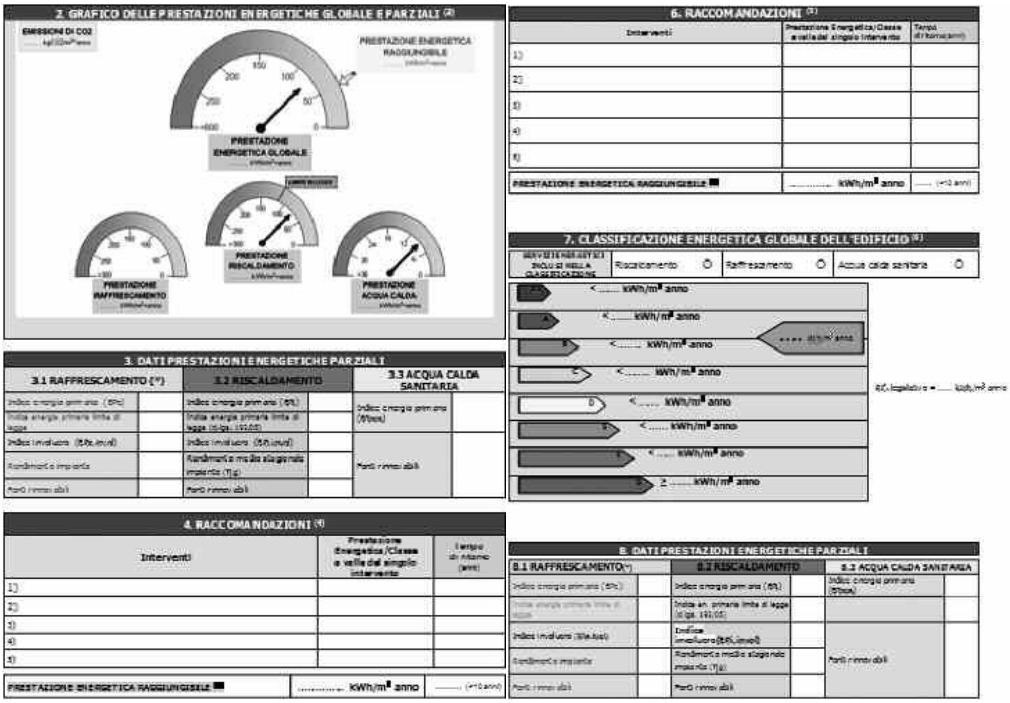


Figura 107. Linee guida: schemi standard di riferimento per ACE e AQE

– allegato 1: contiene le indicazioni per eseguire il calcolo della prestazione energetica anche per edifici non dotati di impianto di climatizzazione invernale e di produzione di acqua calda sanitaria;

– allegato 2: illustra una procedura semplificata per la determinazione dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale di edifici esistenti con superficie utile fino a 1000 m2 (definizione 2iii del paragrafo 5.2 dell'allegato A);

– allegati 5, 6 e 7: vengono presentati i nuovi schemi ai quali attenersi per redigere gli Attestati di Certificazione Energetica (ACE) e di Qualificazione Energetica (AQE);

– allegato B: si riporta l'elenco delle norme tecniche UNI di riferimento per l'applicazione della metodologia di calcolo (vedi §1.7).

Incentivi per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti

In Italia, in affiancamento allo sviluppo di documenti che definiscono i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e le metodologie per la certificazione, sono stati presentati alcuni decreti ministeriali ed alcune misure volte ad incentivare la riqualificazione energetica delle costruzioni esistenti. Si citano le principali leggi a riguardo:

– Legge 27 dicembre 2006, n. 296: *"Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato"* (Legge Finanziaria 2007);

