



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN FISICA

**STUDIO DELL'EFFICIENZA OTTICA DI CONCENTRATORI
SOLARI "SENZA IMMAGINE" CON UN METODO DI
ILLUMINAZIONE INVERSA**

Relatori:

Dott. Antonio Parretta

Dott. Andrea Antonini

Controrelatore:

Prof. Ferruccio Petrucci

Laureando:

Dario Roncati

ANNO ACCADEMICO 2006-2007

INDICE:

Introduzione	4
CAPITOLO 1: L'UTILIZZO DEI CONCENTRATORI	5
1.1 Sistemi non-imaging e loro applicazioni	7
1.2 Definizione di rapporto di concentrazione e massimo teorico	8
CAPITOLO 2: RICHIAMI DI OTTICA	12
2.1 Concetti di radiometria	12
2.2 Idee base di ottica geometrica	13
2.2.1 Il raytracing	14
2.2.2 L'étendue o accettazione	17
2.2.3 Il percorso ottico ed il principio di Fermat	19
2.2.4 L'étendue generalizzata o invariante di Lagrange	20
2.2.5 Differenti versioni del rapporto di concentrazione	24
2.3 I limiti dell'ottica di tipo imaging	24
2.3.1 L'aberrazione	25
2.3.2 Il limite di concentrazione	27
2.4 Sorgenti e diffusori lambertiani	29
CAPITOLO 3: OTTICA DI TIPO NONIMAGING	31
3.1 Il principio dell'Edge-Ray o Metodo String	31
3.2 Coni di luce	33
3.3 Il Concentratore Parabolico Composto (CPC)	33
3.4 Proprietà dei CPC	39
3.4.1 L'equazione del CPC	39
3.4.2 La normale alla superficie	40
3.4.3 Curve trasmissione-angolo per i CPC	41
3.5 Coni e paraboloidi come concentratori	42

CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE OTTICA DI CONCENTRATORI SOLARI	45
4.1 Caratterizzazione con metodo diretto	45
4.1.1 Metodo diretto con sfera integratrice	45
4.1.2 Metodo diretto a fascio laser	49
4.2 Caratterizzazione con metodo inverso	51
4.2.1 Principi del metodo di illuminazione inversa	51
4.2.2 Teoria del metodo inverso	56
4.3 Studio sulle sorgenti lambertiane	62
4.3.1 La sfera integratrice	64
4.3.2 Vetro e carta traslucidi	71
4.3.3 Vetro, carta traslucidi e sfera integratrice	74
4.3.4 Plastica semitrasparente	74
4.5 Simulazioni con Tracepro	75
4.5.1 Modifiche sfera integratrice	77
4.5.2 Verifica teorica del metodo inverso	80
4.5.3 Influenza sulle misure della distanza dello schermo	90
4.6 Il concentratore “Rondine”	91
CAPITOLO 5: APPLICAZIONE DEL METODO INVERSO	94
5.1 CPC troncato squadrato	94
5.2 Concentratore “Rondine”	97
RIASSUNTO RISULTATI	100
APPENDICE	102
A. Dal CPC troncato al CPC ideale	102
B. Il principio di reversibilità	106
C. Cenni di teoria delle sfere integratrici	110
CONCLUSIONI	116

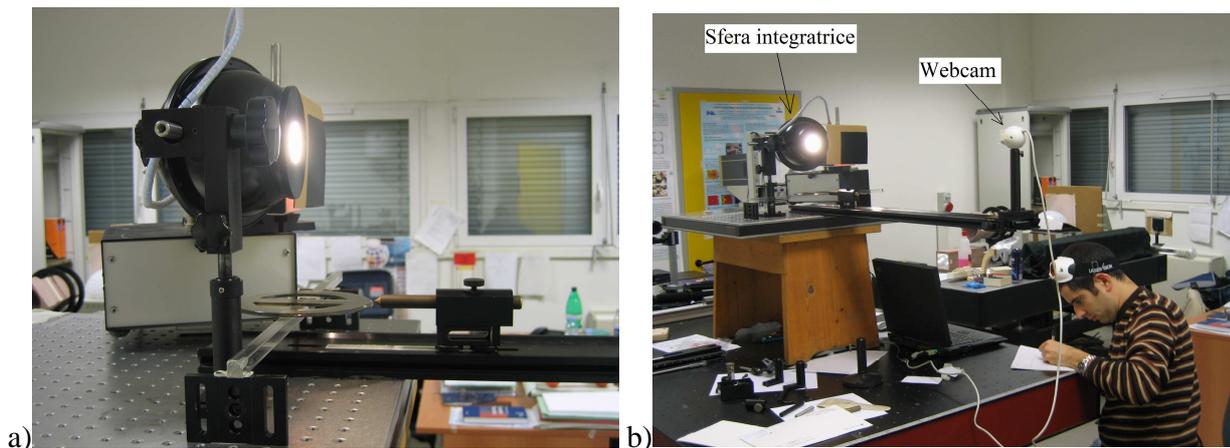


Figura 4.13: a) Sfera integratrice, e b) apparato strumentale

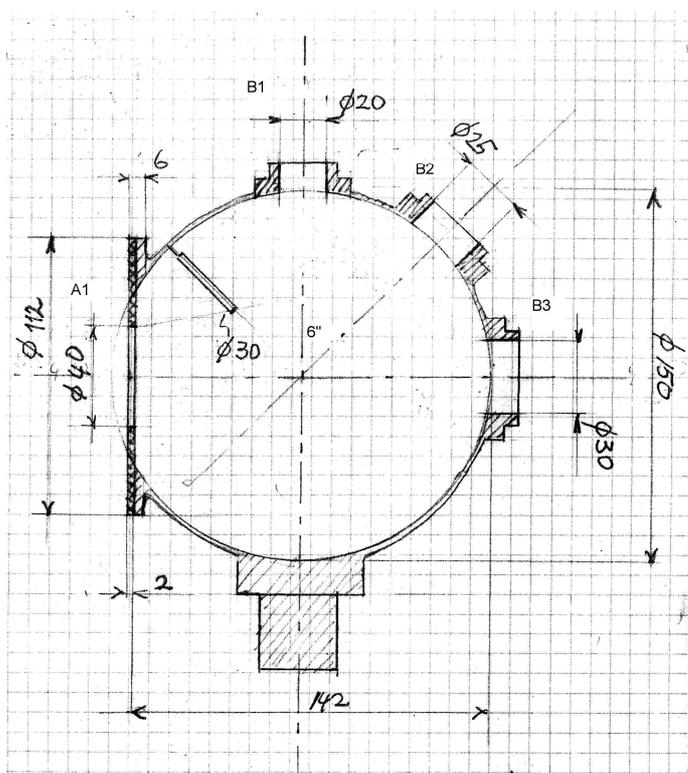


Figura 4.14: Schema della sfera integratrice utilizzata nelle misure.

Avendo riscontrato degli scostamenti significativi rispetto all'andamento lambertiano, abbiamo cercato di ottenere una sorgente lambertiana illuminando dei diffusori semi-trasparenti, ottenendo risultati molto scadenti. Infine abbiamo deciso di utilizzare la sfera integratrice modificando il modo in cui veniva illuminata. Come prima cosa abbiamo verificato la sua curva Intensità-angolo.

In figura 4.13 possiamo vedere l'apparato sperimentale. Su di un banco ottico abbiamo fissato la sfera integratrice, un goniometro ed un braccio mobile. La sfera è stata illuminata con una lampada alogena da 150 watt e 24 Volt tramite la porta d'ingresso B1. Esattamente in asse con l'apertura d'uscita della sfera, A1, abbiamo posto il fulcro del braccio mobile ed il goniometro. Sul braccio vi era un cilindro a punta che segnava l'angolo tra la posizione del braccio mobile e l'asse parallelo alla normale della superficie di A1 (vedi fig. 4.14a). Il braccio aveva un range angolare di $\pm 70^\circ$. Le misure sono state fatte in due modi: i) analizzando con una webcam Logitech Quickcam o una ccd Hamamatsu Digital Camera Mod.C8484-05G l'immagine prodotta su uno schermo posto di fronte l'uscita della sfera integratrice ad una distanza di circa 800mm, oppure ii) misurando con la webcam o la ccd prive di obiettivo il profilo lungo l'asse orizzontale dell'intensità (vedi fig. 4.13b).

Per verificare la risposta del detector (webcam e ccd), abbiamo effettuato una misura di dark field oscurando l'obiettivo e misurando l'intensità rilevata dalla ccd, ed una misura di white field, illuminando in modo uniforme uno schermo posto a 4 metri dalla ccd e misurando le differenze di intensità dei vari pixel dell'immagine catturata sempre con la ccd. L'intensità della misura di dark field è risultata essere circa l'1% dell'intensità misurata sullo schermo illuminato dalla sfera integratrice, mentre la misura di white field ha portato a variazioni massime d'intensità tra i vari pixel dell'1%. Alla luce di questi valori la disuniformità di risposta della ccd è stata considerata trascurabile. Risultati analoghi sono stati ottenuti per la webcam.

4.3.1 La sfera integratrice

Si possono vedere in figura 4.14 i dettagli della sfera da noi usata. La sfera era rivestita con una vernice bianca a grana fine composta da solfato di Bario (BaSO_4). Abbiamo mandato la luce dalle lampada dentro la sfera dalla porta B1. A 810mm di distanza dalla finestra d'uscita abbiamo posto uno schermo bianco utilizzato normalmente per proiezioni di luce sul quale erano segnati l'asse verticale (y) ed orizzontale (x) passanti per l'asse di simmetria dell'apertura d'uscita della sfera e al quale abbiamo fatto corrispondere il centro dello schermo. L'allineamento dell'apparato l'abbiamo effettuato con l'utilizzo di un laser, come si vede in figura 4.15. Gli assi x ed y sono stati segnati con dei markers in corrispondenza dei 200 mm di distanza dal centro. Sotto lo sfera di 100mm abbiamo posto la webcam orientata verso lo schermo.



Figura 4.15: Allineamento della sfera con il centro dello schermo per mezzo di un laser.

Con la stanza al buio abbiamo acceso la lampada ed illuminato lo schermo attraverso la sfera; abbiamo poi scattato una foto con la webcam utilizzando il programma Pryme, poi con il programma ImageJ l'abbiamo elaborata. Abbiamo tracciato una curva del profilo d'intensità della luce sullo schermo lungo x e lungo y. Teoricamente ci aspettavamo un andamento di tipo coseno di θ , con

$$\theta = \arctg \frac{l}{d} \quad (4.22)$$

dove d è la distanza dello schermo (=810mm) dall'uscita della sfera ed l la distanza sullo schermo dal centro.

Ci siamo accorti che la webcam schiaccia le immagini lungo la verticale, dal rapporto mm/numero pixel abbiamo calcolato un fattore di correzione per il profilo lungo y, ovvero abbiamo contato il numero di pixel di una stessa distanza posta lungo x e lungo y ed il risultato è stato 125 e 114 rispettivamente. Come prima cosa siamo passati dai pixel dell'immagine alla rispettiva distanza in mm sullo schermo. Il segno in corrispondenza dei 200 mm lungo l'asse x corrispondeva al pixel 212 dell'immagine.

$$\frac{n^\circ \text{ pixel}}{212} = \frac{x(\text{mm})}{200(\text{mm})} \quad \rightarrow \quad x(\text{mm}) = 200 \frac{n^\circ \text{ pixel}}{212} \quad (4.23)$$

Poi dalla distanza in mm siamo passati all'angolo:

$$\theta = \arctg \frac{x(mm)}{810} \quad (4.24)$$

Per il profilo in y abbiamo aggiunto il fattore di correzione 125/114,

$$\text{pixel(immagine corretta)} = \text{pixel(immagine schiacciata)} * (125/114) \quad (4.24)$$

e poi fatto gli stessi calcoli fatti per x.

