



Ricerca di Sistema elettrico

Fotometria e goniometria di materiali da costruzione opachi

Giuseppe Rossi, Paola Iacomussi

FOTOMETRIA E GONIOFOTOMETRIA DI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Giuseppe Rossi, Paola Iacomussi (INRIM)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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

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

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

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Fotometria e goniofotometria di materiali da costruzione*"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico: Giuseppe Rossi

Ringraziamenti:

Gli autori ringraziano l'Ing. Emiliano Carnielo per la fattiva e proficua collaborazione nella predisposizione dei campioni, nell'acquisizione dei dati goniofotometrici e nella successiva elaborazione.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
2.1 IL GONIORIFLETTOMETRO DELL'INRIM.....	5
2.2 MATERIALI MISURATI E CONDIZIONI DI MISURA.....	11
2.3 RISULTATI DELLE MISURAZIONI GONIORIFLETTOMETRICHE.....	12
2.4 METODOLOGIA DI SIMULAZIONE E RISULTATI	35
3 CONCLUSIONI.....	36
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37
APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	38

Sommario

La presente relazione descrive i risultati di una campagna sperimentale di misurazione della funzione di riflessione bi-direzionale di 15 di campioni di materiali opachi per applicazioni in edilizia. Le tipologie di prodotto includono: rivestimenti elastomerici, membrane bituminose, gres porcellanato, cotto e materiali lapidei.

In questa prima fase, tendente a identificare le principali caratteristiche in riflessione, per tipologia di prodotto, la misura del coefficiente di luminanza ha considerato 4 angoli di incidenza (8° , 30° , 45° e 60°) e il piano di diffusione della radiazione comprendente la direzione di incidenza, in modo da evidenziare il cambio di comportamento (da diffuso a speculare) all'aumentare dell'inclinazione dei raggi solari, con un numero relativamente ridotto di misure e considerando esclusivamente la radiazione visibile.

In base a questi risultati sperimentali si sono costruite delle ipotesi di curve angolari complete per ogni campione misurato. Per ottenere queste curve, oltre ai risultati di ENEA sul fattore di riflessione globale ottenuto mediante misurazioni con sfera integratrice, è stata applicata una metodologia semplificata di estrapolazione e una corretta integrazione dei dati direzionali.

Dalle curve così ottenute sono stati estratti i valori del fattore di riflessione diffuso e speculare al variare dell'angolo di incidenza, permettendo una prima classificazione delle caratteristiche ottiche dei campioni.

1 Introduzione

Le caratteristiche in riflessione di materiali opachi per costruzione rivestono un particolare interesse per quantificare il comportamento energetico di un ambiente (interno o esterno) illuminato da luce naturale o artificiale.

La semplice conoscenza del fattore di riflessione (parametro globale e non direzionale) permette una prima stima dei livelli di illuminazione o di irradiazione dovute alla frazione di luce o di radiazione solare riflessa dal materiale. La presenza di direzioni preferenziali della riflessione richiede, per calcoli e simulazioni più accurate, una caratterizzazione goniofotometrica della riflessione, generalmente ottenuta mediante la misurazione del coefficiente di luminanza o di radianza q indicato sovente con il l'acronimo di BRDF (bi-directional reflectance distribution function (BRDF) [1] [2].

La presente relazione descrive i risultati di una campagna sperimentale di misurazione del coefficiente di luminanza di 15 di campioni di materiali opachi per applicazioni in edilizia. Le tipologie di prodotto includono: rivestimenti elastomerici, membrane bituminose, gres porcellanato, cotto e materiali lapidei.

In questa prima fase, tendente a identificare le principali caratteristiche in riflessione, per tipologia di prodotto, la misura del coefficiente di luminanza ha considerato 4 angoli di incidenza (8° , 30° , 45° e 60°) e il piano di diffusione della radiazione comprendente la direzione di incidenza, in modo da evidenziare il cambio di comportamento (da diffuso a speculare) all'aumentare dell'inclinazione dei raggi solari, con un numero relativamente ridotto di misure e considerando esclusivamente la radiazione visibile.

In base a questi risultati sperimentali si sono costruite delle ipotesi di curve angolari complete per ogni campione misurato. Per ottenere queste curve, oltre ai risultati di ENEA sul fattore di riflessione globale ottenuto mediante misurazioni con sfera integratrice, è stata applicata una metodologia semplificata di estrapolazione e una corretta di integrazione dei dati direzionali.

L'approccio seguito è particolarmente utile in quanto la misurazione del fattore di riflessione globale può essere fatta anche con strumentazione commerciale, in tempi estremamente brevi (se non si eseguono misurazioni spettrometriche) e anche sul campo, mentre la misurazione del coefficiente di luminanza richiede strumentazione specifica da laboratorio e tempi lunghi di misurazione (da qualche ora a qualche giorno in dipendenza del dettaglio angolare desiderato).

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Il gonioriflettometro dell'INRIM

Il gonioriflettometro INRIM permette di eseguire una caratterizzazione completa del campione (misurazione del coefficiente di luminanza) in quanto consente ogni possibile combinazione delle direzioni di incidenza e di osservazione.

La geometria di misura viene specificata mediante un sistema di coordinate polari centrate nel punto O sulla superficie del provino e con gli angoli azimutali riferiti a una opportuna direzione sullo stesso (Figura 1). In particolare:

- ε_1 è l'angolo tra la perpendicolare al campione (asse z) e la direzione di incidenza;
- ε_e è l'angolo tra la perpendicolare al campione (asse z) e la direzione di osservazione;
- φ_1 è l'angolo tra un asse di riferimento (asse x) e il piano di incidenza;
- φ_2 è l'angolo tra un asse di riferimento (asse z) e il piano di osservazione.

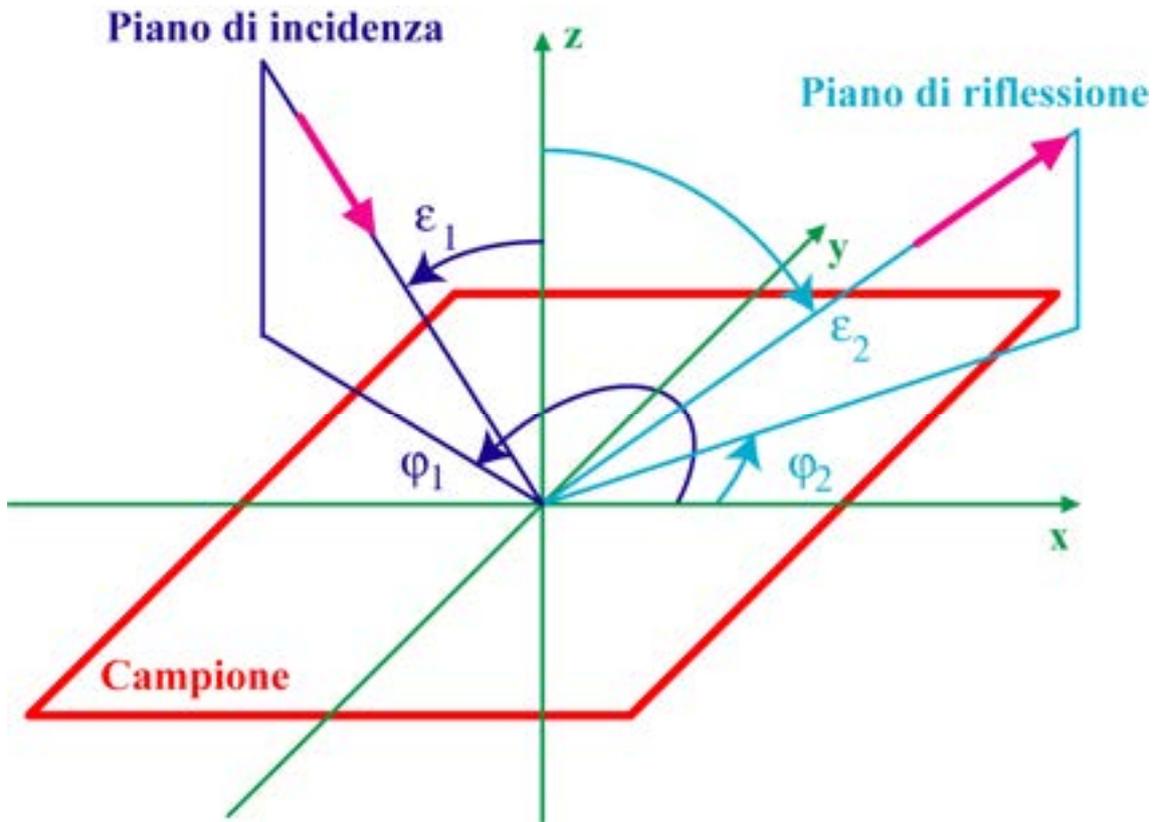


Figura 1 Sistema di coordinate polari per le misurazioni gonioreflettometriche

Le grandezze fotometriche di maggior interesse utilizzate per caratterizzare il fenomeno della riflessione sono principalmente due [2]:

- Coefficiente di luminanza q (di dimensione 1 o 1/steradiante):

$$q = \frac{L_r}{E_i}$$

dove:

L_r è la luminanza del campione misurata nella direzione r di osservazione;

E_i è l'illuminamento generato sul campione dalla radiazione incidente secondo la direzione i .

- Fattore di riflessione ρ (di dimensione 1):

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$$

dove:

Φ_r è il flusso riflesso in ogni direzione dal campione quando illuminato in una data condizione,

Φ_i è il flusso incidente.