– Decreto ministeriale 19 febbraio 2007: *"Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente, ai sensi dell'articolo 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n. 296"*;
– Legge 24 dicembre 2007, n. 244: *"Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato"* (Legge Finanziaria 2008);
– Decreto ministeriale 11 marzo 2008: *"Attuazione dell'articolo 1, comma 24, lettera a), della legge 24 dicembre 2007, n. 244, per la definizione dei valori limite di fabbisogno di energia primaria annuo e di trasmittanza termica ai fini dell'applicazione dei commi 344 e 345 dell'articolo 1 della legge 27 dicembre 2006, n. 296"*;
– Legge 13 dicembre 2010, n. 220: *"Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato"* (Legge di stabilità 2011).
Questo comparto normativo consente ai contribuenti di ottenere detrazioni sull'imposta lorda per una quota pari al 55% degli importi sostenuti in caso di riqualificazione energetica degli edifici esistenti, per interventi quali isolamento dell'involucro, sostituzione di generatori e serramenti, installazione di pannelli solari e così via… I dispositivi statali di detrazione hanno riscosso un enorme consenso: il numero di pratiche di richiesta di incentivo a partire dal 2007 ha superato di gran lunga le aspettative, attivando un vero e proprio motore economico nel mercato della certificazione energetica. A conferma del successo
del provvedimento è stata inoltre rilevata una significativa diminuzione dei consumi sul fabbisogno nazionale di energia, grazie alle opere di riqualificazione eseguite sull'onda di questa politica di incentivazione.

Le UNI TS 11300

Le specifiche tecniche contenute nelle UNI TS 11300 sono state elaborate dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) a supporto della direttiva europea 2002/91/CE. Attualmente sono state recepite solo le prime due parti del blocco normativo UNI TS 11300, costituito da 4 parti:
– **UNI TS 11300-1**: *"Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale"* La norma UNI TS 11300 – 1, che sostituisce la UNI 10379:2005, definisce le modalità per l'applicazione nazionale della UNI EN ISo 13790:2008. Viene applicato il metodo mensile per calcolare i fabbisogni di energia termica dell'involucro per riscaldamento e raffrescamento.

La norma è rivolta a tutte le applicazioni previste dalla UNI EN ISo 13790: il progetto *(design rating)* o la valutazione energetica degli edifici in condizioni standard *(asset rating)* ed in condizioni effettive di utilizzo *(tailored rating)*. Ulteriori dettagli in merito sono contenuti nel prossimo capitolo. Il D.Lgs. n. 115/2008 prima, il D.P.R. n. 59/2009 e le linee guida poi hanno adottato le UNI TS 11300 come principale strumento di riferimento per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, per progetto, certificazione e diagnosi energetica. Per la clausola di cedevolezza del D.Lgs. n. 192 possono coesistere norme e procedure a livello regionale in materia, purché in accordo con le suddette UNI.

– **UNI TS 11300-2**: *"Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria"*

La norma UNI TS 11300-2 specifica i metodi per determinare:

– il fabbisogno di energia utile per l'acqua calda sanitaria;

– il rendimento dei sottosistemi degli impianti di riscaldamento e produzione ACS;

– i fabbisogni di energia elettrica dei dispositivi ausiliari ai sistemi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria;

– i fabbisogni di energia primaria per il riscaldamento e la produzione di acqua calda ad usi igienici e sanitari.

La norma UNI TS 11300-2 unitamente alla UNI EN 15316-2-3:2008 sostituisce la UNI 10347:1993 e unitamente alle UNI EN 15316-1:2008 e UNI EN 15316-2-1:2008 sostituisce la UNI 10348:1993. La norma UNI TS 11300 – 2 sostituisce inoltre le Raccomandazioni CTI 03/3 del novembre 2003.

– **UNI TS 11300-3**: *"Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva"*

La parte 3 contiene la procedura di calcolo per valutare il rendimento dei sottosistemi dell'impianto ed il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva. Il testo di questa norma è già stato pubblicato ma non ancora recepito.