Ottenuto l'angolo abbiamo analizzato l'intensità dei vari punti sullo schermo ovvero l'irradianza $E(\text{W/m}^2)$. Dall'invarianza $E(x,y)$, espressa in W/m^2 e funzione del punto $P(x,y)$ sullo schermo, dobbiamo risalire all'intensità radiante $I(\theta)$, espressa in W/st , funzione dell'angolo di emissione θ . Consideriamo la figura 4.16. Se d è la distanza sfera-schermo, nel punto generico P' della superficie sferica di raggio d verrà prodotta un'irradianza $E'(P') = E'(\theta)$ pari a:

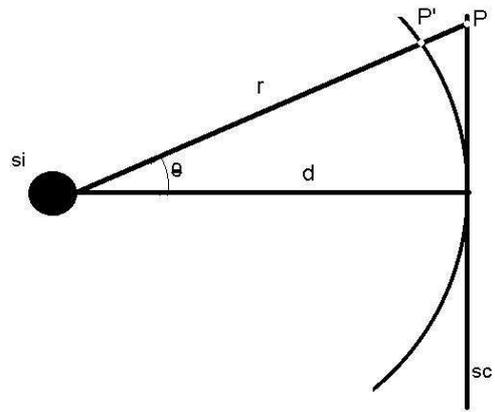


Figura 4.16: Visione schematica sorgente-schermo.

$$E'(\theta) = I(\theta) \cdot \Delta\Omega = I(\theta) \frac{1}{d^2} \quad (4.25)$$

Da cui ricaviamo:

$$I(\theta) = E'(\theta) \cdot d^2 \quad (4.26)$$

L'invarianza misurata sullo schermo, $E(\theta)$, risulta inferiore a $E'(\theta)$ per due fattori: i) $\cos\theta$ dovuto all'inclinazione dello schermo rispetto alla direzione θ , ii) d^2/r^2 dovuto alla maggiore distanza di P da P' , per cui avremo:

$$E(\theta) = E'(\theta) \cos \theta \frac{d^2}{r^2} = E'(\theta) \cos \theta \frac{d^2}{d^2 / \cos \theta} = E'(\theta) \cos^3 \theta \quad (4.27)$$

Da cui ricaviamo la differenza tra $I(\theta)$ e $E(\theta)$:

$$I(\theta) = E'(\theta) d^2 = \frac{E(\theta)}{\cos^3 \theta} d^2 \quad (4.28)$$

Da qui il valore relativo dell'intensità radiante:

$$I_{rel}(\theta) = \frac{I(\theta)}{I(0)} = \left(\frac{E(\theta) \cdot d^2}{\cos^3 \theta} \right) / \left(\frac{E(0) \cdot d^2}{1} \right) = E_{rel}(\theta) \frac{1}{\cos^3 \theta} \quad (4.29)$$

Infine abbiamo normalizzato I nell'intensità e confrontata col coseno. Ecco i profili lungo x ed y trovati:

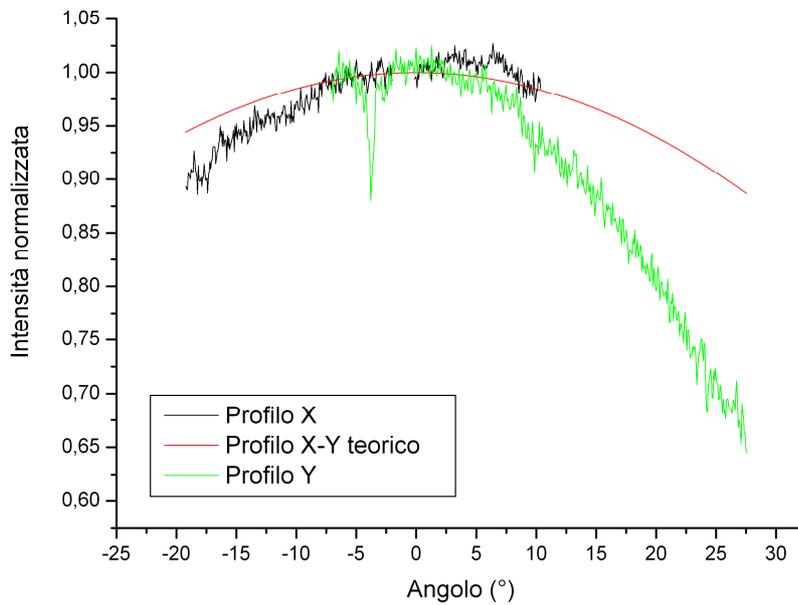


Figura 4.17: Profilo d'intensità radiante, $I(\theta)$, misurato lungo l'asse x ed y e confrontato con la curva teorica $\cos^3 \theta$.

Dai grafici di figura 4.17 risulta che siamo abbastanza lontani dall'andamento teorico, soprattutto lungo l'asse y. Nel profilo in x si vede poi un'asimmetria rispetto al centro. Abbiamo quindi deciso di fare delle misure in diretta della lambertianità della sfera, ponendo un fotorivelatore direttamente davanti la sfera integratrice (vedi figura 4.13b).

Per questa misura abbiamo utilizzato la webcam come fotorivelatore. Si è posta la sfera sul banco ottico; poi abbiamo messo la lampada all'ingresso B1 (rif. figura 4.14) della sfera e collocata l'uscita della sfera sopra il perno dell'asse. Abbiamo tolto l'ottica della webcam di modo che non formasse un'immagine ma che desse in uscita solo una misura di intensità. Senza ottica l'immagine che acquisiamo è uniforme. La distanza uscita sfera-webcam era di 840mm. Abbiamo messo al buio la stanza, e scattate alcune foto a vari angoli dell'asse, per prendere il rumore di fondo di luce. Poi accesa la lampada e scattate altre foto sempre con la webcam e sempre agli stessi angoli. Il programma ImageJ (software freeware disponibile in rete: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>), selezionando l'intera area dell'immagine, restituisce il valore medio di intensità sull'area. Nella tabella sottostante vediamo i valori di intensità media assoluta misurata ai vari angoli rispetto alla normale della superficie d'uscita della sfera integratrice.

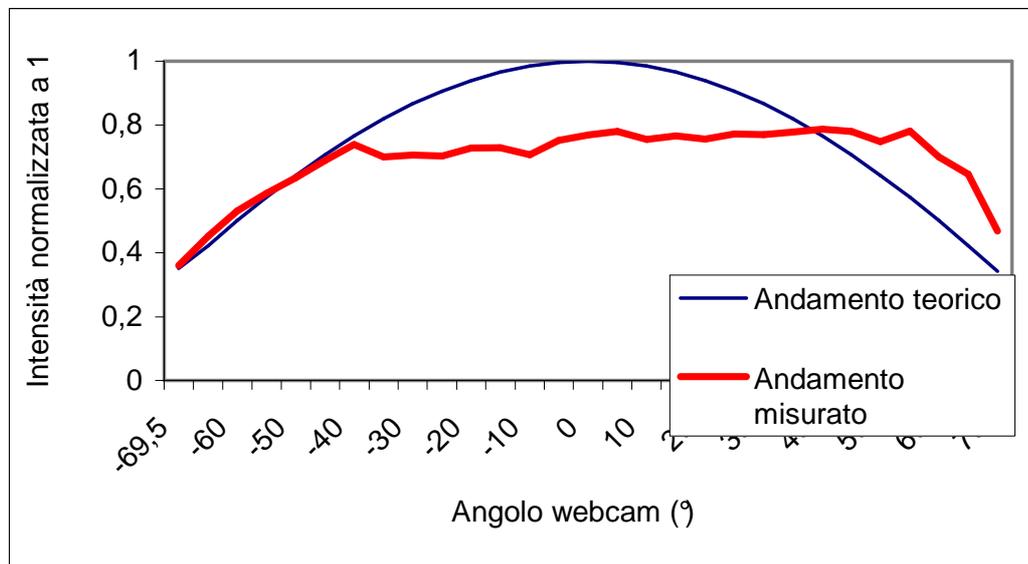


Figura 4.18: Andamento intensità luce della sfera integratrice. Per quello misurato si è usato una webcam.

Questi valori sono in livelli di grigio. I dati di tabella 1 sono poi stati normalizzati e confrontati con l'andamento teorico dell'intensità d'uscita della sfera, il quale è $\cos\theta$. Vediamo nel grafico di

figura 4.18 cosa abbiamo ottenuto; solo la zona di sinistra è lambertiana, a destra l'intensità è maggiore di quella aspettata, mentre al centro è quasi lineare ed inferiore a quella teorica.

θ (°)	-69,5	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25
$\langle I \rangle$	75,1	94,3	110,5	122,2	132,6	143,7	154,0	146,0	147,1	146,6
θ (°)	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$\langle I \rangle$	151,6	152,0	147,4	156,9	160,3	162,5	157,3	159,5	157,6	160,9
θ (°)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
$\langle I \rangle$	160,5	162,3	163,8	162,4	155,9	162,9	145,8	134,7	97,5	

Tabella 1: Valori d'intensità in uscita dalla sfera, misurati a vari angoli con la webcam.

Sospettosi di un non perfetto ed accurato funzionamento della webcam, abbiamo ripetuto la misura sostituendo la webcam con la ccd, di sicuro uno strumento più adatto all'acquisizione di queste immagini. Dopo aver effettuato la stessa procedura abbiamo trovato questo andamento, riportato in figura 4.19.1:

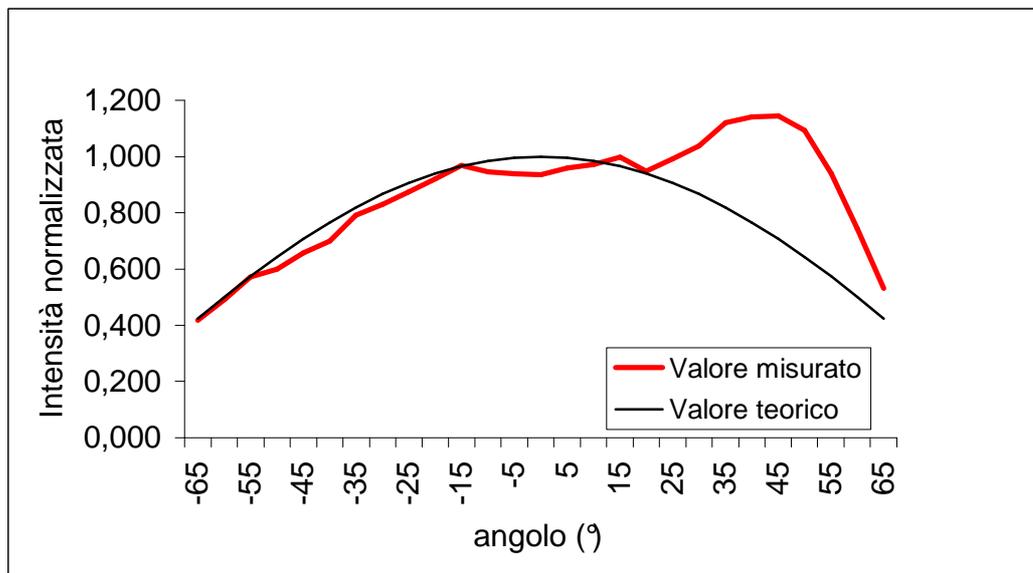


Figura 4.19.1: Andamento intensità luce della sfera integratrice. Per quello misurato si è usato la ccd.

Nella curva di figura 4.19.1 risulta molto buono l'andamento dell'intensità, eccetto che a destra dove si vede proprio un picco d'intensità. Dopo un'accurata analisi del problema, abbiamo capito che la zona centrale ha un'intensità più bassa a causa del cattivo stato della verniciatura dei tappi delle porte della sfera (ingressi B2 e B3 di figura 4.13.2). Mentre la zona di destra ha un'intensità superiore a causa della luce diretta proveniente dalla lampada. Posizionando la webcam ad angoli positivi, quindi a destra della sfera, attraverso il suo foro d'uscita si vede la porzione di parete interna su cui incide direttamente la luce della lampada, ovviamente questa luce è più intensa (vedi figura 4.19.2a). Dopo un'analisi della sfera fatta con TracePro, riportata al paragrafo 4.5, abbiamo modificato la sfera ed effettuato altre misure.