Il fattore di riflessione è quindi una grandezza scalare che caratterizza globalmente il materiale senza tenere conto delle direzioni di riflessione: per questo motivo la sua sola conoscenza è esauriente esclusivamente nel caso di comportamento lambertiano in riflessione. Negli altri casi, è necessaria la conoscenza della matrice completa del coefficiente di luminanza, ossia del valore di q per tutte le possibili direzioni di riflessione in corrispondenza di una qualsiasi direzione del semispazio di incidenza:

$$q = q(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varphi_1, \varphi_2)$$

Le grandezze ora definite possono essere riferite a una radiazione complessa o monocromatica. Inoltre, le misurazioni gonioriflettometriche possono essere eseguite anche spettroradiometricamente. In questo caso è possibile anche la valutazione delle coordinate cromatiche nelle varie condizioni di misurazione.

Il legame funzionale tra la caratteristica spettrale misurata $\alpha(\lambda)$, e quella globale, calcolata mediante integrazione numerica è dato dalle seguenti formule.

- Caratteristica radiometrica:
$$\alpha_e = \frac{\int_0^{\infty} S_\lambda \alpha(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_\lambda d\lambda}$$

- Caratteristica fotometrica:
$$\alpha_v = \frac{\int_{360\text{ nm}}^{830\text{ nm}} S_\lambda \alpha(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{360\text{ nm}}^{830\text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) d\lambda}$$

- Caratteristica colorimetrica:

$$X = \int_{360\text{ nm}}^{830\text{ nm}} S_\lambda \bar{x}(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_{360\text{ nm}}^{830\text{ nm}} S_\lambda \bar{y}(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_{360\text{ nm}}^{830\text{ nm}} S_\lambda \bar{z}(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda$$

dove:

S_λ è la distribuzione spettrale relativa dell'energia della radiazione incidente sul materiale;

$V(\lambda)$ è il fattore spettrale di visibilità;

$\bar{x}(\lambda)$ $\bar{y}(\lambda)$ $\bar{z}(\lambda)$ sono le funzioni colorimetriche CIE 1931;

X, Y, Z sono le componenti tricromatiche CIE 1931 del materiale.

Il gonioriflettometro INRIM [3] consiste in un doppio banco ottico, lungo complessivamente 4 m e largo 60 cm, che ruota intorno al suo asse centrale verticale (Figura 2).

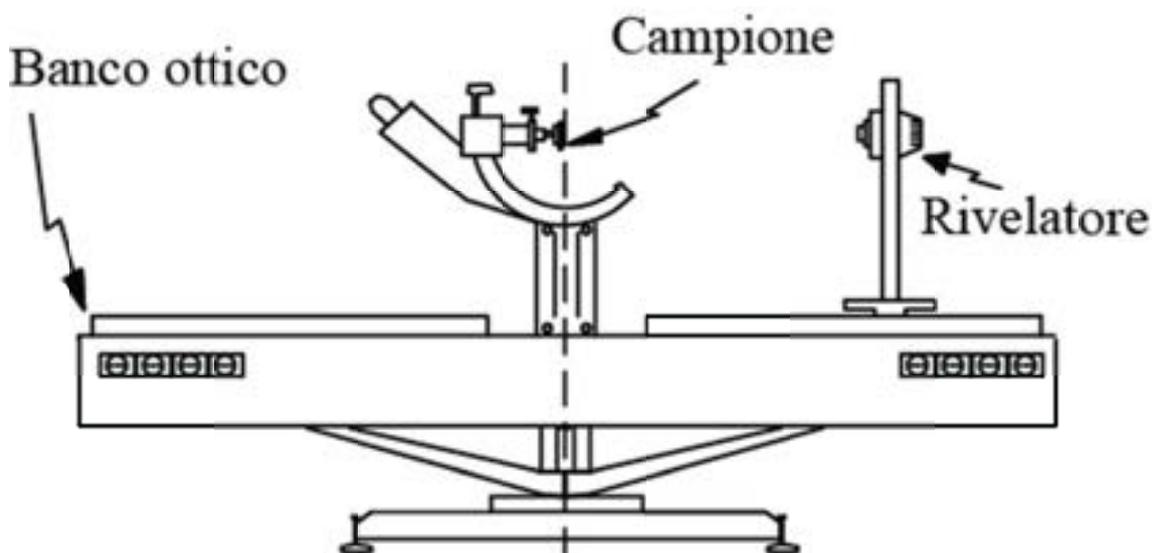


Figura 2 Schema meccanico del gonioriflettometro

Il sistema goniometrico è realizzato mediante 8 movimentazioni motorizzate e completamente automatizzate:

- Due di tipo lineare sono impiegate per scegliere la zona da misurare sulla superficie del provino (movimentazione 1 e 4 in Figura 3);
- Una di tipo lineare compensa i differenti spessori dei campioni utilizzati (movimentazione 2 in Figura 3);
- Una di tipo lineare per consentire lo spostamento del campione fuori dell'area di misura del rivelatore: operando in questo modo si rilevano direttamente le caratteristiche della sorgente (movimentazione 7 in Figura 4);
- Quattro di tipo rotativo impongono gli angoli di incidenza e di osservazione, 3 ruotando il provino e una ruotando sul piano orizzontale il rivelatore (movimentazioni 3 in Figura 3; 5, 6 e 8 in Figura 4).

Per progetto gli assi di rotazione di tutti i movimenti si intersecano nel punto O, coincidente con l'origine del sistema di riferimento del campione (Figura 1). Nello stesso punto si intersecano le rette orizzontali che determinano la direzione di osservazione (definita dalla posizione del rivelatore) e di incidenza fissa rispetto al laboratorio (Figura 5).

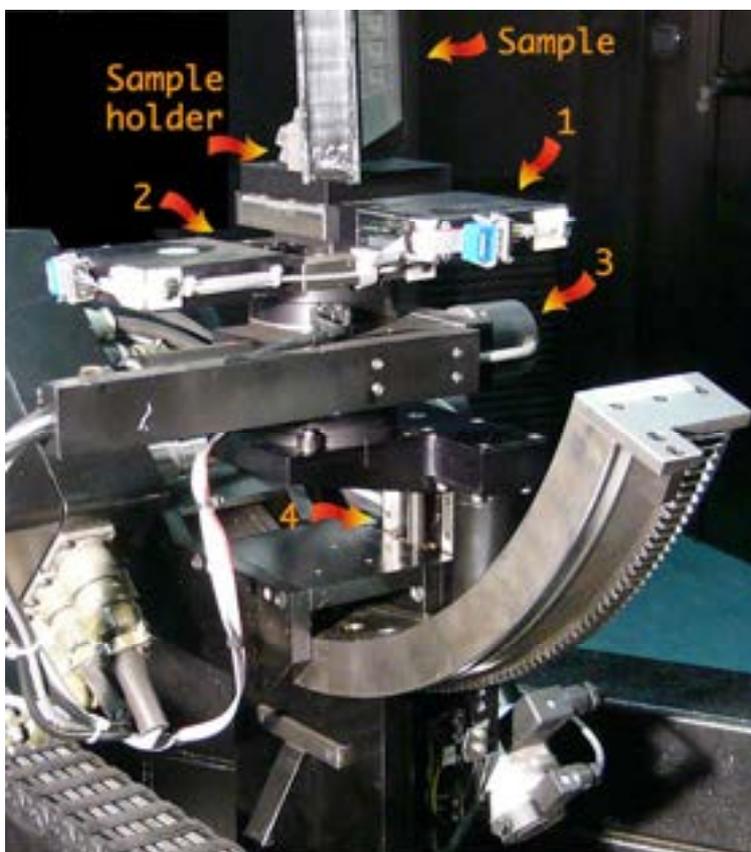


Figura 3 Movimentazioni della zona porta campione

In questo modo il campione può essere illuminato e osservato da ogni direzione nello spazio. Tutti i movimenti sono controllati mediante calcolatore con un'incertezza di 10^{-2} mm sui posizionamenti lineari e di $0,01^\circ$ per le rotazioni angolari. Le ridotte deformazioni della struttura meccanica e l'accuratezza ottenuta nell'allineamento degli assi permettono di raggiungere un'incertezza di $0,1^\circ$ sulla definizione degli angoli ϵ_1 , ϕ_1 , ϵ_2 , ϕ_2 di incidenza e osservazione [4].

La sorgente utilizzata simula l'illuminante A e genera un fascio di luce focalizzato sul provino (la cui area illuminata può variare da un minimo di 2 ad un massimo di 40 mm). L'iride di uscita del sistema ottico di focalizzazione può essere regolata permettendo la generazione di fasci con angolo solido compreso tra 300°

e 10 μ s. Un sistema di controllo elettronico, utilizzando un fotorivelatore, mantiene stabile l'uscita della sorgente tra successive tarature.

