

Contents



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E
NATURALI

Corso di Laurea in Fisica ed Astrofisica

Sviluppo di metodi per la caratterizzazione indoor di concentratori solari

Tesi di Laurea di:

Edgar Bonfiglioli

Edgar Bonfiglioli

Relatore:

Dott. Antonio Parretta

Antonio Parretta

Anno Accademico: 2008/2009

Contents

1	Introduzione	3
2	Generalità sulla concentrazione solare	4
2.1	Definizioni	4
2.2	Concentratori solari di tipo non-imaging	5
3	Metodi di caratterizzazione indoor di concentratori	6
3.1	Metodo diretto	6
3.2	Metodo inverso	8
4	Realizzazione e caratterizzazione delle componenti	11
4.1	Sfere Integratrici in plastica	11
4.1.1	Prove di deposizione di $BaSO_4$ su provini piani	11
4.1.2	Caratterizzazione ottica dei provini piani	13
4.1.3	Realizzazione della sfera (foratura, trattamento superficiale, coating interno ed esterno)	17
4.2	Caratterizzazione delle Sfere Integratrici	26
4.2.1	Misure di Lambertianità	26
4.2.2	Misura di Riflettività da Contrasto (metodo MiRCo)	31
4.3	Caratterizzazione di specchi parabolici	39
5	Caratterizzazione e calibrazione del sistema	41
5.1	Montaggio su banco ottico del sistema (metodo diretto)	41
5.1.1	Misure di omogeneità dell'irraggiamento	45
5.2	Montaggio su banco ottico del sistema (metodo inverso)	46
6	Misure sperimentali	48
6.1	Misure sul concentratore "Rondine"	48
6.1.1	Misura con metodo diretto	49
6.1.2	Misura con metodo inverso	53
7	Conclusioni	57
A	Teoria delle sfere integratrici	60
B	Teoria del metodo MiRCo	73

1 Introduzione

Quale che fosse stata l'origine dell'energia consumata, le popolazioni di tutto il mondo hanno continuato per anni ad investire nei consumi disinteressandosi di provvedere ad un seppur minimo bilancio energetico in avvenire. Soltanto nei tempi più recenti la sensibilità nei confronti di questa materia è andata aumentando, fino a diventare ben presto, tanto più presto quanto più vicino il pericolo del venir meno delle comodità conquistate, un'esigenza sotto la quale si piegano i programmi di governo. Ed è sotto il peso di questa esigenza che si inizia a sentir parlare, anche attraverso il mezzo televisivo, di "rivoluzione solare" per paesi come gli Stati Uniti d'America, sensibili, fin dalle loro origini, alle crisi economiche come ad ogni possibilità di rilancio industriale. Lo studio riguardante la concentrazione solare si colloca, in questo ambito, tra gli studi fisici più gettonati perché finalizzati a dare risposte concrete e rapide ad esigenze di massa per lo sviluppo di energia pulita, con l'avvertenza di ridurre i costi di produzione. In questo lavoro di tesi abbiamo messo in pratica due sistemi di misura per la caratterizzazione indoor di concentratori solari, ovvero sistemi che ci permettono di pervenire a curve di efficienza relativa di un concentratore. In laboratorio i sistemi sono stati applicati per la caratterizzazione di uno degli ultimi modelli di concentratori della famiglia "Rondine" progettati e prodotti da CPower SRL, neonata azienda ferrarese dedita alla commercializzazione di Sistemi Fotovoltaici a Concentrazione per la produzione di energia, oltreché della loro progettazione. [1, 2, 3, 4] Un'azienda che, grazie anche alla collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara, promette di svolgere un lavoro serio ed efficace per migliorare la nostra qualità della vita.

Lo strumento principale utilizzato in questo lavoro di tesi, ai fini della caratterizzazione dei suddetti concentratori, è stato la *sfera integratrice*, che abbiamo provveduto a realizzare artigianalmente in laboratorio e a cui dedicheremo gran parte di questa relazione.

2 Generalità sulla concentrazione solare

2.1 Definizioni

Tra le prime definizioni vogliamo chiarire che cosa si intende per concentratore, e quali sono le principali grandezze radiometriche a cui fare riferimento in questo lavoro di tesi, con relative unità di misure in uso corrente nel Sistema Internazionale. I concentratori, in ambito fotovoltaico, usano lenti o superfici riflettenti per concentrare la luce solare sulle celle di silicio, riducendone così l'area richiesta per ottenere una certa quantità di potenza prodotta dalle celle stesse. [5, 6, 7, 8, 9] Per i concentratori si definisce una proprietà caratteristica: il *rapporto di concentrazione*, definito come il rapporto tra l'area di ingresso della radiazione e l'area di uscita nel caso ideale in cui tutta la radiazione in ingresso possa uscire attraverso l'area di uscita. In sostanza attraverso l'uso di concentratori solari, si aumenta la densità energetica dell'energia solare (che ha un picco approssimativo di $1kW/m^2$), attraverso fattori dati appunto dai rapporti di concentrazione solare che vanno dalle decine alle migliaia di “soli”. Il principio di concentrazione applicato ai pannelli solari consente di produrre una pari quantità di energia tramite una superficie inferiore di celle fotovoltaiche. Facendo un esempio con riferimento alla figura 2.1 la superficie (A) colpita dalla radiazione solare può convogliare la radiazione verso una superficie più piccola (A') tramite un dispositivo quale il nostro concentratore.

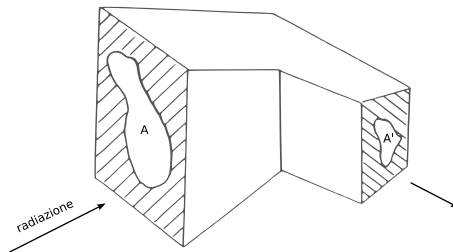


Figure 2.1: Diagramma schematico di un concentratore, la radiazione in ingresso attraverso la superficie A esce dalla superficie A'.

Ed è appunto il rapporto di concentrazione $C = A/A'$ ad essere solitamente indicato in “numero di soli”. Se teniamo conto dei difetti del nostro concentratore bisogna moltiplicare C per una grandezza che esprime l'efficienza di concentrazione η_{conc} .

Le quantità più usate in radiometria sono flusso, irradianza, intensità e radianza.

Il flusso, Φ , è la potenza ottica o l'andamento di flusso d'energia radiante, e si misura in Watt.

L'irradianza, E , è il flusso per unità d'area che colpisce una superficie, e si misura in

W/m^2 . Da sola non da alcuna informazione sulla direzionalità del flusso. La definizione di intensità coinvolge il concetto di angolo solido. L'angolo solido è un volume angolare tridimensionale che è definito analogamente all'angolo piano delle due dimensioni. L'unità dimensionale dell'angolo solido è lo steradiano, con 4π steradiani in una sfera piena.

L'intensità, I , è il flusso per unità d'angolo solido, e si misura in W/sr . E' la quantità di flusso emesso da una sorgente puntiforme contenuto in un volume angolare unitario. Una sorgente può essere considerata puntiforme in questo caso, se l'irradianza cala con l'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente.

La radianza, L , si applica a sorgenti estese e superfici. E' il flusso per unità d'angolo solido per unità d'area proiettata della sorgente o superficie, e si misura in W/m^2sr . L'area proiettata è la proiezione dell'area sulla superficie normale alla direzione di vista ed è uguale all'area attuale per il coseno dell'angolo tra la normale della superficie e la direzione di vista. La radianza può variare con la posizione sulla superficie e, come l'intensità, con la direzione.

2.2 Concentratori solari di tipo non-imaging

I sistemi a concentrazione basati sull'ottica senza immagine (non-imaging optics) [1-4] sono oggi molto studiati per via di una serie di vantaggi, tra i quali i più importanti sono:

- la possibilità di raggiungere livelli molto elevati di concentrazione solare (attraverso il loro impiego sono stati raggiunti i limiti termodinamici della concentrazione, dell'ordine di 100.000 soli);
- l'uso prevalente di superfici riflettenti e quindi l'assenza di aberrazioni
- una curva di efficienza poco sensibile all'angolo di incidenza della luce che si riflette su una minore sensibilità agli errori di inseguimento solare (solar tracking).

I sistemi a concentrazione del tipo "senza immagine" sono quindi divenuti oggi delle valide alternative ai più noti sistemi a concentrazione basati sull'uso di lenti di Fresnel o di specchi parabolici, d'altra parte i concentratori non-imaging avrebbero aberrazioni molto grandi se usati come sistemi a formazione d'immagine. Tra i più famosi concentratori appartenenti a questa categoria si ricordano i concentratori CPC (Compound Parabolic Concentrator), solidi di rivoluzione ottenuti dalla rotazione di una parabola attorno ad un asse diverso dall'asse di simmetria. Il concentratore "Rondine" ne rappresenta un caso particolare, del quale verrà discusso nel capitolo 6.

3 Metodi di caratterizzazione indoor di concentratori

Con la terminologia “metodo di caratterizzazione” ci si rifà ad ogni passo percorso per giungere alla descrizione di una specifica curva di efficienza in riferimento al particolare tipo di concentratore solare di cui si vogliono esaminare le caratteristiche. Quando il concentratore solare è di grandi dimensioni è escluso che possa essere caratterizzato in laboratorio. Esso è generalmente costituito da diverse parti (lenti o specchi) che potranno essere caratterizzati singolarmente direttamente al sole o in laboratorio. Le prestazioni reali del concentratore verranno poi simulate al computer in seguito ad un assemblaggio virtuale di tutti i componenti. In questo caso parliamo di metodo “indiretto” di caratterizzazione ottica. Diversa è la situazione per i concentratori di piccole dimensioni. In questo caso è possibile usare in laboratorio il metodo “diretto” sottoponendo il concentratore ad una radiazione solare simulata. Meno noto, perché sviluppato solo di recente, è invece il cosiddetto metodo “inverso” che consiste nell’illuminare il concentratore invertendo i raggi luminosi. In questo capitolo discuteremo esclusivamente questi due ultimi metodi in quanto i più adatti ad essere applicati al concentratore Rondine e ne confronteremo i risultati.

3.1 Metodo diretto

La caratterizzazione ottica di un concentratore solare è finalizzata essenzialmente alla misura della sua efficienza ottica in funzione dell’angolo d’incidenza della luce. [15, 16, 17] Questo perché il concentratore opera in condizioni di allineamento con il disco solare e quindi è necessario conoscere qual è la perdita di flusso conseguente ad un eventuale disallineamento del concentratore, ovvero con quale tolleranza deve essere costruito l’inseguitore solare su cui viene montato il concentratore. L’efficienza ottica misurata col metodo “diretto” in laboratorio richiede:

1. la preparazione di un fascio di luce collimato ed uniforme, eventualmente divergente come la componente diretta della luce solare ($\pm 0.27^\circ$);
2. l’illuminazione del concentratore ad una particolare orientazione, definita dagli angoli d’incidenza δ e dall’angolo azimutale φ ;
3. la misura del flusso incidente sull’apertura d’ingresso e quello all’uscita del concentratore.

3 Metodi di caratterizzazione indoor di concentratori

La figura 3.1 mostra lo schema semplificato del metodo diretto, applicato ad un concentratore parabolico composto (CPC), che è un tipico concentratore di tipo non-imaging (senza-immagine). Lo schema dettagliato dell'apparato è invece mostrato in figura 3.2.

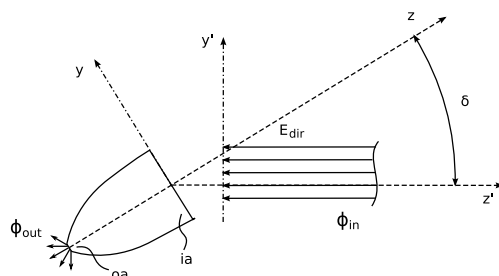


Figure 3.1: Schema di principio semplificato del metodo diretto.

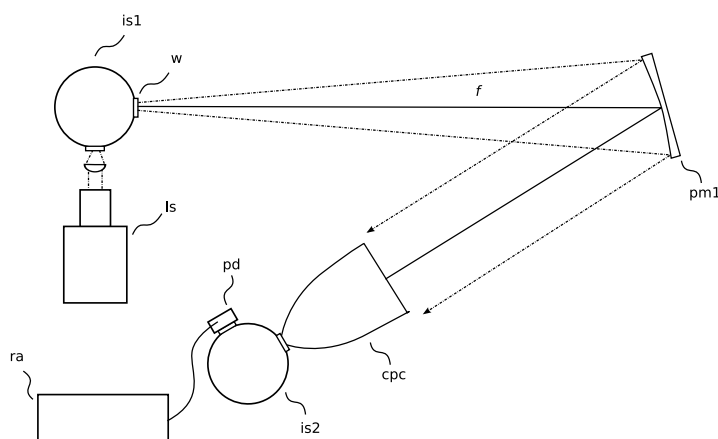


Figure 3.2: Schema dettagliato dell'apparato sperimentale relativo al metodo diretto.

La sorgente di luce (ls) illumina una sfera integratrice (is1) la quale produce, sulla sua apertura d'uscita (w), una luce diffusa con radianza costante. Lo specchio parabolico (pm1), orientato off-axis rispetto a (w) e ad una distanza uguale alla lunghezza focale f dello specchio, raccoglie parte della luce emessa dalla sfera e la trasforma in un fascio quasi collimato. La divergenza angolare massima del fascio è regolata dall'apertura della finestra (w). Per avere una divergenza pari alla componente diretta della radiazione solare ($\sim 0.27^\circ$), è necessario mantenere intorno a 100 il rapporto f/D_w tra lunghezza focale e diametro di (w). Il fascio parallelo è poi diretto verso il concentratore solare (cpc), opportunamente orientato. La luce in uscita dal (cpc) è raccolta da una seconda sfera integratrice (is2) ed il flusso misurato dal radiometro (ra) attraverso il fotorivelatore (pd). Orientando il concentratore (cpc) a diversi angoli δ rispetto all'asse del fascio, si può misurare l'andamento del flusso d'uscita e quindi l'efficienza ottica relativa del concentratore. Per ottenere l'efficienza ottica assoluta sarebbe necessario misurare anche il flusso incidente sull'apertura d'ingresso del concentratore attraverso una diversa config-

urazione del sistema, ma non è stato possibile effettuare questa misura per mancanza di tempo. L'efficienza angolare assoluta del concentratore è espressa dalla relazione:

$$\eta(\delta, \varphi) = \frac{\phi_{out}(\delta, \varphi)}{\phi_{in}(\delta)} = \frac{\phi_{out}(\delta, \varphi)}{E_{dir} A_{in} \cos \delta} \quad (3.1)$$

dove $\phi_{in}(\delta)$ e $\phi_{out}(\delta, \varphi)$ sono i flussi rispettivamente in ingresso e in uscita al concentratore, E_{dir} è l'irradianza corrispondente al fronte del fascio collimato incidente, A_{in} è l'area d'ingresso. L'efficienza angolare relativa si ottiene normalizzando quella assoluta al valore ottenuto a 0° (incidenza perpendicolare sull'apertura d'ingresso):

$$\eta_{rel}(\delta, \varphi) = \frac{\eta(\delta, \varphi)}{\eta(0)} = \frac{\phi_{out}(\delta, \varphi)}{E_{dir} A_{in} \cos \delta} \cdot \frac{E_{dir} A_{in}}{\phi_{out}(0)} = \frac{\phi_{out}(\delta, \varphi)}{\phi_{out}(0)} \frac{1}{\cos \delta} \quad (3.2)$$

La relazione 3.2 è stata utilizzata per calcolare l'efficienza angolare relativa del concentratore Rondine, le cui misure sono riportate nel paragrafo 6.1.1.

3.2 Metodo inverso

Il metodo “diretto” è indispensabile per misurare l'efficienza ottica assoluta di un concentratore. Esso è inoltre molto utile quando si voglia esaminare una particolare sezione dell'apertura d'ingresso per vagliare l'uniformità spaziale del processo di concentrazione. Le misure angolari dell'efficienza ottica col metodo diretto, però, sono estremamente lunghe ed elaborate, soprattutto quando riguardano concentratori a simmetria non cilindrica, per i quali occorre effettuare una serie di misure ad angolo d'incidenza variabile per ogni angolo azimutale d'interesse. Esiste però un altro metodo, sviluppato recentemente da A. Parretta et al. [18, 19, 20, 21, 22], il quale si è dimostrato di gran lunga più conveniente di quello diretto proprio per investigare le proprietà angolari del concentratore, in particolare l'efficienza ottica angolare relativa. Il metodo, chiamato generalmente “inverso” (“inverse method” o “reverse method” in inglese) e battezzato col nome di ILLUME (Inverse Illumination Method) è basato sull'inversione del cammino ottico della luce, da cui il nome. L'inversione del cammino ottico è realizzato illuminando il concentratore dalla parte del ricevitore anziché dalla parte dell'apertura d'ingresso, con le modalità illustrate di seguito. Esso è stato incidentalmente “scoperto” durante prove di laboratorio in cui un CPC veniva illuminato con luce laser, in quanto all'epoca non si disponeva di una sorgente estesa per l'illuminazione diretta. Durante una di queste prove è stato posto un diffusore bianco all'apertura di uscita ed è stato illuminato con la luce laser. Si sono subito notate delle figure interessanti sulla parete del laboratorio, prodotte dalla luce distribuita dal diffusore all'interno del concentratore. E' bastato poco poi per scoprire che quella figura proiettata conteneva informazioni importanti legate all'efficienza ottica, come ci accingiamo a dimostrare.

3 Metodi di caratterizzazione indoor di concentratori

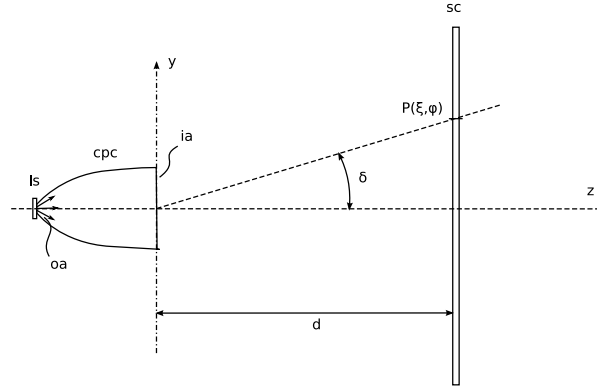


Figure 3.3: Schema di principio del metodo “inverso”.

La figura 3.3 mostra lo schema di principio del nuovo metodo: anziché illuminare l’apertura d’ingresso (ia) del concentratore con un fascio collimato ed uniforme e misurare il flusso sull’apertura di uscita, viene illuminata l’apertura d’uscita (oa) con luce diffusa lambertiana (ls) in direzione opposta e viene misurata la radianza della luce retrodiffusa al di là dell’apertura d’ingresso (ia) intercettandola con uno schermo piano (sc) (figura 3.3). E’ facile dimostrare che la luce diffusa in direzione opposta a quella convenzionale produce una radianza proporzionale all’efficienza ottica del concentratore. Consideriamo a titolo d’esempio un concentratore ideale del tipo CPC illuminato in diretta (figura 3.4). Esso sia caratterizzato per semplicità da assenza di perdita ottica sulla parete interna ($R_w = 1,0$); l’efficienza ottica dipenderà soltanto dal numero di raggi respinti indietro. Se allora proiettiamo l’apertura d’ingresso, di area A_{in} , lungo la direzione δ , possiamo distinguere due regioni: una verde di area A_G , attraversata soltanto dai raggi collezionati, cioè raggi in grado di raggiungere l’apertura d’uscita, un’altra rossa di area A_R , attraversata soltanto dai raggi respinti indietro dal concentratore.

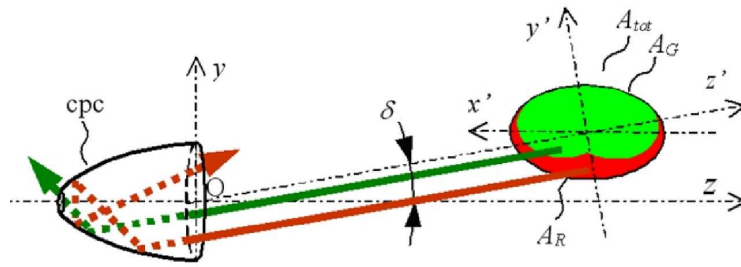


Figure 3.4: Rappresentazione schematica della collezione della luce in un CPC ideale.

Possiamo allora scrivere per l’efficienza ottica:

$$\eta(\delta, \varphi) = A_G(\delta, \varphi) / [A_R(\delta, \varphi) + A_G(\delta, \varphi)] = \dots = A_G(\delta, \varphi) / [A_{in} \cos \delta] \quad (3.3)$$

3 Metodi di caratterizzazione indoor di concentratori

I raggi che pervengono al concentratore a partire dall'area proiettata A_{tot} verso la direzione δ produrranno perciò due eventi distinti: alcuni raggi saranno collezionati, altri saranno respinti a seconda della regione di origine, verde o rossa, rispettivamente. D'altra parte, qualunque raggio sia prodotto a partire dall'apertura di uscita in direzione opposta, esso uscirà dalla parte dell'apertura d'ingresso. In particolare, i raggi retrodiffusi ad angolo δ saranno soltanto quelli che attraverseranno l'area verde di figura 3.4, e quindi si sovrapporranno a quelli potenzialmente collezionabili viaggianti in direzione opposta durante l'illuminazione diretta. In altre parole, i raggi inversi producono in direzione δ una radianza proporzionale all'efficienza ottica di collezione diretta per la stessa direzione δ . Si può dimostrare che l'illuminazione inversa da applicare all'apertura d'uscita (oa) perchè la proporzionalità di cui sopra sia assicurata, deve essere di tipo Lambertiano. Normalizzando la radianza rispetto alla direzione a 0° otteniamo la radianza inversa relativa:

$$L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) = \frac{L^{inv}(\delta, \varphi)}{L^{inv}(0)} = \frac{\eta(\delta, \varphi)}{\eta(0)} = \eta_{rel}(\delta, \varphi) \quad (3.4)$$

dove $L^{inv}(\delta, \varphi)$ e $L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi)$ sono, rispettivamente, la radianza assoluta e relativa del concentratore operante come sorgente di luce, $\eta(\delta, \varphi)$ e $\eta_{rel}(\delta, \varphi)$ sono, rispettivamente, le efficienze ottiche assoluta e relativa del concentratore operante come collettore di luce. L'equazione 3.4 è valida anche per un concentratore generico nel quale siano presenti perdite per riflessione e/o per assorbimento in corrispondenza di interfacce riflettive o rifrattive. A questo proposito, è sufficiente considerare il principio di reversibilità in ottica, che stabilisce l'invarianza dell'attenuazione subita da una radiazione e.m. in corrispondenza ad una interfaccia riflettiva o rifrattiva rispetto al verso di percorrenza del cammino ottico.

Per trovare $L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi)$ nell'equazione 3.4, intercettiamo la luce inversa per mezzo dello schermo (sc) posto a grande distanza rispetto alle dimensioni lineari dell'apertura (ia) (figura 3.3), e misuriamo l'irradianza $E^{inv}(d, P)$ prodotta nel punto $P(\xi, \varphi)$ sullo schermo, essendo d la distanza tra il centro dell'apertura del concentratore e lo schermo lungo l'asse ottico z . Abbiamo infine per la radianza relativa:

$$L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) = \frac{L^{inv}(\delta, \varphi)}{L^{inv}(0)} = \frac{E^{inv}(d, \delta, \varphi)}{E^{inv}(d, 0)} \frac{1}{\cos^4 \delta} = \dots = E_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) \frac{1}{\cos^4 \delta} \quad (3.5)$$

Al fine di avere una corrispondenza univoca tra coordinata del punto $P(\xi, \varphi)$ sullo schermo e angolo δ di emissione/incidenza, la distanza d deve essere mantenuta molto più grande (> 50 volte) della dimensione lineare D dell'apertura d'ingresso. Per una risoluzione (in radianti) migliore di $\Delta\delta$, dobbiamo avere: $d \geq D/2\Delta\delta$.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

4.1 Sfere Integratrici in plastica

Come obiettivo di questo lavoro di tesi ci siamo posti la caratterizzazione a basso costo di concentratori solari utili, come già evidenziato fin dalle prime righe, per abbattere i costi di produzione dei pannelli solari fotovoltaici, avendo ridotto di conseguenza la quantità di silicio del pannello. Il sistema di caratterizzazione preso in esame prevede il largo impiego di sfere integratrici come sorgenti di luce lambertiana e non solo, ovvero l'acquisto di svariate sfere integratrici che sul mercato si presentano a prezzi proibitivi. Per procedere comunque nel tentativo di sviluppo del sistema, ci troviamo dinnanzi alla prima grande sfida di questo lavoro di tesi: la realizzazione a costi contenuti di sfere integratrici in plastica anziché l'acquisto delle stesse in alluminio.

4.1.1 Prove di deposizione di $BaSO_4$ su provini piani

In commercio si possono recuperare praticamente ovunque oggetti in plastica di diverso tipo, e, tra i più comuni, abbiamo facilmente reperito delle vaschette per alimenti in plastica trasparente e un cartello stradale di plastica bianco (o in parte colorato) utilizzato generalmente per le affissioni sui portoni di casa. Sugli oggetti acquistati sono riportate le sigle, rispettivamente PE e PP, che identificano univocamente le materie plastiche di cui sono fatti e di conseguenza le relative specifiche. Indicato con la sigla PE, il polietilene (o politene) è il più semplice tra i polimeri sintetici, la sua grande versatilità e il suo modesto costo lo rendono il più diffuso tra le materie plastiche; si presenta come un solido trasparente in forma amorfa o bianco in forma cristallina. Con la sigla PP ci si riferisce invece al polipropilene di cui, tra le sue varianti a diversa tatticità¹, quello isotattico è il preferito dal punto di vista commerciale per la sua facilità nell'assumere una struttura cristallina o semi-cristallina. Entrambi polimeri sintetici, si distinguono: il primo per essere ottenuto per poliaddizione dell'etilene, il secondo per poliaddizione a partire dal monomero propene. Dalle diverse materie plastiche a disposizione quindi sono stati intagliati dei quadrati piani di dimensioni contenute, questi campioni non superano i 3-4 cm di dimensione per i loro lati. Con carte abrasive a diversa grana² infine - per esempio si potranno utilizzare le grane 80 e 220 per confronto - abbiamo sfregato una

¹In chimica la tatticità è la configurazione stereochimica (insieme delle proprietà spaziali delle molecole: assenza o presenza di centri, piani e assi di simmetria riflessiva o rotazionale) relativa tra atomi di carbonio asimmetrici adiacenti lungo la catena di un polimero.