La sfera questa volta è stata illuminata da dietro, dal foro in asse con l'uscita, ed al centro è stato posto un disco del diametro di 40mm e spessore 3mm (vedi figura 4.19.2b). Abbiamo misurato con la ccd l'intensità di luce a vari angoli, la distanza uscita sfera-ccd era di 800mm ed il tempo di esposizione delle immagini di 4ms. Vediamo nel grafico riportato sotto i risultati.

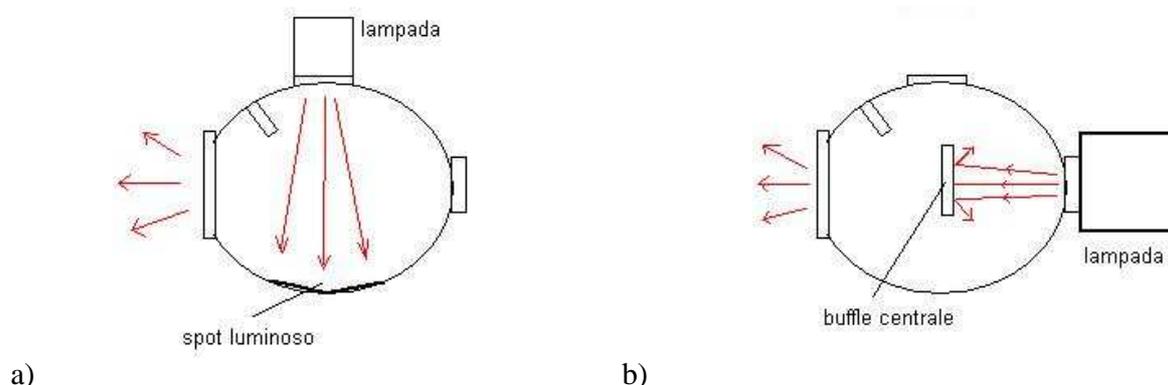


Figura 4.19.2: a) Illuminazione della sfera laterale, con formazione di uno spot più luminoso B) Illuminazione della sfera da dietro.

Si nota subito un bel miglioramento, la curva è simmetrica rispetto al centro ed oltre i 40 gradi c'è un perfetto andamento lambertiano. Entro i 40 gradi invece ci sono problemi. Osservando la sfera illuminata con un paio di occhiali da laser, ci si accorge che il rivestimento del disco interno è di una tonalità di bianco meno intenso di quello delle pareti interne della sfera, questo causa l'abbassamento della curva a 0 gradi.

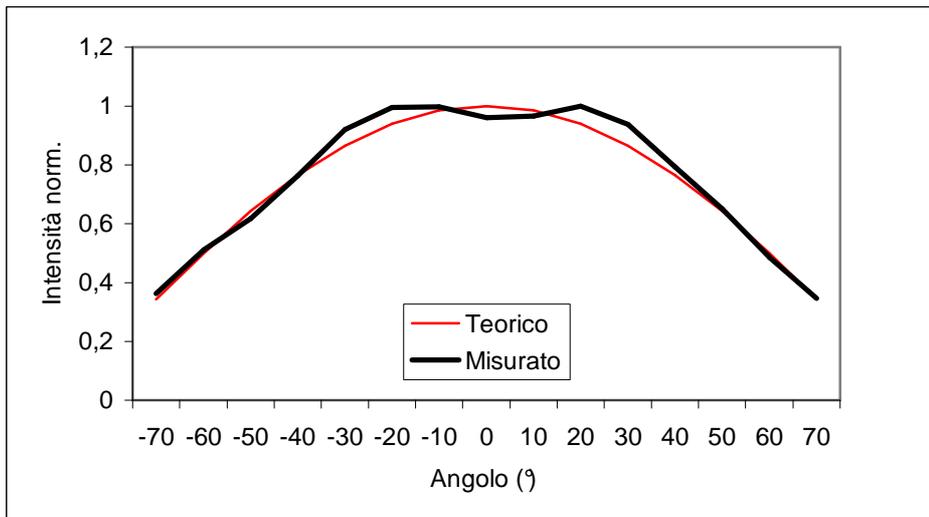


Figura 4.20: Andamento intensità luce della sfera integratrice dopo la modifica.

4.3.2 Vetro e carta traslucidi

Visto il non perfetto funzionamento della sfera a nostra disposizione prima della modifica, abbiamo cercato altre soluzioni facendo uno studio sulle proprietà lambertiane di alcuni materiali facilmente reperibili e di uso comune. Abbiamo creato un diffusore sovrapponendo tre strati di carta traslucida FaberColor©, quella che si trova in tutte le cartolerie, ed uno vetro smerigliato dello spessore di 2mm. Il diffusore è stato distanziato dalla lampada per evitare problemi di calore, tramite un tubo di cartoncino nero lungo 150mm, avvolto attorno ad un foglio bianco, il tutto fissato con del nastro isolante nero. Il resto del banco di misura è come nel paragrafo 4.3.1. Anche in questo caso sono state fatte delle foto a vari angoli utilizzando la ccd, a 825mm di distanza, priva di ottica e con due strati di carta opaca sull'obiettivo per attenuare la luce diretta ed evitare la saturazione; con tempo di esposizione di 300 μ s. Le foto sono state divise in due serie, una a lampada spenta (misura di zero) ed una a lampada accesa. Vediamo il grafico dei valori ottenuti come differenza delle due serie, quindi prive di rumore, confrontati con quelli teorici di un diffusore lambertiano. Osservando il grafico si nota la buona correlazione tra curva teorica e misurata ad angoli superiori ai 40°, mentre al centro l'intensità misurata è molto forte. Questo significa che la luce esce dal diffusore (vetro e carta) con caratteristiche ancora troppo direzionali. Possiamo dire che l'idea di utilizzare vetro e carta opachi è buona ma che forse serve o più strati

di carta o materiale più diffondente. Si nota anche una leggera asimmetria della curva misurata, dovuta ad un non perfetto allineamento dell'apparato di misura. Abbiamo ripetuto le misure aggiungendo un altro strato di carta opaca, la curva ottenuta è raffigurata in figura 4.22. Il risultato sembra variato di poco, Forse l'utilizzo di più strati di carta migliorerebbe la situazione, ma questo comporterebbe una riduzione dell'intensità della luce in uscita. Abbiamo allora fatto una prova utilizzando 6 fogli di carta traslucida sovrapposti senza il vetro smerigliato, la curva ottenuta è quella di figura 4.23. Come prima cosa diciamo che l'utilizzo del vetro non è fondamentale, anzi. Inoltre le caratteristiche del vetro variano di molto a seconda del tipo di vetro e di lavorazione, e quindi non è facile trovare più diffusori di vetro con le stesse caratteristiche. Mentre i fogli di carta opaca sono molto standardizzati. Dal grafico (fig. 4.23) si vede inoltre oltre i 20 gradi c'è un buon accordo con i dati teorici, in effetti aumentando gli strati si migliora l'approssimazione lambertiana. La non perfetta simmetria della curva è dovuta ad un non perfetto fissaggio dei fogli di carta i quali non risultano di conseguenza perfettamente stirati. Abbiamo effettuato un'ultima prova sovrapponendo 8 fogli di carta traslucida, vedi figura 4.24. Usare più strati non aveva senso in quanto l'assorbimento di luce sarebbe stato troppo elevato, e comunque sia queste prove hanno dimostrato che oltre un certo grado di diffusione, questo tipo di materiale non va. In conclusione, con 5 o 6 strati di carta opaca si ottiene una buona sorgente lambertiana in trasmissione, ma solo oltre i 30 gradi.

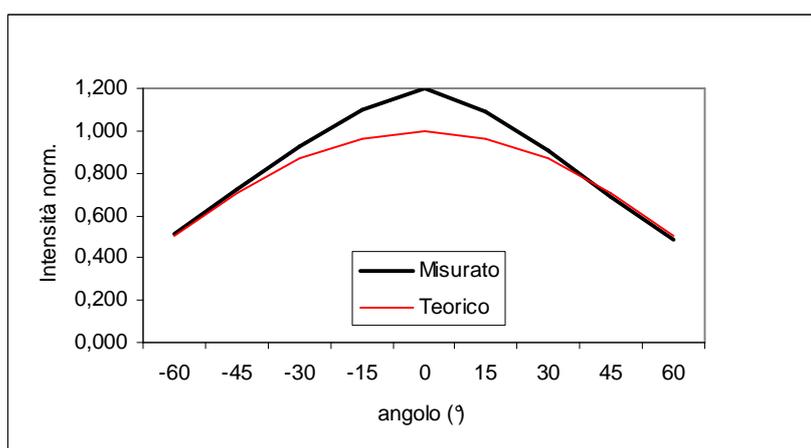


Figura 4.21: Profilo intensità vetro più tre fogli di carta opaca.

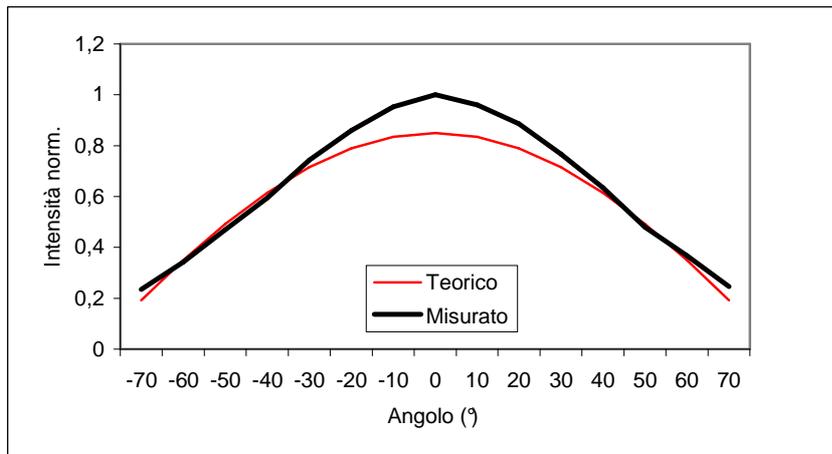


Figura 4.22: Profilo intensità vetro più 4 fogli di carta opaca.

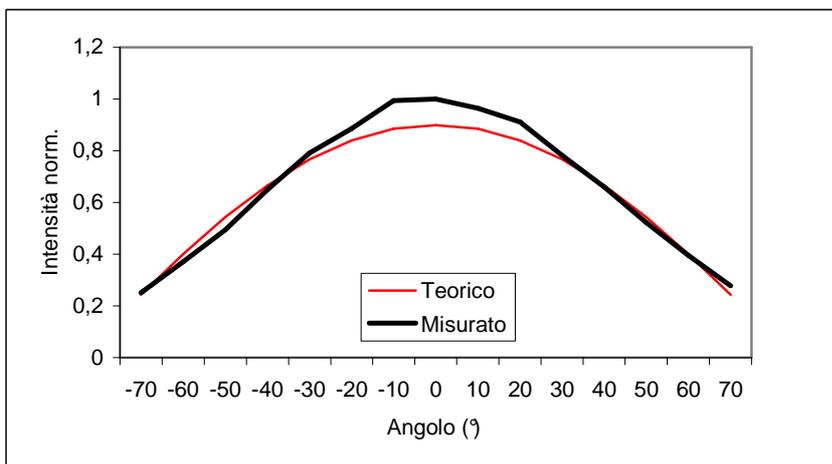


Figura 4.23: Profilo intensità sei fogli di carta opaca.