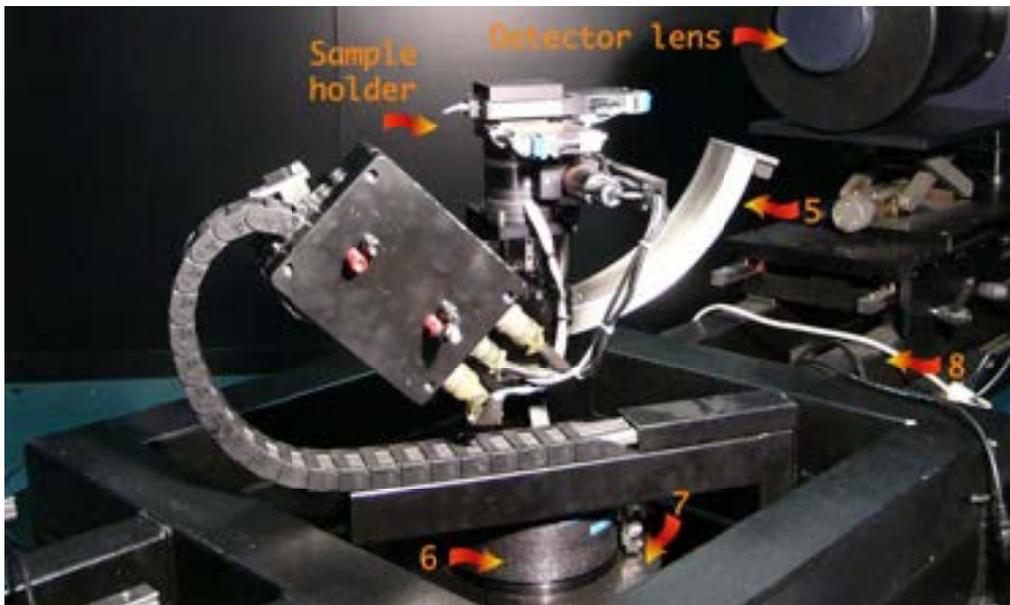


Figura 4 Altre movimentazioni

Il rivelatore, montato sul banco rotante, consiste in un sistema ottico che focalizza la superficie del provino e da un sensore CCD (charge coupled device) composto da 512 x 512 pixel quadrati con convertitore A/D a 16 bit. Le dimensioni del rivelatore CCD non permettono di eseguire misurazioni in un angolo morto di circa 6° attorno alla direzione di incidenza.

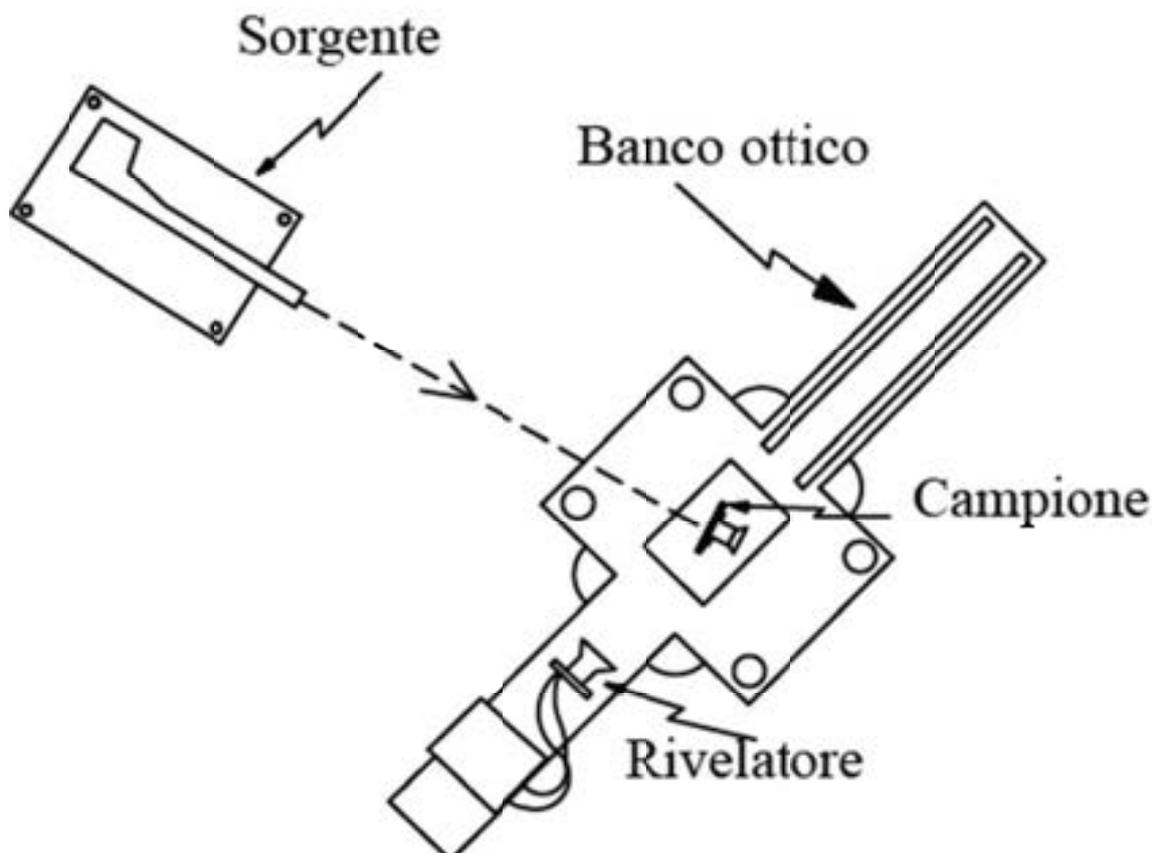


Figura 5 Configurazione di misura

Uno dei vantaggi nell'uso del rivelatore CCD è la sua linearità associata alla possibilità di variare il tempo di esposizione. In questo modo la taratura (misurazione dell'illuminamento incidente) viene eseguita con lo stesso rivelatore facendogli inquadrare direttamente la sorgente.

La misurazione del coefficiente di luminanza viene eseguita secondo il seguente algoritmo.

Sia D la distanza tra la sorgente luminosa e il campione in O e ε_1 l'angolo di incidenza, considerato costante per tutti gli elementi ΔS_{1i} della sorgente (ipotesi senz'altro corretta considerata la piccola estensione di questa). L'illuminamento E in O può essere scritto come:

$$E = \frac{\cos \varepsilon_1}{D^2} \sum_i L_{1i} \Delta S_{1i}$$

dove L_{1i} è la luminanza in ogni elemento ΔS_{1i} e la sommatoria è estesa su tutta la superficie della sorgente.

Se la luminanza della sorgente è uniforme (condizione necessaria seguendo le tradizionali metodologie di misura per i goniofotometri [5]), tutte le luminanze L_{1i} sono costanti e la sommatoria coincide con la luminanza L_1 della sorgente moltiplicata per la sua area complessiva S_1 . Nel nostro caso questo requisito non è necessario in quanto, mediante il rivelatore CCD, tutti i valori L_{1i} possono essere accuratamente misurati.

Nell'ambito di caratterizzazioni di materiali per uso illuminotecnico, l'accuratezza richiesta non è paragonabile a quella necessaria per i campioni di taratura. In questo caso, per motivi di praticità legati soprattutto ai tempi di misurazione, si preferisce porre il risultato della sommatoria uguale alla luminanza media L_1 della sorgente moltiplicata per la sua area complessiva S_1 . Introducendo il parametro geometrico G :

$$G = \left(\cos \varepsilon \frac{S_1}{D^2} \right)^{-1}$$

il valore di q può essere ottenuto mediante l'equazione:

$$q = G \frac{L_2}{L_1}$$

note le misure di luminanza della sorgente (L_1) e del campione (L_2).

Sfortunatamente, neanche questo tipo di misura è semplice poiché il rapporto tra L_1 e L_2 può superare anche 4 ordini di grandezza. Il peculiare funzionamento del rivelatore a matrice CCD permette di risolvere questo problema attraverso differenti tempi di esposizione: infatti il segnale in uscita è proporzionale al prodotto della luminanza per il tempo di integrazione. Nel gonioriflettometro il tempo di integrazione viene definito mediante un otturatore ruotante appositamente progettato. Operando in questo modo è possibile effettuare le due misure in condizioni di linearità del rivelatore.

L'equazione finale utilizzata per la misurazione è quindi:

$$q = G \frac{T_2}{T_1} k$$

ove:

- T_1 è il tempo di esposizione usato per la misurazione della luminanza della sorgente;
- T_2 è il tempo di esposizione usato per la misurazione della luminanza del campione;
- k è un parametro correttivo dipendente dalle letture del CCD nelle due condizioni di misura.

Le condizioni di misura e la metodologia seguita per la misurazione assicurano:

- la riduzione dell'incertezza di misura, non essendo richiesti campioni di riferimento o eventuali tarature di tipo fotometrico;

- la linearità nel funzionamento del CCD, e quindi viene evitato l'uso di sorgenti ausiliarie;
- la compensazione delle disuniformità della sorgente.

L'incertezza di misura complessiva è influenzata da un numero notevole di parametri. Il seguente elenco non è certo esaustivo, ma intende fornire una traccia per la corretta analisi dei singoli contributi:

- Sorgente: distribuzione spettrale, polarizzazione, stabilità durante il ciclo di misura.
- Geometria: accuratezza degli allineamenti angolari, dimensione del fascio incidente-riflesso, uniformità del fascio.
- Rilevatore: risposta spettrale, sensibilità alle condizioni di polarizzazione, caratteristiche sistema ottico, incertezza sui tempi esposizione, rumore e risoluzione del convertitore A/D.
- Campione: tipo e omogeneità della superficie, stabilità nel tempo e con la temperatura, spessore.
- Laboratorio: temperatura, umidità e grado di pulizia area.

2.2 Materiali misurati e condizioni di misura

I campioni misurati, forniti da ENEA, sono elencati nella Tabella 1. Si tratta di tipici materiali opachi usati in edilizia.

Per le dimensioni e, in alcuni casi anche per il peso, non è stato possibile sfruttare a pieno tutte le potenzialità del goniometro INRIM. In particolare i campioni sono stati ruotati esclusivamente su un piano e l'angolo morto (l'angolo per il quale la sorgente è mascherata dal rivelatore) è stato leggermente superiore al minimo previsto.