²Più alto è il numero di grana più è fine l'abrasivo e più liscia sarà la finitura.

delle due superfici di ciascun campione; su tale superficie rugosa è stato depositato il Solfato di Bario ($BaSO_4$) in soluzione acquosa di colla vinilica. Alternativamente avremmo potuto depositare il $BaSO_4$ per compressione in recipienti portacampioni per evitare l'uso di un legante come il Vinavil.

La riflettanza spettrale del $BaSO_4$, materiale prescelto per la deposizione sui campioni piani, è molta alta e in particolare è più alta di quella di altri materiali, come ad esempio l'ossido di magnesio MgO , usati in passato come standard di riflettanza per costruire dispositivi ottici (ad esempio per il rivestimento delle pareti interne delle sfere integratrici). Utilizzando pitture a base di solfato di bario per dispositivi ottici di misura come gli spettrofotometri, oggi si è in grado di misurare in maniera attendibile la riflettanza spettrale dei materiali nella regione UV fino a circa $200nm$; appunto perché le pitture a base di $BaSO_4$ hanno, in corrispondenza delle regioni dello spettro a minore lunghezza d'onda, riflettanze maggiori di quelle a base di MgO , si ha un guadagno nella sensibilità dello strumento quando il solfato di bario viene usato come coating per le sfere integratrici e come materiale di confronto. Le basi sugli studi riguardanti gli standard di riflettanza per le applicazioni ottiche, furono gettate nel 1917 dal chimico tedesco Friedrich Wilhelm Ostwald, il primo a concludere che uno strato sufficientemente spesso³ del più puro precipitato di $BaSO_4$, poteva essere considerato come una superficie con riflettanza del 100%. Il solfato di bario veniva e viene tuttora preparato rimuovendo per precipitazione i metalli pesanti da una soluzione di cloruro di bario, mediante l'aggiunta di solfuri (cioè composti contenenti zolfo nel suo minor stato di ossidazione -2); filtrando il surnatante si ottiene una soluzione pura di cloruro di bario $BaCl_2$. A partire da quest'ultima soluzione, attraverso un'aggiunta di un lieve eccesso⁴ di acido solforico H_2SO_4 , si ricava, ancora una volta per precipitazione, il solfato di bario, che andrà quindi raccolto e lavato accuratamente. L'importanza della purezza del $BaSO_4$ fu appunto per la prima volta riconosciuta da Ostwald. Con il sopravanzare della ricerca, nel 1951 fu introdotto un altro elemento di confronto per i due materiali sopracitati che depositò in favore del $BaSO_4$; la stabilità del MgO fu messa definitivamente in discussione per via della caratteristica formazione di centri di colore quando questo materiale viene investito da radiazione UV. Per di più questi centri di colore possono sbiadire nel tempo, introducendo ulteriori fattori di incertezza.[23]

Il Vinavil (acronimo di Vinilacetato Villadossola) è il marchio depositato dell'acetato di vinile, tra i collanti è il più famoso in commercio, talvolta pure conosciuto come *colla bianca* per il suo colore caratteristico. Prepariamo soluzioni acquose di Vinavil alle diverse concentrazioni, 10 g/l, 20 g/l, 50 g/l e 100 g/l, assicurandoci di agitare bene la soluzione per evitare il deposito di Vinavil non dispersosi nel solvente. Il Solfato di Bario, per la sua scarsa solubilità⁵, viene costantemente mescolato per essere mantenuto in sospensione nelle diverse soluzioni acquose di Vinavil; nelle diverse soluzioni si mantiene una

³A causa del basso indice di rifrazione del $BaSO_4$, è necessario usarne strati piuttosto spessi ($\approx 0,4mm$) per ottenere buoni risultati: dall'equazione della riflettanza di una superficie di separazione infatti si vede che essa è tanto maggiore quanto è più grande la differenza tra gli indici di rifrazione dei due materiali contigui.

⁴In chimica la terminologia "lieve eccesso" indica che non si sono seguite indicazioni stechiometriche.

⁵Solubilità in acqua di $BaSO_4 < 0,01$ g/l a temperature di $20^\circ C$

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

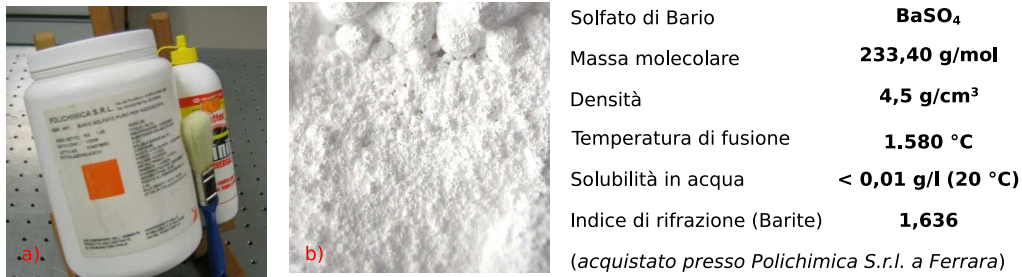


Figure 4.1: Materiali occorsi per la deposizione (a), immagine della polvere (b) di $BaSO_4$ e le relative proprietà chimiche (Barite è il nome del minerale del Solfato di Bario).

percentuale all'incirca del 10% di Solfato di Bario in sospensione. Disponiamo su un cartoncino in successione una serie di $n + 1$ di provini piani opportunamente trattati con una stessa carta abrasiva e, a pennello, depositiamo n mani successive di una delle particolari soluzioni preparate con $BaSO_4$ in sospensione, con l'avvertenza di lasciare, a partire dalla prima mano, il primo campione libero, cioè senza depositarne materiale sulla superficie per un raffronto finale. Si procede quindi in seguito, dopo una prima asciugatura, a depositare le $n - 1$ mani rimaste via via sugli altri campioni diminuiti ancora di un'unità; alla fine delle n mani di vernice abbiamo così ottenuto, a nostra disposizione per un confronto, $n + 1$ provini di cui il primo lasciato libero da depositi, ed i successivi ricoperti da un differente numero di mani di vernice in ordine progressivo; il secondo campione ricoperto da una mano soltanto, il terzo da due mani, il quarto da tre mani e così via, fino ad arrivare al campione $n + 1$ ricoperto da n strati di $BaSO_4$ in sospensione nella soluzione acquosa di colla vinilica prescelta per la prova di deposizione. Si ripetono le stesse procedure più volte al variare delle concentrazioni di Vinavil, al variare delle concentrazioni di $BaSO_4$ in sospensione, al variare del numero n di mani di vernice che desideriamo depositare (per le prove riportate in figura 4.2 (a) si ha predisposto $n = 13$ ad esempio, per avere la certezza di raggiungere lo spessore raccomandato), ed infine se ne valutano i risultati.

4.1.2 Caratterizzazione ottica dei provini piani

Per prima cosa già *al tatto* si può verificare una differenza nell'adesione superficiale del $BaSO_4$ tra le diverse soluzioni acquose di Vinavil adoperate: passando con un polpastrello sui campioni trattati con soluzioni a minori concentrazioni di Vinavil si riesce, senza esercitare pressioni particolarmente notevoli, a rimuovere gli strati più superficiali del deposito. Per una prima grossolana valutazione *a vista* della trasmittanza si sono disposti ordinatamente i campioni di PE (questi si presentano inizialmente trasparenti) su fogli a righe colorate come mostra la figura 4.2; così facendo possiamo facilmente osservare come la trasmittanza dei campioni subisca una progressiva diminuzione, all'aumentare delle mani di vernice depositata; la riga rossa dell'esempio si vede sempre meno e a partire dal quarto-quinto campione, corrispondente al terzo-quarto deposito, non si riuscirà

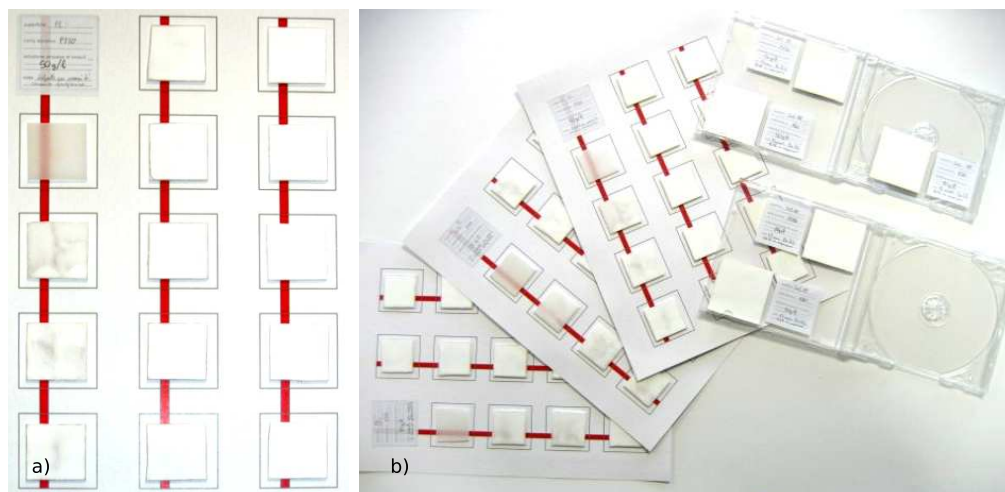


Figure 4.2: Prove di deposizione, campioni disposti verticalmente per mani successive (a), diverse serie di prove disposte artisticamente (b).

più a distinguere del tutto.

Ad una analisi così puramente esemplificativa di trasmittanza, seguono delle più approfondite analisi di riflettanza spettrale in laboratorio effettuate con spettrofotometro PerkinElmer $\lambda 900$. Per queste analisi abbiamo selezionato ed inviato 7 campioni tutti trattati con 13 mani di vernice, ma ciascuno si differenzia dagli altri, o per quanto riguarda la vernice utilizzata o per via di altre caratteristiche, come il materiale plastico di cui è fatto il campione. In tabella 4.1 sono riassunte le caratteristiche dei campioni inviati, di seguito sono riportati i grafici di riflettanza spettrale ottenuti. I risultati, riportati in figura 4.3, ci permettono di distinguere i campioni trattati con $BaSO_4$ in base al tipo di plastica utilizzata piuttosto che in relazione alla concentrazione vinilica del legante o alla diversa rugosità della carta abrasiva. Si suppone inoltre che le differenze siano dovute alla quantità di materiale depositato a pennello, parametro di cui in effetti non abbiamo tenuto conto in corso d'opera, se non nel considerare un uguale numero di mani di pittura depositate. Osservando quindi le curve di riflettanza spettrale dei diversi campioni si possono facilmente notare due andamenti peculiari per le due rispettive plastiche costituenti il substrato del deposito. A seconda della natura del substrato plastico abbiamo tracciato due andamenti medi caratteristici come si può notare dalla figura 4.4, rispettivamente il primo in nero calcolato tra i campioni 1, 2 e 3, mentre il secondo in rosso tra i campioni 4, 5, 6, e 7.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

campione (#)	plastica	vinavil (g/l)	carta abrasiva (grana)	note particolari
1	PE	10	220	
2	PE	20	220	
3	PE	50	220	
4	PP	10	80	
5	PP	20	220	
6	PP	50	220	
7	PP	10	220	grumi di pittura

Table 4.1: Le caratteristiche dei campioni di cui abbiamo richiesto un'analisi di riflettanza spettrale.

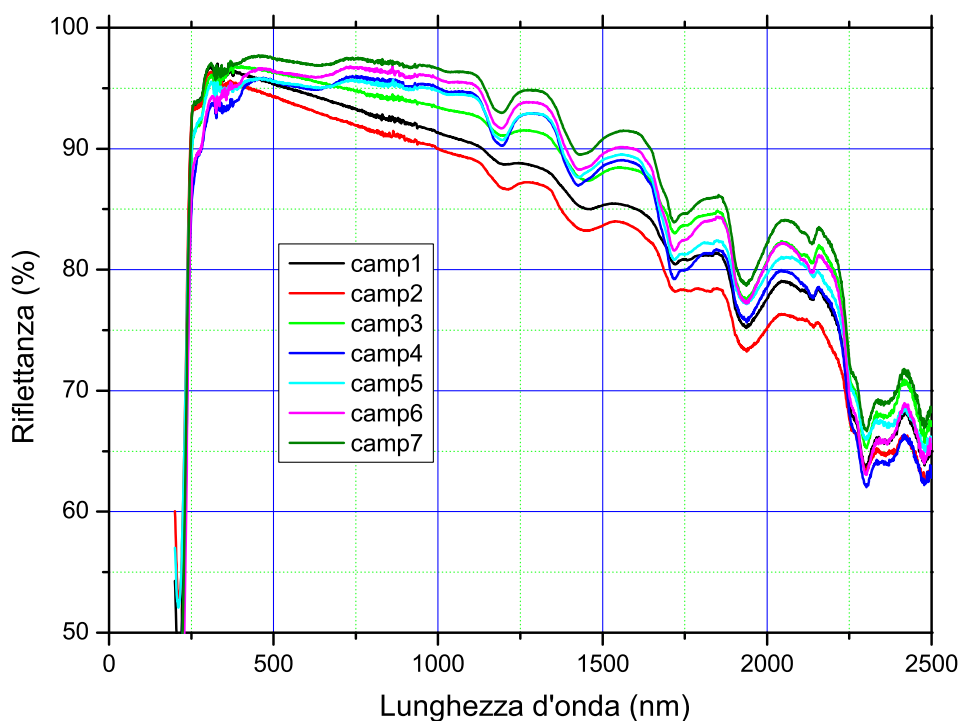


Figure 4.3: Risultati dell'analisi spettrale dei campioni elencati in tabella 4.1, ottenuti per valori di lunghezza d'onda $\lambda \in [200nm; 2500nm]$ (mentre in particolare si ricorda che il range di lavoro del Silicio è compreso tra i $300nm$ e i $1200nm$).

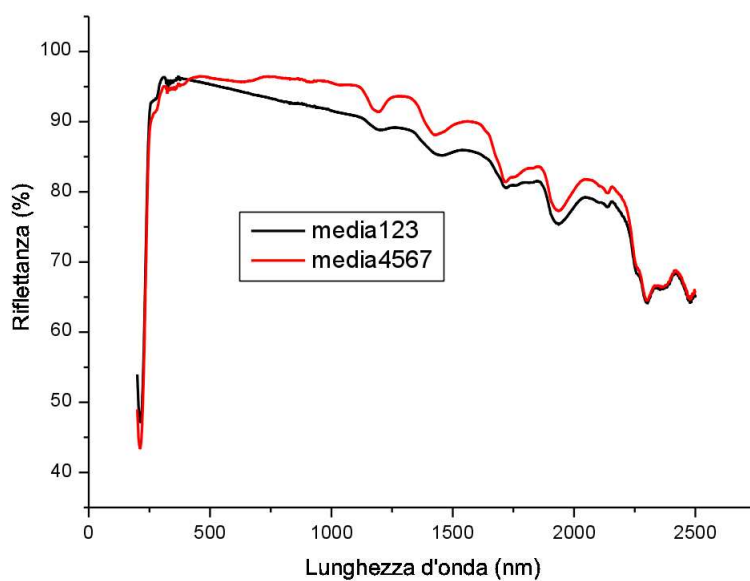


Figure 4.4: Andamenti caratteristici medi per le curve di riflettanza spettrale.

Nell'ambito degli studi sugli standard di riflettanza si riportano in figura 4.5 alcuni spettri di riflettanza misurati per altre pitture a base di $BaSO_4$ e non solo: il nostro risultato si colloca tra questi nella regione del vicino infrarosso $\lambda \in [500nm; 2500nm]$, assicurandoci che le modalità di deposizione si sono svolte secondo criterio, e addirittura risulta particolarmente buono per la risposta nella regione UV con $\lambda \in [200nm; 700nm]$.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

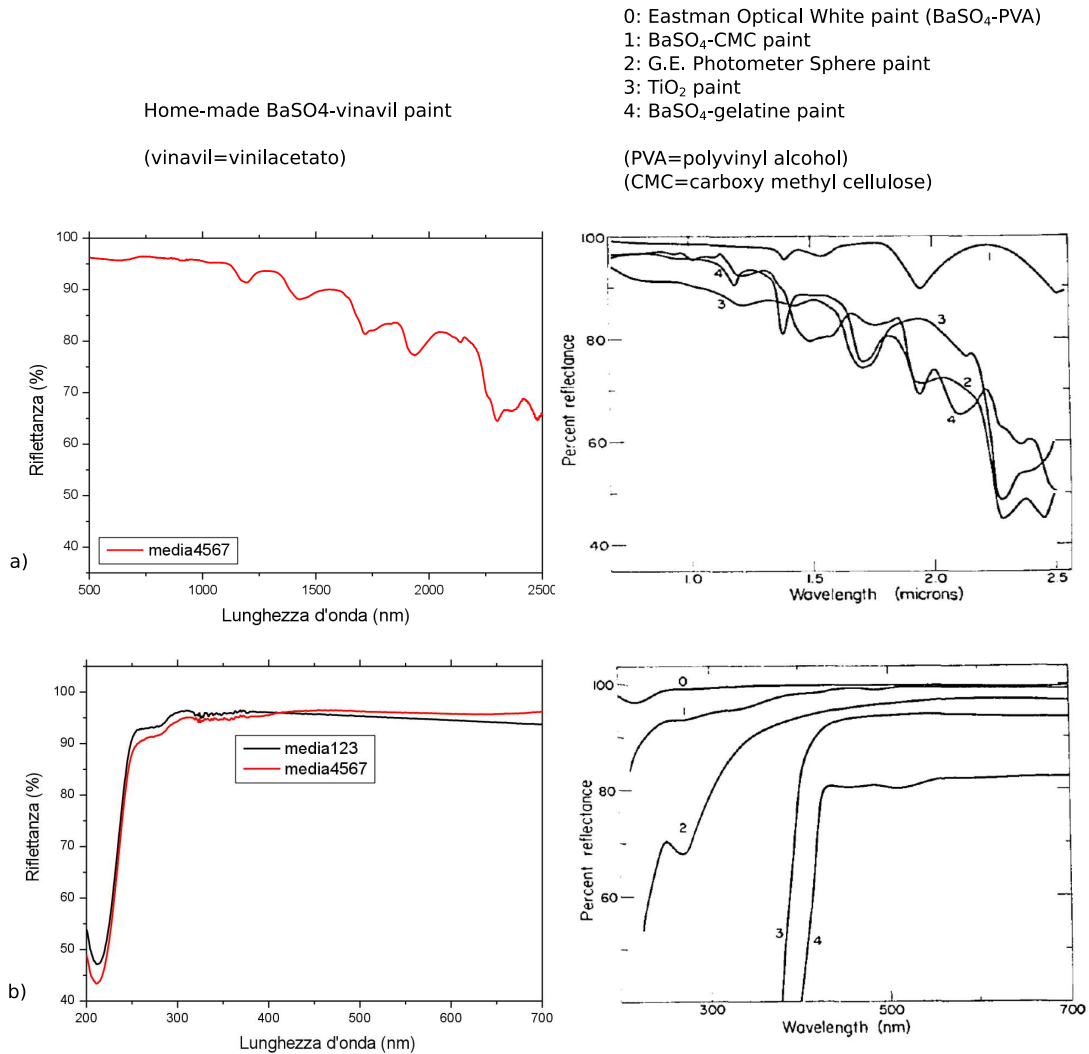


Figure 4.5: Curve di riflettanza spettrale a confronto, nelle regioni di vicino IR (a) e di UV-VIS (b). Le curve sperimentali a destra sono riportate da uno articolo di F. Grum e G. W. Luckey pubblicato sulla rivista Applied Optics.

4.1.3 Realizzazione della sfera (foratura, trattamento superficiale, coating interno ed esterno)

Per realizzare questo dispositivo ottico, facendo particolare cura a contenerne i costi⁶, si parte dall'acquisto di alcuni globi trasparenti in plastica per lampade da giardino che abbiamo facilmente reperito in ferramenta e procediamo a caratterizzarne le dimensioni

⁶Le sfere integratrici in commercio sono in alluminio ed hanno costi molto elevati, dell'ordine delle diverse centinaia di euro per centimetro di diametro.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

con calibro e metro a nastro. Le sfere acquistate possono variare per il diametro e per la grandezza del foro che tutte presentano di default alla loro base per poter introdurre con facilità la lampada al loro interno. Per costruire una *buona* sfera integratrice (si veda l'appendice A nella pagina 60) è necessario che la superficie complessiva dei fori presenti su di essa non superi il 4-5% della superficie totale della sfera; è pertanto inevitabile che questo limite sia tanto prima raggiunto per quelle sfere di più piccole dimensioni, qualora il foro di ingresso pre-esistente non diminuisca anch'esso sensibilmente le sue dimensioni, il che di norma non si verifica. Per ovviare a tale problema si possono disporre due sfere in serie, introdurre baffle (o "palette" in italiano) che mascherino i fori di ingresso della luce, oppure fare una scelta selettiva di quale zona di luce preferire per i propri scopi pratici. Avendo progettato un sistema che tiene conto di queste avvertenze, abbiamo preparato sul tavolo di lavoro le sfere acquistate, e ne abbiamo dato loro un nome attraverso cui ad esse riferirci, cioè un nome che le identifica univocamente insieme alle loro proprietà e alla funzione che ciascuna dovrà svolgere.

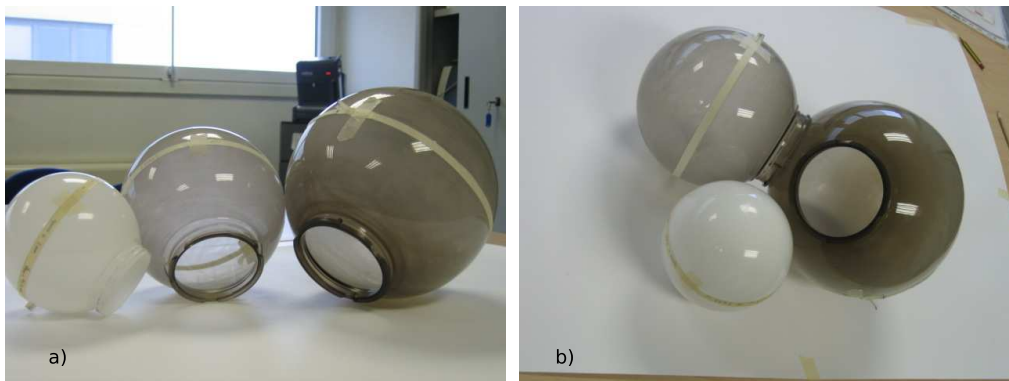


Figure 4.6: In figura a) si mostrano le sfere con le relative "bocche" messe in evidenza, a fianco b) si ripropongono le stesse sfere disposte ad libitum.

Di seguito si riportano le caratteristiche di base di ciascuna sfera, cioè le caratteristiche al momento dell'acquisto. Va ricordato inoltre che insieme ai globi di plastica ciascuna sfera comprendeva nell'acquisto anche un relativo portalampada in plastica nera che, per il caso della sfera satellite bianca-piccola, si è provveduto a smontare per poterne utilizzare il manicotto femmina filettato su cui la sfera in questione si può avvitare. Per evitare ripetizioni si anticipano anche gli spessori delle superfici di plastica misurati con calibro e, a seguire, con il termine inglese "coating" saranno indicati gli spessori di materiale aggiunto su di esse a seguito dei trattamenti sulle stesse superfici che verranno specificati più avanti. I diametri dei fori di uscita sono rispettivamente descritti per ciascuna sfera. Il criterio di scelta per queste dimensioni è quello di ottenere un compromesso tra la percentuale di area occupata dai fori sull'area complessiva della sfera (a cui ci si riferisce con la simbologia $\%_{area\ fori}$) che garantisce un buon regime di lavoro per la generica SI (questo rappresenta un limite superiore alla dimensione dei fori), e la volontà di poter

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

utilizzare specchi caratterizzati da focali F di circa 1-1,5m di lunghezza⁷ (questo secondo limite arbitrario è un limite inferiore). Impostando una disuguaglianza del tutto indicativa, che presenta come termini le precedenti considerazioni, si potrebbe scrivere:

$$F_{specchio} \lesssim \phi_{foro} \lesssim \%_{areafori}$$

che in termini quantitativi si può riscrivere come:

$$\frac{F_{specchio}}{200} \lesssim R_{foro} \lesssim \sqrt{4R_{sfera}^2 (\%_{areafori}) - R_{bocca}^2}$$

dove tutti i raggi coinvolti sono indicati con la lettera R , e il limite superiore di destra è derivato dal limite consueto, per ottenere una buona SI, del rapporto tra le aree dei fori e la superficie totale della sfera nel caso in cui due siano gli unici fori presenti, la “bocca” della sfera (o foro di ingresso) e il foro di uscita:

$$\frac{\pi R_{foro}^2 + \pi R_{bocca}^2}{4\pi R_{sfera}^2} \lesssim (\%_{areafori}) \approx 4 - 5\%$$

Il termine inferiore di sinistra invece ci ripropone a denominatore il rapporto esistente tra la distanza Terra-Sole e il raggio solare, rapporto che vale circa 200, valore per cui deve essere divisa la distanza focale F dello specchio (come abbiamo del resto già discusso nella sezione 3.1). Si tratta di un limite inferiore perché non c'è una precisa necessità di avere un foro di uscita di una certa dimensione; infatti si potrà sempre successivamente disporre di fronte ad essa (come abbiamo peraltro fatto durante il montaggio del sistema, descritto in sezione 5.1) un diaframma grazie al quale diminuire, secondo le esigenze, la dimensione del foro di uscita.

Sfera BP la sigla BP sta a identificare le caratteristiche originali di questa sfera, essa infatti si presentava alla vista di colore bianco (B) e di piccole (P) dimensioni. Sono le sue stesse modeste dimensioni che fanno di questa sfera la più adatta per ricoprire il ruolo di sfera satellite, ovvero di una sfera che riceverà la luce dall'uscita di una prima sfera integratrice e non direttamente da una sorgente come una lampada. Per la sfera BP si è progettato un foro di uscita di diametro 15,2mm, collocato a metà altezza della sfera e lungo una direzione ortogonale alla direzione della bocca di ingresso.

⁷ricordiamo qui ora che il rapporto tra il raggio del foro e la distanza focale deve essere approssimativamente dell'ordine di 1:100

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

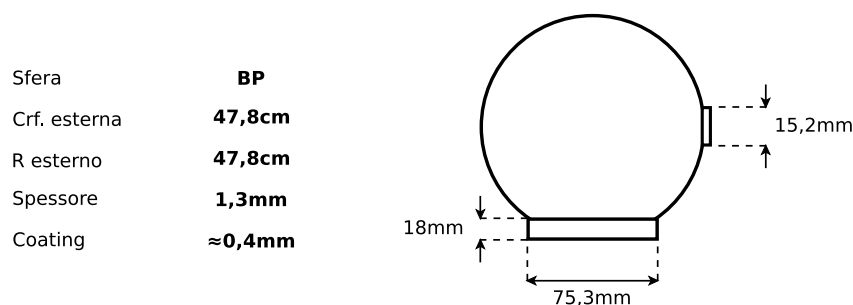


Figure 4.7: In figura si mostrano riassunte le caratteristiche misurate della sfera BP.