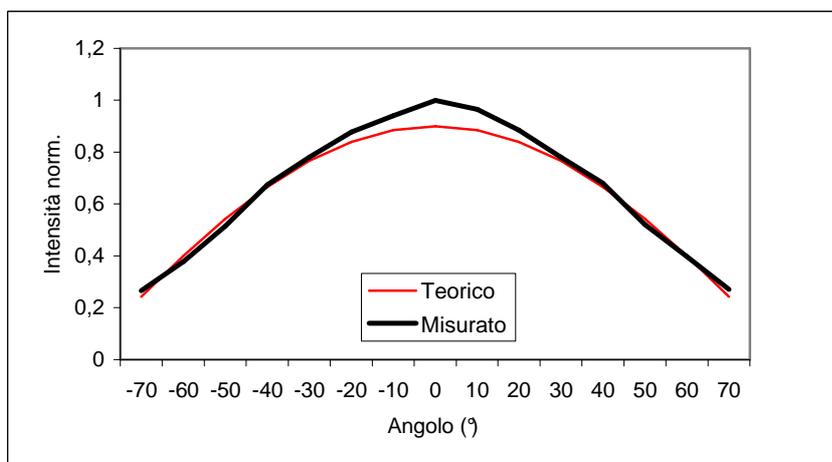


Figura 4.24: Profilo intensità di otto fogli di carta opaca.

4.3.3 Vetro, carta traslucidi e sfera integratrice

All'apparato della misura precedente abbiamo aggiunto la sfera. La distanza d'uscita sfera-ccd era di 845mm, ed il tempo di esposizione di 5ms. La ccd era senza ottica e con uno strato di carta traslucida davanti. La nostra speranza era quella di ottenere un'approssimazione di lambertianità migliore all'uscita della sfera se all'ingresso mandavamo una luce diffusa. Così la lampada ha illuminato il vetro smerigliato da 2mm, i tre strati di carta opaca e la sfera integratrice.

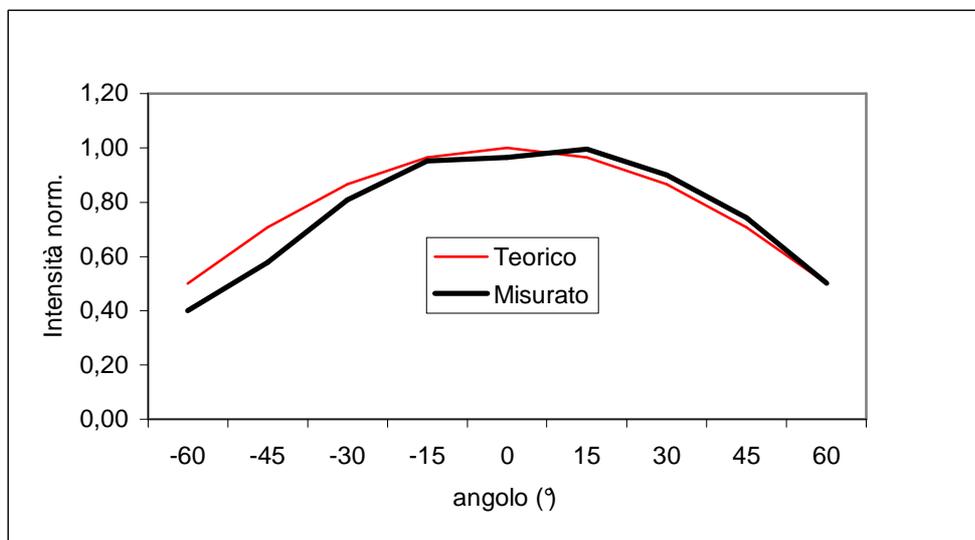


Figura 4.25: Profilo intensità sfera con applicato vetro e 3 fogli di carta opaca.

Come si vede dal grafico, l'andamento è molto migliorato, ma comunque sono ancora visibili i difetti dovuti all'illuminazione diretta ed alla cattiva verniciatura del tappo centrale e laterale.

4.3.4 Plastica semitrasparente

Come ultima misura abbiamo utilizzato un piccolo diffusore di plastica traslucida (purtroppo non siamo riusciti a risalire al tipo esatto di materiale) di 6mm di raggio e 3mm di spessore. Posizionato davanti alla lampada e distanziato da essa per motivi di calore da un cono di cartoncino nero lungo 150mm e fissato con nastro adesivo nero. La distanza diffusore-ccd era di 830mm ed il tempo di esposizione di 400 μ s. Osserviamo la curva Intensità-angolo ccd di figura 4.26:

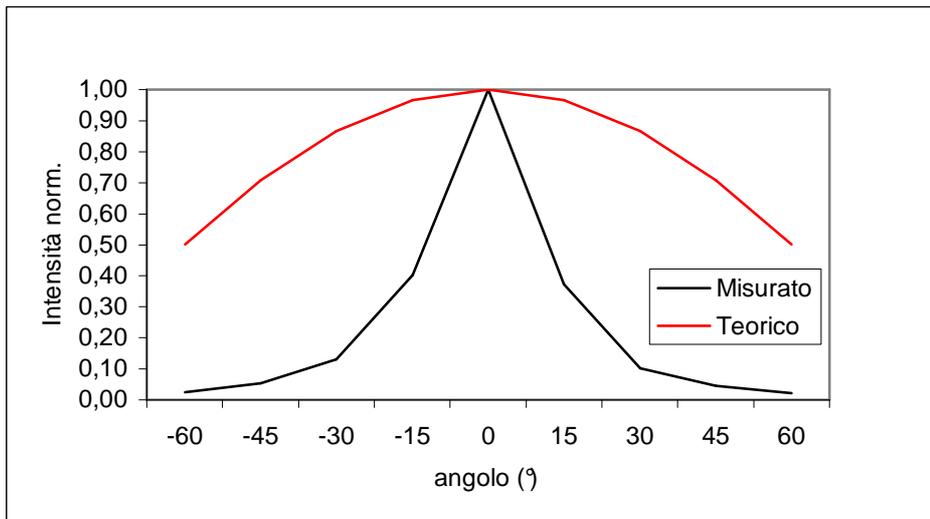


Figura 4.26: Profilo intensità diffusore di plastica opaca.

Vediamo che questo diffusore ha un andamento che non ha niente a che fare con quello lambertiano, ma che è invece esponenziale.

4.5 Simulazioni con Tracepro ©

La simulazione ottica, effettuata tramite opportuni programmi, del comportamento del sistema è finalizzata a riprodurre le condizioni della analisi sperimentale per confrontare, appunto, i risultati teorici con quelli pratici. Questo può servire anche come indice di qualità della realizzazione pratica del dispositivo.

In realtà, tramite software dedicato, si può ottenere una grande quantità di informazioni, sia dal punto di vista pratico che da quello teorico, che possono anche essere usate, prima della realizzazione del prototipo, per ottimizzarne le caratteristiche.

Le banche dati del programma TracePro per esempio forniscono una vasta scelta di tipologie di materiali e una possibilità quasi illimitata di fonti di luce. Questo permette di ottenere le prime informazioni evitando lunghi lavori in laboratorio e la possibilità di mirare quest'ultimo su indagini più specifiche, su particolarità emerse al computer.

Altro mezzo estremamente potente del TracePro è la possibilità del "ray trace". Questo significa che è possibile seguire l'evoluzione di un singolo raggio e non di tutta la quantità di energia che

viene immessa nel concentratore. Questa possibilità è un mezzo estremamente potente quando gli scopi della simulazione non sono solo lo studio di un oggetto, ma la sua miglioria perché permette con semplicità di estrarre informazioni sul comportamento puntuale dell'oggetto. Anche se in ultima analisi serve sempre un riscontro reale per ottenere conferme e quindi intraprendere una strada anziché un'altra. [4]

Nel nostro caso TracePro è stato utilizzato come strumento primario nella caratterizzazione teorica dei modelli di oggetti da noi analizzati, come ad esempio lo studio della lambertianità di sfere integratrici, o la misura dell'efficienza e dell'angolo d'accettanza di lenti di Fresnel e di concentratori cpc, e quindi è servito anche come primo riscontro teorico del funzionamento del metodo diretto applicato appunto a vari tipi di concentratori.

Vediamo brevemente come funziona. TracePro è un programma di tracciamento dei raggi per analisi ottiche di modelli solidi. TracePro utilizza il "Generalized Raytracing", ovvero, a seconda di come i raggi si propagano lungo diversi percorsi all'interno del modello del solido, TracePro tiene traccia del flusso ottico associato ad ogni raggio, considerando assorbimento, riflessioni, rifrazioni, diffrazioni e scattering a cui i raggi possono essere soggetti. Il suo utilizzo si divide in quattro passi principali. Si crea o importa un modello, si definiscono le proprietà dei materiali e delle superfici del modello, si effettua il raytracing e si fa l'analisi del raytracing. La modellizzazione di TracePro è basata sul sistema ACIS realizzato dalla Spatial corporation, ma può scambiare dati con modelli CAD a programmi di analisi via IGES e STEP. Per il calcolo dello scattering e diffrazione, TracePro utilizza il metodo Monte Carlo, il quale per questa applicazione ottica usa le tecniche di ray splitting e importance sampling. Per maggiori informazioni sul funzionamento di TracePro rimandiamo al suo User's Manual [5].

Quindi una volta completato il modello, nel nostro caso di una lente, un cpc o una sfera integratrice, si passa al raytracing. Si definisce una griglia, da cui partiranno i raggi per la simulazione. Noi abbiamo scelto di farli partire da punti a caso all'interno della stessa. Qui bisogna fare una distinzione tra metodo diretto e metodo inverso. Nel metodo diretto la griglia viene creata sull'apertura d'ingresso del modello e con le stesse dimensioni, si sceglie un profilo spaziale e angolare dei raggi uniforme e si fa partire la simulazione scegliendo come direzione dei raggi ovviamente quella d'ingresso del solido. A fine simulazione si va ad osservare la mappa d'irradianza sull'assorbitore. Questa mappa ci mostra con un grafico a colori, l'intensità del flusso arrivato sulle varie zone dell'assorbitore, oltre a dirci il numero totale di raggi arrivati. Maggiore è il numero di raggi generati dalla griglia e maggiori e più accurate sono le informazioni della

mappa, ma aumentano anche i tempi di elaborazione e le prestazioni richieste al pc. Poi la simulazione va ripetuta per ogni angolo desiderato e per ogni direzione, impostando ogni volta l'angolo d'inclinazione dei raggi. Se ad esempio si vogliono le curve efficienza-angolo per le direzioni orizzontale e verticale, da 0 a 5 gradi con passo di 0,2 gradi si dovranno fare in tutto 52 simulazioni! Nel metodo inverso la griglia viene creata sull'assorbitore, con le sue dimensioni anche in questo caso. I raggi vengono mandati in senso inverso, quindi dall'assorbitore verso l'ingresso del solido e gli si dà un profilo angolare lambertiano impostando l'angolo massimo a 90°. Di fronte all'ingresso del modello va aggiunto un solido, di solito un parallelepipedo o un disco, che funge da schermo. Va posizionato ad una distanza molto superiore al raggio o semi lato dell'apertura d'ingresso del modello, di modo che l'errore che si commette sull'angolo sia almeno di un ordine di grandezza inferiore all'angolo d'accettazione aspettato (Se ad esempio ho un cpc con angolo d'accettazione atteso di 2° allora l'errore dovrà essere inferiore ai 0,2° ed il rapporto semi lato schermo/distanza schermo dal cpc superiore a 1/287). Fatto questo si fa partire la simulazione ed al termine si osserva la mappa d'irradianza sullo schermo. In questo caso è sufficiente una sola simulazione per avere le informazioni su ogni angolo in ogni direzione! C'è da dire però che, affinché i dati siano accurati è necessario fare simulazioni con un elevato numero di raggi.

4.5.1 Modifiche sfera integratrice

Un primo utilizzo di TracePro è stato nel cercare le modifiche da fare alla sfera integratrice. Abbiamo visto prima come la sfera non desse un segnale perfettamente lambertiano. Abbiamo quindi cercato le modifiche più funzionali ed economiche. Alla fine la soluzione migliore è stata quella di utilizzare come foro d'ingresso per la luce quello in asse con l'uscita, e di porre un disco sottile al centro che schermasse dalla luce diretta e che la riflettesse sulle pareti interne, disco fissato attraverso una bacchetta inserita dall'altra apertura rimasta inutilizzata. Fatto il progetto lo si è importato in TracePro (vedi figura 4.27) e si è proceduto alla simulazione. Questo ci ha permesso di vedere subito se il progetto per la modifica della sfera era corretto e quali erano le posizioni migliori dei vari elementi, facendo il raytracing dopo ogni modifica. Come si vede dalla figura 4.28 è stata posizionata contro l'uscita della sfera una cupola, sulla cui superficie interna abbiamo osservato la mappa d'irradianza e verificato il profilo lambertiano.