Tabella 1 Elenco e numero di riferimento dei campioni misurati

Numero	Descrizione
1	Membrana Grigio
2	Membrana Texture
3	Coating Grigio
4	Shingle
5	Azzurra
6	Marrone
7	Mattonella Liscia
8	Mattonella Grigia Ruvida
9	Travertino
10	Pietra Lavica
11	Calcestruzzo Drenante 6 mm Bianco
12	Calcestruzzo Drenante 12 mm Bianco
13	Marmetta 1
14	Marmetta 2
15	Mattone Argilla

I campioni sono stati misurati "come forniti" senza nessun trattamento preliminare di pulizia. I campioni erano in equilibrio termico con il laboratorio alla temperatura di $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Considerata la presenza di texture su alcuni campioni, il fascio della sorgente è stato allargato in modo da coprire praticamente tutta la lunghezza del campione quando inclinato all'angolo di 60°. In queste condizioni gli angoli solidi di misura erano equivalenti all'angolo piano di 1° per il rivelatore e 2° per la sorgente.

I campioni sono stati allineati rispetto al sistema di riferimento del goniometro con un'incertezza massima di 1,5° per causa, principalmente, delle irregolarità o non planarità della loro superficie.

2.3 Risultati delle misurazioni gonioriflettometriche

I risultati delle misure del coefficiente di luminanza sono riassunti nei grafici da Figura 6 a Figura 50. Per ogni campione sono riportati:

- fotografia della superficie misurata del campione;
- grafici del coefficiente di luminanza misurato nel piano $\varphi_2 = 0 - 180$ per le quattro direzioni di incidenza considerate ($\varepsilon_1 = 8^\circ, \varphi_1 = 180^\circ$), ($\varepsilon_1 = 30^\circ, \varphi_1 = 180^\circ$), ($\varepsilon_1 = 45^\circ, \varphi_1 = 180^\circ$), ($\varepsilon_1 = 60^\circ, \varphi_1 = 180^\circ$);
- grafici di confronto tra il coefficiente di luminanza nel semipiano $\varphi_2 = 0^\circ$ e nel semipiano $\varphi_2 = 180^\circ$ con evidenziata, se presente, la componente regolare rispetto a quella diffusa (vedere §2.4).

Tutte le misure sono state eseguite con una sorgente ad incandescenza alla temperatura di colore di (2856 ± 50) K pari all'illuminante A e con rivelatore con filtro fotometrico per simulare il fattore spettrale di visibilità $V(\lambda)$.

In base a questi risultati è possibile classificare i campioni secondo quattro forme di riflessione:

campioni essenzialmente lambertiani:

non è presente una evidente componente regolare o non esiste una componente privilegiata rispetto all'altra per tutte le direzioni di misura considerate. È il caso dei campioni 8286, 8296, 8297.

campioni con riflessione regolare presente:

la componente regolare è ben individuabile con un andamento generalmente simmetrico rispetto alla direzione di riflessione regolare. È il caso dei campioni 8285, 8290, 8291.

campioni con riflessione prevalentemente direzionata nel semipiano della riflessione regolare:

esiste un significativo aumento del coefficiente di luminanza nel semipiano opposto a quello di incidenza, ma gli angoli interessati non sono esclusivamente quelli nell'intorno della riflessione regolare. È il caso dei campioni 8284, 8288, 8289, 8292.

campioni con riflessione prevalentemente direzionata nel semipiano di incidenza:

esiste un significativo aumento del coefficiente di luminanza nel semipiano di incidenza. L'impossibilità di misurare nelle direzioni prossime alla riflessione catadiottrica non permette di valutare l'importanza numerica di questa componente. È il caso dei campioni 8287, 8293, 8394, 8295, 8298.

Occorre notare che all'aumentare dell'angolo di incidenza la componente regolare aumenta, in modo più o meno rilevante, per tutti i campioni. La classificazione sopra riportata deve essere quindi considerata qualitativa e, spesso, riferita al comportamento per gli angoli di incidenza inferiori a 45°.

Fisicamente un aumento del coefficiente di luminanza in una data direzione implica che, a parità di illuminamento sulla sua superficie, il campione sarà visto più luminoso in quella direzione rispetto alle altre. Per esempio il campione 8290 che presenta un elevato grado di specularità con incidenza a 60° sarà visto circa 30 volte più luminoso in questa direzione rispetto alle altre.

L'incertezza di misura del coefficiente di luminanza è minore dell'1,5%.

Per i campioni 8284 e 8288 non è stato possibile misurare la riflessione in tutto il piano $\varphi_2 = 0$.



Figura 6 Fotografia della superficie del campione 8284

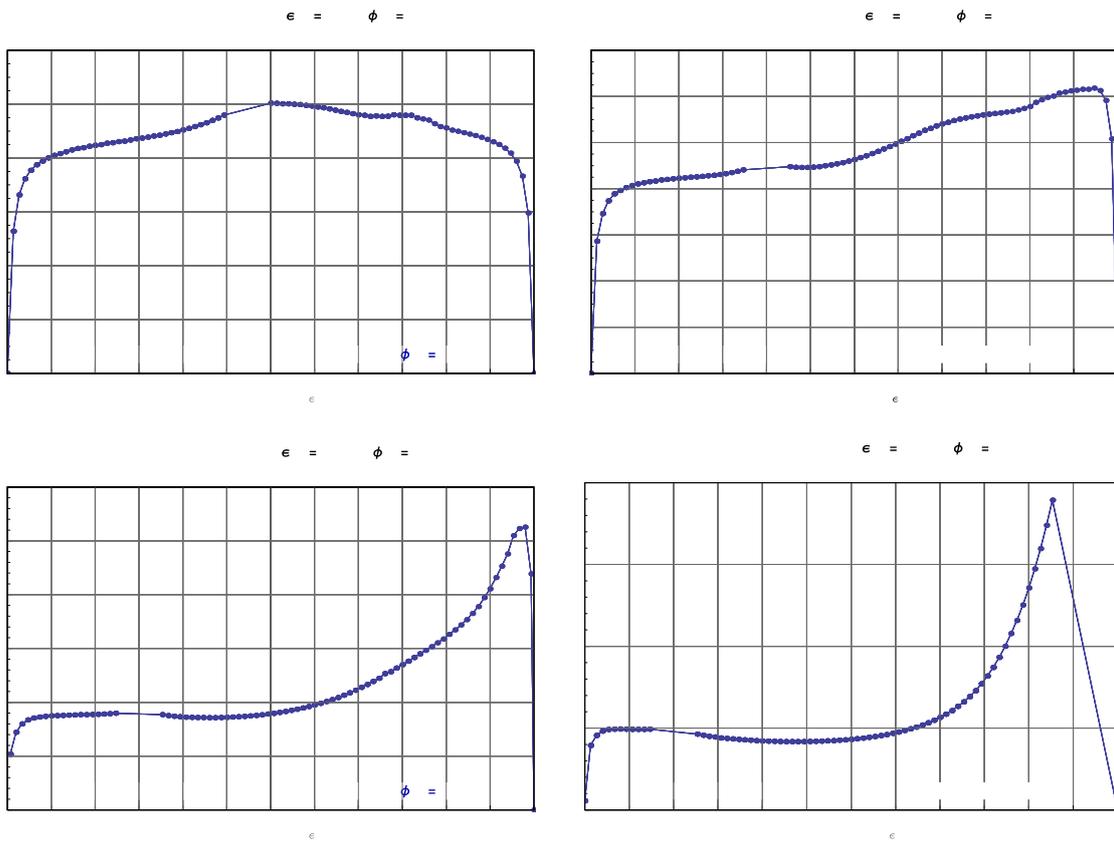


Figura 7 Coefficiente di luminanza del campione 8284

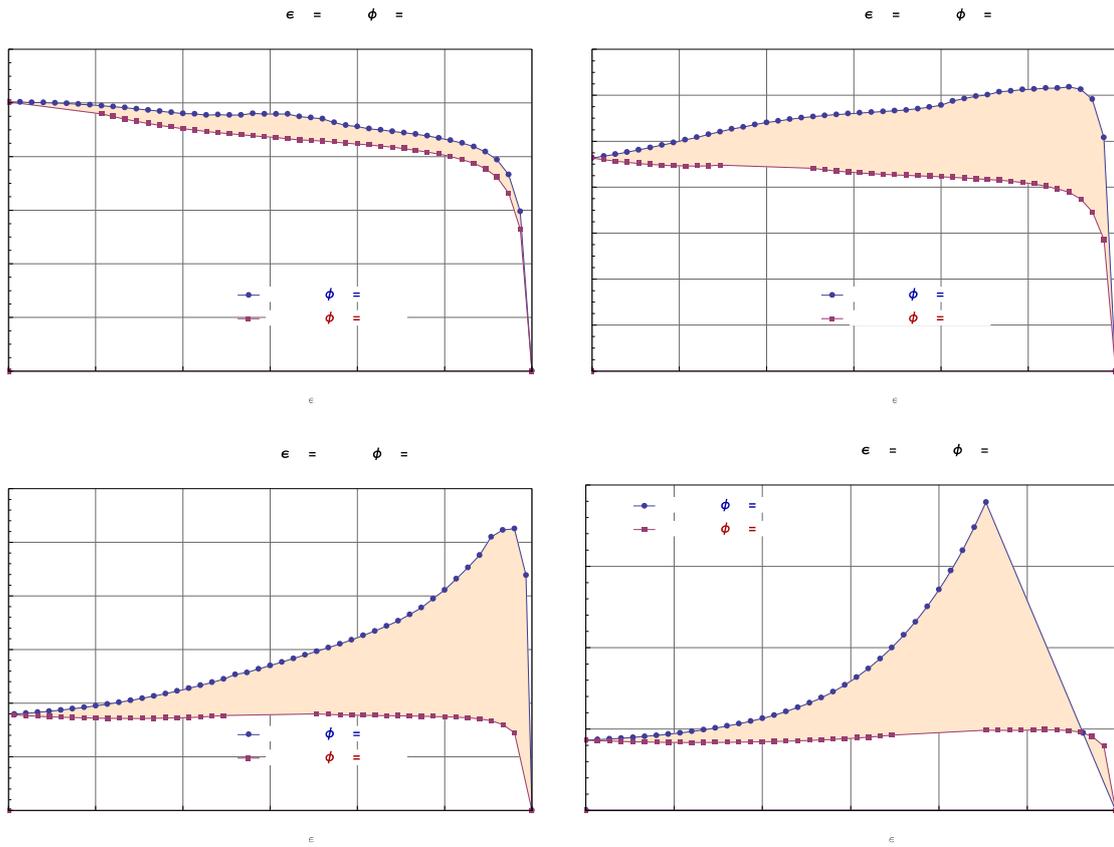


Figura 8 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8284 nei due semipiani misurati