Sfera TG la sigla TG sta a identificare l'originale trasparenza (T) di questa sfera insieme alle sue più grandi dimensioni (G). Concentrico al foro di uscita si colloca il manicotto sul quale può avvitarsi la sfera BP; per farlo aderire saldamente alla superficie plastica della sfera abbiamo utilizzato un silicone trasparente. In fase di trattamento con $BaSO_4$ anche la zona interna al manicotto viene verniciata ed asciugata come mostra la figura 4.14 nella pagina 24. Per la sfera TG il diametro del foro d'uscita è di $28,0mm$, e questo foro viene utilizzato come sorgente di luce in ingresso, presumibilmente già di carattere lambertiana, per la più piccola sfera satellite BP.

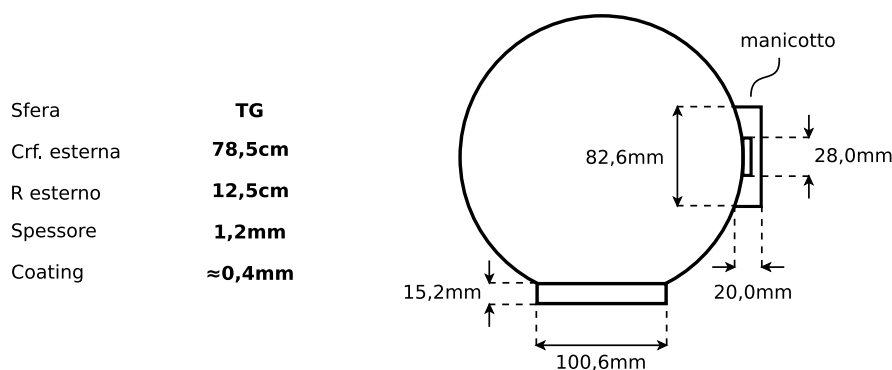


Figure 4.8: In figura si mostrano riassunte le caratteristiche misurate della sfera TG.

Sfera TM la sigla TM sottolinea ancora una volta l'originale trasparenza (T) del materiale plastico di cui è costituita la sfera, insieme alla dimensione che si è definita di media (M) grandezza perché più piccola della sfera TG ma più grande della sfera BP. La sfera TM nasce per un utilizzo singolo, cioè non sono previste accoppiate con altre sfere. Il diametro del foro di uscita per la sfera TM è di $19,2mm$.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

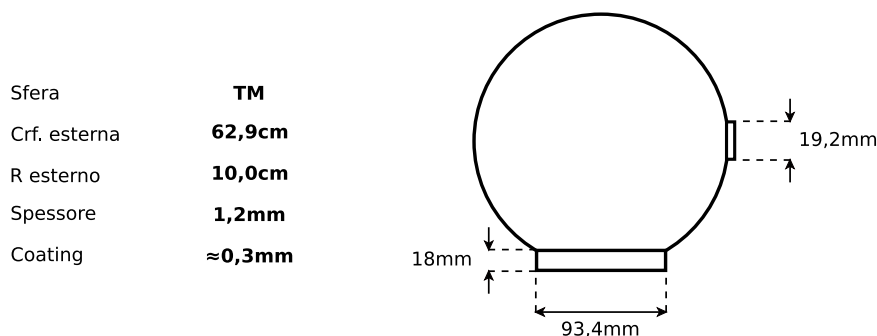


Figure 4.9: In figura si mostrano riassunte le caratteristiche misurate della sfera TM.

Sfera NP la sigla NP ci ricorda, oltre alle piccole (P) dimensioni, una caratteristica insolita per questa sfera: il suo originale utilizzo pratico, cioè quello di addobbo per le festività natalizie (N). Questa sfera si è dimostrata la più facile da trattare perché originalmente predisposta per aprirsi a metà lungo una linea equatoriale. La funzione a cui abbiamo adibito la sfera NP è quella di raccogliere, integrare e misurare un flusso di radiazione elettromagnetica in ingresso. Per permetterci questa misura la sfera NP dovrà essere accoppiata ad un rivelatore CCD, quindi ne adattiamo il foro di uscita alla dimensione di $27,7\text{mm}$. Il foro di ingresso dovrà essere sufficientemente grande per accogliere il rivelatore *Rondine* da caratterizzare, di diametro quindi pari a circa $34,2\text{mm}$. Siccome per questa sfera i fori (entrambi da praticare perché la sferetta originalmente si presenta chiusa) vengono disposti allineati, predisponiamo l'utilizzo di un *baffle* centrale. La preparazione di questa paletta avviene intagliando un campione piano circolare di plastica, assicurandoci di ottenere un diametro maggiore rispetto alle dimensioni dei diametri dei fori. Il motivo di questa necessità è semplice: il baffle, una volta allineato con i fori di ingresso e di uscita, deve impedire che al foro di uscita giunga luce direttamente dal foro di ingresso, oltretutto deve consentire a tutta la luce in ingresso di integrarsi sulla superficie della sfera NP prima di raggiungere il foro di uscita.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

Sfera	NP
Crf. esterna	37,8cm
R esterno	6,02cm
Spessore	2,0mm
Coating	≈0,4mm

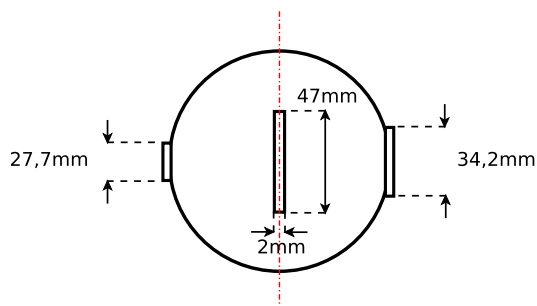


Figure 4.10: In figura si mostrano riassunte le caratteristiche misurate della sfera NP. Lungo la linea tratto-punto equatoriale di colore rosso la sfera NP può aprirsi, dividendosi così in due semisfere.

Le sfere TM e TG riportate in figura 4.6 non appaiono perfettamente trasparenti perché per esse (come del resto anche per BP, soltanto che l'effetto non appare evidente per via del suo colore bianco) è stata già praticata la sfregatura con carta abrasiva, un passo necessario per garantire una maggiore rugosità della parete e quindi una migliore aderenza per consentire il fissaggio del $BaSO_4$ in sospensione nella soluzione vinilica. Sfregando con forza la parete interna si è così ridotta la trasparenza di queste sfere, come mette in evidenza la figura 4.11.

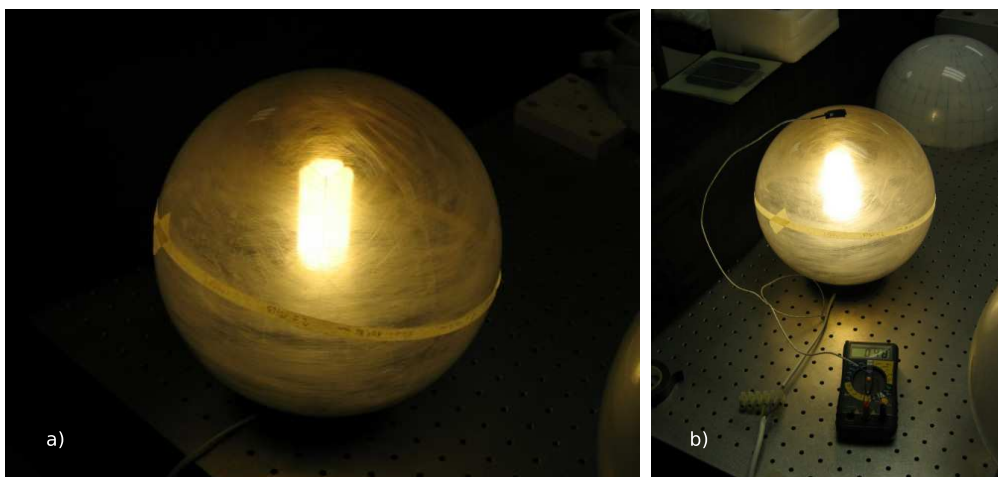


Figure 4.11: Esempi di sfere sfregate internamente con lampada accesa, in figura b) una termocoppia collegata ad un multimetro rivelano una temperatura di $48^{\circ}C$ raggiunta sulla superficie della sfera.

Erosa la superficie interna delle sfere, si procede a praticare i fori che sono stati progettati per esse, ricordando che gli stessi fori sono dislocati in posizioni diverse a seconda del ruolo che la sfera deve assumere nell'ambito del progetto di misura. Se la generica SI si dovrà comportare come una sorgente di luce lambertiana allora il foro viene praticato in direzione ortogonale rispetto alla direttrice della bocca di ingresso, dove per direttrice si

intende la retta perpendicolare al piano a cui appartiene la base della “bocca” cilindrica, e passante per il suo centro. Analogamente si può definire una direttrice per ciascun foro di uscita come la retta perpendicolare al piano a cui appartiene il disco, ovvero il foro, e passante per il suo centro. Avendo così definito le direttrici dei fori, sia per i fori di ingresso che per i fori di uscita, si può semplificare la discussione dicendo che, in generale, per questo lavoro di tesi si è predisposto che le direttrici dei fori siano rette tra loro perpendicolari per le sorgenti, oppure coincidenti (cioè i fori si trovano allineati tra loro) per i ricevitori.

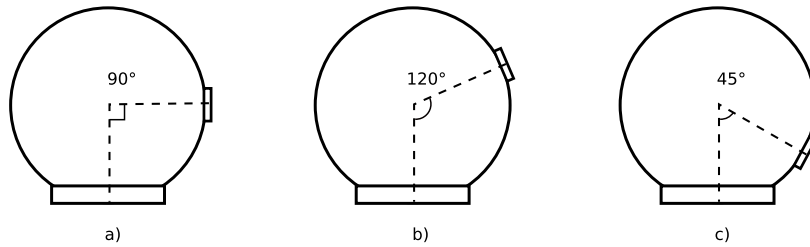


Figure 4.12: Esempi di diverse collocazioni dei fori rispetto al foro di ingresso di base, la “bocca” delle sfere. Ci si riferisce alle linee tratteggiate come alle *direttrici dei fori*. Per le sfere BP, TM e TG si è preferita la configurazione a).

Per incidere la superficie descrivendo una circonferenza (la linea di demarcazione del foro) abbiamo pensato di utilizzare un comunissimo compasso⁸ da disegno, avendo opportunamente sostituito alla mina di grafite la lama di un taglierino fissata con fili di ferro. Si tiene la punta di ferro del compasso ben ferma in coincidenza del centro del foro mentre contemporaneamente con forza si ruota il compasso modificato facendo via via sempre più insistente la pressione esercitata dalla lama sulla superficie plastica della sfera, affinché durante la rotazione il compasso scavi un solco lungo la circonferenza del foro. Per praticare questi fori con maggiore comodità teniamo il compasso all'esterno della sfera anche se, in linea di principio, nulla esclude che utilizzando un compasso di dimensioni ridotte il foro si possa praticare dall'interno della sfera, e quindi in questo secondo caso il solco si andrebbe a scavare a partire dalla superficie interna.

Operati così i fori si procede a rivestire la parete interna delle sfere con applicazione a pennello di $BaSO_4$ disperso in sospensione in una soluzione acquosa di colla vinilica ($50g/l$), dando le mani di vernice una di seguito all'altra aspettando, tra una mano e l'altra, che la vernice abbia fatto presa asciugandosi in modo omogeneo su tutta la superficie interna. Per evitare che durante la fase di asciugatura si venisse a depositare la vernice sul fondo della sfera, ovvero che la soluzione acquosa formasse dei rigagnoli lungo i quali erodere e trasportare sul fondo il $BaSO_4$ appena depositato, abbiamo proceduto ad aumentare la quantità di $BaSO_4$ in sospensione aumentando così la densità della soluzione, ed in secondo luogo abbiamo accelerato i tempi di asciugatura. Per accelerare i tempi di asciugatura abbiamo disposto un phon nei pressi della bocca di

⁸nel nostro caso abbiamo utilizzato un *balaustrone*, ovvero un compasso dotato di rotellina regolatrice grazie alla quale è mantenuto nell'angolazione prescelta.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

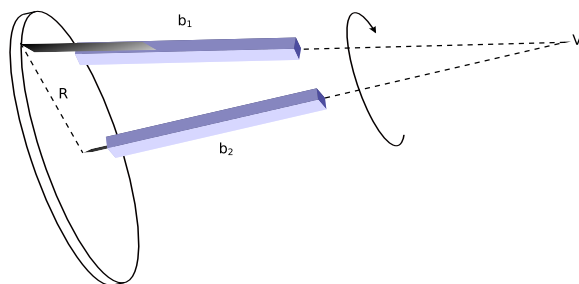


Figure 4.13: Schema del compasso utilizzato per i fori: sul braccio b_1 è stata fissata la lama di un taglierino, V è il vertice del compasso, R il raggio del foro.

ingresso della sfera in modo da immetterne un flusso di aria calda all'interno, lasciando integrare anch'esso sulla sua superficie.



Figure 4.14: Suddivisione in fasi del processo di lavorazione per la sfera TG: a) il pennello viene fatto sgocciolare b) applicazione della pittura a pannello c) asciugatura della vernice con phon d) trattamento della zona interna al manicotto.

Superata la decina di mani di pittura, notiamo come lo strato di $BaSO_4$ applicato inizi a fratturarsi, e la comparsa di queste micro-fratture si manifesta in maniera evidente

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

applicando una sorgente luminosa all'interno della sfera. Come si può osservare dalla figura 4.15, la perdita di luce attraverso le imperfezioni della superficie è notevole. A fronte di questi difetti dobbiamo concludere che l'esperienza maturata nel corso della realizzazione dei provini piani non è stata completamente sufficiente per l'applicazione dello stesso coating su superfici concave.

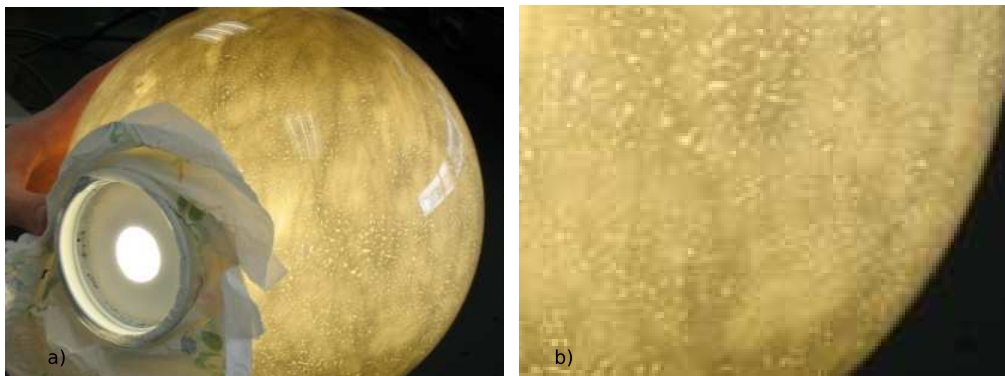


Figure 4.15: La sfera viene illuminata da una lampada posta al suo interno (a), si notano sulla superficie esterna i difetti del coating interno (b).

Per porre rimedio alla perdita di luce decidiamo di ripetere i coating antepo-
nendo allo strato di $BaSO_4$ uno strato di vernice bianca spray, applicato sia sulla superficie interna che sulla superficie esterna della sfera, quindi riverniciare di nuovo la parete esterna con vernice spray a effetto cromatura, per riflettere verso l'interno l'eventuale luce altrimenti dispersa. Infine l'ultima mano di vernice spray viene data di colore nero per evitare riflessioni esterne di luce non pertinenti ai nostri scopi di caratterizzazione dei concentratori.

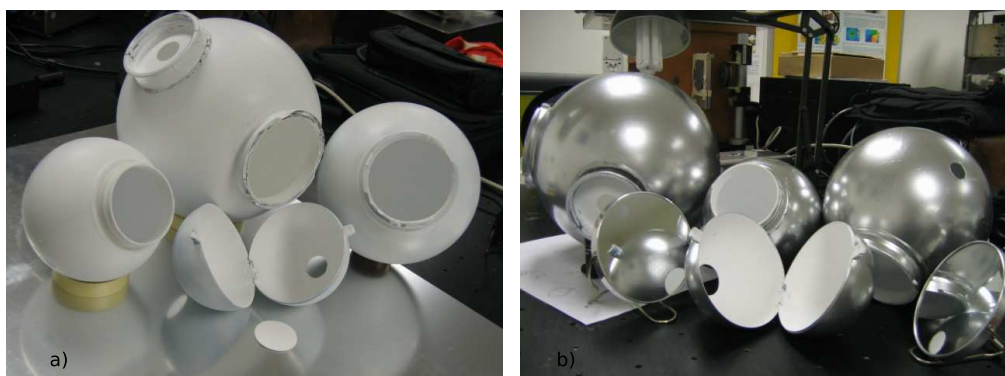


Figure 4.16: Step di verniciatura diversi corrispondenti all'applicazione, sulla superficie esterna delle sfere, di vernice spray *bianco opaco* (a) e di vernice spray a *effetto cromatura* (b).

4.2 Caratterizzazione delle Sfere Integratrici

Preso una sfera singola con i relativi fori di ingresso e d'uscita, o una coppia di sfere disposte in serie, diverse sono le misure e i metodi che si possono utilizzare per caratterizzarle. In laboratorio verranno trattati un metodo classico per la misura di lambertianità del fascio di luce in uscita, ed un metodo innovativo per la misura della riflettività delle pareti interne di una sfera integratrice presa singolarmente; entrambi i metodi hanno previsto l'utilizzo di un rivelatore di luce elettronico CCD.

4.2.1 Misure di Lambertianità

Per misurare la lambertianità della sfera integratrice sono stati adottati due metodi diversi: le prime misure consistono nella cattura dell'immagine della luce in uscita dal foro della SI e nella verifica che "l'intensità del bianco" non vari ai diversi angoli; questa verifica si riferisce ad una misura di radianza. Per la comprensione di come è composto l'apparato sperimentale ci si rifà alla figura 4.17.

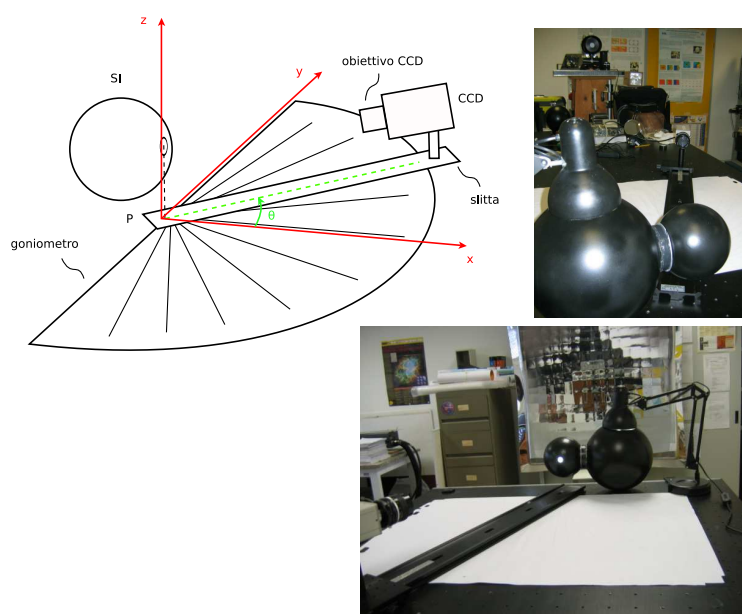


Figure 4.17: Configurazioni del sistema per la misura di lambertianità della SI. Nel disegno l'asse della slitta tratteggiato in verde, è stato ruotato in senso antiorario di un angolo θ attorno al punto P ; l'angolo θ viene misurato a partire dalla direzione zero del goniometro, direzione coincidente con l'asse x del sistema di riferimento centrato in P .

Primo metodo, con CCD ed obiettivo ottico

L'obiettivo ottico di cui è corredato il dispositivo CCD è capace di mettere bene a fuoco l'immagine ad una minima distanza di 70cm, distanza alla quale viene appunto predis-

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

posta l'uscita della SI per contenere l'ingombro dell'apparato di misura. L'apparato di misura consiste in un supporto a soffietto sul quale disporre e fissare la SI (esso ci consentirà di regolare in altezza l'ubicazione del foro d'uscita della sfera) e di una slitta libera di ruotare a diversi angoli perchè imperniata sulla verticale del foro d'uscita della SI. Sulla slitta si fissa, attraverso l'uso di supporti a cavalieri, il dispositivo CCD ad una distanza foro-obiettivo di 70cm. Avendo precedentemente preparato e fermato su banco ottico un goniometro sottile (di carta, nel nostro caso), effettuiamo le catture dell'immagine a distanze angolari differenti ruotando semplicemente il sistema slitta-CCD sopra di esso. Per la precisione, centriamo il puntatore del goniometro sul perno di rotazione della slitta, facendo approssimativamente coincidere lo zero della gradazione sulla proiezione su banco ottico della direttrice del foro di uscita. Tuttavia per procedere a questo allineamento abbiamo semplicemente controllato che la luce lambisse in modo simmetrico gli assi della gradazione corrispondenti a $+90^\circ$ e -90° , sottovalutando possibili errori di allineamento che purtroppo si sono resi manifesti con il secondo metodo di misura. Le immagini catturate della stessa uscita alle diverse angolazioni, da $+90^\circ$ a -90° con passo angolare di 5° , sono riportate in figura 4.18. Per ogni cattura si valuta il valore dell'intensità media del bianco corrispondente ad una regione interna all'immagine del foro di uscita della SI: è come se stessimo osservando la luce integrata dalla parete interna della sfera con una sottile cannuccia attraverso il foro di uscita.

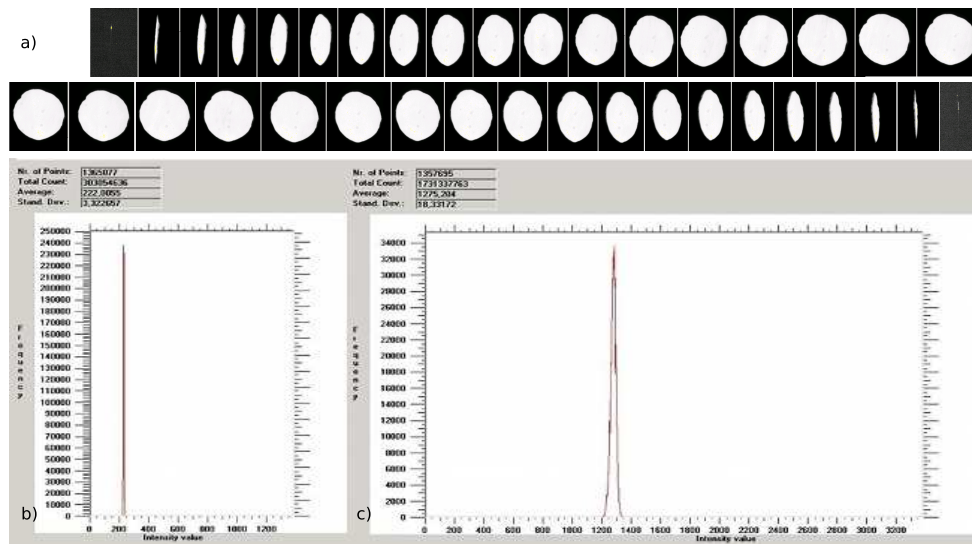


Figure 4.18: Immagini dell'uscita della sfera integratrice (a) prese a diversi angoli. Istogrammi di intensità del rumore di fondo (b) e della zona di bianco (c) corrispondenti all'immagine presa a -40° .

Contemporaneamente all'acquisizione del valore medio relativo di intensità del bianco, si seleziona una regione di fondo nera e se ne calcola il valore medio di intensità; questo secondo valore verrà sottratto al precedente per ogni misura al fine di riportare in grafico un segnale privato del rumore di fondo. Come si può notare dal grafico in figura 4.19 le

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

intensità relative, in ordinata, non variano sensibilmente al variare dell'angolo in ascissa, il che corrisponde ad una buona misura di radianza costante per tempi di acquisizione pari a $400ms$. Si verifica che i valori sperimentali ottenuti si discostano da un valor medio (calcolato in unità arbitrarie di valore circa pari a 2835 ± 110 per l'esempio di figura 4.19) entro un intervallo dell'1%; i valori presi agli angoli più estremi sono meno attendibili poiché, come mette in evidenza la figura 4.18, le regioni di bianco entro le quali selezionare un'area di cui calcolare un valore di intensità vanno via via assottigliandosi, rendendo più ardua la selezione.