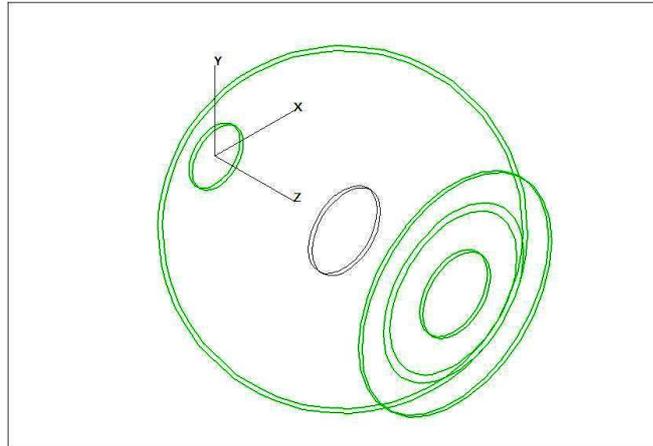


Figura 4.27: Progetto semplificato di TracePro della sfera integratrice modificata

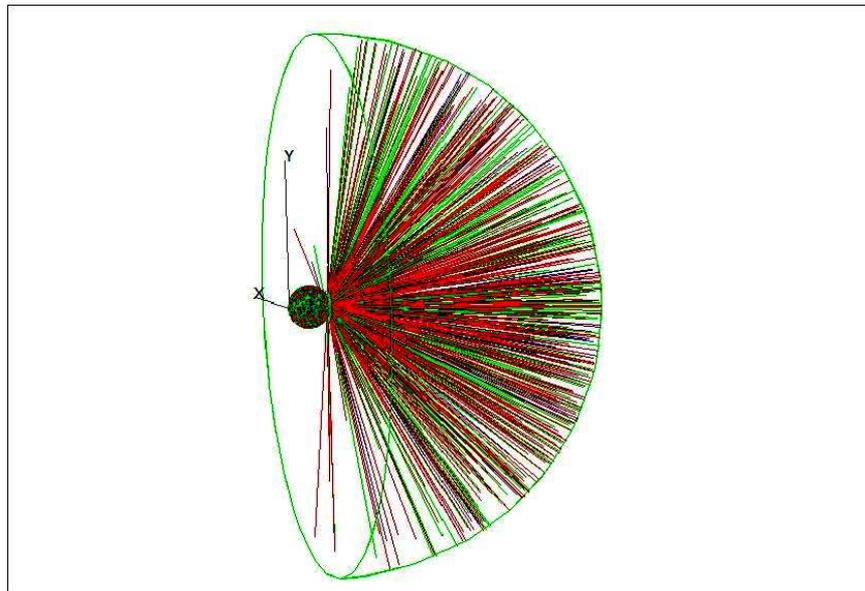


Figura 4.28: Sfera integratrice con superficie assorbitrice a forma di semi sfera per la verifica della lambertianità

Vediamo due esempi della mappa d'irradianza della cupola su due prove sulla posizione del disco interno alla sfera integratrice: figure 4.29 e 4.30. In figura 4.29 il disco era posto a 37,5mm dal foro d'uscita della sfera, e la simulazione è stata fatta con 80000 raggi. Una sorgente lambertiana dovrebbe emettere un flusso con una intensità radiante proporzionale al coseno dell'angolo. In questo caso noi avevamo una cupola, una superficie curva quindi, ma per vedere la mappa, TracePro la proietta su una superficie piatta, così facendo il coseno di annulla. Quindi un profilo non piatto come quello di figura 4.29 non va bene. La figura 4.29 ha molto rumore, eliminabile

utilizzando un elevato numero di raggi nella simulazione. Si nota comunque una zona centrale con maggiore intensità. Abbiamo allora messo il disco al centro, a 60mm dal foro d'uscita, praticamente al centro del profilo sferico ed abbiamo visto che era la soluzione migliore, come si può vedere dalla figura 4.30.

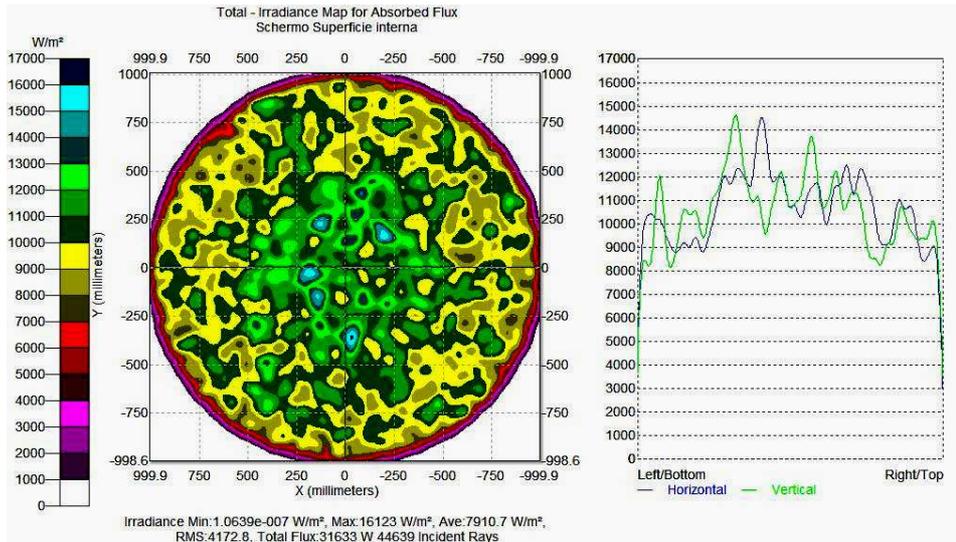


Figura 4.29: Mappa d'irradianza sfera con disco a 37,5mm dall'uscita

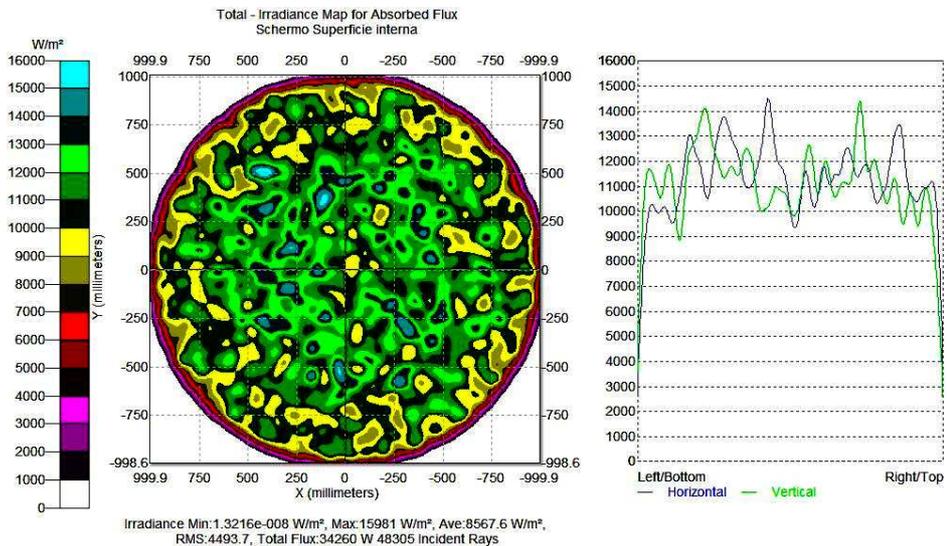


Figura 4.30: Mappa d'irradianza sfera con disco a 60mm dall'uscita.

4.5.2 Verifica teorica del metodo inverso

TracePro è stato lo strumento principale per la verifica teorica dal metodo inverso. Abbiamo confrontato le curve efficienza-angolo ricavate del metodo inverso con quello diretto di vari concentratori, imaging e nonimaging anche a vari indici di assorbimento delle pareti interne, quindi non solo nel caso ideale.

Come prima cosa sono state fatte simulazioni di un concentratore presente in laboratorio, ovvero un CPC circolare troncato lungo 350mm, con diametro apertura ingresso di 142mm e diametro apertura uscita 10mm, che chiameremo T-CPC (Truncated-CPC) vedi figura 4.31a. Abbiamo voluto fare simulazioni anche su un CPC ideale, e abbiamo scelto il progenitore del nostro T-CPC (figura 4.31b). Possiamo vedere in appendice A il calcolo teorico per ottenere le misure del CPC ideale partendo dal CPC troncato.

Come prima cosa abbiamo fatto simulazioni del metodo diretto. Abbiamo quindi mandato un fascio collimato di 5000 raggi all'ingresso del cpc ed abbiamo misurato il flusso in uscita. Questa operazione l'abbiamo ripetuta più volte aumentando sempre più l'angolo d'inclinazione dei raggi, e poi con un foglio di calcolo abbiamo tracciato la curva flusso normalizzato-angolo d'incidenza. Il cpc aveva le pareti interne ideali, ovvero con riflettività $R_w = 1$. Abbiamo poi ripetuto la serie di simulazioni altre due volte, variando il parametro R_w portandolo a 0,9 e 0,8, simulando così un caso reale. In figura 4.32 si vede la curva ottenuta.

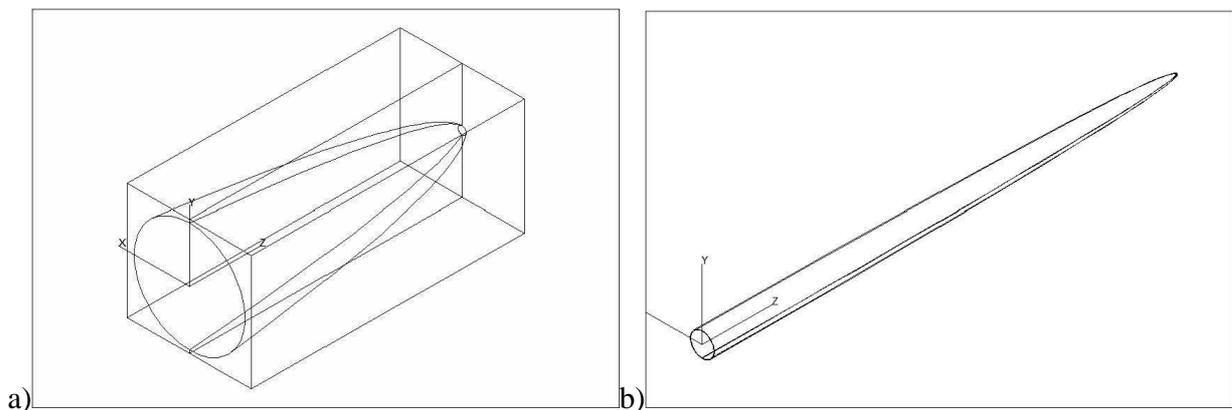


Figura 4.31: a) CPC circolare troncato lungo 35cm e b) suo progenitore ideale lungo 8m.