– **UNI TS 11300-4**: *"Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e produzione di acqua calda sanitaria"*

La parte 4 delle UNI TS 11300 tratta il calcolo dei contributi di energia da fonti rinnovabili (solare termico, biomasse e solare fotovoltaico) per le prestazioni energetiche degli edifici; specifica inoltre come trattare alcuni metodi di generazione non inclusi nella parte 2, come

pompe di calore, cogenerazione e teleriscaldamento. La norma è attualmente in fase di inchiesta pubblica e sarà recepita dalla legislazione nazionale presumibilmente entro la fine del 2011.

Altre norme tecniche di riferimento

Le norme della serie UNI TS 11300 costituiscono lo strumento principale di riferimento per il progettista od il certificatore che voglia calcolare la prestazione energetica di un edificio. Le specifiche tecniche in esse contenute tuttavia rimandano sovente a disposizioni incluse in altre norme della serie UNI. È opportuno pertanto disporre accanto alle UNI TS 11300 delle principali norme UNI della sezione termotecnica, per comprendere a pieno tutte le procedure necessarie allo svolgimento

delle analisi. Un elenco completo delle norme tecniche UNI riconosciute come riferimento dalla legislazione nazionale è contenuto nell'Allegato B delle linee guida per la certificazione (Decreto ministeriale 26 giugno 2009). Di seguito si indicano le più significative.

– **uni en iso 13790:2008** *"Prestazione termica degli edifici – Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento"*

Questa norma costituisce il più importante riferimento a livello europeo per i metodi di calcolo dei fabbisogni di energia termica dell'involucro degli edifici residenziali e non, per quanto riguarda sia il riscaldamento che il raffrescamento. La UNI TS 11300-1 rappresenta di fatto la sua diretta applicazione nazionale.

– **uni en iso 13789:2008** *"Prestazione termica degli edifici – Coefficiente di perdita di calore per trasmissione – Metodo di calcolo"*

In questa norma si indicano i metodi per calcolare i coefficienti di scambio termico verso esterno, zone non riscaldate o zone confinanti riscaldate da altri impianti.

– **uni en iso 6946**: *"Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo"*

Illustra le procedure per calcolare la trasmittanza delle strutture opache multistrato; fornisce inoltre alcuni valori di riferimento per calcolare la resistenza termica degli strati superficiali e delle intercapedini d'aria.

– **uni en iso 10077-1** e **10077-2**: *"Calcolo della trasmittanza termica delle finestre"*

Questa norma contiene le indicazioni per valutare la trasmittanza dei serramenti, considerando varie tipologie di vetro e telaio. Fornisce inoltre alcuni valori standard di riferimento per i tipi più comuni di finestre.

– **uni en iso 13370**: *"Prestazione termica degli edifici – Trasferimento di calore attraverso il terreno – Metodi di calcolo"*

Spiega i metodi per calcolare la dispersione termica degli elementi confinanti con terreno, vespaio o volumi interrati.

– **uni en iso 14683** *"Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento"*

Questa norma contiene alcuni metodi per determinare i flussi di calore attraverso ponti termici lineari, localizzati nelle giunzioni tra elementi degli edifici. Un prospetto riporta inoltre valori standard di trasmittanza termica lineica per le più comuni tipologie di ponte termico: coperture, angoli, pavimenti, pareti interne, pilastri, serramenti di porte e finestre.

– **uni 10349**: *"Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici"*

Contiene le tabelle con i dati climatici di riferimento dei capoluoghi di provincia italiani, tra cui le temperature esterne per mese, le irradiazioni nelle varie esposizioni per mese, pressioni di vapore esterne mensili, eccetera … Si illustra inoltre come ricavare per interpolazione i dati climatici di un qualunque comune.

– **uni 10351**: *"Materiali da costruzione – Conduttività termica e permeabilità vapore"*

– **uni 10355**: *"Murature e solai – Valori della resistenza termica e metodo di calcolo"*

Riportano per i materiali più comunemente utilizzati in edilizia i principali dati necessari a svolgere i calcoli di dispersione termica (statica o dinamica) e comportamento termoigrometrico.