Figura 9 Fotografia della superficie del campione 8285

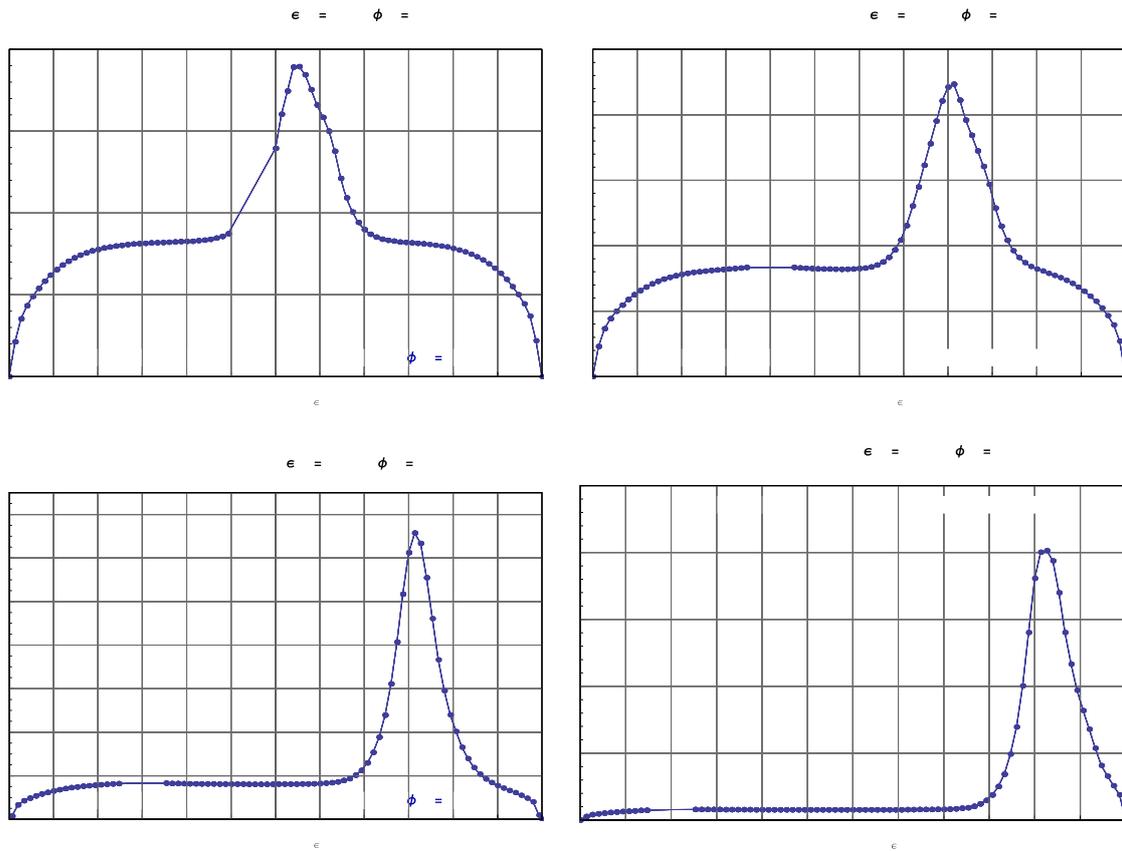


Figura 10 Coefficiente di luminanza del campione 8285

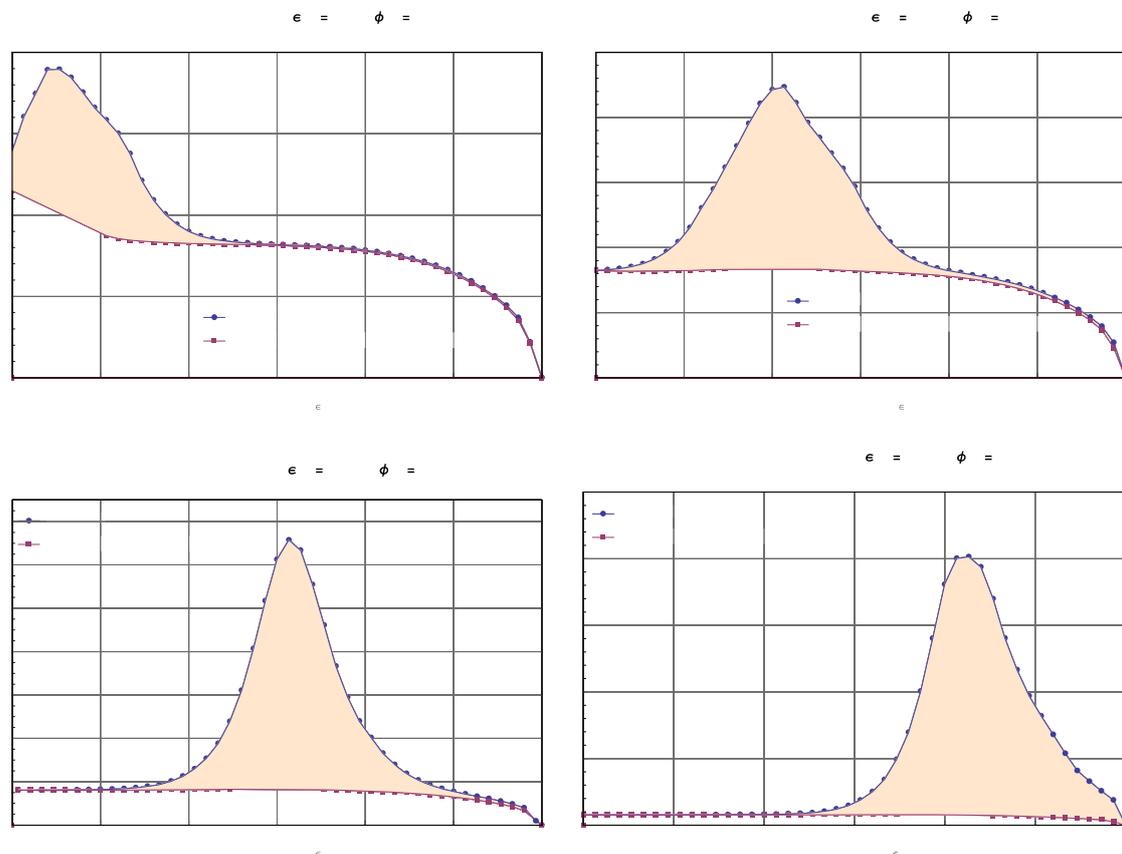


Figura 11 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8285



Figura 12 Fotografia della superficie del campione 8286

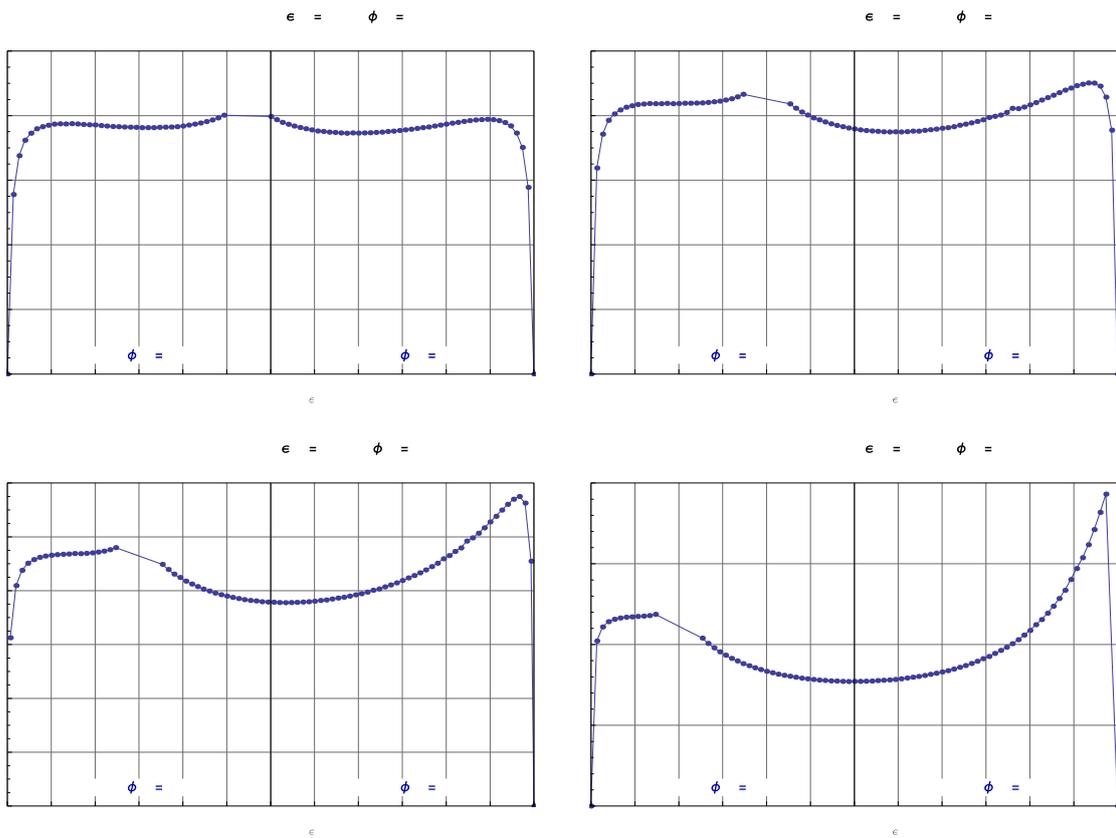


Figura 13 Coefficiente di luminanza del campione 8286