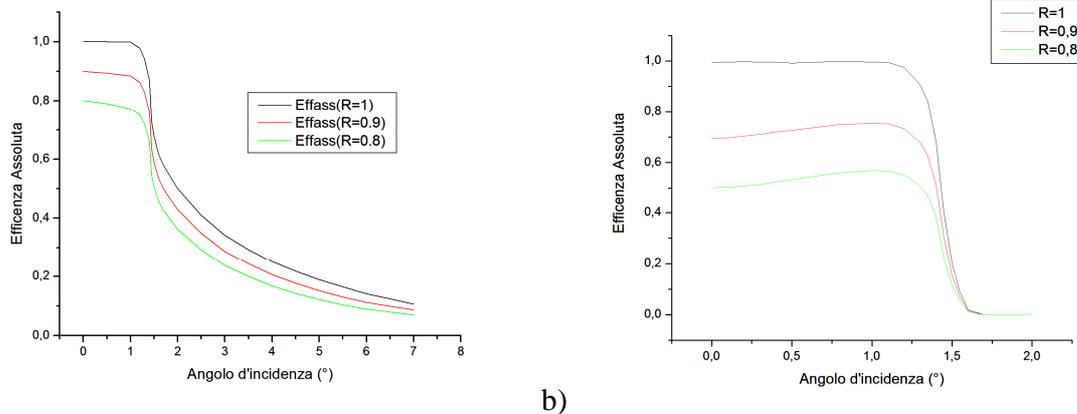


Figura 4.32: Curve efficienza-angolo a vari indici di rifrazione per il a) CPC troncato e b) CPC ideale suo progenitore

Da precisare che il flusso normalizzato misurato in uscita non dipende dal numero dei raggi della griglia, quindi utilizzare 5000 o 10000 raggi cambia solo il tempo di elaborazione ed i requisiti dell'elaboratore. Questo è stato verificando facendo le stesse simulazioni con numero diverso di raggi ed ottenendo lo stesso risultato.

Una volta ottenute queste curve si passa al metodo inverso. Si sposta la griglia sull'assorbitore e si mandano i raggi in senso contrario dopo aver posizionato uno schermo davanti al cpc sul quale si osserverà la mappa d'irradianza. Qui basta una sola simulazione, ma per avere una buona definizione servono molti raggi. Vediamo in figura 4.32a la mappa d'irradianza dello schermo per il T-CPC con $R_w=1$ ed in figura 4.32b con $R_w=0,8$. In entrambe le simulazioni abbiamo usato 450.000 raggi.

Lo schermo era posto a 15 metri ed aveva un raggio di 1,5 metri, in questo modo l'angolo massimo catturato è stato di $5,7^\circ$ e l'errore di $0,54^\circ$.

Le stesse simulazioni sono state fatte per il CPC progenitore, sempre con indice di riflettività delle pareti interne, R_w , di 1, 0,9, 0,8. La qualità della mappa d'irradianza è peggiore in quanto il cpc è lungo 8 metri e la simulazione richiede una gran quantità di dati, per questo la nostra griglia aveva solo 100.000 raggi. In figura 4.35 possiamo vedere la mappa d'irradianza dello schermo di raggio 1,5 metri e distante 15 metri dal CPC progenitore, con $R_w=0,9$.

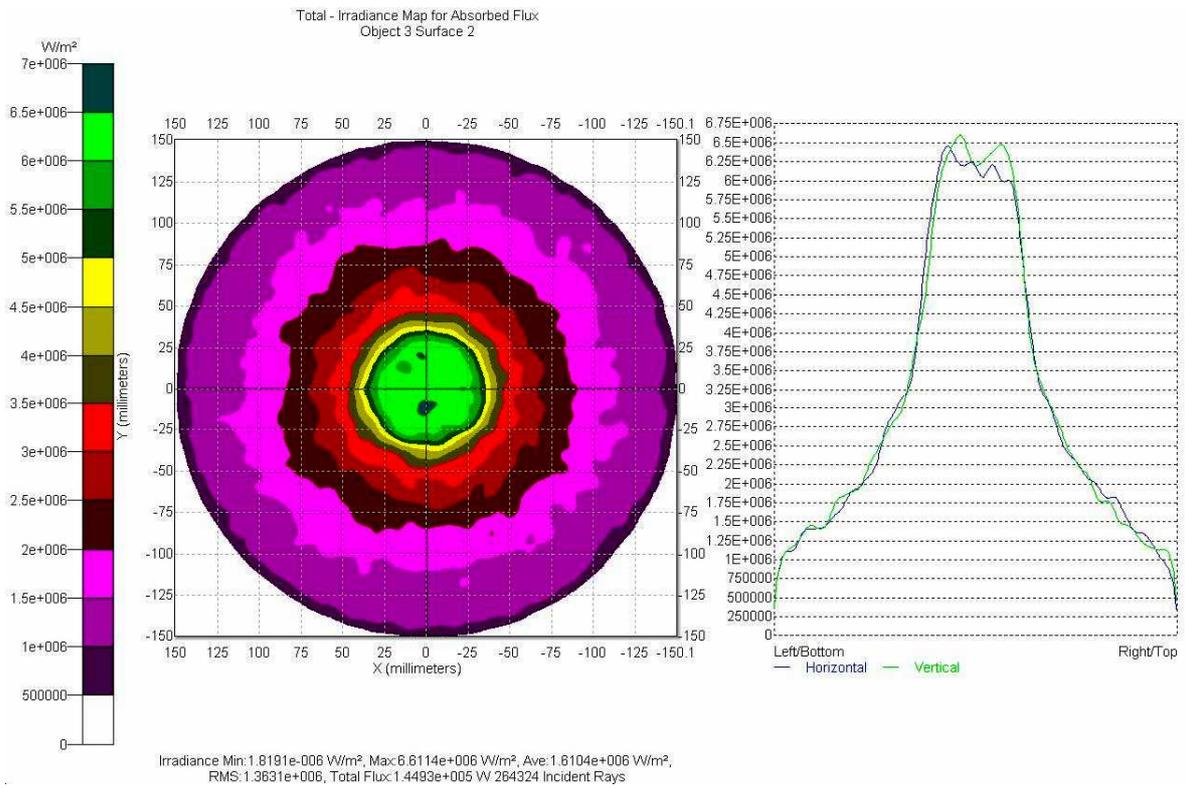


Figura 4.33: Mappa d'irradianza dello schermo nel metodo inverso del T-CPC a 450k di raggi e R=1

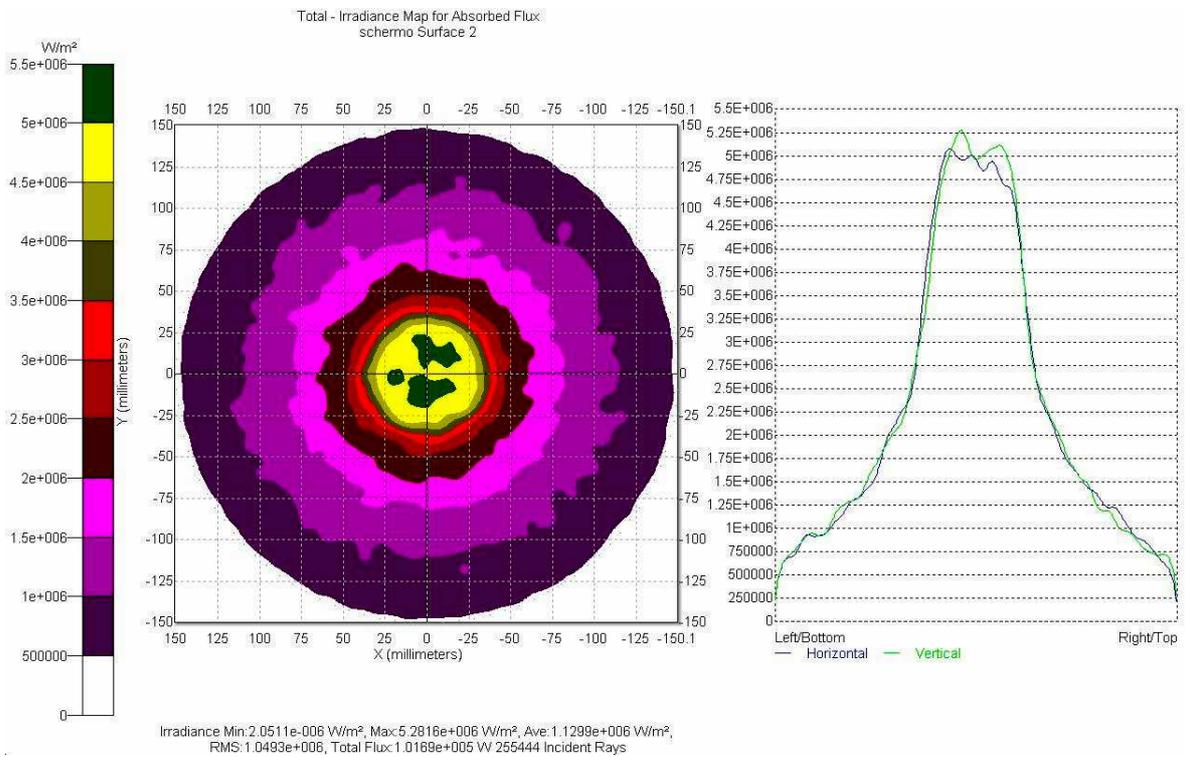


Figura 4.34: Mappa d'irradianza sullo schermo nel metodo inverso del T-CPC a 450k di raggi e R_w=0,8

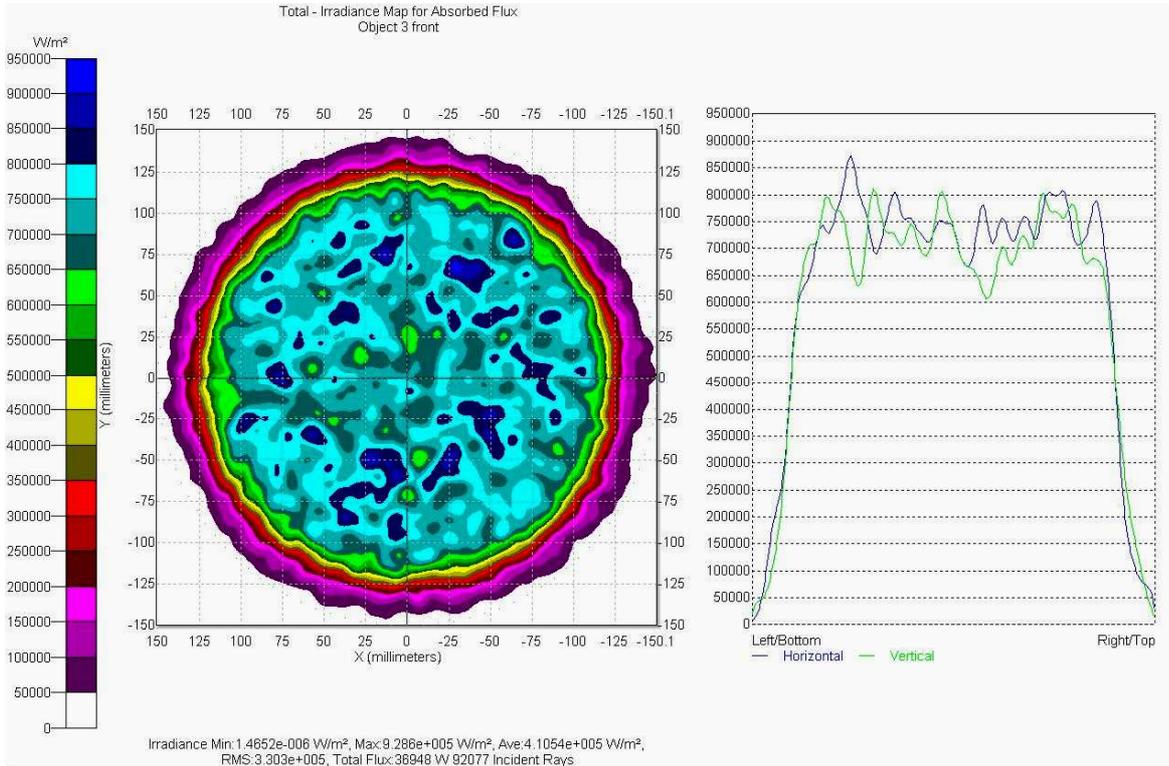


Figura 4.35: Mappa d'irradianza dello schermo nel metodo inverso del CPC progenitore a 100k di raggi e R=0,9

Dal metodo inverso si ottiene una matrice di valori di intensità, in tutto sono 128x128. Ogni valore è associato ad un punto sulla mappa, bisogna quindi passare dalla casella della matrice, che va da 1 a 128 alla distanza di quella casella dal centro dello schermo e quindi all'angolo corrispondente. Essendo i nostri cpc a simmetria circolare, abbiamo tracciato la curva lungo una direzione sola, dal centro fino al bordo dello schermo. Alla distanza pari al raggio, r , dello schermo corrispondono 64 caselle, e 64 dati. Per passare dal numero di casella, n , alla distanza dal centro, x , si usa la formula:

$$x = \frac{r}{64} n \quad (4.30)$$

E per passare dalla distanza dal centro, x , all'angolo corrispondente, θ , si usa la formula:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{x}{d} \quad (4.31)$$

Dove d è la distanza dal cpc. Nel nostro caso $d = 50\text{m}$ e $r = 1,5\text{m}$.