– **uni en iso 13786**: *"Prestazione termica dei componenti per edilizia – Caratteristiche termiche dinamiche – Metodi di calcolo"*

– **uni en iso 13788**: *"Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e condensazione interstiziale – Metodo di calcolo"*

Queste due norme UNI illustrano i metodi per studiare le caratteristiche di dispersione termica dinamica (utile per il periodo estivo) e di comportamento termoigrometrico delle strutture multistrato in edilizia. Il D.P.R. n. 59 prevede obbligatoriamente la valutazione ed alcune verifiche di entrambi gli aspetti.

Verso il Calcolo Dinamico

Chiarimenti sulla nuova norma per il calcolo in regime dinamico UNI EN ISO 52016

[29] A breve conosceremo la versione UNI delle prime norme della serie 52000 (tra cui la UNI EN ISO 52016), ma continueremo ad utilizzare le UNI/TS 11300 finché non saranno pubblicati anche gli allegati nazionali. E probabilmente, tali allegati saranno accompagnati da un chiarimento legislativo che ne disciplinerà tempi e modi d'applicazione. Quindi, finché non verranno pubblicati gli allegati tecnici nazionali e il legislatore non si pronuncerà a loro favore, si continuerà ad utilizzare il metodo quasi stazionario medio mensile descritto nelle norme UNI/TS 11300. Questo vale per tutti gli ambiti di calcolo: redazione di un APE, di una Legge 10 o di una diagnosi energetica.

La possibilità di utilizzare un metodo più raffinato basato su un modello dinamico orario è quindi (per ora) solo uno strumento facoltativo per approfondimenti di natura energetica.

La pubblicazione della norma mette in luce la linea di sviluppo che sta prendendo il comparto normativo, e questo fatto è interessante per due motivi.

Il primo è di carattere culturale: è interessante sapere che da qui a qualche anno sarà richiesto un allineamento tecnico verso l'alto a tutti coloro che si occupano di efficienza energetica. L'uso di un metodo dinamico pone infatti nuovi temi e dubbi (ma anche nuovi spunti e soluzioni) per i progettisti, i termotecnici e i modellizzatori energetici. E questi soggetti per trovare una valorizzazione economica nel mercato dovranno approfondire le proprie conoscenze in ambito energetico.

Il secondo motivo è di carattere operativo: per gli addetti ai lavori è interessante sapere che nell'arco di qualche anno il metodo di calcolo quasi stazionario medio mensile andrà in pensione a favore di metodi orari dinamici. Conoscere i contenuti della norma oggi, quindi vuol dire prepararsi al cambiamento di domani.

I vantaggi di un calcolo dinamico sono molteplici e a più livelli. Infatti un modello dinamico orario consente una maggiore affidabilità dei risultati e nuove opzioni di controllo del progetto. Tra le tante possibilità segnaliamo ad esempio:

- l'analisi del reale fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio;

- la verifica delle condizioni di comfort all'interno degli ambienti;

- lo studio delle potenze richieste dai diversi servizi energetici e quindi un ottimizzazione del dimensionamento degli impianti;

- la valutazione dell'efficacia dei sistemi di controllo solare e del comportamento inerziale dell'involucro.

Con un modello di simulazione dinamica si possono ottenere diversi vantaggi, tra i quali:

– un bilancio energetico estivo ed in invernale più realistico;

– una valutazione previsionale dei consumi di energia primaria;

– una valutazione dei parametri ambientali (temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria);

– una più corretta valutazione delle potenze termiche dei componenti sia in inverno che in estate;

– una valutazione più corretta degi effetti della radiazione solare, in quanto viene simulato il percorso solare ora per ora;

– una valutazione più corretta degli effetti dei sistemi di ombreggiamento o degli effetti delle ombre portate dagli altri edifici;

– una valutazione corretta degli apporti energetici dovuti ai componenti bioclimatici come serre o sistemi a guadagno diretto;

– una valutazione delle prestazioni energetiche di involucri particolari come facciate a doppia pelle o pareti ventilate.