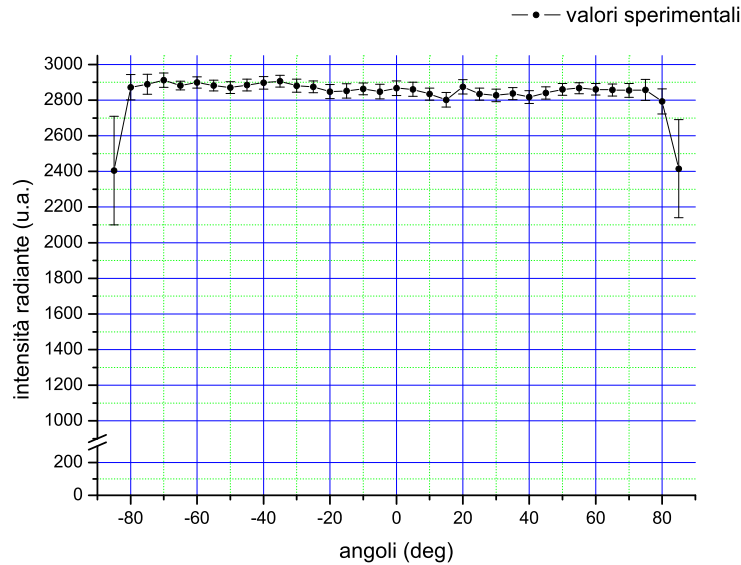


Figura 4.19: Il grafico riporta un esempio di radianza costante, verificato per la sfera TM

Va detto che durante una prima fase di acquisizione con CCD e obiettivo si potevano notare ai diversi angoli, contrariamente a quello che ci si aspettava, valori medi relativi che si discostavano sensibilmente tra loro, entro un intervallo di circa il 10 – 15% a partire da un certo valore medio. Di conseguenza, per verifica, abbiamo ripetuto più misure fissando il sistema su uno stesso angolo (a titolo di esempio abbiamo scelto $+60^\circ$) e ripetendo le misure a intervalli di tempo regolari di $10s$, con un uguale tempo di esposizione pari a $500\mu s$; scopriamo, con il sistema fissato su uno stesso angolo, fluttuazioni della stessa identità. Ipotizziamo che l'origine di tale fluttuazione derivi da un'oscillazione dell'intensità del segnale luminoso con una frequenza prossima alla frequenza della tensione di alimentazione ($\sim 50Hz$ corrispondente ad un periodo di oscillazione di $20ms$) della lampada che immette luce all'interno della sfera integratrice e ci proponiamo eventualmente di verificare la nostra ipotesi in un secondo momento attraverso l'uso di oscilloscopio e fotodiiodo. Intanto, per procedere oltre e aggirare il problema di cui abbiamo ipotizzato l'origine, si aumenta il tempo di esposizione a $400ms$, e al contempo per evitare la saturazione del segnale disponiamo di fronte all'obiettivo una serie di filtri neutri. Per

tempi di esposizione così lunghi (per quasi tre ordini di grandezza superiori ai precedenti) non sono state rivelate sensibili variazioni del segnale; assumiamo questo responso operativo come una verifica indiretta, seppur parziale, della nostra ipotesi. Per tutte le misure successive, che verranno in seguito di volta in volta descritte, abbiamo cercato di mantenere tempi di esposizione prossimi ai valori di $400 - 500ms$, aggiungendo, ove necessario, filtri neutri per evitare la saturazione dei segnali più intensi.

Secondo metodo, con CCD e sfera integratrice NP

Per le misure successive, relative al secondo metodo, si sostituisce all'obiettivo ottico la sfera integratrice NP, per verificare che la luce in ingresso di essa, proveniente dalla sorgente di cui si sta verificando la lambertianità, una volta integratasi sulle sue superfici, e ricevuta dal CCD, diminuisca di intensità seguendo la legge $I = I_0 \cos \theta$. Ci si aspetta tale andamento poiché la luce in ingresso dovrà diminuire di intensità per solo effetto di una diminuzione dell'area della sorgente piuttosto che per una variazione di intensità intrinseca (tale variazione in effetti non sussiste come abbiamo verificato nella precedente esperienza). Manteniamo gli stessi tempi di esposizione e, all'occorrenza, disponiamo una serie di filtri dinnanzi al foro di ingresso della sfera NP per attenuare il segnale evitando in tal modo di cadere in regimi di saturazione. In questo secondo caso, siccome non avremo una regione di bianco e una di nero nella stessa immagine, selezioneremo per ciascuna angolazione l'intera immagine acquisita dal CCD e ne ricaveremo un valore medio di intensità. Il valore medio del rumore di fondo viene calcolato otturando momentaneamente l'uscita della SI, quindi viene sottratto ai valori medi rivelati.

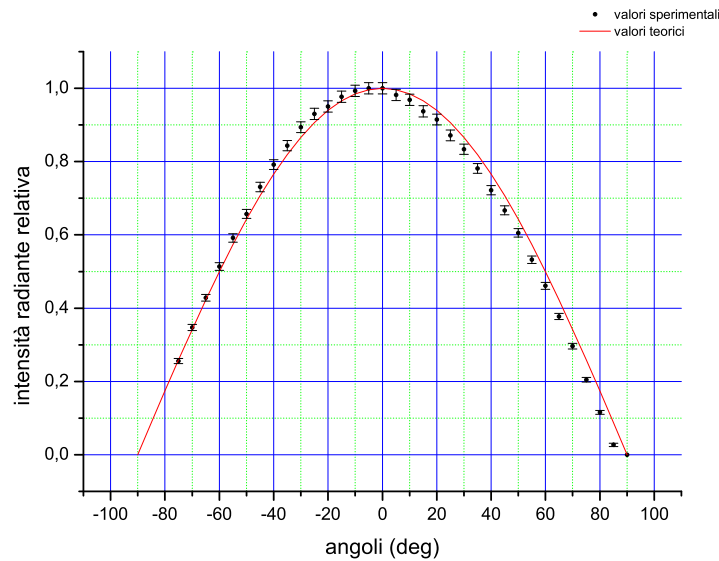


Figura 4.20: Il grafico riporta i valori di intensità della luce ricevuta all'ingresso della sfera NP, emessa dal foro di uscita della sfera TM.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

Il primo grafico in figura riporta l'andamento dei valori sperimentali misurati di intensità, insieme all'andamento teorico del coseno in funzione dell'angolo θ : si nota come gli andamenti siano gli stessi anche se le curve non vengono a coincidere perfettamente. Si ipotizza in tal senso un disallineamento della direttrice del foro di uscita della sfera TM, utilizzata per l'esempio che abbiamo riportato, con l'asse corrispondente all'angolo zero del nostro goniometro. Correggendo a posteriori un ipotetico disallineamento di 2° , si può notare dal grafico di figura 4.21 come ora l'andamento dei valori sperimentali, entro gli errori di misura assunti, ricalchi l'andamento del coseno; le escursioni più significative si notano agli angoli più grandi in valore assoluto, e potrebbero essere dipese da irregolarità nella forma della superficie del foro di uscita della sfera TM. In accordo con questo risultato verificiamo quantitativamente attraverso il *metodo dei minimi quadrati* che lo shift apportato abbia prodotto un fitting migliore per la seconda curva di dati sperimentali:

$$\left[\sum (y_i - y_i^{exp})^2 \right]_{prima} \simeq 0,03215 > \left[\sum (y_i - y_i^{exp})^2 \right]_{dopo} \simeq 0,00932$$

dove in parentesi quadre sono riportate le sommatorie degli scarti quadratici calcolati tra i valori sperimentali misurati y_i e i valori teorici attesi (expected values) y_i^{exp} per una sorgente lambertiana, in corrispondenza di uno stesso angolo prima e dopo l'allineamento. Il risultato inferiore della sommatoria di destra è indice di un fitting migliore tra la curva sperimentale e teorica nel caso di una correzione all'allineamento pari a 2° .

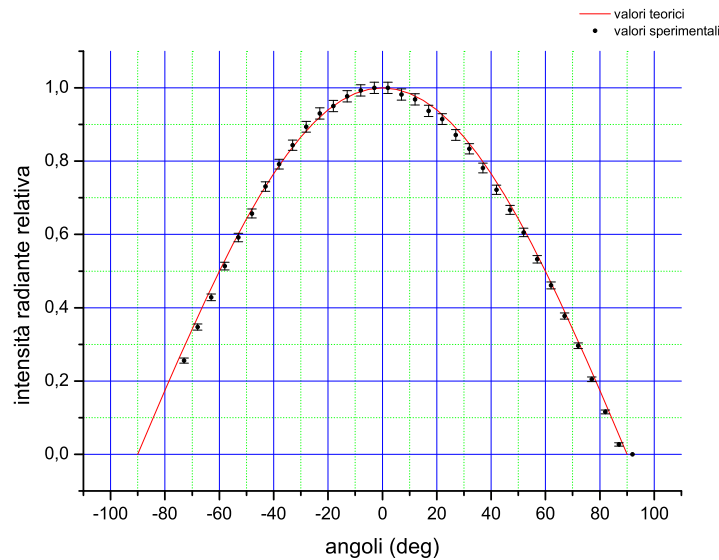


Figura 4.21: Il grafico riporta gli stessi valori sperimentali di intensità del grafico di figura 4.20 shiftati di 2° verso valori positivi dell'angolo.

Infine, per entrambi i casi, in figura 4.22 nella pagina seguente si riportano i corrispet-

tivi grafici polari, per un confronto con la funzione di distribuzione angolare aspettata teoricamente di figura A.3 nella pagina 61 per un diffusore lambertiano ideale (FDA sferica).

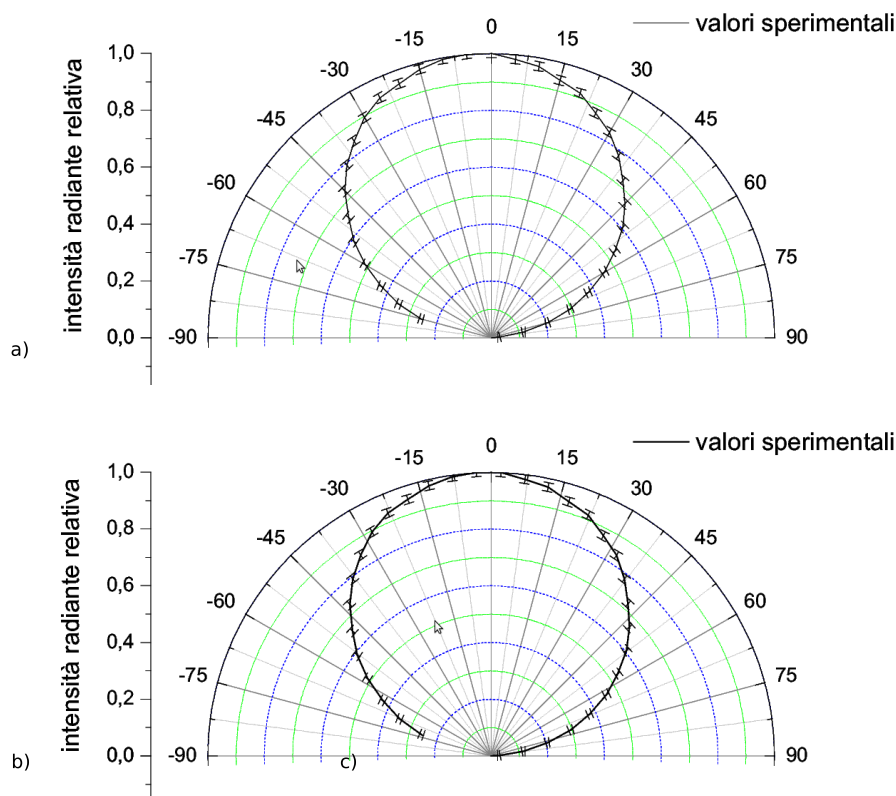


Figura 4.22: Grafici polari per il caso originale (a) di cui si suppone un disallineamento, e per la correzione all'allineamento apportata di 2° (b).

4.2.2 Misura di Riflettività da Contrasto (metodo MiRCo)

Per la misura della riflettività della parete interna di una sfera integratrice si può adottare il metodo MiRCo [24] che deriva direttamente da considerazioni di tipo teorico sulle equazioni caratteristiche delle sfere integratrici, come si potrà constatare da una rapida lettura dell'appendice B. Il contrasto ε , ovvero il rapporto tra le intensità radianti della zona di primo impatto di un fascio luminoso e della circostante parete, sarà funzione di caratteristiche geometriche ed ottiche della sfera stessa, e sarà osservato sperimentalmente attraverso un rivelatore ottico quale il CCD. Si dispone in laboratorio di un fascio laser verde (laser He-Ne $\lambda = 543,4nm$), il quale, per l'utilizzo che ne verrà fatto, abbiamo opportunamente espanso attraverso un beam-expander ($\times 10$)⁹ posto di fronte

⁹Si tratta del valore del rapporto di espansione riportato sullo strumento

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

alla sua uscita. Del fascio così espanso, selezioniamo la zona che ci appare più omogenea attraverso un diaframma che ha il compito di escluderne le zone più periferiche, fornendo al contempo la possibilità di regolare il diametro dello spot luminoso di interesse. Si regola lo spot luminoso ad un diametro di 14mm e, scelta la sfera da caratterizzare, ovvero i particolari parametri geometrici che la riguardano, si provvede a graficare la riflettività di parete ρ_w attesa teoricamente in funzione del contrasto ε , secondo la relazione B.8 qui di seguito riportata:

$$\rho_w = \frac{1}{\alpha(\varepsilon - 1) + (1 - f)}$$

La sfera trasparente grande (sfera TG) si presta alla misura perché il parametro f , ovvero il rapporto tra l'area totale delle finestre presenti e l'area della sfera, è prossimo al valore limite accettabile ($\sim 4\%$) per avere una buona integrabilità della sfera. La sensibilità della misura teorica di ρ_w è tanto migliore quanto maggiore risulta il rapporto tra il diametro dello spot e il diametro della sfera (di conseguenza con parametri α maggiori), come si deduce dai grafici di figura B.3. Questa ultima considerazione giustifica come la scelta di un particolare diametro dello spot luminoso debba essere il risultato di un buon compromesso tra una migliore sensibilità della misura e l'esigenza sperimentale di ottenere un fascio luminoso il più omogeneo possibile.

Per la sfera TG e lo spot luminoso presi in considerazione si hanno di conseguenza $\alpha \simeq 8,0 \times 10^{-3}$ ed $f \simeq 4,5 \times 10^{-2}$, pertanto si riporta in figura il grafico di $\rho_w(\varepsilon)$ con i valori assegnati di questi parametri:

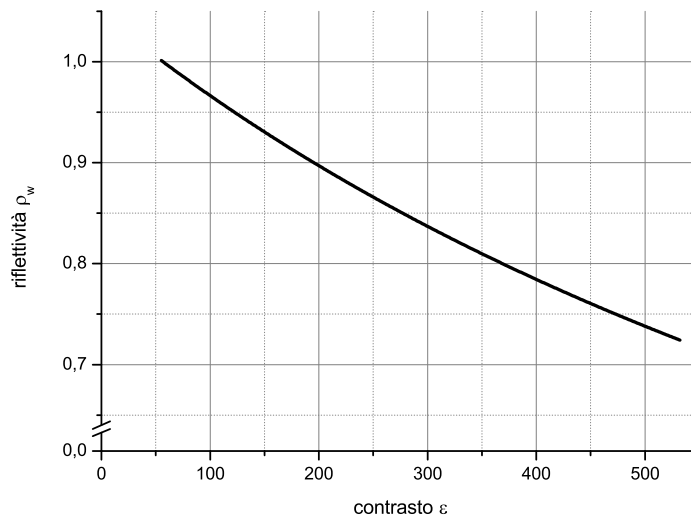


Figure 4.23: Andamento della riflettività di parete attesa per la sfera TG

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

Per osservare le intensità dello spot luminoso e della parete circostante, si può disporre il rivelatore CCD off-axis di pochi gradi rispetto all'asse laser-SI oppure in direzione alla precedente ortogonale previo l'utilizzo di uno specchio piano; a seconda delle necessità di spazio si può preferire l'una o l'altra configurazione di misura, purché per entrambe le configurazioni il fuoco dell'obiettivo del CCD sia opportunamente regolato sull'immagine da visualizzare.

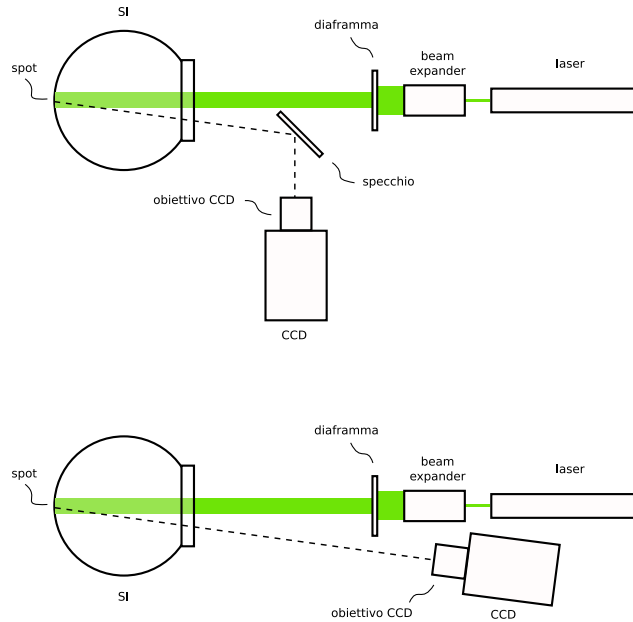


Figure 4.24: configurazioni di misura per il metodo MiRCO

Osservando con la CCD lo spot luminoso attraverso la finestra della SI, ci si accorge ben presto di come la zona di primo impatto (in breve ZPI) sia troppo fortemente illuminata rispetto alla parete di fondo eliminando così ogni possibilità di misurare un valore finito del contrasto ε , ricordando appunto che per definizione $\varepsilon = \frac{L_I}{L_w}$. Per riprese con tempi di esposizione troppo alti si osserverà come il segnale relativo alla ZPI cada in regime di saturazione, mentre per tempi di esposizione più brevi al contrario la luminosità della parete verrà quasi a perdere di identità nei confronti del rumore di fondo. Per aggirare il problema abbiamo escogitato due metodi: l'uno attraverso l'uso di filtri neutri, l'altro variando i tempi di esposizione a seconda della misura che si sta effettuando. Purtroppo i risultati di questi due metodi si discostano sensibilmente tra loro e non ci consentono di pervenire ad una sincera verifica del metodo MiRCO, poiché si ritrovano inaspettatamente due valori di contrasto differenti e, di conseguenza, due valori di riflettività diversi. Ma come è possibile che il contrasto tra le stesse due intensità sia risultato differente avendo applicato due metodi di misura, entrambi validi in linea di principio? Al momento in cui viene steso questo lavoro di tesi non si sono riscontrati elementi di indagine sufficienti per dare una risposta.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

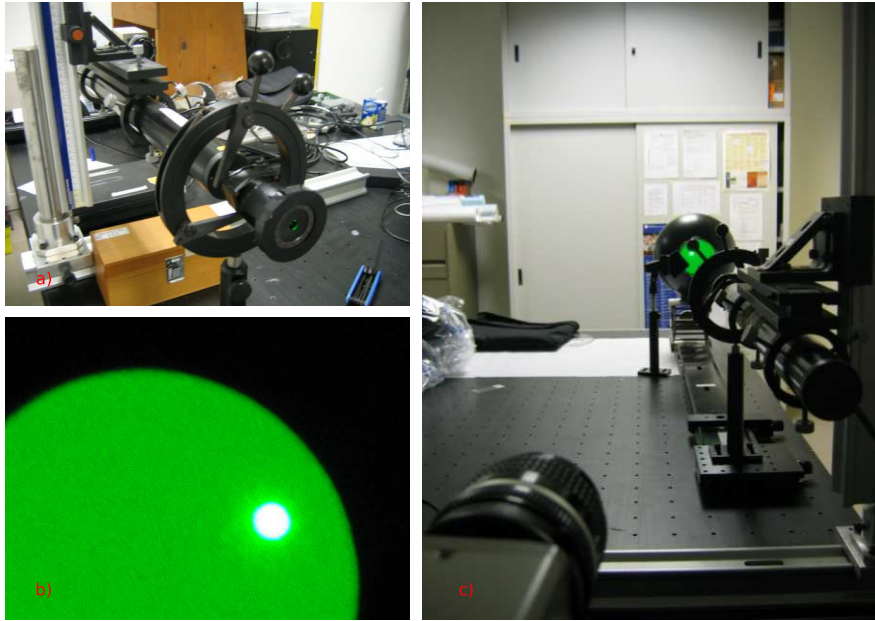


Figure 4.25: Nelle fotografie sono ripresi (a) il laser He-Ne, con beam-expander e diaphragma, (b) l'immagine dello spot sul fondo della parete della sfera TG omogeneamente illuminata, (c) la configurazione prescelta per effettuare le misure di intensità, con rivelatore CCD e serie di filtri sostenuti vicino alla bocca della sfera TG.

Primo metodo, con CCD e filtri ottici

Una prima possibilità per superare queste difficoltà consiste nell'intercettare l'immagine dello spot, ovvero l'immagine della ZPI, con uno o più filtri neutri in serie in modo da attenuare di un fattore 10^{OD} dove con OD sia espressa la somma delle densità ottiche¹⁰ dei singoli filtri utilizzati: $OD = \sum_i (od)_i$, nel caso in questione si è presumibilmente¹¹ ottenuto $OD = 2$ disponendo in serie tre filtri neutri di od rispettivamente pari a 1, 0,7 e 0,3.

La finestra della SI-TG in esame, attraverso cui si visualizza l'immagine, è provvista di un collare ricoperto di $BaSO_4$ per facilitare l'ingresso della luce proveniente da una sorgente posta nelle sue prossimità. Questo collare bianco agisce ad impedire la libera fuoriuscita della luce dalla sfera e quindi l'effettiva dimensione dell'apertura, nei confronti della luce in uscita, non risulta quella misurata ($\phi = 100,6mm$), bensì risulta più piccola. Non sapendo misurare otticamente l'effetto del collare occorre ricoprirlo con una striscia di carta nera ritagliata delle stesse dimensioni del collare.

Avendo così interposto, sul cammino della luce dello spot verso il rivelatore CCD, una serie di filtri neutri con $OD = 2$, si procede a misurare i profili delle intensità medie dello spot e della parete di fondo della SI-TG non direttamente illuminata dal fascio laser con tempi di acquisizione impostati a $50ms$, tempi per i quali, in assenza di filtri, il segnale luminoso dello spot non potrebbe essere rivelato perché in saturazione.

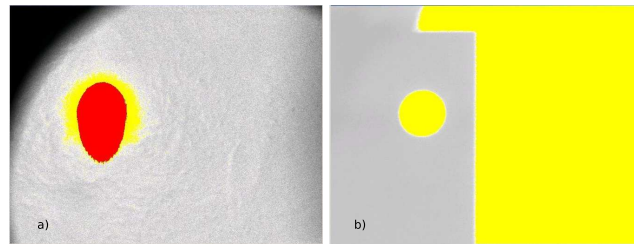


Figure 4.26: immagini acquisite con CCD a $50ms$; senza filtri interposti (a) con il segnale dello spot in saturazione (zona rossa) e in presenza di filtri (b) a $OD = 2$

A causa di un'evidente non perfetta omogeneità dello spot, non si può procedere a selezionare una zona al suo interno e fare la media delle intensità rilevate; piuttosto si è ritenuto più opportuno selezionare due profili dello stesso spot luminoso lungo due direzioni diametrali ortogonali, e mediane tra loro i valori delle intensità medie acquisite I_{m_x} ed I_{m_y} , dopo averle ripulite del rumore di fondo.

In effetti i segnali che vengono acquisiti dalla CCD sono "sporcati" da un segnale di fondo che, pur essendo in corrispondenza del nero dell'immagine, non risulta nullo. Il

¹⁰la densità ottica di un materiale, anche denominata assorbanza, è definita in spettroscopia come il logaritmo decimale dell'inverso della trasmittanza ad una data lunghezza d'onda: $od \equiv A = \log_{10} \frac{1}{T} = \log_{10} \frac{I_0}{I_1}$ dove con I_0 e I_1 le intensità della luce incidente e della luce che emerge dal campione attraversato.

¹¹i valori riportati di od sono valori medi, per una maggiore precisione a questi valori andrebbero sostituiti i valori delle densità ottiche effettive per $\lambda = 543,5nm$

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

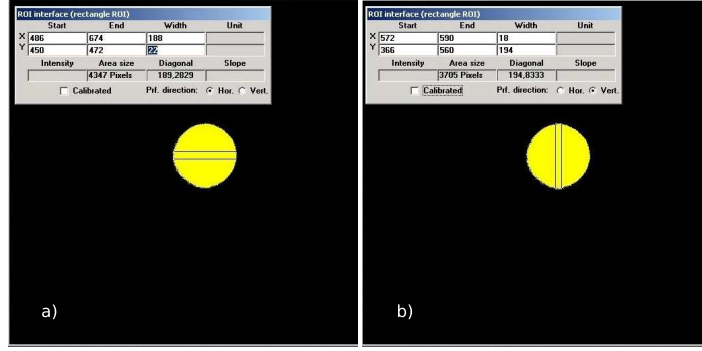


Figure 4.27: selezione delle Regions Of Interest (ROI) per il campionamento delle intensità relativamente ai profili orizzontale (a) e verticale (b) dello spot

segnale di fondo si ottiene mediando le intensità di una zona di nero selezionata all'interno dell'immagine acquisita; ci si riferisce ad esso come N_m , e va sottratto ai valori acquisiti delle intensità. In generale si ha quindi che $I_m = I_m^N - N_m$ dove I_m^N è appunto la media delle intensità comprensiva di rumore. Per le acquisizioni dei profili di intensità dello spot orizzontali e verticali si è ottenuto in unità arbitrarie (u.a.):

$$I_{m_x} = I_{m_x}^N - N_m \simeq (1299, 14 \pm 24, 14) - (190, 80 \pm 0, 22)$$

$$I_{m_y} = I_{m_y}^N - N_m \simeq (1245, 31 \pm 12, 95) - (190, 80 \pm 0, 22)$$

e facendo una media dei due valori si ottiene I_m per lo spot pari a:

$$I_m = \frac{(I_{m_x}^N + I_{m_y}^N) - N_m}{2} \simeq (1176, 83 \pm 18, 66)$$

D'altra parte per le acquisizioni dell'intensità di parete si è ottenuto in unità arbitrarie (u.a.):

$$I_m^w = I_m^{w,N} - N_m \simeq (1870, 02 \pm 8, 79) - (190, 80 \pm 0, 22)$$

$$I_m^w \simeq (1679, 22 \pm 9, 01)$$

Avendo così ricavato I_m riferendoci allo spot e I_m^w relativamente alla parete, si procede a valutarne il rapporto di intensità radianti ε ricordando che prima I_m deve essere moltiplicato per un fattore pari 10^{OD} , cioè per un fattore 100 nel nostro caso:

$$\varepsilon = \frac{10^{OD} \cdot I_m}{I_m^w} \approx (70, 1 \pm 1, 5)$$

a cui corrisponde, dall'osservazione del grafico in figura 4.23 nella pagina 32, ad un valore di riflettività di parete ρ_w pari a $(0, 989 \mp 0, 02)$.