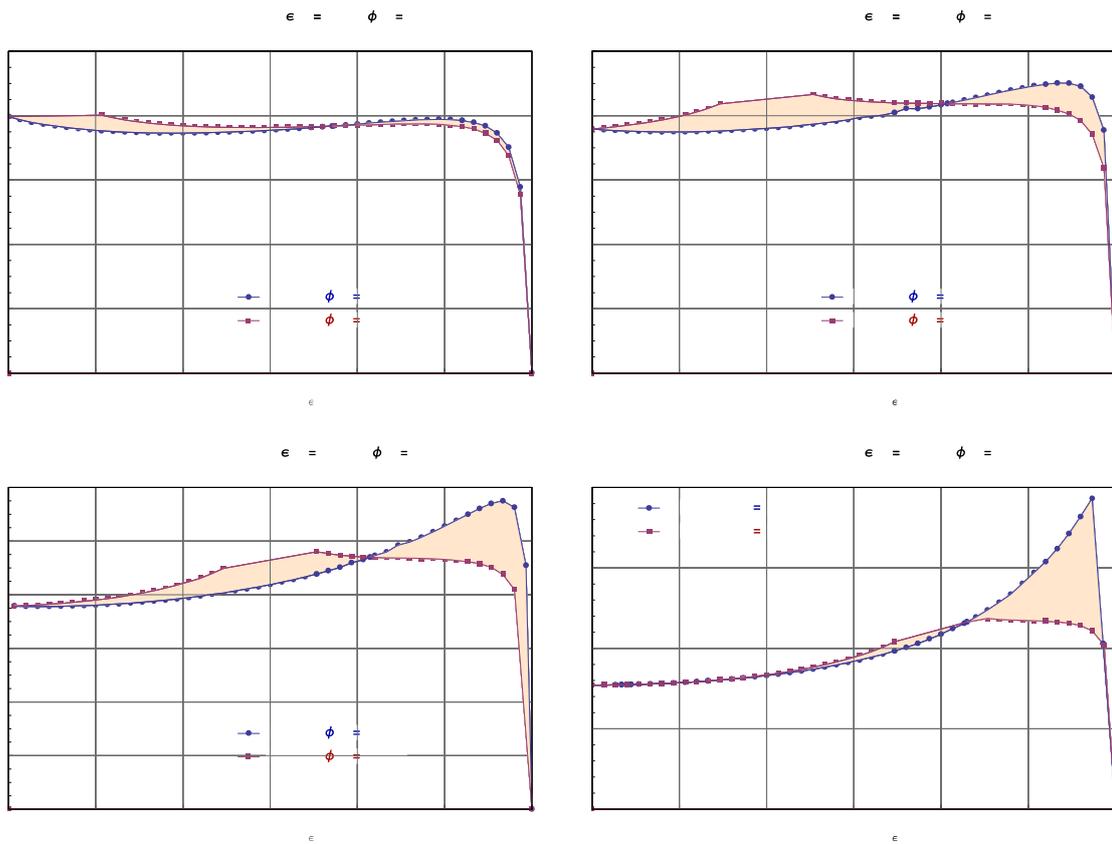


Figura 14 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8286 nei due semipiani misurati



Figura 15 Fotografia della superficie del campione 8287

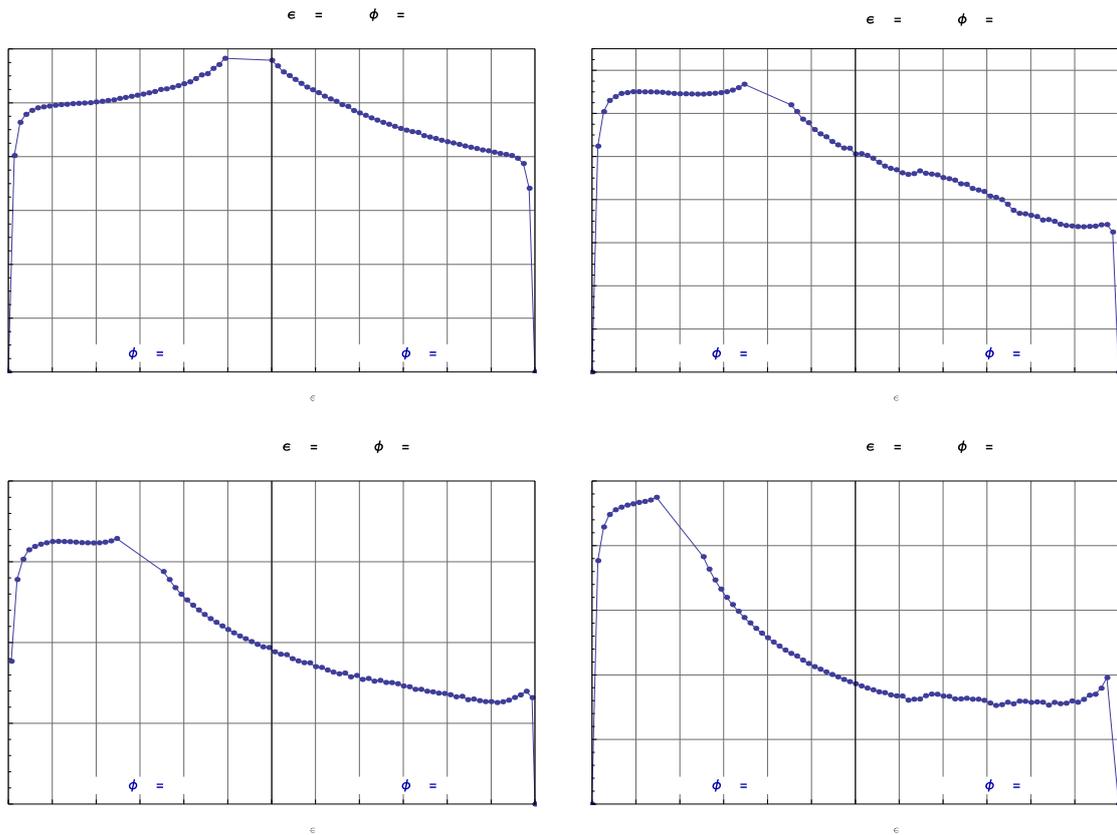


Figura 16 Coefficiente di luminanza del campione 8287

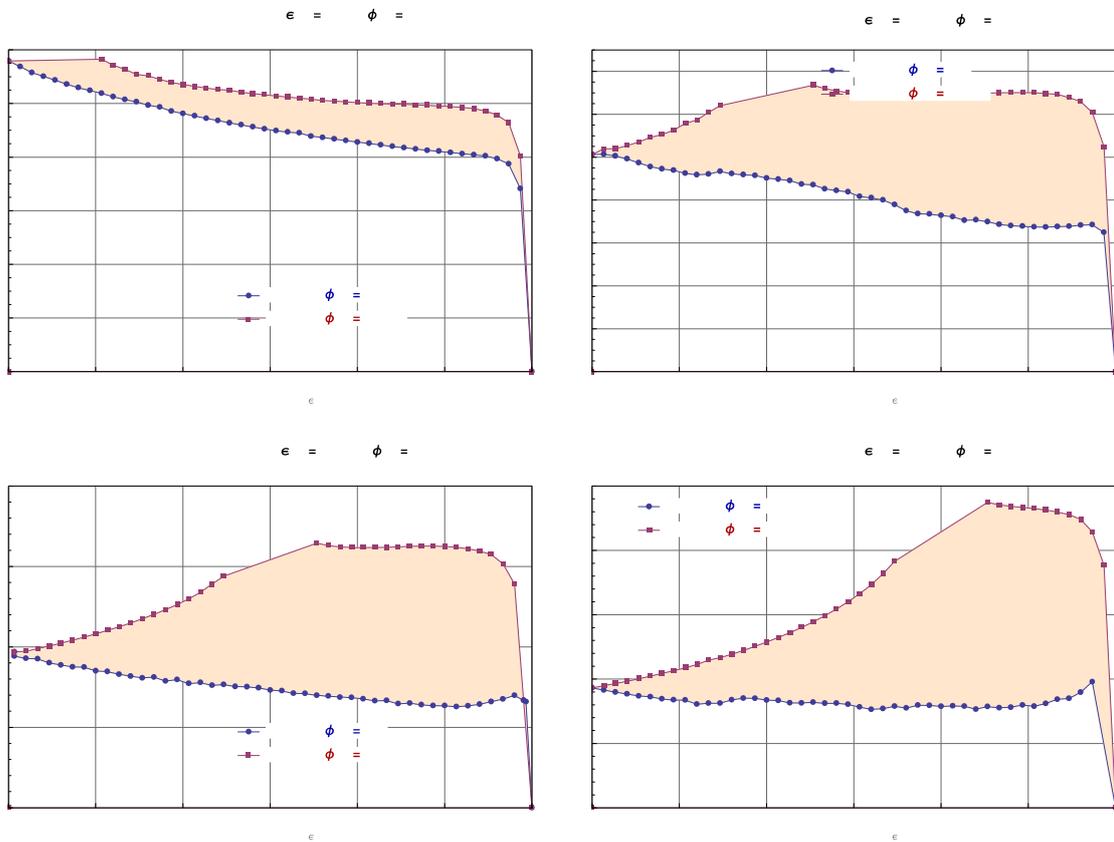


Figura 17 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8287 nei due semipiani misurati