Bibliografia

[1] Akbari H., R. Bell et al. (2008) "Urban heat island basics", EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

[2] Kolokotsa, D., Psomas, A., Karapidakis, E., Urban heat island in southern Europe: the case study of Hania, Crete., Solar Energy, 83 (2009), pp. 1871–1883, http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.018.

[3] Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., Caouris, Y. G., On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece, Sustain. Cities Soc., (2011), 1, pp. 16–28, http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.003.

[4] European Environment Agency, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: an indicator-based report, 2012, http://dx.doi.org/10.2800/66071.

[5] Akbari, H., Bretz, S., Kmn, D. M., Hanford, J., Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs, Energy and Builduings, 25 (1997), pp. 117–126.

[6] Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., Pomerantz, M., Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction, Energy and Buildings, 28 (1998), pp. 51–62.

[7] De la Flor, F. S., Domı´ınguez, S. A., Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings, Energy Build, 36 (2004), pp. 403–413, http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.050.

[8] Hassid, S., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Linardi, A., Klitsikas, N., The effect of the Athens heat island on air conditioning load, Energy Build, 32 (2000), pp. 131–141.

[9] Oxizidis, S., Dudek, A. V., Papadopoulos, A. M., A computational method to assess the impact of urban climate on buildings using modeled climatic data. EnergyBuild., 40 (2008), pp. 215–223, http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.018.

[10] Sun, Y., Augenbroe, G., Urban heat island effect on energy application studies of office buildings, Energy Build., 77 (2014), pp. 171–179, http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.055.

[11] Oke T. R. (1982), “The energetic basis of the urban heat island”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108, n. 455, 1 24.

[12] Rizwan, Ahmed Memon, Leung Dennis Y.C. e Chunho Liu (2008), “A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island”, Journal of Environmental Sciences 20, 120 128.

[13] Unger Janos (2009) “Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database”, International Journal of Environment and Pollution, 36, 59 - 80.

[14] B. Gebhart, Heat Transfer, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1971.

[15] B. Gebhart, Surface temperature calculations in radiant surroundings ofarbitrary complexity −for gray, diffuse radiation, Int. J. Heat Mass Transfer 3(4) (1961) 341–346.

[16] Bonafè G. (2006), “Microclima urbano: Impatto dell'urbanizzazione sulle condizioni climatiche locali e fattori di mitigazione”, ARPA Emilia-Romagna.

[17] Akbari H. (2005), “Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation”, Lawrence Berkeley National Laboratory.

[18] Chin G., A. Desjarlais, M. Estes et al. (2008), “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Cool Roofs”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

[19] Santamouris M. (2001), Energy and Climate in the Urban Built Environment, James&James Science Publishers Ltd, Londra.

[20] Gartland Lisa (2008), Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas, Earthscan, London.

[21] Haberl J. e S. Cho (2004), “Literature Review of Uncertainty of Analysis Methods (Cool Roofs), Report to the Texas Commission on Environmental Quality. Energy Systems Laboratory” (http://esl.tamu.edu), Texas A&M University.

[22] Taha Haider (1997), ”Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat”, Energy and Buildings, 25, 99 103.

[23] Santamouris M., A. Synnefa, e T. Karlessi (2011), "Using advanced cool materials in

the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions.", Solar Energy 85, 12, 3085 3102.

[24] Ferguson B., K. Fisher, J. Golden et al. (2008), “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Cool Pavements”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

[25] Bell R., Cole D., DeAngelo B. et al. (2008) “Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. Tree and Vegetation”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

[26] Pauleit S., Duhme F. (2000), "Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning", Landscape and Urban Planning, 52, 1–20.

[27] Bell R., R. Berghage, H. Doshi et al. (2008), ”Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Green Roofs”, EPA-U.S. Environmental Protection Agency.

[28] Lazzarin R., Castellotti F., Busato F. (2005), “Experimental measurements and numerical modelling of a green roof”, Energy and Buildings, vol. 37, 1260 1267, ISSN: 0378 7788.

[29] Galbusera Giorgio – ANIT 21/02/2018.