Secondo metodo, con CCD e diversi tempi di acquisizione

Volendo evitare l'uso di filtri neutri, di cui peraltro non abbiamo verificato l'effettiva densità ottica per $\lambda = 543,5nm$, possiamo ripetere le acquisizioni delle intensità variando i tempi di acquisizione (exposure time) secondo necessità e applicando la proprietà di risposta lineare del rivelatore CCD che abbiamo verificato sperimentalmente (si vedano a dimostrazione le figure 4.28 e 4.29). Vengono acquisite perciò, prima l'immagine della zona di primo impatto a tempi relativamente brevi, pari a $200\mu s$, e, successivamente, l'immagine della parete con tempi di acquisizione più lunghi, pari a $80ms$. Visto che il rapporto tra i diversi tempi di acquisizione è pari a $\xi = 80ms/200\mu s = 400$, dovremo moltiplicare per il fattore ξ il valore medio dell'intensità rilevata dallo spot che illumina la zona di primo impatto. Procedendo come per le acquisizioni precedenti, ripetiamo le medie svolte al fine di determinare I'_m , dove l'apice sta a ricordarci che abbiamo applicato il secondo metodo per la misura delle stesse grandezze.

$$I'_{m_x} = (I_{m_x}^N)' - N'_m \simeq (1556, 32 \pm 25, 13) - (204, 21 \pm 0, 18)$$

$$I'_{m_y} = (I_{m_y}^N)' - N'_m \simeq (1514, 87 \pm 16, 48) - (204, 21 \pm 0, 18)$$

e facendo una media dei due valori si ottiene I'_m per lo spot pari a:

$$I'_m = \frac{\left((I_{m_x}^N)' + (I_{m_y}^N)' \right) - N'_m}{2} \simeq (1433, 49 \pm 20, 89)$$

D'altra parte per le acquisizioni dell'intensità di parete, con tempi di acquisizione di $80ms$, si è ottenuto sempre in unità arbitrarie (u.a.):

$$(I_m^w)' = (I_m^{w,N})' - N'_m \simeq (2853, 50 \pm 17, 90) - (178, 51 \pm 0, 19)$$

$$(I_m^w)' \simeq (2674, 99 \pm 18, 09)$$

Avendo così ricavato I'_m in riferimento allo spot e a tempi di acquisizione di $200\mu s$ e $(I_m^w)'$ relativamente alla parete e a $80ms$, si procede a valutarne il rapporto di intensità radianti ε' ricordando che prima I'_m deve essere moltiplicato per il fattore ξ , cioè nel nostro caso:

$$\varepsilon' = \frac{\xi \cdot I'_m}{(I_m^w)'} \approx (214 \pm 5)$$

a cui corrisponde, dall'osservazione del grafico in figura 4.23 nella pagina 32, ad un misura indiretta di riflettività di parete ρ'_w pari a circa $(0,888 \mp 0,04)$; valore che si discosta sensibilmente da quello precedentemente ottenuto.

4 Realizzazione e caratterizzazione delle componenti

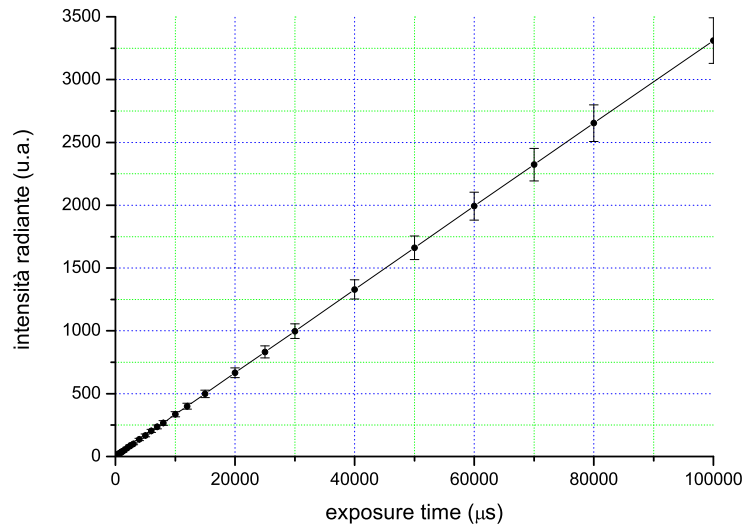


Figure 4.28: Grafico di risposta del CCD al segnale luminoso di parete per diversi tempi di acquisizione. Si ritrova a tempi di acquisizione pari a 80ms un valore medio di $(2653, 21 \pm 146, 34)$ u.a. valore confrontabile con la precedente misura di $(I_m^w)'$.

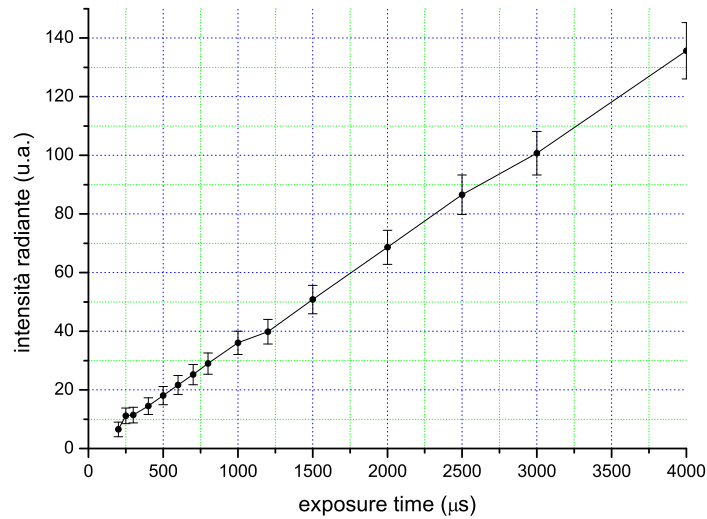


Figure 4.29: Particolare del grafico in figura 4.28 per piccoli tempi di acquisizione. Si nota che il segnale di parete ha intensità radiante media per tempi di acquisizione pari a $200\mu s$ di circa $(7,55 \pm 2,49)$ u.a., valore confrontabile entro gli errori di misura con $(I_m^w)'/\xi \simeq (6,69 \pm 0,05)$ a verifica della risposta lineare dello strumento.

4.3 Caratterizzazione di specchi parabolici

Dopo aver acquistato una coppia di specchi parabolici per provvedere alle misure sui concentratori solari, si procede a determinarne le caratteristiche fondamentali come il diametro e la distanza focale f . Utilizzando come sorgente luminosa il foro di uscita di una delle sfere integratrici realizzate, si dispone uno schermo bianco nelle vicinanze del foro, ad esso complanare, e si intercetta il fascio luminoso con lo specchio parabolico disposto off-axis rispetto la direzione di propagazione del fascio, assicurandosi che l'immagine reale riflessa venga a formarsi sullo schermo. Allontanandosi od avvicinandosi con lo specchio si osserva quando, sullo schermo, è visualizzata un'immagine delle stesse dimensioni del foro d'uscita; quando questa condizione è verificata ci si trova ad una precisa distanza tra lo specchio e la sorgente, quella pari a $2f$ cioè a due volte la distanza focale f come illustra il disegno in figura 4.30.

Nel disegno di figura 4.30 sono evidenziati due raggi luminosi che partono dal punto A della sorgente luminosa, rispettivamente uno parallelo all'asse ottico (l'asse ottico per definizione è la linea congiungente il vertice dello specchio e il fuoco dello specchio; i puntini neri non coincidono esattamente con il fuoco dello specchio ma segnalano in entrambi i casi la distanza focale dal vertice) e l'altro passante direttamente per il puntino nero rappresentante il primo fuoco off-axis dello specchio parabolico. Il primo verrà

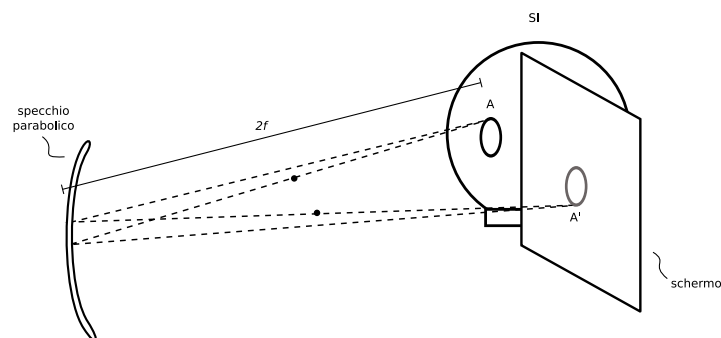


Figure 4.30: Caratterizzazione di uno specchio parabolico con SI come sorgente di luce, i puntini neri rappresentano i fuochi off-axis dello specchio.

quindi riflesso dallo specchio e passerà approssimativamente per il secondo fuoco off-axis evidenziato in figura; allo stesso tempo il secondo raggio uscirà parallelamente all'asse ottico intersecandosi infine con il primo nel punto A' che appartiene all'immagine riflessa formatasi sullo schermo. La misura di $2f$ che se ne ricava è per entrambi gli specchi di $(99,5 \pm 0,5) \text{ cm}$ dove l'errore assoluto è stato assunto maggiore della sensibilità dello strumento di misura a causa di una non perfetta definizione dell'immagine riflessa sullo schermo.

5 Caratterizzazione e calibrazione del sistema

5.1 Montaggio su banco ottico del sistema (metodo diretto)

L'apparato sperimentale che abbiamo sistemato su banco ottico per il metodo di misura diretto sul concentratore Rondine è riportato in figura 5.1, le componenti principali del sistema sono state indicate con una etichetta rossa, le restanti con una etichetta verde. Vediamo di passarle ora in rassegna in dettaglio.

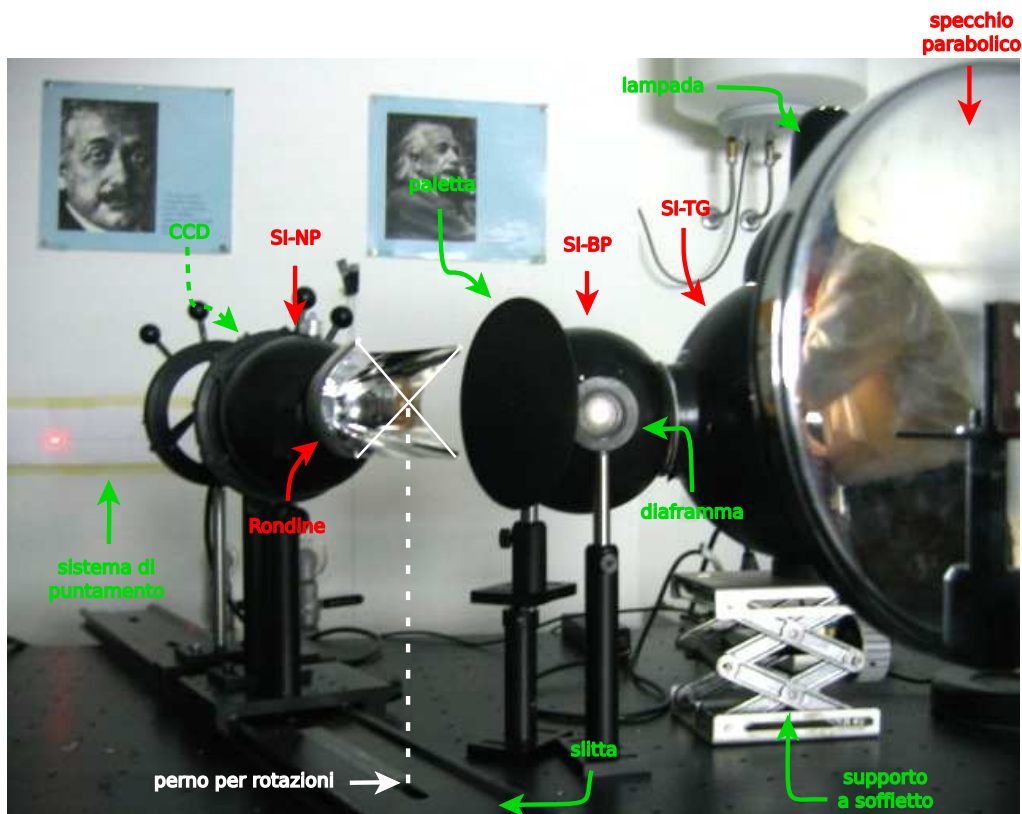


Figure 5.1: Apparato sperimentale per il metodo di misura diretto sul concentratore Rondine.

La sfera *TG* è disposta sopra un *supporto a soffietto* rivolgendo la sua “bocca” verso il soffitto, in modo tale che una *lampada* possa facilmente incastrarsi con essa da sopra,

immettendo la luce di una comune lampadina all'interno della sfera. Attraverso il foro di uscita della sfera TG la sfera BP viene illuminata internamente, provvedendo ad una integrazione successiva della luce in ingresso. Di fronte all'uscita del foro della sfera BP viene posizionato il *diaframma*, e regolandoci in altezza grazie all'asta del cavaliere ci assicuriamo che il diaframma e il foro di uscita siano concentrici. Regoliamo l'apertura del diaframma a circa 5mm di diametro, avendo misurato per la focale dello specchio una lunghezza pari a circa 50cm . A tale distanza focale verrà posizionato lo specchio sostenuto anch'esso da un cavaliere fissato non direttamente sul banco ottico, bensì su una piccola slitta, consentendoci in tal modo un posizionamento più agevole. L'asse dello specchio e la direttrice del foro di uscita della sfera BP sono tenuti paralleli al banco ottico ma non sono coincidenti: teniamo lo specchio off-axis appunto per avere la possibilità di utilizzare il fascio riflesso con divergenza solare nella posizione in cui verrà fissato il concentratore *Rondine*. Il concentratore rondine concentrerà la luce in ingresso all'interno della sfera NP che integrerà sulle sue superfici il segnale luminoso, e la cui intensità sarà rivelata dal *rivelatore CCD* posto di seguito all'uscita della sferetta.

La superficie di ingresso del concentratore Rondine è un quadrato di lato 7cm , ed i vertici del quadrato coincidono con le punte del concentratore. Dai vertici immaginiamo di tracciare le diagonali, le linee bianche sottili in figura, individuando così il centro del quadrato da cui facciamo calare la verticale perpendicolare al piano del banco ottico: sul punto di intersezione tra la verticale e il piano del banco verrà imperniata la slitta cosicché il concentratore rondine possa, ruotando la slitta attorno al perno di rotazione, ruotare attorno al centro della sua superficie di ingresso. Prima di fissare il perno controlliamo che la slitta non sia completamente disallineata con il fascio riflesso dallo specchio; per allineare la slitta con il fascio avremmo potuto posizionare sull'intera lunghezza della slitta in diverse posizioni, un cavaliere attraverso cui sostenere verticalmente una matita in posizioni sempre centrali rispetto al lato corto della slitta. Si ottiene un allineamento nel momento in cui la matita viene a coincidere con il diametro verticale del fascio, nelle diverse posizioni. Non curandoci di questo allineamento iniziale perchè irrilevante ai fini di ottenere un angolo di accettazione per il concentratore, fissiamo comunque uno zero su una striscia di carta affissa sul muro retrostante, sulla quale provvediamo a tracciare una scala di misura in cui ad ogni tacca successiva corrisponde la rotazione di $0,1^\circ$ della slitta attorno al suo perno, ovverosia del concentratore attorno al suo centro di rotazione. Un laser rosso allineato con la slitta e puntato sulla scala graduata serve ad indicarci sulla scala di quanto ci stiamo ruotando; in figura 5.1 ci riferiamo al sistema laser e scala graduata con l'etichetta *sistema di puntamento*. Per capire come sono state individuate le tacche sulla striscia di carta riferiamoci al disegno di figura 5.2.

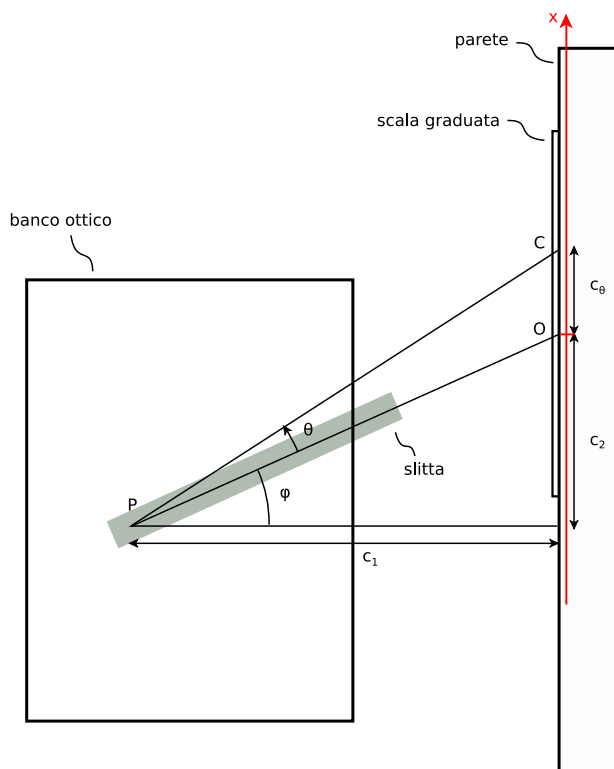


Figure 5.2: Schema di come è stata disposta la scala graduata sulla parte del muro più vicino al banco ottico; la slitta, libera di ruotare attorno al perno P , è ferma sullo zero della scala.

In figura 5.2 φ è l'angolo compreso tra la normale al muro passante per il perno P , e la direzione della slitta corrispondente allo zero della scala; si verifica quindi che $\tan \varphi = \frac{c_2}{c_1}$. Noi tuttavia siamo interessati a conoscere c_θ , ovvero sia di quanto, in unità di misura di lunghezza, mi devo spostare lungo la scala a partire dall'origine O , in corrispondenza di rotazioni della slitta attorno a P di angoli θ . Di conseguenza, re-impostando la formula trigonometrica per far comparire al suo interno le nuove incognite, si può facilmente verificare che $\tan(\varphi + \theta) = \frac{(c_2 + c_\theta)}{c_1}$ da cui si ricava $c_\theta(\theta)$:

$$c_\theta = c_1 \tan(\varphi + \theta) - c_2$$

Ad esempio, nel nostro caso, avendo misurato $c_1 \simeq 136,5\text{cm}$ e $c_2 \simeq 50,5\text{cm}$, e di conseguenza $\varphi \simeq 20,3^\circ$, si ottiene in corrispondenza di una rotazione di $\theta = +20^\circ$ attorno a P , $c_{+20^\circ} \simeq 65,3\text{cm}$ mentre nel caso di una rotazione dello stesso angolo ma in verso opposto, $\theta = -20^\circ$, si ottiene $c_{-20^\circ} \simeq -49,8\text{cm}$. Attraverso l'uso di un qualsiasi foglio di calcolo elettronico abbiamo fatto variare θ aggiungendo o togliendo di volta in volta $0,1^\circ$, per ottenere il relativo spostamento c_θ rispetto l'origine O della scala, tracciando infine a matita ogni volta una nuova tacca.

Tornando a descrivere il sistema di figura 5.1 e facendo al contempo riferimento alla

figura 5.3, ricordiamo ora in che modo ci siamo assicurati che il piano a cui appartengono i vertici del quadrato, ovvero le punte del nostro concentratore, fosse ortogonale all'asse della slitta e di conseguenza anche al piano del banco ottico a cui l'asse della slitta appartiene. Il laser verde He-Ne ($\lambda = 543,4nm$) utilizzato nell'esperienza di verifica del metodo MiRCO (descritta in sezione 4.2.2) viene fissato su banco ottico grazie ad una slitta di traslazione x-y, da cui è sorretto e mantenuto allineato in direzione z. Allineando l'asse x della slitta di traslazione del laser in una direzione parallela all'asse della slitta sulla quale è fissato il concentratore, abbiamo facilmente ottenuto un fascio laser parallelo al banco ottico e perpendicolare all'asse della slitta. Fissando il laser in una posizione x della slitta da cui è sorretto, e variandone secondo necessità l'altezza lungo y, abbiamo innanzi tutto fatto sì che la prima coppia inferiore di punte del concentratore lambissero contemporaneamente il fascio laser. Successivamente, tenendoci alla posizione prestabilita lungo l'asse x, abbiamo innalzato di $7cm$ il fascio laser (distanza pari al lato del quadrato formato dalle punte) e allineato la coppia superiore di punte. In figura 5.3 (b) viene messo in evidenza l'allineamento della coppia superiore di punte del concentratore.

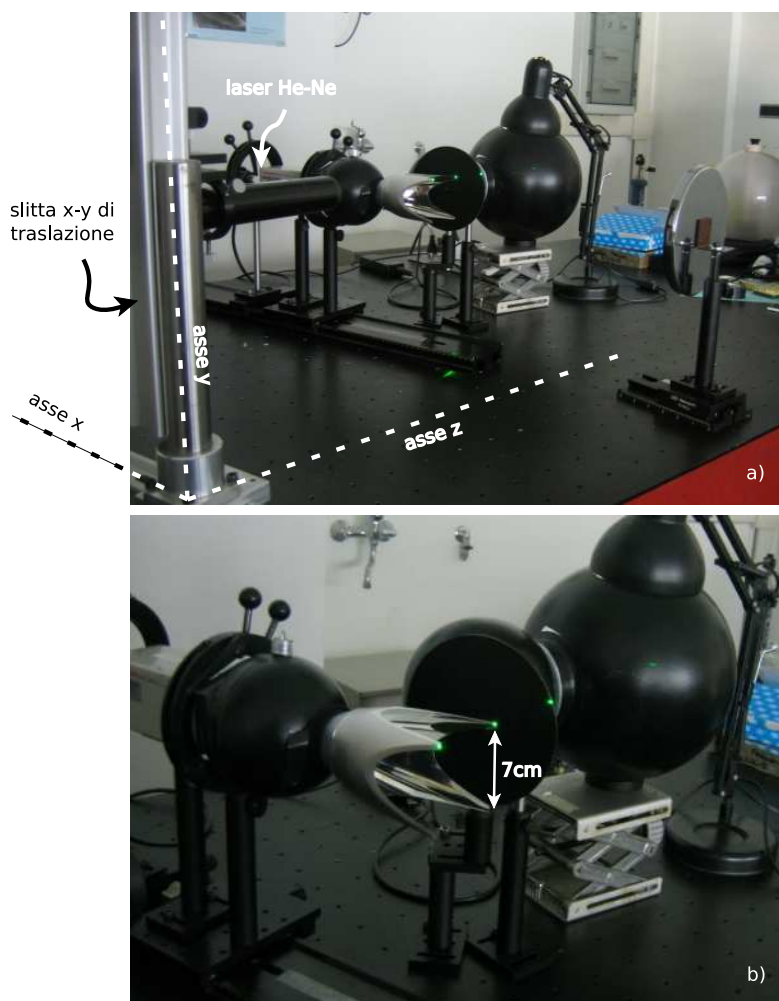


Figure 5.3: Nelle fotografie riportate si può notare (a) come le componenti sono state allineate tra loro, e come le punte, della coppia superiore, vengono lambite contemporaneamente dal fascio laser (b).

A conclusione della descrizione del sistema in figura 5.1 va segnalata la presenza di una *paletta* nera sostenuta da cavalieri e posta tra l'uscita diaframmata della sfera integratrice BP e il concentratore Rondine, con lo scopo di evitare che luce proveniente direttamente dal foro di uscita venisse riflessa dalle pareti interne riflettenti del concentratore, e concentrata accidentalmente insieme al fascio di luce proveniente dallo specchio, inficiando la misura.

5.1.1 Misure di omogeneità dell'irraggiamento

Per una misura di omogeneità del fascio in ingresso al concentratore, disponiamo, a due diverse distanze dallo specchio, una superficie liscia piana omogenea, che agisca da

schermo: su questa superficie viene a formarsi l'immagine del fascio. Per la prima prova posizioniamo lo schermo complanare alla superficie di ingresso del concentratore, mentre per la seconda prova arretriamo lo schermo, tenendolo sempre parallelo a se stesso, fino a giungere in prossimità della superficie di uscita (ovviamente avendo prima rimosso il concentratore dalla sfera NP a cui è connesso). Acquisendo ed elaborando le immagini del fascio attraverso il rivelatore CCD e il programma di acquisizione HiPic, generiamo due matrici di valori medi di intensità che andiamo a confrontare. Per operare un confronto selezioniamo le matrici così ottenute e plottiamone, con il programma Origin, i grafici a tre dimensioni.

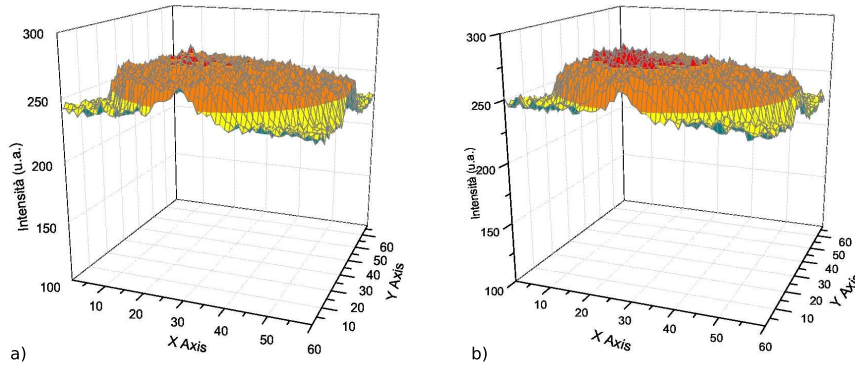


Figure 5.4: Grafici di intensità del fascio luminoso rilevati in due posizioni distinte, tenendo lo schermo in prossimità dell'uscita del concentratore (a) e in posizione retrostante (b), più vicino all'uscita.

L'entità della disuniformità rilevata si suppone dovuta alla scarsa qualità dello specchio parabolico utilizzato, uno specchio ingranditore da bagno. Questa informazione verrà tenuta in considerazione per un'eventuale corrispondenza non soddisfacente tra i risultati sperimentali ottenuti attraverso i metodi diretto e inverso.

5.2 Montaggio su banco ottico del sistema (metodo inverso)

L'apparato sperimentale per la misura attraverso il metodo inverso è costituito da un minor numero di elementi e si è dimostrato di ben più facile e rapida messa in opera. Riferendoci alla figura 5.5 vediamo che una *lampada alogena* da 150W e 24V illumina l'ingresso di una prima *generica SI* alla quale in serie è stata di seguito collegata la *SI-NP*: per assicurarci una migliore lambertianità della sorgente di luce in retro-ingresso al concentratore, abbiamo fatto integrare la luce sulle superfici delle SI per due volte consecutive, disponendo appunto in serie le due SI. Abbiamo valutato opportuna questa siffatta disposizione per via del fatto che la prima generica SI non è stata progettata all'interno del contesto di caratterizzazione di questa tesi, mentre la sfera NP è stata invece realizzata con la principale finalità di accogliere, attraverso la maggiore delle sue porte, l'uscita del concentratore *Rondine* in esame. Di fronte al concentratore, alla

5 Caratterizzazione e calibrazione del sistema

distanza di 363cm dalla sua finestra di ingresso (finestra da cui in questo caso proviene la luce), disponiamo uno *schermo bianco*, di lato pari a 176cm (si tratta di un comune telo bianco utilizzato nella didattica per le video-proiezioni). Il piano su cui giace lo schermo è tenuto approssimativamente perpendicolare all'asse ottico del concentratore. Sottostante al concentratore si trova il nostro rivelatore CCD corredato di obiettivo, o in alternativa si può disporre una fotocamera digitale, grazie al quale acquisire un'immagine dello schermo così illuminato, che verrà rielaborata successivamente attraverso il programma di acquisizione HiPic.