Figura 18 Fotografia della superficie del campione 8288

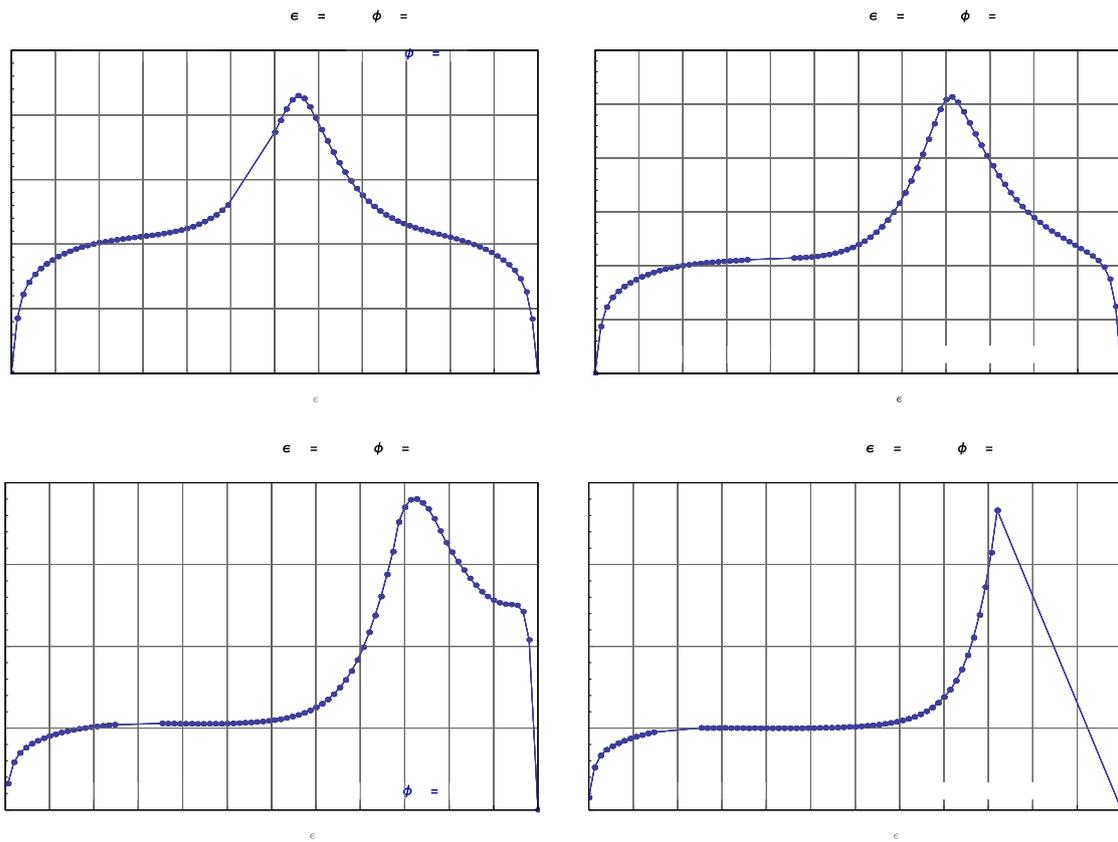


Figura 19 Coefficiente di luminanza del campione 8288

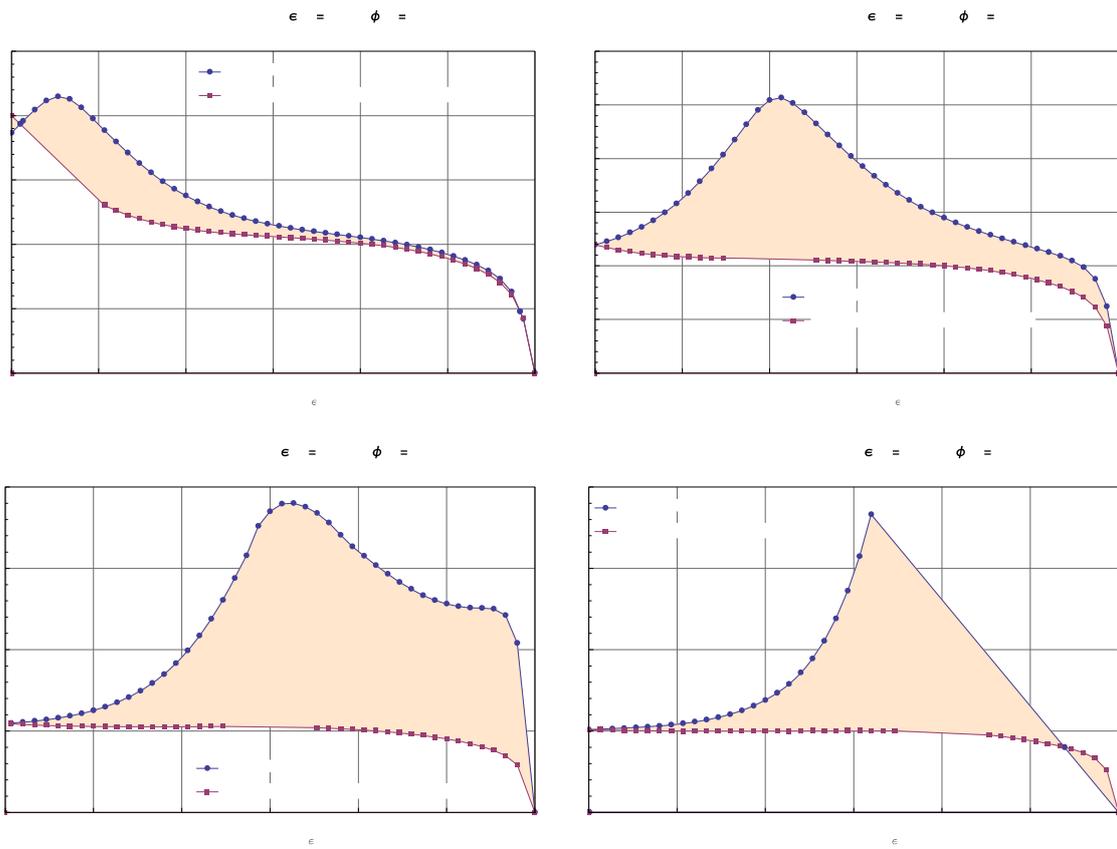


Figura 20 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8288



Figura 21 Fotografia della superficie del campione 8289

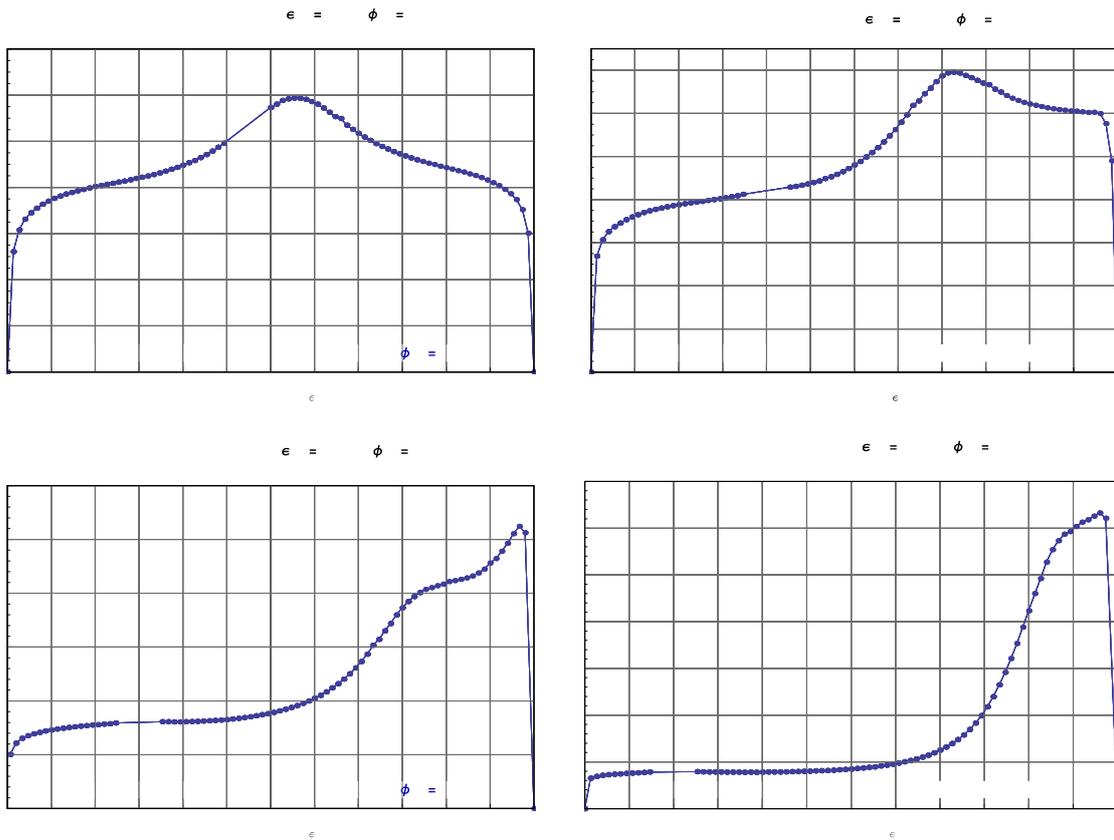