Abbiamo infine confrontato le curve ottenute col metodo diretto e quello inverso per stesso concentratore e stesso valore di riflettività delle pareti interne, R_w . In figura 4.37 e 4.38 abbiamo i confronti per il T-CPC con $R=1$ e $R=0,8$.

L'accordo tra i metodi sembra molto buono, le piccole variazioni presenti ad alcuni angoli sembrano essere dovute al numero di raggi usati nel metodo inverso, come si vede infatti dalla figura 4.36, se si usano pochi raggi si hanno delle fluttuazioni, e man mano che si aumenta il numero di raggi queste vanno scomparendo.

Vediamo poi in figura 4.39 e 4.40 il confronto tra i due metodi applicati al CPC progenitore, il quale è un CPC ideale di 8 metri di lunghezza. Le due curve si riferiscono ad indice interno di riflessione, R_w , di 1 e 0,9.

Si vede nelle immagini che l'aver utilizzato solo 10.000 raggi ha comportato una scarsa precisione del metodo, Ma l'angolo d'accettazione per efficienza al 90% ed al 50% risulta lo stesso in entrambi i casi, le fluttuazioni quindi interessano prevalentemente la regione piatta a bassi angoli.

Per completezza mettiamo anche la curva di confronto (figura 4.42), di un CPC troncato squadrato (figura 4.41), anche questo presente in laboratorio, ottenuto dal T-CPC: la sua diagonale è uguale al diametro del T-CPC. Questa squadratura è stata fatta per avere un migliore impacchettamento nei moduli solari.

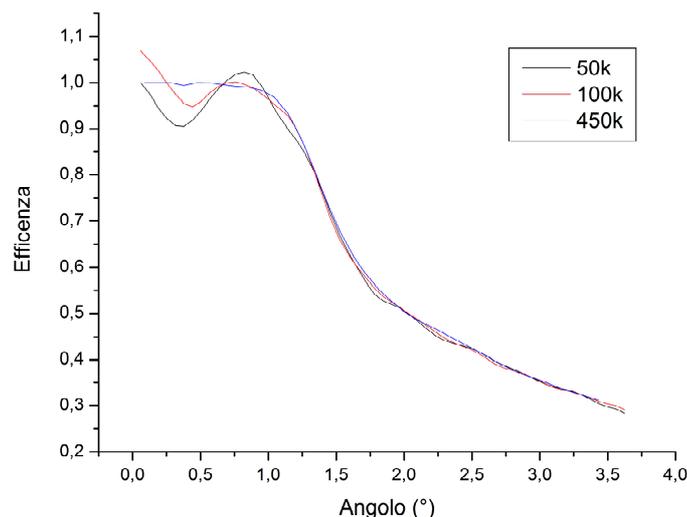


Figura 4.36: Confronto metodo inverso T-CPC per simulazioni con diverso numero di raggi.

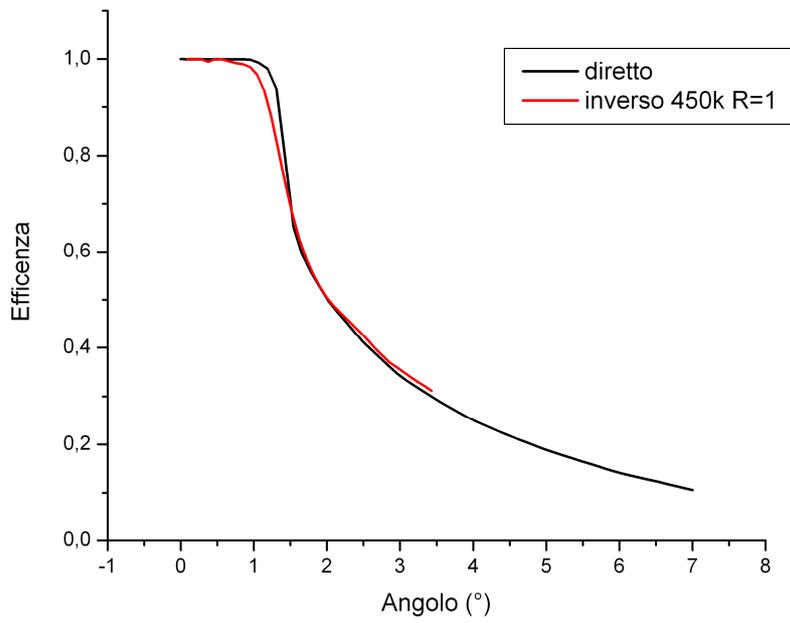


Figura 4.37: Confronto metodo diretto-inverso per T-CPC con R=1

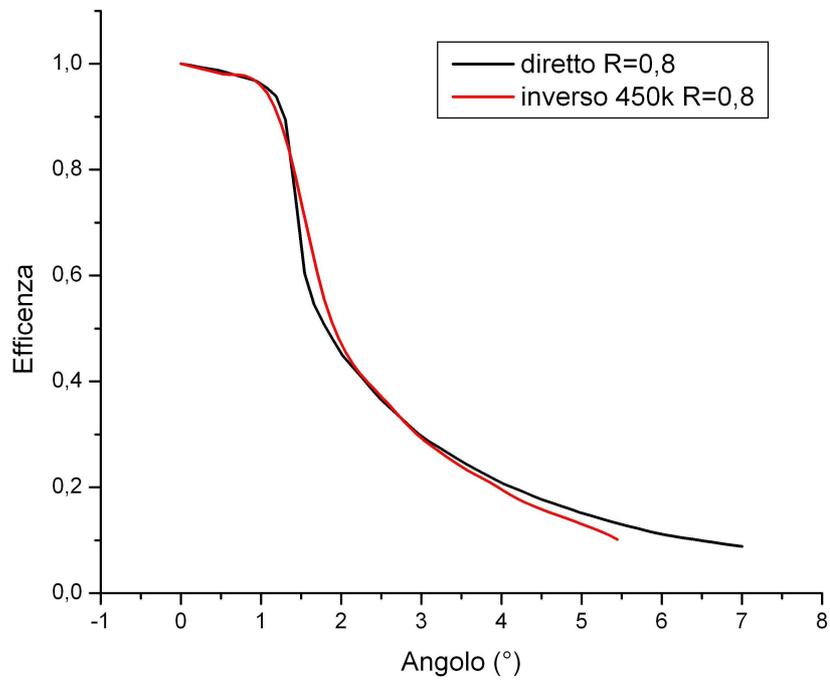


Figura 4.38: Confronto metodo diretto-inverso per T-CPC con R=0,8

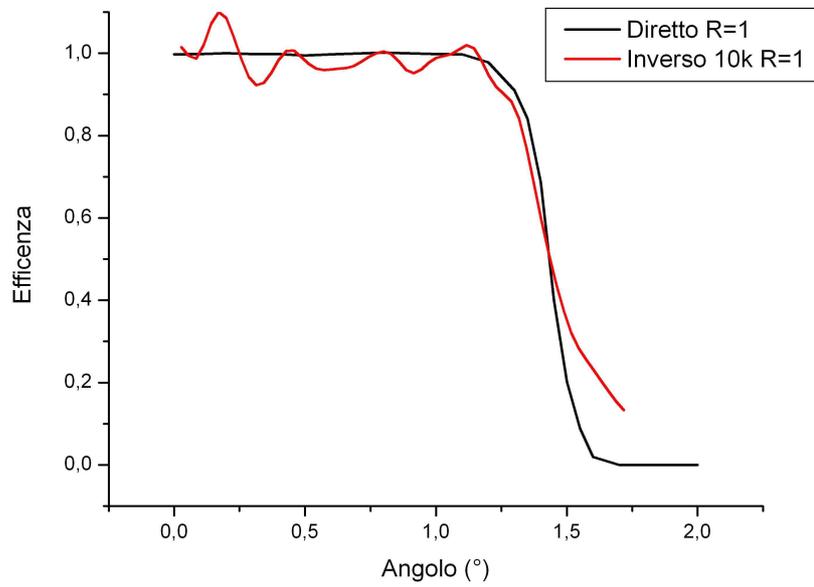


Figura 4.39: Confronto metodo diretto-inverso per CPC ideale con $R_w=1$

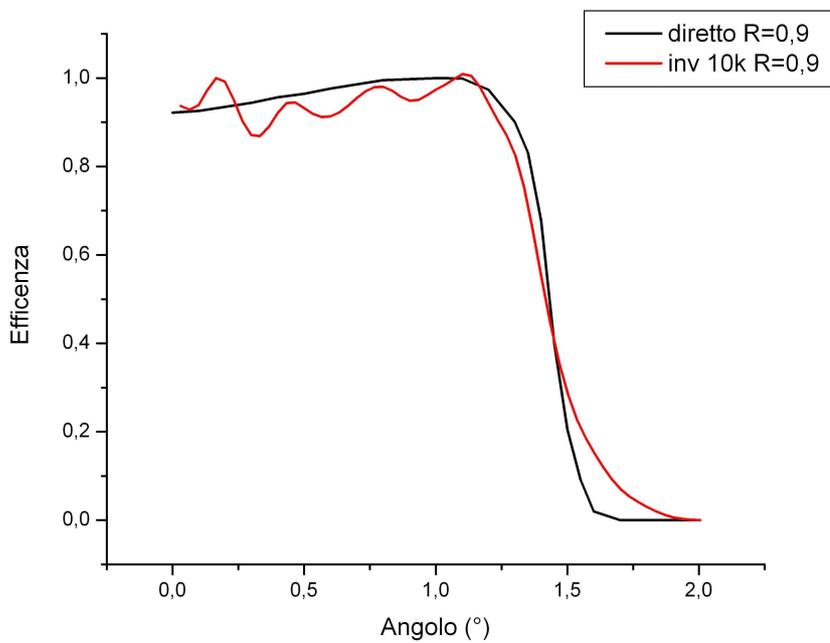
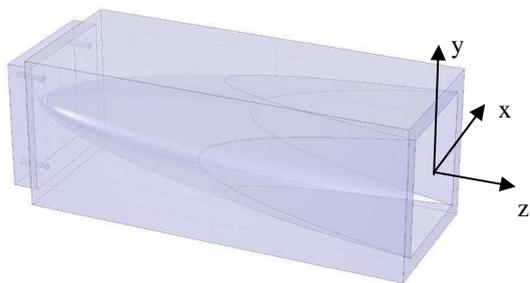
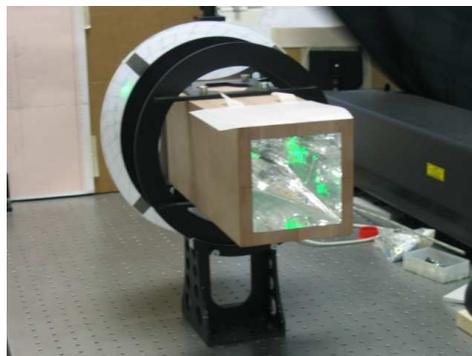


Figura 4.40: Confronto metodo diretto-inverso per CPC ideale con $R_w=0,9$



a)



b)

Figure 4.41: a) Vista prospettica di un modello di CPC troncato e squadrato (TS-CPC). b) Prototipo del TS-CPC durante una caratterizzazione con laser. [4]

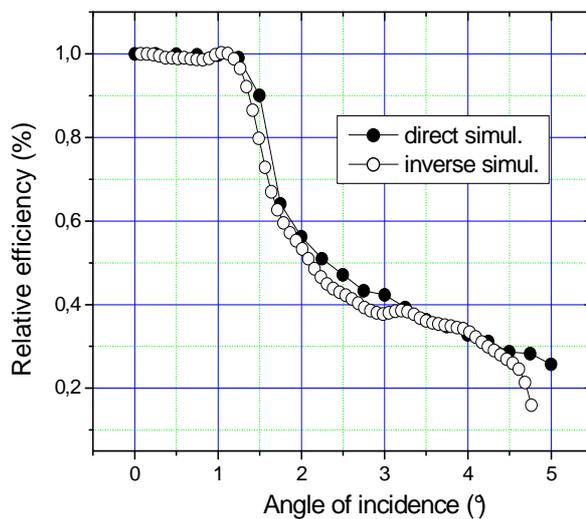


Figura 4.42: Efficienza ottica relativa di un CPC troncato e squadrato calcolata con il metodo diretto e con quello inverso. [6]

Abbiamo provato infine ad applicare il metodo inverso a sistemi imaging, come ad esempio, ad una lente di Fresnel circolare (figura 4.43a) e quadrata. La lente di Fresnel quadrata è in realtà solo un'approssimazione in quanto l'abbiamo ottenuta applicando una maschera quadrata alla lente circolare, come si può vedere dalla figura 4.43b.