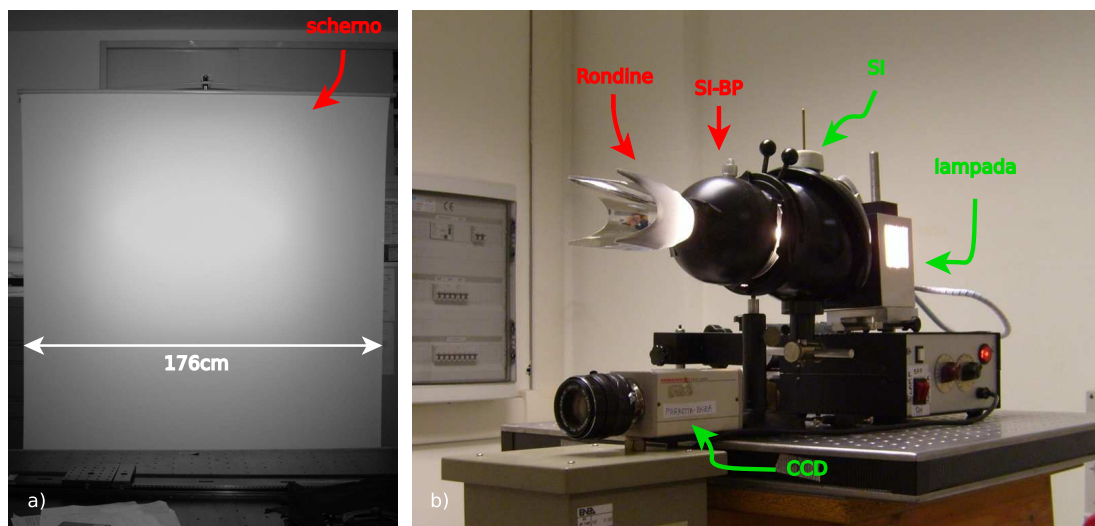


Figure 5.5: L'apparato sperimentale per applicare il metodo inverso è costituito da uno schermo bianco (a) su cui viene proiettata l'immagine, il concentratore oggetto di studio, una sorgente di luce lambertiana e un rivelatore CCD (b).

6 Misure sperimentali

6.1 Misure sul concentratore “Rondine”

Tra le differenze principali tra un concentratore classico di tipo CPC ed il concentratore Rondine, spicca in primis la geometria del concentratore: il primo gode di simmetria cilindrica mentre il secondo, oggetto di studio in questa tesi, ha due piani di simmetria ben definiti, la cui intersezione ne individua l'asse ottico. Questa prima differenza ha come inevitabile conseguenza la necessità di tracciare più curve di efficienza lungo le diverse direzioni considerate, e determinare quindi diversi valori di angoli di accettazione. Per entrambi i metodi di misura ci siamo tuttavia limitati a selezionare due direzioni caratteristiche e a tracciare i relativi profili di intensità, per capire di quali direzioni stiamo parlando riferiamoci alla figura 6.1 facendo qualche premessa di carattere geometrico.

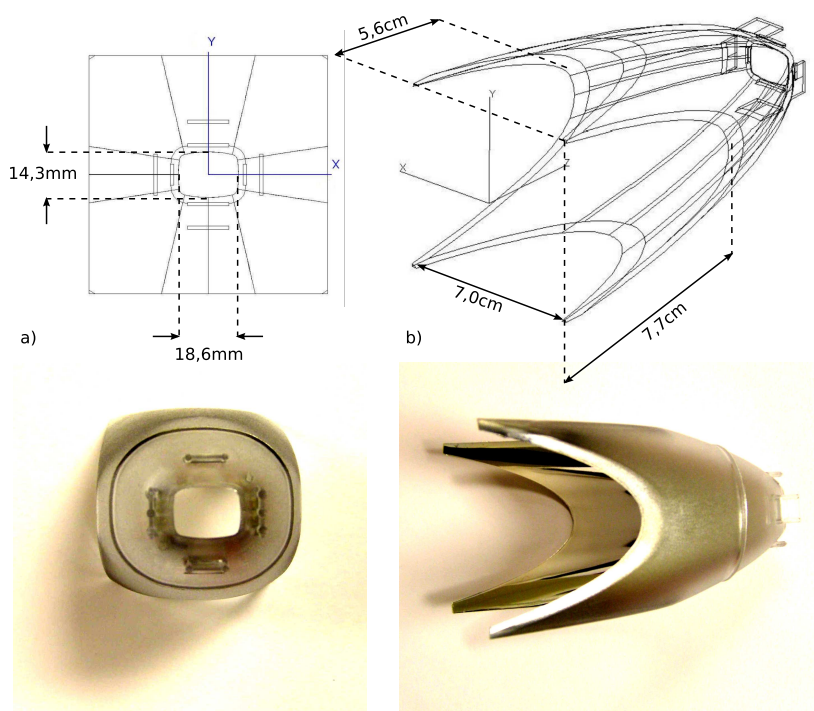


Figure 6.1: Il concentratore Rondine e le sue dimensioni, visuale da dietro (a) e visuale laterale (b). La distanza misurata tra l'apertura di ingresso e l'apertura d'uscita è pari a 13,9cm.

Innanzitutto va detto che la sua forma particolare nasce dall'esigenza di inserire la singola unità del concentratore a fianco di altre unità uguali all'interno di uno stesso modulo a concentrazione, per questo motivo il concentratore ci appare come derivato da un modello di CPC troncato e squadrato a cui sono state tolte le quattro pareti laterali piane. Il concentratore delimita con le sue quattro punte l'area di ingresso: un quadrato di lato pari a 7cm . L'area di uscita è più complicata, è di forma rettangolare ma con gli angoli sensibilmente smussati.

6.1.1 Misura con metodo diretto

Accesa la lampada e acceso il laser rosso del sistema di puntamento, partiamo con le misure facendo via via ruotare di $0,5^\circ$ il sistema Rondine-SI-NP-CCD, ancorato sulla slitta, attorno al punto in cui quest'ultima è imperniata al banco ottico. Ad ogni rotazione successiva corrisponde, come al solito, una misura del valore medio di intensità del segnale attraverso il programma di acquisizione HiPic, avendo impostato tempi di acquisizione (exposure time) pari a 500ms e con la selezione dell'intera area acquisita (corrispondente per il programma HiPic all'impostazione "full area, no ROI selected"). Tenuto conto della non-simmetria¹ del concentratore Rondine, provvediamo a tracciare due grafici, ripetendo perciò due volte le misurazioni, per delineare due diversi profili per le curve di efficienza relativa nel caso in cui:

1. l'uscita rettangolare del Rondine abbia il lato maggiore disposto parallelamente al banco ottico (e di conseguenza, a seguito dell'allineamento operato in fase di calibrazione del sistema, il lato minore ad esso ortogonale). Ci riferiamo a questo profilo come il profilo orizzontale, o profilo-x;
2. l'uscita rettangolare del Rondine abbia il lato minore disposto parallelamente al banco ottico (ovvero il lato maggiore ortogonale), ci riferiamo a questo secondo profilo come il profilo verticale, o profilo-y.

Come notiamo dai grafici sperimentali ottenuti, il mancato allineamento del fascio di luce con lo zero della scala, insieme a qualche imprecisione occorsa per via di alcune difficoltà nell'allineamento delle punte del concentratore Rondine, hanno fatto sì che i due profili non fossero simmetrici attorno all'asse di angolo zero, una mancata proprietà di simmetria che comunque non ci impedisce di operare una ragionevole valutazione riguardo all'ampiezza dell'angolo di accettazione α per entrambi i casi. Per ogni profilo sperimentale ottenuto abbiamo valutato lo shift angolare più opportuno, da applicare al profilo stesso per renderlo simmetrico attorno all'asse di angolo zero. Il metodo dei minimi quadrati utilizzato per valutare l'entità delle correzioni verrà discusso nei dettagli in seguito.

¹a differenza dei più comuni concentratori non-image come i classici CPC (Compound Parabolic Concentrator)

6 Misure sperimentali

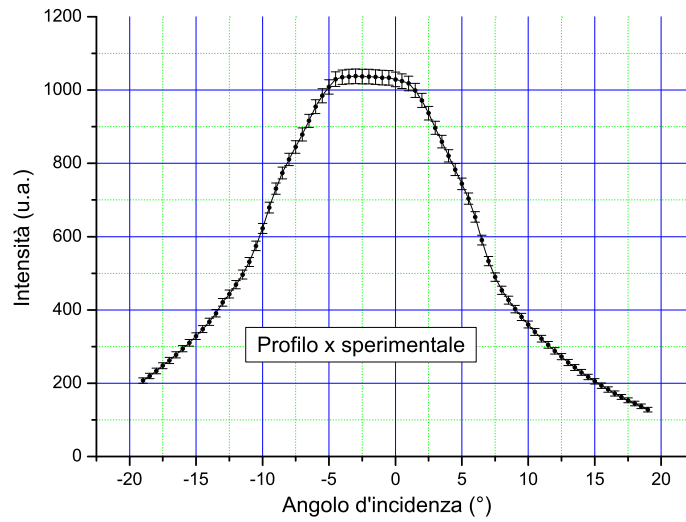


Figure 6.2: In grafico sono riportati i valori sperimentali di intensità espressi in unità arbitrarie ottenuti per il profilo orizzontale.

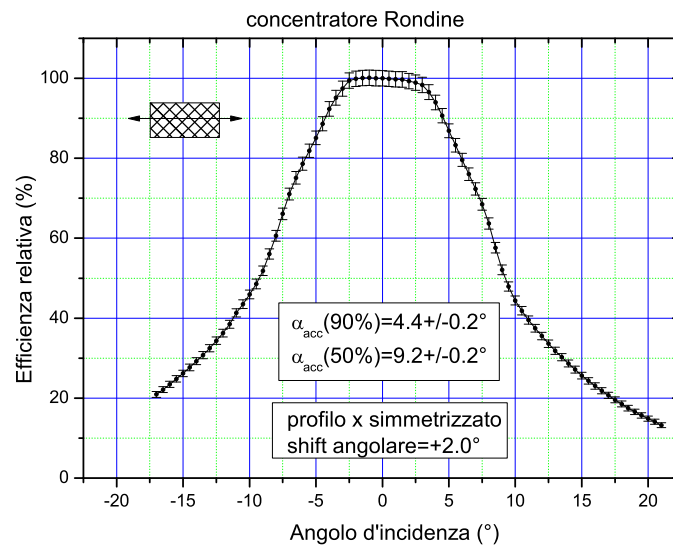


Figure 6.3: Grafico di efficienza relativa per il profilo verticale ottenuto correggendo un disallineamento pari a $+2^\circ$, sono inoltre indicati i valori degli angoli di accettazione.

6 Misure sperimentali

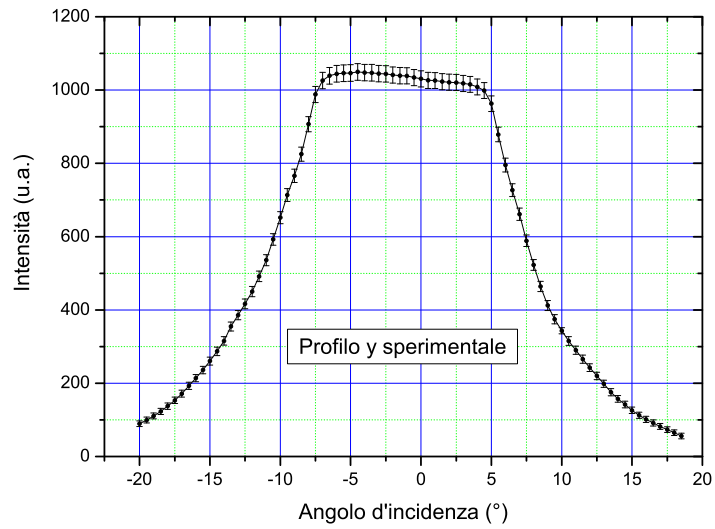


Figure 6.4: In grafico sono riportati i valori sperimentali di intensità espressi in unità arbitrarie ottenuti per il profilo verticale.

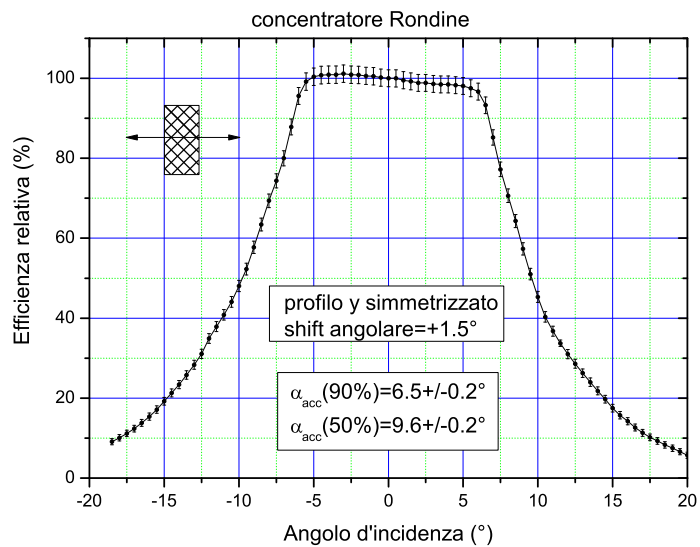
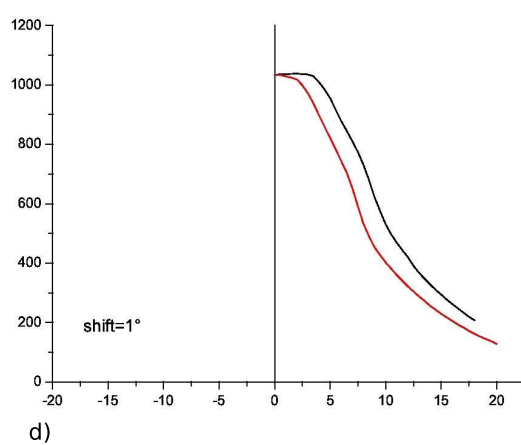
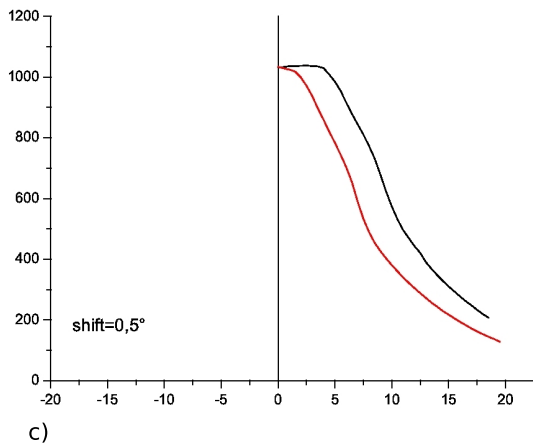
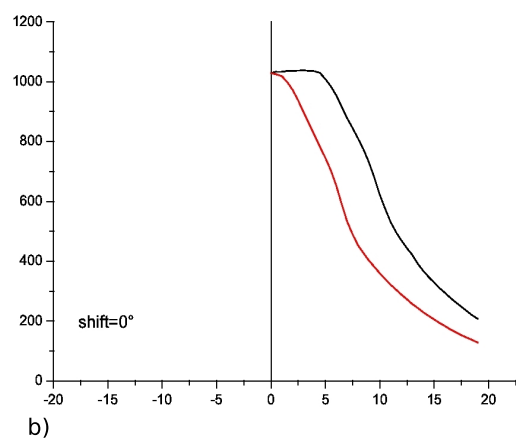
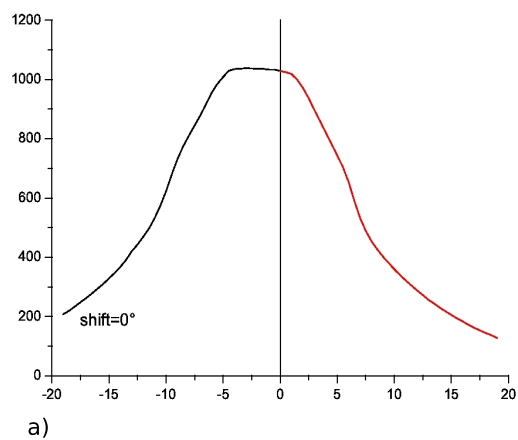


Figure 6.5: Grafico di efficienza relativa per il profilo verticale ottenuto correggendo un disallineamento pari a $+1,5^\circ$, sono inoltre indicati i valori degli angoli di accettazione.

6 Misure sperimentali

Per procedere a simmetrizzare le curve di efficienza e correggere la posizione dell'asse zero, prendiamo ad esempio in esame il grafico di intensità relativa riportato in figura 6.2, riferito al profilo orizzontale del concentratore, ed evidenziamo con colori diversi i valori di intensità del semiasse positivo delle ascisse e del semiasse negativo (i primi evidenziati in rosso e i secondi in nero in figura 6.6 (a)). Ribaltiamo i valori del semiasse negativo considerando in ascissa solo i valori assoluti degli angoli precedenti. Attraverso il metodo dei minimi quadrati valutiamo l'entità degli scarti tra i valori delle curve nera e rossa in corrispondenza di uno stesso angolo. Per minimizzare il valore di tale entità procediamo a shiftare di volta in volta di $0,5^\circ$ la scala dei valori degli angoli in ascissa ed annotiamo di conseguenza i valori dei minimi quadrati calcolati. Il minimo della parabola che interpola questi valori, rappresenta la migliore correzione all'allineamento del sistema. Apportando perciò una simile correzione, abbiamo ricavato le curve simmetrizzate riportate nelle figure 6.3 e 6.5.



6 Misure sperimentali

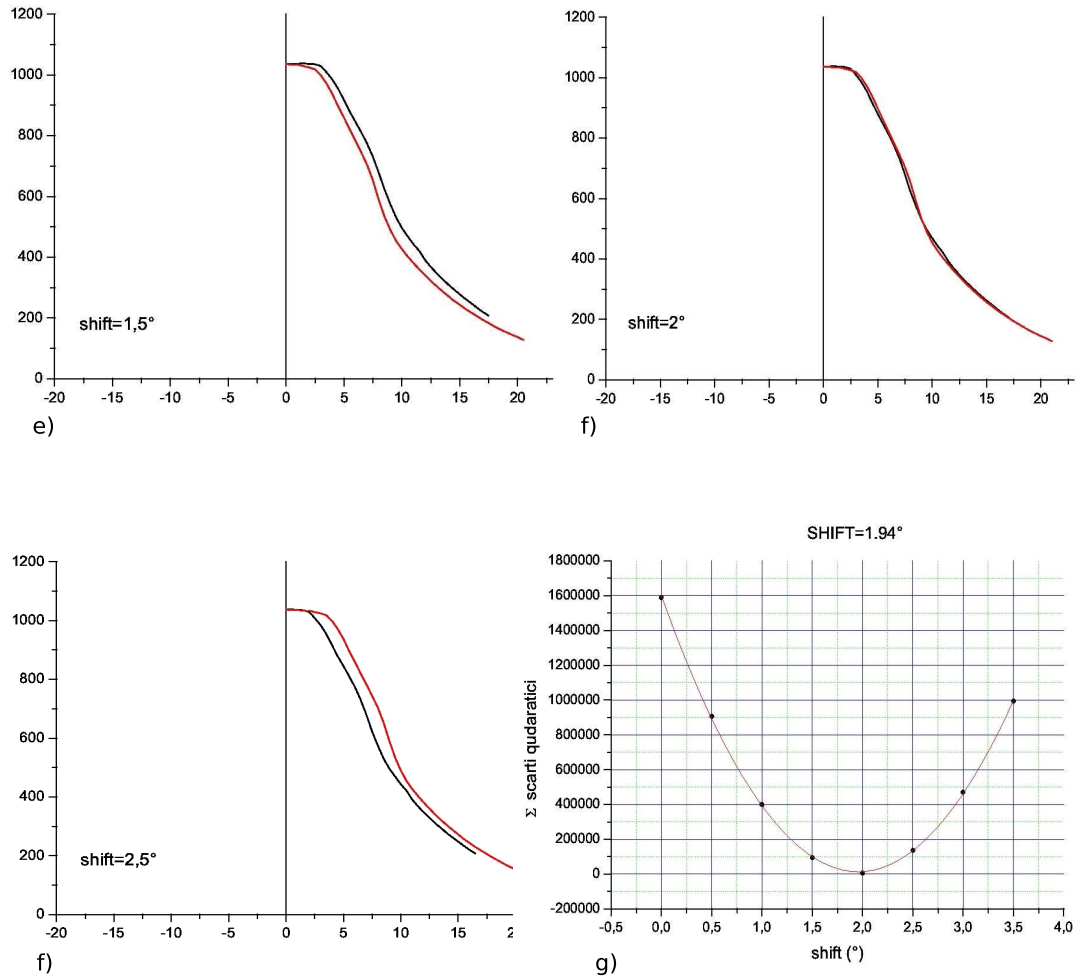


Figure 6.6: In grafico a) si distinguono in rosso i dati relativi ad angoli del semiasse positivo, in nero quelli relativi ad angoli del semiasse negativo. I grafici successivi b), c), d), e), ed f) mostrano, sovrapponendo le curve nel primo quadrante, il risultato di shift angolari dei valori pari a 0° , $0,5^\circ$, 1° , $1,5^\circ$, 2° , e $2,5^\circ$ rispettivamente. Il grafico g), riportando l'andamento delle sommatorie degli scarti quadratici, ci aiuta ad individuare lo shift migliore da apportare per ottenere la simmetrizzazione dei valori sperimentali attorno ad un asse di zero (ovvero il risultato mostrato in figura 6.3).

6.1.2 Misura con metodo inverso

Per operare un confronto con i risultati precedentemente ottenuti, selezioniamo attraverso HiPic due diverse regioni dell'immagine del fascio proiettato sullo schermo, dirette lungo due particolari direzioni, al solito quelle orizzontale e verticale. Queste due direzioni restano definite in relazione all'orientazione della finestra d'uscita del concentratore e

6 Misure sperimentali

sono quelle direzioni particolari per cui abbiamo tracciato le curve di efficienza con il metodo diretto; in effetti il metodo inverso ci dà la possibilità di selezionare, per la stessa immagine acquisita, infinite direzioni lungo le quali verificare l'andamento delle curve di efficienza, noi ci limiteremo a studiare il profilo orizzontale e il profilo verticale come illustra la figura 6.7.

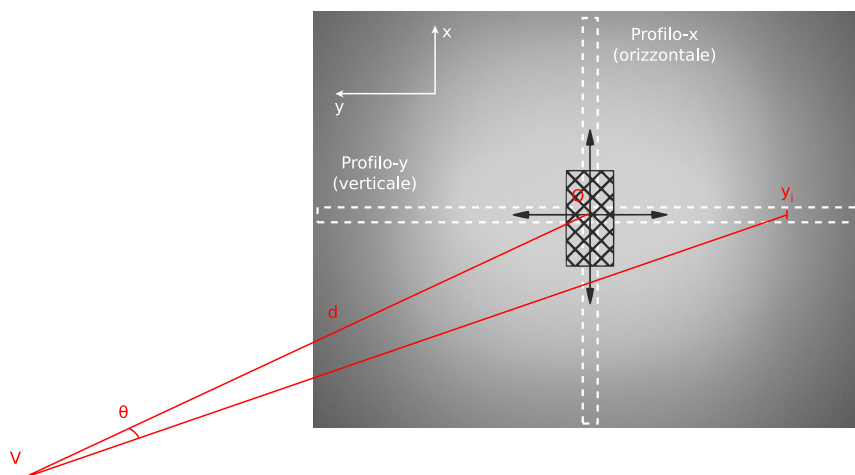


Figure 6.7: In funzione di come è stata disposta l'uscita del concentratore Rondine (in figura l'area evidenziata in nero a scacchi) si opera la selezione delle regioni dell'immagine di cui si vuole elaborare il profilo di intensità. Al centro della finestra di ingresso, e alla distanza d dallo schermo, si trova V , vertice dell'angolo θ compreso tra la direzione dell'asse ottico del concentratore e la direzione che individua il valore medio di intensità da rivelare in posizione y_i , ovvero, nell'esempio in figura, lungo il profilo verticale.

Alla selezione rettangolare relativa al profilo verticale che intendiamo tracciare, corrispondono $1212px$ per l'immagine acquisita, corrispondente ad una regione sullo schermo bianco a nostra disposizione, pari a circa $93cm$ (il fattore di conversione è $12,985px/cm$). La selezione relativa al profilo orizzontale invece consiste in un'altezza di $698px$, equivalente pertanto, per questioni di proporzionalità, a circa $54cm$. A ciascuna selezione vengono quindi associati attraverso l'analisi dell'immagine una serie di n dati relativi a valori di intensità media, per la prima selezione si sono ottenuti 405 dati, mentre per la seconda (quella relativa al profilo orizzontale si va a tracciare) se ne sono raccolti 233 (per una densità lineare corrispondente a circa $\delta_{dati} = 0,33dati/px$ il cui inverso è approssimabile a circa $3px/dato$). Per conoscere all'angolo θ , quale dato corrisponde è sufficiente considerare, premesso che la distanza $d = 225cm$ tra lo schermo e l'ingresso del concentratore equivale in pixel a $2922px$, la seguente relazione trigonometrica:

$$\theta_x \simeq \arctan \frac{3x_{dato}}{d_{px}}$$

dove x_{dato} è il numero, positivo o negativo, di dato che si sta prendendo in consider-

6 Misure sperimentali

azione a partire da un'origine O , che si suppone corrispondere, per entrambi i casi, al centro dell'area di intersezione tra le due regioni selezionate. Il fattore 3 corrisponde alla dimensione in pixel dell'unità di misura, ovvero di quanti pixel ci si deve spostare, verso valori positivi o negativi che sia, prima di ritrovare un altro dato di intensità media. Riportando nei grafici di entrambi i profili, l'intensità radiante normalizzata per $\theta = 0$, si ritrovano andamenti, quelli di figura X e di figura Y, paragonabili agli andamenti di figura 6.3 e di figura 6.5 rispettivamente, verificando valori consistenti ai precedenti per quel che riguarda gli angoli di accettazione.

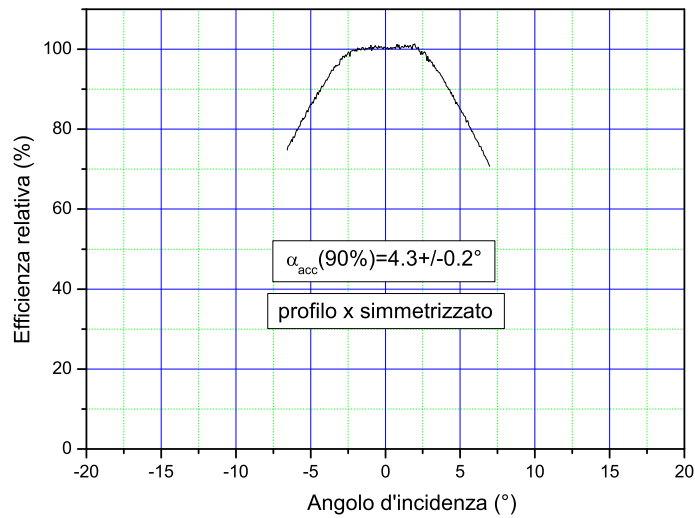


Figure 6.8: Grafico di efficienza relativa per il profilo orizzontale ottenuto correggendo il disallineamento, è inoltre indicato il valore dell'angolo di accettazione α_{90° .

6 Misure sperimentali

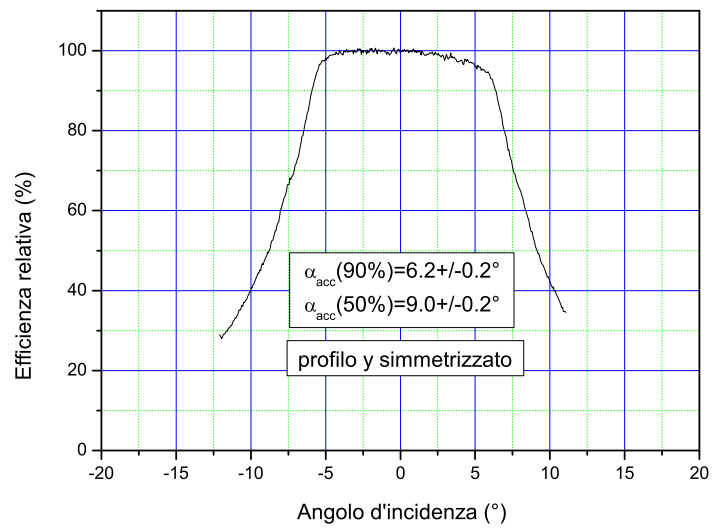


Figure 6.9: Grafico di efficienza relativa per il profilo verticale ottenuto correggendo il disallineamento, sono inoltre indicati i valori degli angoli di accettazione.

7 Conclusioni

Per la messa a punto di due metodi, quello diretto e quello inverso, ai fini della caratterizzazione indoor di piccoli concentratori solari, è stato necessario innanzi tutto realizzare artigianalmente alcune sfere integratrici che, per entrambi i metodi, si sono rivelate le componenti essenziali. Realizzare delle sfere integratrici, in realtà, comporta ben altri mezzi rispetto a quelli generalmente disponibili in un laboratorio di ottico e tecnologie più sofisticate. Questo è il motivo per cui le sfere integratrici vengono di solito acquistate ad un prezzo di alcune migliaia di euro. Noi siamo partiti da materiali molto semplici: per prima cosa globi commerciali di plastica, venduti come lampioni da giardino, che abbiamo modificato per adattarli alle nostre esigenze di lavoro; in secondo luogo soluzioni acquose di polveri di $BaSO_4$ addizionate con vinavil con funzione di legante, seguendo ricette sperimentali. I risultati sperimentali di riflettività dei coating si sono dimostrati molto buoni, alla pari dei preparati commerciali. Con le quattro sfere realizzate, di diverse dimensioni, sono stati avviati alcuni esperimenti di ottica finalizzati alla caratterizzazione di concentratori solari di piccole dimensioni. In particolare, il metodo diretto di caratterizzazione ci ha permesso di trovare la curva di efficienza angolare relativa, per l'importante prototipo di concentratore "Rondine", in corso di perfezionamento presso CPower. Altri esperimenti di ottica realizzati con le nostre sfere sono stati il metodo inverso a verifica dei risultati ottenuti attraverso il metodo diretto di caratterizzazione, e il metodo innovativo MiRCO per la misura della riflettività di parete di una sfera integratrice. Per questo ultimo esperimento i risultati riportati sono preliminari e meritano un ulteriore approfondimento. La teoria alla base del metodo inverso è stata sviluppata per concentratori classici CPC, ciò nondimeno il metodo inverso applicato al concentratore Rondine ha portato a risultati consistenti con quanto prima verificato attraverso il metodo diretto, come si può del resto facilmente notare dai grafici 7.1 e 7.2 che sovrappongono i risultati ottenuti dai due metodi.

7 Conclusioni

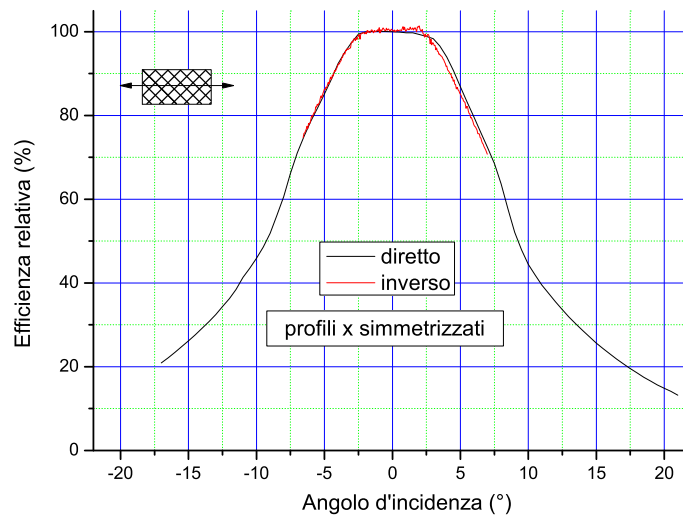


Figure 7.1: Sovrapposizione dei grafici di efficienza relativa per il profilo orizzontale ottenuti attraverso i metodi diretto (curva in nero) e inverso (curva in rosso).

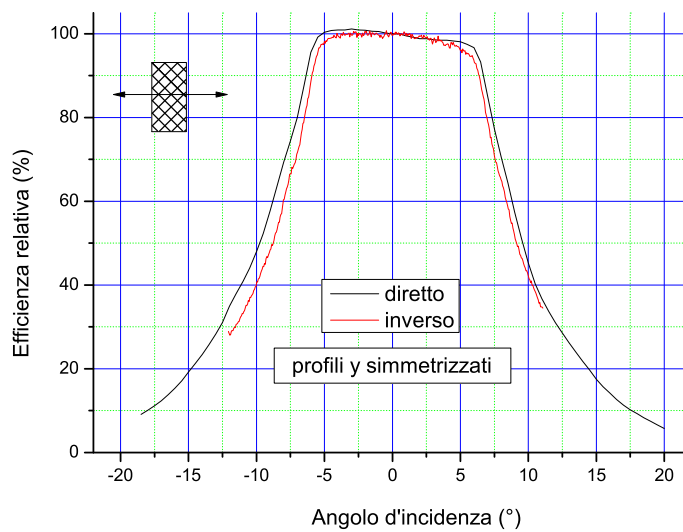


Figure 7.2: Sovrapposizione dei grafici di efficienza relativa per il profilo verticali ottenuti attraverso i metodi diretto (curva in nero) e inverso (curva in rosso).

Appendici teoriche

A Teoria delle sfere integratrici

Le sfere integratrici sono dei dispositivi ottici realizzati ricoprendo la parete interna di una sfera opaca con del materiale altamente riflettente e diffusivo. [24, 25] Le sfere integratrici (SI) vengono usate principalmente per due scopi:

1. raccogliere, integrare e misurare un flusso di radiazione elettro-magnetica¹. In questo caso la SI, opportunamente attrezzata, diventa la componente fondamentale di un radiometro;
2. generare luce diffusa. In questo caso la SI si comporta come una sorgente di radiazione.

In questo lavoro di tesi verranno usate diverse sfere integratrici, sia come radiometri, sia come sorgenti di luce diffusa. Come già detto, la SI è realizzata utilizzando un materiale diffusivo per la sua parete interna. Prima di discutere i principi di funzionamento di una SI è necessario allora precisare quali sono le proprietà ottiche di un diffusore e quali le principali grandezze che lo definiscono. Cominciamo a considerare un diffusore piano.

Diffusore piano

Un diffusore piano (opaco) ha la proprietà di diffondere nello spazio circostante una luce collimata incidente sulla sua superficie (figura A.1).

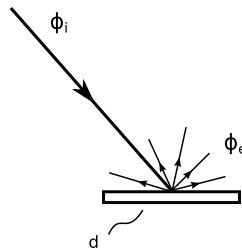


Figure A.1: Rappresentazione schematica di un diffusore piano.

La modalità con cui la luce è diffusa è definita da una funzione di distribuzione angolare (FDA) che caratterizza il profilo dell'intensità radiante $I(\theta, \gamma)$ della luce emessa dalla regione illuminata del diffusore, in funzione della direzione di emissione (θ, γ) , dove θ è l'angolo di emissione zenitale (misurato rispetto alla normale alla superficie) e γ è l'angolo azimutale (misurato rispetto ad una particolare direzione sul piano del diffusore).

¹il nostro ambito di ricerca riguarda la radiazione e.m. UV-VIS-NIR, cioè ultra violet-visible-near infrared, e quindi faremo riferimento in seguito esclusivamente ad essa

A Teoria delle sfere integratrici

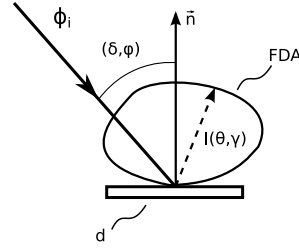


Figure A.2: FDA generica di un diffusore piano senza particolari proprietà.

In figura A.2 è mostrato un raggio, o fascio collimato, di luce incidenti sul diffusore dalla direzione (δ, φ) con δ angolo d'incidenza zenitale e φ angolo d'incidenza azimutale. La FDA del diffusore è mostrata come una superficie chiusa dalla quale si ricava l'intensità radiante $I(\theta, \gamma)$ funzione dell'angolo di emissione zenitale θ e azimutale γ .

Un diffusore ideale (*lambertiano*) è caratterizzato da una FDA sferica (vedi figura A.3).

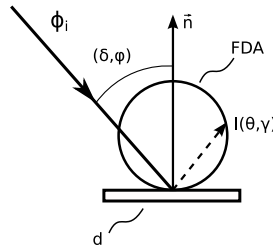


Figure A.3: FDA sferica di un diffusore piano lambertiano.

L'intensità radiante di emissione $I(\theta, \gamma)$ sarà allora definita come:

$$I(\theta, \gamma) = I(\theta) = I_0 \cos \theta \quad (\text{A.1})$$

L'intensità radiante quindi è funzione solo di θ secondo la funzione $\cos \theta$. Un diffusore ideale è detto anche lambertiano se obbedisce alle seguenti due leggi di Lambert.

- A) L'intensità radiante della luce diffusa è una funzione di $\cos \theta$ (come già definito dall'equazione A.1).
- B) Il flusso totale emesso dal diffusore a parità di flusso incidente (ovvero la riflettanza del diffusore) è una funzione costante dell'angolo d'incidenza δ .

La legge B) può essere formulata in un altro modo qualora il fascio collimato incidente illumini completamente il diffusore (vedi figura A.4):

- B') il flusso totale emesso dal diffusore è una funzione di $\cos \delta$.

E' da notare che le leggi di Lambert non fanno riferimento ad un particolare grado di riflettività del diffusore. Esse, in linea di principio, sono valide per un qualsiasi grado di

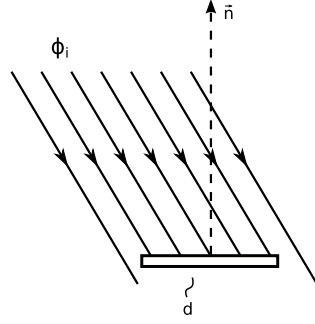


Figure A.4: Caso in cui un diffusore piano è completamente illuminato.

riflettività del diffusore. Nella realtà si trova che i diffusori che meglio si avvicinano alle proprietà del diffusore ideale (*lambertiano*) sono quelli che mostrano i più alti valori di riflettività.

Da qui in poi, comunque, ci si riferirà sempre allo schema di figura A.3 che mostra il fascio collimato sempre incidente sulla superficie del diffusore. Definiamo con ϕ_i il flusso incidente e con ϕ_e il flusso emesso, o diffuso da un diffusore lambertiano di superficie A_d . Si definisce M l'emettanza del diffusore in W/m^2 :

$$M = \frac{\phi_e}{A_d} \quad (A.2)$$

ma avendo anche che $\phi_e = \int_{\theta, \varphi} I(\theta, \varphi) = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin \theta I_o \cos \theta$, si ottiene:

$$\phi_e = \pi I_o \quad (A.3)$$

da cui si ricava $MA_d = \pi I_o$ e quindi si ottiene I_o misurato in Watt per angolo solido (W/sr):

$$I_o = \frac{MA_d}{\pi} = \frac{\phi_e}{\pi} \quad (A.4)$$

Ma essendo:

$$\phi_e = \rho_d \phi_i \quad (A.5)$$

dove ρ_d è la riflettività del diffusore, si ha che le grandezze M ed I_o diventano, riformulando rispettivamente le formule A.2 ed A.4:

$$M = \rho_d \frac{\phi_i}{A_d}$$

$$I_o = \rho_d \frac{\phi_i}{\pi}$$

Si definisce ora la radianza L_d del diffusore; per definizione si ottiene dividendo l'intensità radiante $I(\theta, \varphi)$ misurata in W/sr per la proiezione ortogonale alla direzione (θ, φ) dell'area del diffusore, ovvero:

$$L(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{A_d \cos \theta} = \frac{I_0 \cos \theta}{A_d \cos \theta} = \frac{I_0}{A_d} = \frac{M}{\pi} \quad (\text{A.6})$$

La radianza di un diffusore lambertiano è quindi costante. La radianza è misurata in $W/sr \cdot m^2$. Prima di introdurre le sfere integratrici si discute un ulteriore aspetto, quello dello scambio di radiazione, e flusso, tra due superfici.

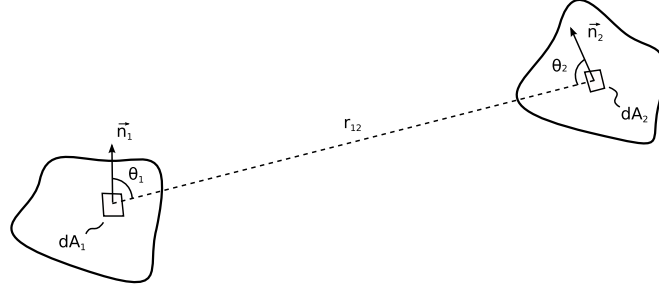


Figure A.5: Schematizzazione dello scambio di radiazione tra due elementi di superfici.

Il flusso elementare emesso dall'elemento di superficie dA_1 e raccolto dall'elemento dA_2 è pari a:

$$d\phi_{12} = (L_1 dA_1 \cos \theta_1)_I \times \left(\frac{dA_2 \cos \theta_2}{r_{12}^2} \right)_{II}$$

dove $(\dots)_I$ è il flusso emesso da dA_1 entro l'angolo solido unitario e $(\dots)_{II}$ è l'angolo solido entro il quale è visto l'elemento dA_2 da parte dell'elemento dA_1 . In maniera equivalente il flusso elementare emesso da dA_2 e assorbito da dA_1 è:

$$d\phi_{21} = (L_2 dA_2 \cos \theta_2) \times \left(\frac{dA_1 \cos \theta_1}{r_{12}^2} \right)$$

Il flusso radiante $\Delta\phi$ scambiato tra due superfici sarà dato allora da:

$$\Delta\phi = d\phi_{12} - d\phi_{21} = \frac{(L_{12} - L_{21}) \cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{r_{12}^2} \quad (\text{A.7})$$

Il flusso totale scambiato, ϕ , si ottiene integrando $\Delta\phi$:

$$\phi = \iint dA_1 dA_2 (L_{12} - L_{21}) \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{r_{12}^2} \quad (\text{A.8})$$

La sfera integratrice

Nel seguito si supporrà sempre che le proprietà ottiche della parete interna di una SI siano quelle ideali di un diffusore lambertiano. Si supporrà quindi che la parete reale diffonda in maniera ideale la luce e che abbia una elevata riflettività (prossima a 1). Per ottenere ciò, è necessario utilizzare dei materiali particolari e seguire una particolare

procedura per il rivestimento della parete interna della sfera integratrice. Questi aspetti sono trattati nel capitolo 4 loro dedicato. Si considera la sfera integratrice di raggio R illustrata in figura A.6 per la quale si distinguono A_i l'area della finestra di ingresso, ρ_w la riflettività di parete, e dA_1 e dA_2 due elementi infinitesimi della superficie interna.

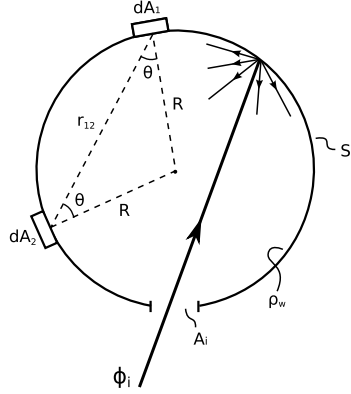


Figure A.6: Schema della sfera integratrice SI illuminata da un fascio ϕ_i .

Il flusso trasferito da dA_1 a dA_2 diventa:

$$d^2\phi_{12} = L_1 \frac{dA_1 \cos \theta_1 dA_2 \cos \theta_2}{r_{12}^2} = \dots = L_w \frac{dA_1 dA_2 \cos^2 \theta}{r_{12}^2} = L_w \frac{dA_1 dA_2}{4R^2} \quad (\text{A.9})$$

dove L_w è la radianza della parete di SI. Il flusso $d\phi_2$ trasferito da tutta la superficie interna della sfera all'elemento dA_2 si ottiene integrando la A.9:

$$d\phi_2 = \frac{L_w}{4R^2} dA_2 \int dA_1 = \frac{L_w}{4R^2} dA_2 A_{sph} (1 - f) \quad (\text{A.10})$$

dove f è la frazione di area occupata dalle finestre, ciascuna di area a_i :

$$f = \frac{\sum_i a_i}{A_{sph}} \quad (\text{A.11})$$

L'irradianza sulla parete interna della sfera sarà allora pari a:

$$E_w = \frac{d\phi_2}{dA_2} = \frac{L_w}{4R^2} A_{sph} (1 - f) = \pi L_w (1 - f) \quad (\text{A.12})$$

Se si praticasse un foro sulla parete della sfera in corrispondenza dell'elemento dA_2 , il flusso incidente su dA_2 , $d\phi_2$, sarebbe il flusso emesso dalla sfera in corrispondenza dell'apertura dA_2 :

$$d\phi_{emesso} = d\phi_2 = M_{sph} dA_2 \quad (\text{A.13})$$

dove M_{sph} è l'emettanza della sfera (flusso emesso per unità di superficie di apertura sulla sfera):

$$M_{sph} = \pi L_w (1 - f) \quad (\text{A.14})$$

Se M_{sph} è l'emettanza della sfera, dall'equazione A.6 si può ottenere la "radianza" della sfera L_{sph} :

$$L_{sph} = \frac{M_{sph}}{\pi} = L_w (1 - f) \quad (\text{A.15})$$

Da cui si trova che la radianza della sfera L_{sph} è legata alla radianza della parete L_w per mezzo del fattore $(1 - f)$. Per avere l'espressione esplicita di L_{sph} occorre seguire il seguente procedimento: si considera la figura A.7 in cui è riportata una semplice SI, di raggio R e riflettività di parete ρ_w , dotata di una finestra d'ingresso di area A_{in} , attraverso la quale è immesso il flusso radiante ϕ_{in} .

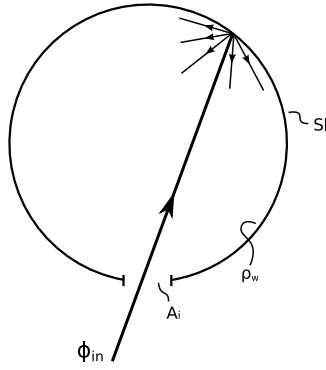


Figure A.7: Schema di una semplice sfera integratrice SI illuminata da un fascio ϕ_{in} .

Dopo la *prima riflessione* si avrà per il flusso ϕ_1 all'interno della sfera:

$$\phi_1 = \rho_w \phi_{in} \quad (\text{A.16})$$

e quindi si avrà un'irradianza parziale sulla parete della sfera dovuta a ϕ_1 :

$$E_1 = \frac{\phi_1}{A_{sph}} = \frac{\rho_w \phi_{in}}{A_{sph}} \quad (\text{A.17})$$

Dopo la *seconda riflessione* si avrà rispettivamente come flusso ϕ_2 all'interno della sfera e come irradianza parziale E_2 sulla parete della sfera:

$$\phi_2 = E_1 \rho_w A_{sph} (1 - f) \quad (\text{A.18})$$

$$E_2 = \frac{\phi_2}{A_{sph}} = E_1 \rho_w (1 - f) \quad (\text{A.19})$$

Dopo la *terza riflessione* si avrà rispettivamente come flusso ϕ_3 all'interno della sfera e come irradianza parziale E_3 sulla parete della sfera:

$$\phi_3 = E_2 \rho_w A_{sph} (1 - f) \quad (\text{A.20})$$

$$E_3 = \frac{\phi_3}{A_{sph}} = E_2 \rho_w (1 - f) = E_1 \rho_w^2 (1 - f)^2 \quad (\text{A.21})$$

Dopo la n -sima riflessione si avrà rispettivamente come flusso ϕ_n all'interno della sfera e come irradianza parziale E_n sulla parete della sfera:

$$\phi_n = E_{n-1} \rho_w A_{sph} (1 - f) \quad (\text{A.22})$$

$$E_n = \frac{\phi_n}{A_{sph}} = E_{n-1} \rho_w (1 - f) = E_1 \rho_w^{n-1} (1 - f)^{n-1} \quad (\text{A.23})$$

Dopo un numero infinito di riflessioni, ovvero al raggiungimento di uno stato stazionario, si avrà un'irradianza complessiva sulla parete $E_\infty \equiv E_w$ data dalla somma di tutti i contributi parziali:

$$\begin{aligned} E_w \equiv E_\infty &= E_1 + E_2 + E_3 + \dots = E_1 + E_1 \rho_w (1 - f) + E_1 \rho_w^2 (1 - f)^2 + \dots = \\ &= E_1 \left[1 + \rho_w (1 - f) + \rho_w^2 (1 - f)^2 + \dots \right] = E_1 \frac{1}{[1 - \rho_w (1 - f)]} \end{aligned}$$

Quindi:

$$E_w = \frac{\rho_w \phi_{in}}{A_{sph}} \frac{1}{1 - \rho_w (1 - f)} \quad (\text{A.24})$$

Ma essendo:

$$E_w = M_{sph} = \pi L_{sph} \quad (\text{A.25})$$

e inoltre:

$$E_w = \pi L_w (1 - f) \quad (\text{A.26})$$

si ottiene per l'emettanza della sfera:

$$M_{sph} = \frac{\rho_w \phi_{in}}{A_{sph}} \frac{1}{1 - \rho_w (1 - f)} \quad (\text{A.27})$$

e per la radianza della sfera:

$$L_{sph} = \frac{M_{sph}}{\pi} = \frac{\rho_w \phi_{in}}{\pi A_{sph}} \frac{1}{1 - \rho_w (1 - f)} \quad (\text{A.28})$$

Finora si ha considerato una configurazione semplice per la sfera, ovvero quella in cui vi siano solo finestre aperte, il che significa a riflettanza nulla. Nel caso generale ciò

A Teoria delle sfere integratrici

succede raramente, pertanto si considera ora una serie di n porte, in cui la i -esima abbia riflettanza ρ_i e sia contraddistinta da una frazione di area f_i

$$f_i = \frac{A_i}{A_{sph}} = \frac{A_i}{4\pi R^2} \quad (\text{A.29})$$

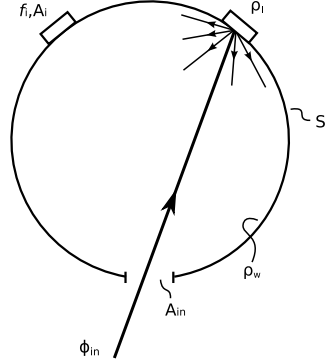


Figure A.8: SI caratterizzata da n aperture (porte) ciascuna di riflettività ρ_i e frazione di area f_i . La zona di primo impatto ha riflettività ρ_I

Preso visione della figura A.8 si definiscono ρ_I la riflettanza della zona di primo impatto, ρ_w la riflettanza di parete, ρ_i la riflettanza della porta i -esima, f_i la frazione di area della porta i -esima.

L'espressione generale dell'irradianza sulla parete della sfera la si ottiene generalizzando l'equazione A.24. In questo caso si deve considerare che la frazione di area della parete è:

$$f_w = 1 - \sum_{i=1}^n f_i \quad (\text{A.30})$$

Inoltre va considerato che il fascio in ingresso colpisce in generale la zona di primo impatto che non sempre coincide con la parete. L'equazione A.24 diventa allora:

$$E_w = \frac{\rho_I \phi_{in}}{A_{sph}} \frac{1}{1 - \rho_w \left(1 - \sum_{i=1}^n f_i \right) - \sum_{i=1}^n \rho_i f_i} \quad (\text{A.31})$$

da cui si ricava per l'espressione generale della radianza della sfera:

$$L_{sph} = \frac{\rho_I \phi_{in}}{\pi A_{sph}} \frac{1}{1 - \rho_w \left(1 - \sum_{i=1}^n f_i \right) - \sum_{i=1}^n \rho_i f_i} \quad (\text{A.32})$$

Come si vede dalla A.32, le grandezze che incidono in maniera diretta sulla radianza della sfera sono: la riflettività di primo impatto, il flusso d'ingresso e la superficie totale della sfera. La ρ_I è contenuta sia a numeratore nel 1° termine del 2° membro che a

denominatore nel 2° termine del 2° membro, in quanto la zona di primo impatto può essere la parete oppure una delle n porte. Ciò significa che la radianza non è perfettamente lineare rispetto a ρ_I . Questo fatto ha delle implicazioni sulle modalità di misura della riflettanza per mezzo di una sfera integratrice, che qui non sono trattate. Un diverso ragionamento vale per il flusso d'ingresso ϕ_{in} . In questo caso abbiamo una perfetta linearità tra radianza della sfera e flusso di ingresso. La stessa cosa vale per l'irradianza E_w sulla parete della sfera, come descritto dall'equazione A.31. Se la sfera viene usata come radiometro anziché come sorgente di luce diffusa, allora al suo interno viene posto un fotoregistratore la cui risposta sarà una funzione lineare di E_w . In tal caso, essendo E_w una funzione perfettamente lineare di ϕ_{in} dalla equazione A.31, ne si deduce che la sfera è un dispositivo di misura del flusso che ha una risposta perfettamente lineare.