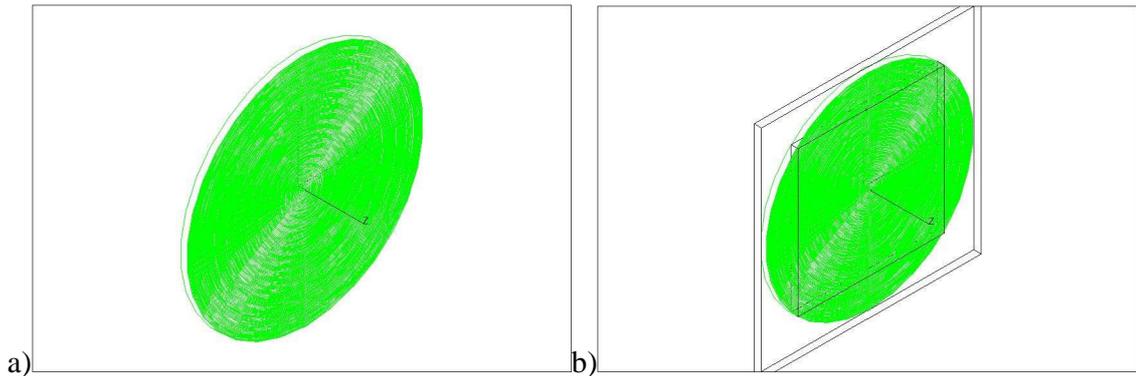


Figura 4.43: Progetto di TracePro di una lente di Fresnel a) circolare, b) circolare con maschera quadrata

Nella figura 4.44 abbiamo le mappe d'irradianza ottenute dal metodo inverso per le due lenti.

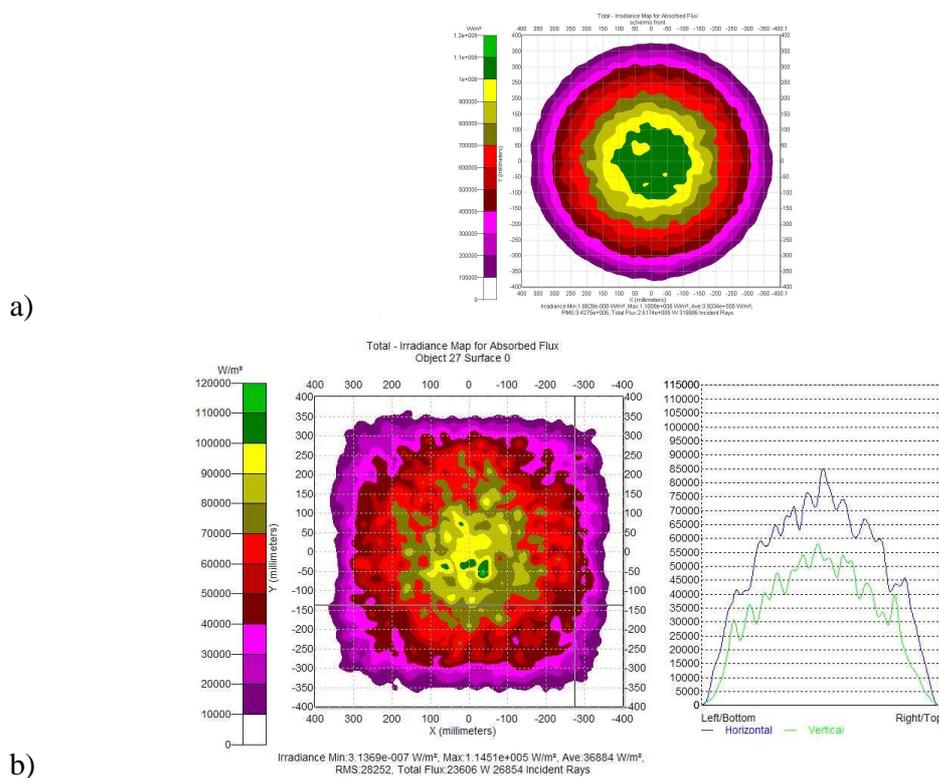
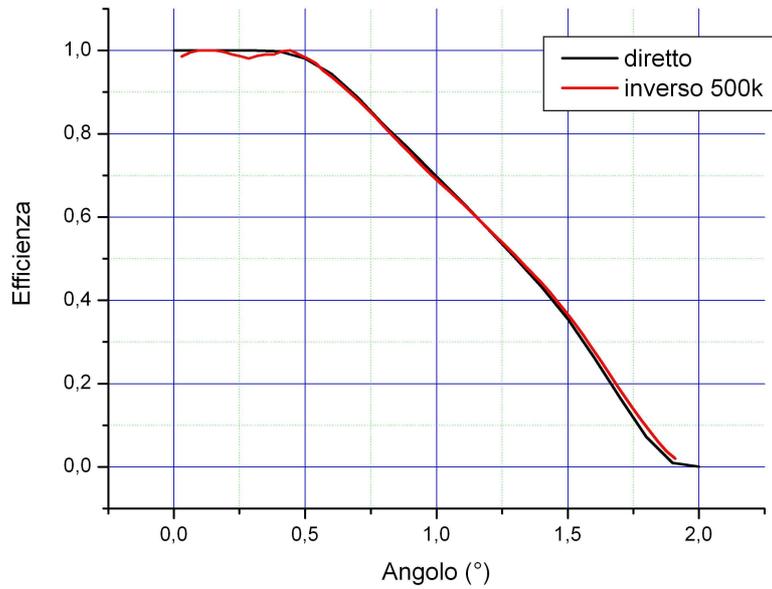


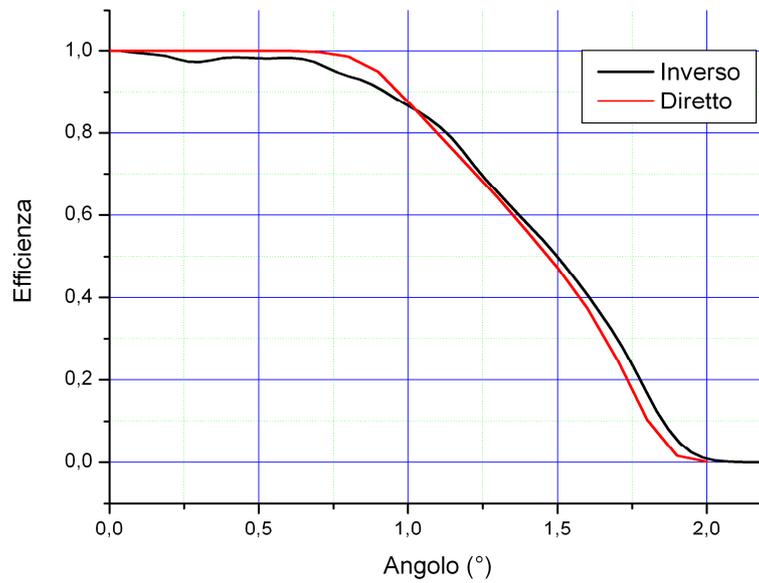
Figura 4.44: Mappa d'irradianza del metodo inverso a 500.000 raggi per la lente di fresnel a) circolare, b) quadrata

Ed infine nella figura 4.45.1 possiamo vedere il confronto tra le curve efficienza-angolo ottenute con il metodo inverso e diretto per le due lenti. Anche in questo caso si ha un ottimo accordo, solo

con l'utilizzo della maschera per quadrare la lente si ha qualche differenza forse dovuta ad effetti di bordo.



a)



b)

Figura 4.45.1: Confronto curve efficienza-angolo metodo diretto ed inverso per lente di fresnel a) circolare, b) quadrata.

4.5.3 Influenza sulle misure della distanza dello schermo

Abbiamo già parlato dell'importanza nell'applicazione del metodo inverso della distanza dello schermo dal concentratore, la quale deve essere molto maggiore rispetto alle dimensioni lineari dell'apertura d'ingresso del concentratore. Un esempio di come questa distanza influenzi fortemente le misure lo abbiamo da alcune simulazioni effettuate sullo stesso modello CAD di un CPC-SQ con schermo posto a distanza variabile: 3,8 metri, 10 metri, 20 metri, 100 metri e 1000 metri dal concentratore per simulazioni con 100000 raggi. Il rapporto semilato schermo/distanza schermo è sempre stato mantenuto a 1/10. Nella figura 4.25.2 vediamo le curve intensità-angolo ottenute dalle simulazioni, confrontate con la simulazione del metodo diretto.

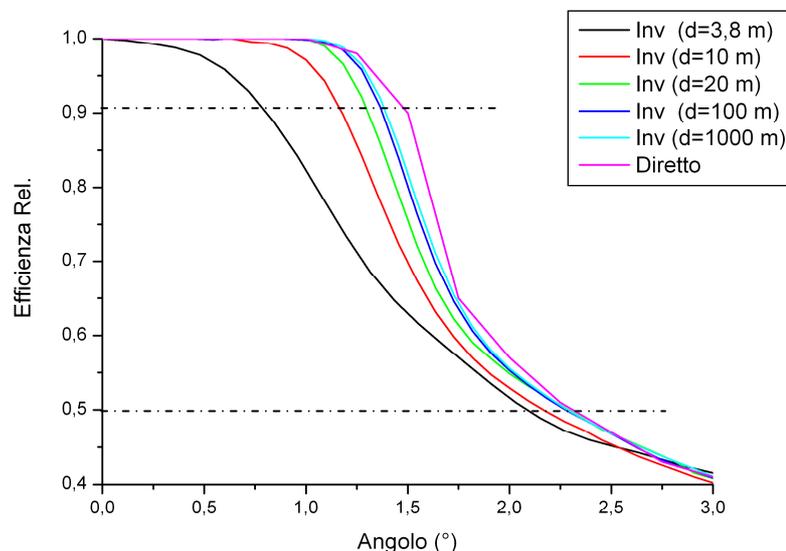


Figura 4.45.2: Curve d'efficienza del cpc-sq ricavate con il metodo inverso per schermo posto a distanza variabile.

Simulazione	Dir	Inv (d=3,8 m)	Inv (d=10 m)	Inv (d=20 m)	Inv (d=100m)	Inv (d=1000 m)
θ_{acc} (90%)	1,5°	0,8°	1,2°	1,3°	1,4°	1,4°
θ_{acc} (50%)	2,3°	2,1°	2,2°	2,3°	2,3°	2,3°

Tabella 2: Angoli d'accettanza θ_{acc} del cpc-sq ottenuti con il metodo inverso per varie distanze di schermo.

Dalla tabella 2 possiamo renderci conto della variazione dell'angolo d'accettanza con lo spostamento dello schermo e quindi di quanto questo deve essere posto distante dal concentratore per non generare errori sulle misure.