Moltiplicatore della sfera

Il moltiplicatore della sfera, μ , è un parametro che tiene conto dell'aumento di radianza, dovuto alle riflessioni interne, che si ottiene con una sfera integratrice rispetto ad un diffusore piano che ha la stessa superficie della sfera. [24, 25, 26] La teoria comune adottata da molti autori stabilisce per la radianza L_D di un diffusore piano di area totale A_D , senza aperture, e di riflettività ρ :

$$L_D = \frac{\phi_{in}\rho}{\pi A_D} \quad (\text{A.33})$$

Questa radianza è confrontata con quella di una sfera integratrice di area totale $A_s = A_D$, provvista di aperture per l'ingresso e l'uscita della radiazione:

$$L_s = \left(\frac{\phi_{in}}{\pi A_D} \right)_I \left(\frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \right)_{II} \quad (\text{A.34})$$

dove f è la frazione di area occupata dalle finestre. Secondo questa teoria corrente, il termine $(\dots)_I$ dell'equazione A.34 viene dichiarato essere "approssimativamente uguale" ad L_D :

$$\frac{\phi_{in}}{\pi A_s} \approx \frac{\phi_{in}\rho}{\pi A_D} \quad (\text{A.35})$$

da cui risulterebbe per il fattore $(\dots)_{II}$ dell'equazione A.34 la definizione di *moltiplicatore della sfera* (sphere multiplier):

$$\mu = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (\text{A.36})$$

La definizione di moltiplicatore della sfera, secondo l'equazione A.36, non è esatta e può essere corretta seguendo due procedimenti diversi.

Nel primo procedimento, si fissa la stessa area per il diffusore piano e per la sfera, e si immagina inoltre di sviluppare la superficie della sfera su di un piano in modo da realizzare la superficie piana del diffusore. Si considera dapprima il caso semplice di una sfera di area totale A_s , composta da una parete otticamente uniforme e da alcune porte

di riflettività nulla (cioè aperte) per l'ingresso e l'uscita della radiazione. La sfera così sviluppata da luogo ad un diffusore piano di area $A_D = A_s$, provvisto di alcune aperture di area $A_F = f \cdot A_s$, dove f è al solito la frazione di area delle aperture (vedi figura A.9).

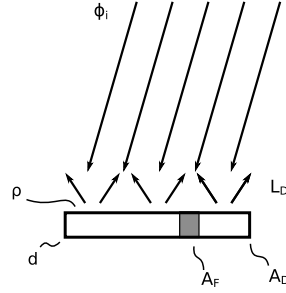


Figure A.9: Diffusore piano d di area totale A_D , riflettività di parete ρ e frazione di area delle finestre f , irraggiato con il flusso ϕ_i . Esso produce una radianza L_D in uscita (W/m^2sr).

Se la superficie del diffusore ha proprietà ottiche ideali (è lambertiano) allora la radianza L_D è costante rispetto a tutte le direzioni e si può esprimere come segue:

$$L_D = \frac{M_D}{\pi} = \frac{\phi_{in}\rho(1-f)}{\pi A_D} = \frac{\phi_{in}\bar{\rho}}{\pi A_D} \quad (A.37)$$

dove M_D (W/m^2) è l'emettanza del diffusore, ϕ_{in} (W) è il flusso incidente sulla superficie di riflettività ρ , e $\bar{\rho} = \rho(1-f)$ è la riflettività media del diffusore. Per calcolare la radianza L_s della sfera integratrice, riferiamoci alla figura A.10.

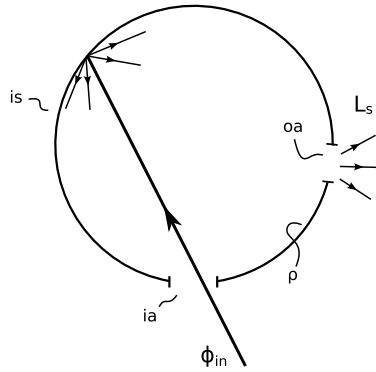


Figure A.10: La sfera integratrice (is) è irraggiata con un flusso ϕ_{in} dalla porta di ingresso (ia) e produce un flusso a radianza costante L_s dalla porta di uscita (oa).

La sfera (is) è irraggiata da un flusso ϕ_{in} , come nel caso del diffusore, che incide su una piccola regione (regione di primo impatto) della parete interna. La radianza L_s è quella misurata per la radiazione emessa dall'apertura di uscita (oa). L_s è ottenuta dalla irradianza E_w sulla parete interna nello stato stazionario:

dove $\sum_j \rho_j f_j = \bar{\rho}$ è la riflettanza media del diffusore e della sfera (nella sommatoria la parete compare come una delle parti della sfera).

Trattando la radiazione come è stato fatto precedentemente, si perviene ad una espressione per la radianza che è simile a quella di equazione A.39 con la differenza che il termine di riflettività che moltiplica il flusso di ingresso si riferisce ora alla zona di primo impatto:

$$L_s = \frac{E_w}{\pi} = \frac{\phi_{in} \rho_I}{\pi A_s} \frac{1}{1 - \sum_j \rho_j f_j} \quad (\text{A.43})$$

Esprimendo la radianza L_s come prodotto di L_D per il moltiplicatore della sfera μ_I si ottiene:

$$L_s = \left[\frac{\phi_{in} \sum_j \rho_j f_j}{\pi A_D} \right] \mu_I = \left[\frac{\phi_{in} \sum_j \rho_j f_j}{\pi A_s} \right] \mu_I \quad (\text{A.44})$$

Dalle equazione A.43 e A.44 si ricava infine l'espressione generale per il moltiplicatore della sfera:

$$\mu_I = \frac{\rho_I}{\sum_j \rho_j f_j \left[1 - \sum_j \rho_j f_j \right]} = \frac{\rho_I}{\bar{\rho} [1 - \bar{\rho}]} \quad (\text{A.45})$$

E' facile verificare che l'espressione generale A.45 diventa quella semplificata A.41 quando si pone $\rho_I = \rho$, $\bar{\rho} = \rho(1 - f)$, essendo ρ la riflettività della parete. Le equazioni A.42, A.43 e A.45 sono strettamente valide nelle ipotesi che tutte le parti della sfera abbiano un comportamento lambertiano. In pratica questo è soddisfatto dalla parete della sfera, meno dalle altre componenti affacciate sulle aperture.

Adesso si introduce una nuova definizione di moltiplicatore. Se si considera il modo con cui sono illuminati il diffusore e la sfera negli esempi precedenti, infatti, si nota una sostanziale differenza. Mentre il diffusore piano è illuminato dal flusso ϕ_{in} in maniera uniforme, la sfera è illuminata dal flusso in ingresso solo su una piccola regione della sua parete interna, la regione di primo impatto. Per svolgere un confronto appropriato tra diffusore piano e sfera, si dovrà in realtà confrontare il flusso incidente sul diffusore piano con il flusso diffuso prodotto all'interno della sfera integratrice dopo la prima riflessione. Quindi, anziché porre uguale a ϕ_{in} il flusso all'interno dei due dispositivi, si porranno uguali tra loro il flusso incidente sul diffusore piano e quello all'interno della sfera dopo la riflessione sulla zona di primo impatto. Si pone allora il flusso all'ingresso nella sfera, ϕ'_{in} , in modo tale da avere ϕ_{in} come il flusso diffuso per la prima volta su A_s :

$$\phi_{in} = \phi'_{in} \rho_I \quad (\text{A.46})$$

Allora l'equazione A.43 si modifica come segue:

$$L_s = \frac{E_w}{\pi} = \frac{\phi_{in}}{\pi A_s} \frac{1}{1 - \sum_j \rho_j f_j} \quad (\text{A.47})$$

Esprimendo la radianza della sfera come prodotto della radianza del diffusore (equazione A.42) per il nuovo moltiplicatore μ_{II} :

$$L_s = \left[\frac{\phi_{in} \sum_j \rho_j f_j}{\pi A_D} \right] \mu_{II} = \left[\frac{\phi_{in} \sum_j \rho_j f_j}{\pi A_s} \right] \mu_{II} \quad (\text{A.48})$$

dal confronto tra le equazioni A.47 e A.48 si ottiene per il parametro μ_{II} :

$$\mu_{II} = \frac{1}{\sum_j \rho_j f_j \cdot \left[1 - \sum_j \rho_j f_j \right]} = \frac{1}{\bar{\rho} [1 - \bar{\rho}]} \quad (\text{A.49})$$

Per una semplice sfera con aperture a riflettanza zero si ottiene:

$$\mu_{II} = \frac{1}{\rho (1 - f) [1 - \rho (1 - f)]} \quad (\text{A.50})$$

Le equazioni A.49 e A.50 rappresentano probabilmente una migliore definizione del moltiplicatore della sfera rispetto alle equazioni A.45 e A.41 in quanto la seconda definizione di moltiplicatore della sfera è ottenuta confrontando il diffusore piano con la sfera nelle seguenti ipotesi:

1. le aree del diffusore e della sfera sono identiche;
2. il flusso incidente sul diffusore è uguale al flusso diffuso incidente sulla parete interna della sfera.

Confrontando l'equazione A.45 con la A.49 si ottiene la relazione:

$$\mu_{II} = \frac{1}{\rho_I} \cdot \mu_I \quad (\text{A.51})$$

Le due definizioni di moltiplicatore della sfera differiscono per i due seguenti motivi:

1. μ_I è ottenuto eguagliando il flusso ϕ_{in} all'ingresso dei due dispositivi.
2. μ_{II} è ottenuto considerando un diverso flusso in ingresso, ma lo stesso flusso diffuso all'ingresso sulla superficie totale dei due dispositivi.

B Teoria del metodo MiRCo

MiRCo sta per: “Misura della Riflettanza di una sfera integratrice con il metodo del Contrasto”. [24] La conoscenza della riflettanza spettrale della parete interna di una sfera integratrice è richiesta in diverse applicazioni. Nella teoria precedente abbiamo visto per esempio che la definizione di “moltiplicatore della sfera” è basata sulla conoscenza della riflettività di parete, oltre che dei parametri dimensionali della sfera e delle porte annesse (vedi eq A.41 e A.50). La misura di ρ_w (riflettività di parete) di una sfera non è agevole. La cosa migliore sarebbe avere a disposizione dei piccoli campioni piani che abbiano le stesse proprietà ottiche della parete della sfera. A volte è possibile disporre dei “tappi” che chiudono le porte della sfera. In tal caso si possono fare misure separate su questi “tappi”, i cui risultati siano rappresentativi delle proprietà della parete. Quando non si disponga di questi campioni piani, allora diviene necessario escogitare altre procedure indirette di misura. Una di queste procedure è quella che descriviamo di seguito, battezzata in occasione di questa tesi con il termine “MiRCo” (Misura di Riflettanza da Contrasto). Il metodo suddetto è basato sul fenomeno ottico per cui, illuminando con un fascio di luce l’interno di una sfera, si osserva una zona della superficie, quella illuminata direttamente dal fascio, più illuminata e che si possiamo pertanto brevemente indicare come ZPI (Zona di Primo Impatto), mentre il resto della parete della sfera è illuminata più debolmente per le successive riflessioni. Il metodo MiRCo è basato sulla misura dell’intensità della luce nelle vicinanze della ZPI. Nella teoria che segue si dimostra che da questa misura si può estrarre facilmente l’informazione sulla riflettività di parete ρ_w . Naturalmente la ρ_w è riferita all’intervallo spettrale e all’intensità del fascio incidente. In generale si ha, per un fascio incidente con densità spettrale E ($W/\mu m$) nell’intervallo $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$, la seguente definizione di riflettività relativa allo spettro s :

$$\rho_w(s) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \rho_w(\lambda) E(\lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda E(\lambda)} \quad (B.1)$$

dove $\rho_w(\lambda)$ è la riflettività spettrale della parete. Illustriamo la teoria del metodo MiRCo facendo riferimento ad una sfera integratrice semplice, ovvero priva degli accessori che comunemente sono installati sulle porte (vedi figura B.1).

Dalla teoria esposta in appendice A nella pagina 60 si ricava l’espressione dell’irradianza E_w sulla parete della sfera:

$$E_w = \frac{\rho_w \phi_{in}}{A_s} \cdot \frac{1}{1 - \rho_w(1 - f)} \quad (B.2)$$

con $A_s = 4\pi R^2$ area superficiale della sfera, ϕ_{in} flusso in ingresso e $f = A_f/A_s$ frazione di area delle finestre. In figura B.1 si distingue la zona di primo impatto ZPI,

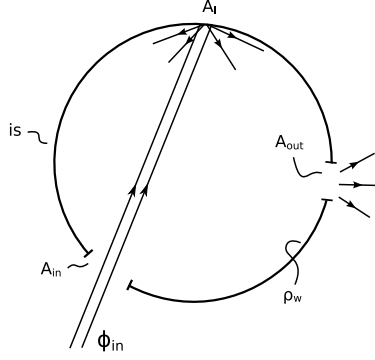


Figure B.1: Il metodo MiRCO è applicato ad una sfera is priva di accessori sulle porte. Per semplicità sono riportate solo le porte di ingresso e di uscita.

caratterizzata da un'area A_I . L'irradianza sulla zona di primo impatto, E_I , sarà uguale alla somma dell'irradianza E_w comune a tutta la parete e di quella prodotta dal fascio di ingresso:

$$E_I = E_w + \frac{\phi_{in}}{A_I} = \phi_{in} \left[\frac{1}{A_I} + \frac{1}{A_S} \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w(1-f)} \right] \quad (B.3)$$

Definendo ε il rapporto tra le due radianze, della ZPI e di parete rispettivamente, misurabili con un rivelatore CCD, e sapendo quale legame sussiste tra radianza ed irradianza ($L = E\rho/\pi$), si ottiene (avendo sia per la ZPI che per la circostante parete la stessa riflettività):

$$\varepsilon = \frac{L_I}{L_w} = \frac{E_I}{E_w} = \frac{\left[\frac{1}{A_I} + \frac{1}{A_S} \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w(1-f)} \right]}{\frac{1}{A_S} \cdot \frac{\rho_w}{1 - \rho_w(1-f)}} = 1 + \frac{A_S}{A_I} \cdot \frac{1 - \rho_w(1-f)}{\rho_w} \quad (B.4)$$

Si indica con α il rapporto tra l'area della zona di primo impatto e l'area della sfera:

$$\alpha = \frac{A_I}{A_S} \quad (B.5)$$

e si può di conseguenza riscrivere il rapporto ε , o "contrasto", in termini di α facendo alcune considerazioni sul valore di questi rapporti:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1 - \rho_w(1-f)}{\alpha\rho_w} \quad (B.6)$$

$$\begin{cases} \varepsilon = E_I/E_w > 1 \\ \alpha = A_I/A_S < 1 \end{cases} \quad (B.7)$$

Misurando il contrasto ε dalla B.6 si può estrarre infine la riflettività ρ_w incognita:

$$\rho_w = \frac{1}{\alpha(\varepsilon - 1) + (1-f)} \quad (B.8)$$

Esempi di calcolo di ε in funzione di ρ_w per diverse coppie di valori (α, f) sono riportati in figura B.2.

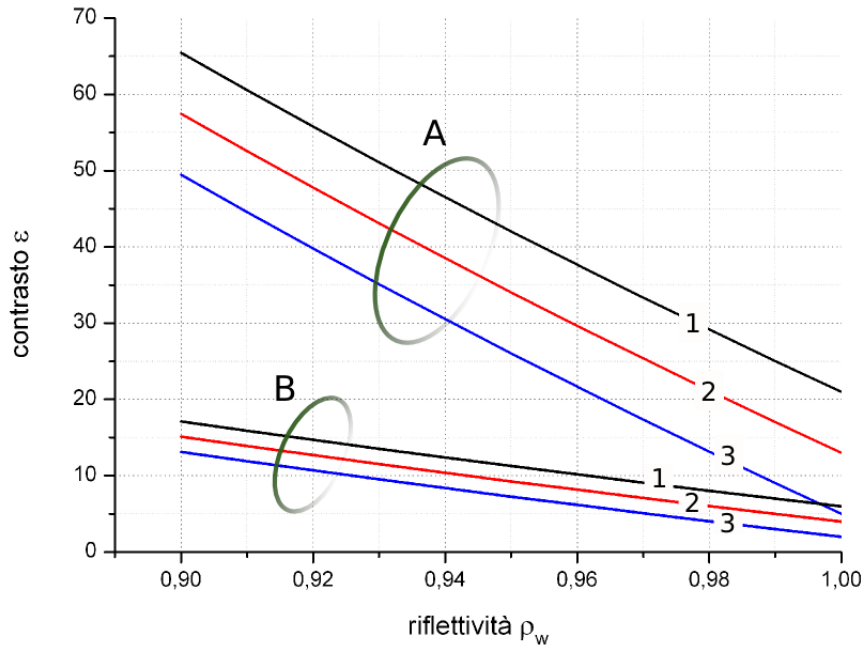


Figure B.2: Curve di contrasto ε in funzione della riflettività ρ_w per vari valori della coppia (α, f) .

In figura B.2 è stata simulata una sfera di 20cm di diametro illuminata con uno spot di 2cm di diametro (dati in grafico contrassegnati con la lettera A) e inoltre una sfera di 10cm di diametro illuminata con uno spot di 2cm di diametro (dati B). Si nota subito il fatto che i dati B danno una misura di ε poco sensibile alle variazioni di ρ_w . Diversamente, i dati A danno una misura di ε molto più sensibile alle variazioni di ρ_w . Quindi la misura di tipo A è preferibile a quella di tipo B, ovvero è preferibile fare le misure sperimentali adoperando un basso valore di α , dell'ordine di 10^{-3} .

La figura B.3 sottostante riporta lo stesso grafico di figura B.2 rovesciato rispetto alle variabili rappresentate.

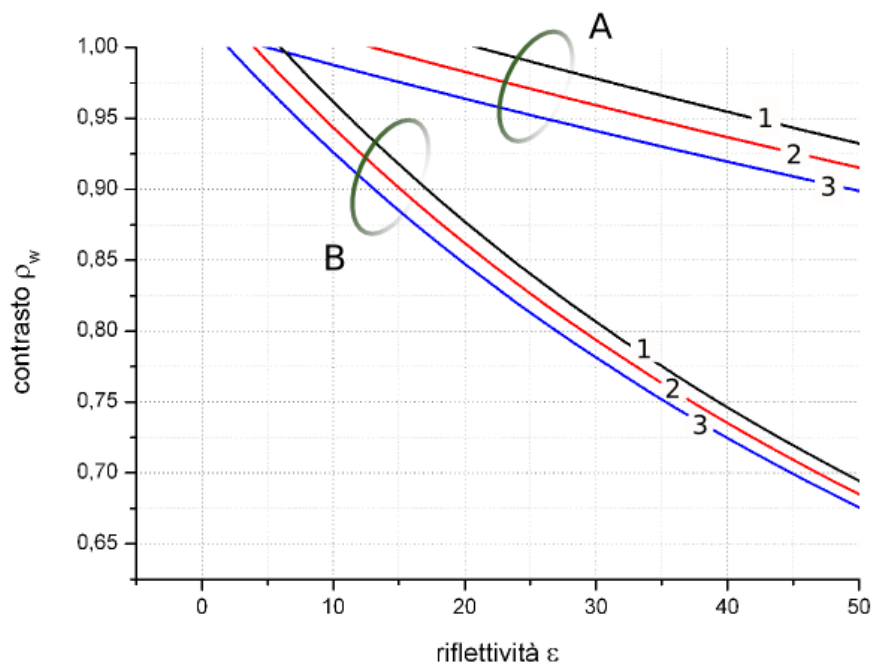


Figura B.3: Curve della riflettività ρ_w in funzione del contrasto ϵ per vari valori della coppia (α, f) .

Bibliography

- [1] A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, D. Uderzo, P. Zurru, E. Milan, M. Stefancich, M. Armani, A. Parretta, N. Baggio, "Development of "Rondine" Concentrating PV Module - Field Results and Progresses", poster presentation at the 23rd EPSEC, 1-5 September 2008, Feria Valencia, Valencia, Spain.
- [2] A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, D. Uderzo, P. Zurru, E. Milan, M. Stefancich, M. Armani, A. Parretta, N. Baggio, "Primi risultati sul campo del modulo fotovoltaico "Rondine", oral presentation at the XCIV Congresso della Società Italiana di Fisica, Genova, 22-27 Settembre 2008.
- [3] A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, E. Milan, D. Uderzo, P. Zurru, M. Stefancich, A. Parretta, M. Armani, N. Baggio, "Field testing per la tecnologia di concentratori a disco e per moduli "Rondine", presented at the Conference ZeroEmission Rome 2008 - Rome Fair Centre, 1-4 October 2008.
- [4] A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, D. Uderzo, P. Zurru, E. Milan, M. Stefancich, A. Parretta, N. Baggio, "Rondine PV Concentrators: Field Results and Innovations", submitted to the 24th EPSEC, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
- [5] A. Luque and V.M. Andreev, "Concentrator Photovoltaics" (Springer-Verlag, Berlin, D, 2007).
- [6] A. Luque and S. Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering" (John Wiley & Sons Ltd, Chicester, UK, 2003).
- [7] R. M. Swanson, "The promise of concentrators," Progress in Photovoltaics 8 (2000) 93-111.
- [8] A. Luque, "Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration" (Adam Hilger, Bristol, UK, 1989).
- [9] V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev, "Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight" (John Wiley & Sons Ltd, Chicester, UK, 2003).
- [10] R. Winston, J. C. Miñano, and P. Benítez, "Nonimaging Optics" (Elsevier Academic Press, Burlington, USA, 2005).
- [11] W.T. Welford and R. Winston, "The Optics of Nonimaging Concentrators" (Academic Press, San Diego, USA, 1978).

Bibliography

- [12] G. Martinelli, c. Malagù, M. Stefancich, D. Vincenzi, A. Parretta and R. Winston, "Optical beam splitting and CPC for high performances photovoltaic concentrator systems", oral presentation at ICO XIX, Optics for the Quality of Life", Firenze, 25-30 August 2002. Technical Digest vol. II, ed. By A. Consortini and G.C. Righini (Washington, USA: SPIE Vol. 4829)2002, pp. 1023-1024.
- [13] A. Parretta, G. Martinelli, M. Stefancich, D. Vincenzi and R. Winston, "Modelling of CPC-based photovoltaic concentrator", oral presentation at ICO XIX, Optics for the Quality off Life", Firenze, 25-30 August 2002. Technical Digest vol. II, ed. By A. Consortini and G.C. Righini (Washington, USA: SPIE Vol. 4829)2002, pp. 1011-1012.
- [14] A. Parretta, M. Morvillo, C. Privato, G. Martinelli and R. Winston, "Modelling of 3D-CPCs for concentrating photovoltaic systems" oral presentation at the Conference "PV in Europe, from PV Technology to Energy Solutions", Rome, Italy, 7-11 October 2002. Ed. J.L. Bal, G. Silvestrini, A. Grassi, W. Palz, R. Bigotti, M. Gamberane, P. Helm. WIP-Munich and ETA-Florence, 2002, pp. 547-550.
- [15] A. Parretta, E. Bonfiglioli, A. Antonini, M.A. Butturi, P.Di Benedetto, D. Uderzo, P. Zurru, E. Milan, "Indoor optical Characterization of the Nonimaging "Rondine" PV Solar Concentrator", submitted to the 24th EPSEC, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
- [16] P. Sansoni, F. Francini, and D. Fontani, Optics and Lasers in Engineering 45 (2007) 351.
- [17] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, V. Franceschini, G. Martinelli, and M. Armani, Proc. SPIE 6652 (2007) 665207.
- [18] A. Parretta, A. Antonini, E. Milan, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, "Optical efficiency of solar concentrators by a reverse optical path method", Optics Letters, 33 (2008) 2044-2046.
- [19] A. Parretta, A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, E. Milan, M. Stefancich, D. Uderzo, P. Zurru, D. Roncati, G. Martinelli, M. Armani, "How to "Display" the Angle-Resolved Transmission Efficiency of a Solar Concentrator Reversing the Light Path", oral presentation at the 23rd EPSEC, 1-5 September 2008, Feria Valencia, Valencia, Spain.
- [20] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, "Metodo "inverso" per la caratterizzazione ottica di concentratori solari", oral presentation at the 93° Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Pisa, 24-29 Settembre 2007.
- [21] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, "Optical Characterization of CPC Concentrator by an Inverse Illumination Method", visual presentation at the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,

Bibliography

Fiera Milano, 3–7 September 2007, Milan, Italy. Subject 1: Advanced Photovoltaics. Subsection 1.4: Terrestrial Concentrator Systems.

- [22] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, “Inverse illumination method for characterization of CPC concentrators”, oral presentation at the SPIE Optics and Photonics Conference, San Diego, California (USA), 26-30 August 2007.
- [23] F. Grum and G. W. Luckey, “Optical Sphere Paint and a Working Standard of Reflectance”, *Applied Optics*, Vol. 7 (1968) 2289-2294.
- [24] Dalle lezioni di “*Ottica Applicata*” di A. Parretta, A.A. 2007-2008.
- [25] [20] Labsphere Inc., 1994 “A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications”, www.labsphere.com.
- [26] A. Parretta and G. Calabrese, “About the Definition of “Multiplier” of an Integrating Sphere”, submitted to *Optics Communications*.

A conclusione di quest'opera, spettano alcuni doverosi ringraziamenti alle persone che mi hanno dedicato il loro tempo. Ringrazio in primis il Dottor Antonio Parretta per avermi sempre supportato durante il periodo di studio in preparazione alla tesi.

Ringrazio il Professor Giuliano Martinelli per avermi concesso l'utilizzo del Laboratorio di Ottica Applicata del Dipartimento di Fisica, presso il quale è stata svolta la tesi.

Ringrazio il Dottor Giuseppe Nimma del Laboratorio di Ricerche Enea di Portici per le accurate misure di riflettanza spettrale effettuate sui provini piani.

Ringrazio il team di sviluppo di LyX, il processore di documenti open source attraverso cui questo lavoro di tesi è stato redatto.

Infine rivolgo un sincero ringraziamento agli amici, al gruppo scout di Bondeno, e alla mia famiglia, per essermi sempre stati vicini e per avermi incoraggiato nei momenti più difficili.