Figura 22 Coefficiente di luminanza del campione 8289

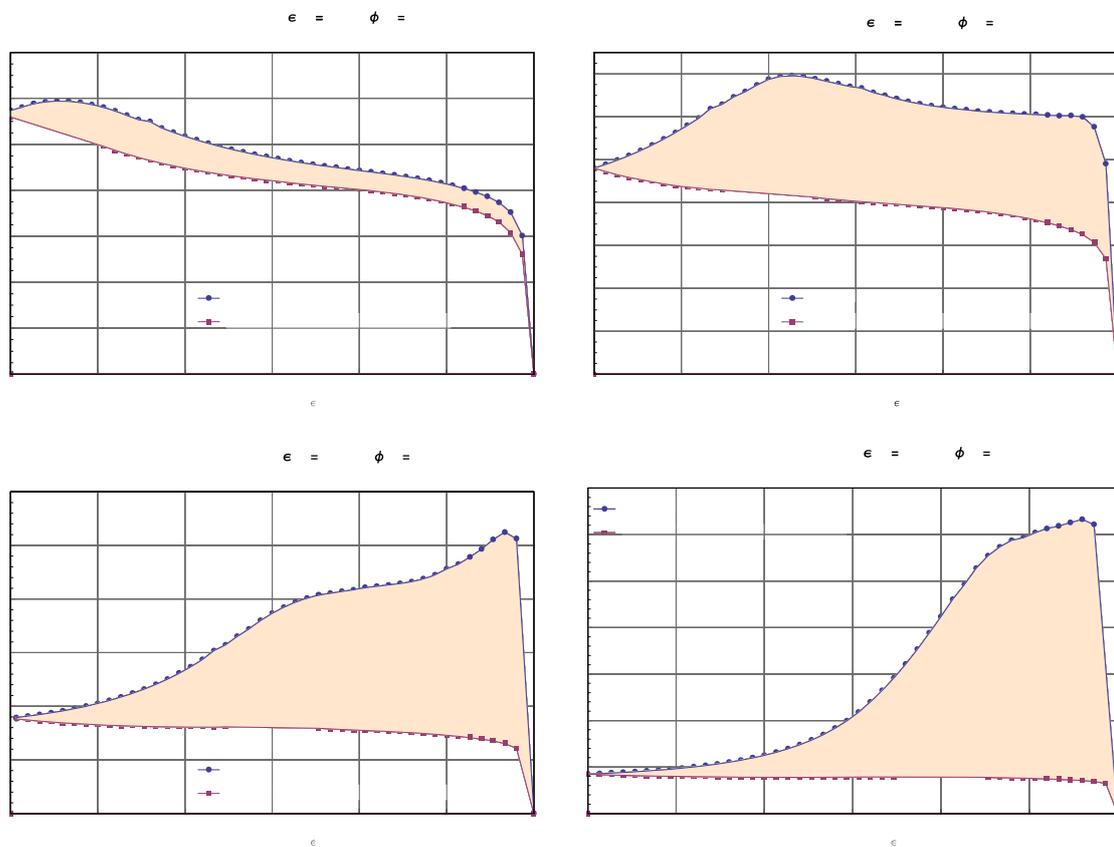


Figura 23 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8289



Figura 24 Fotografia della superficie del campione 8290

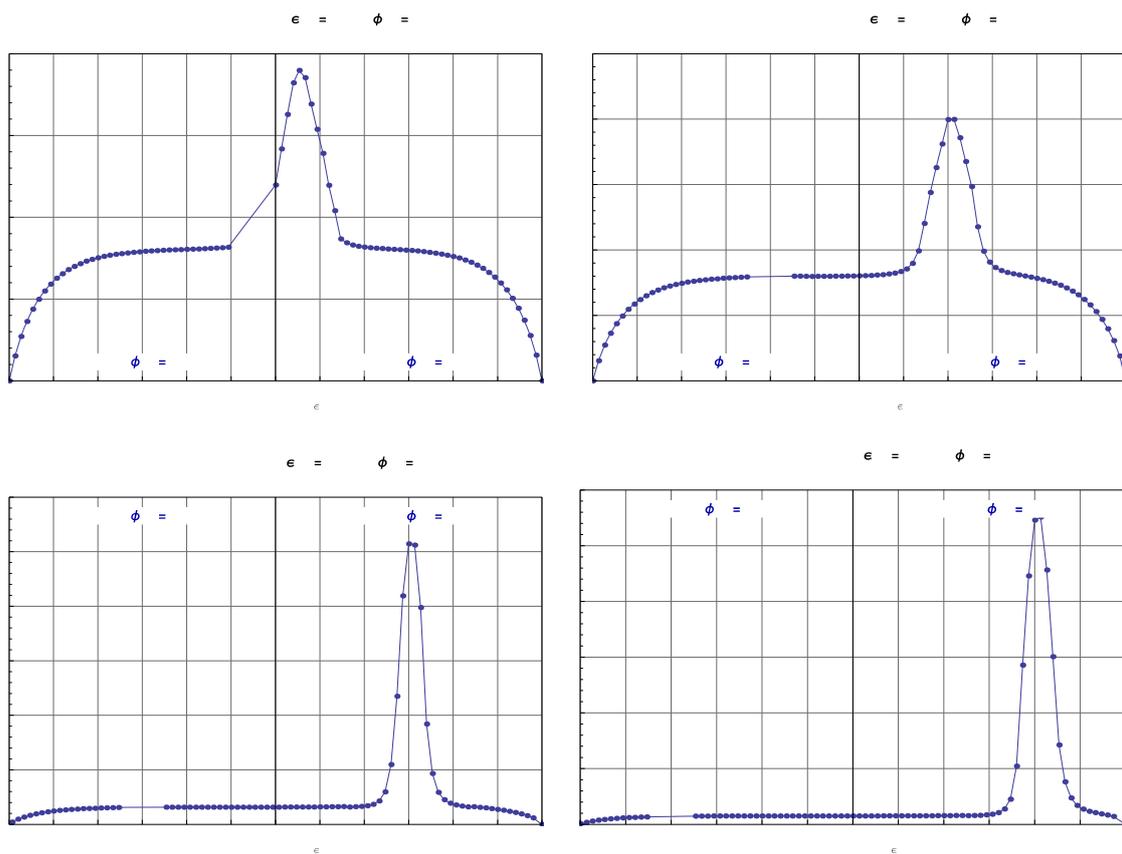


Figura 25 Coefficiente di luminanza del campione 8290

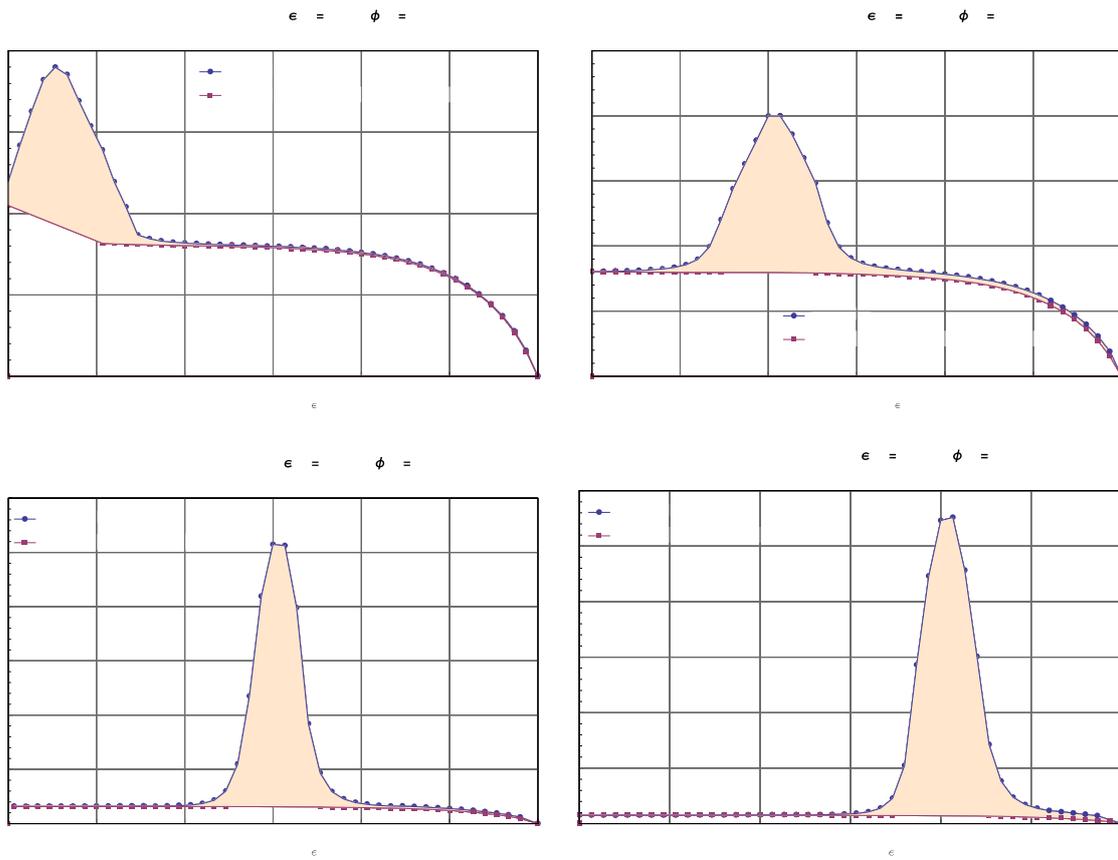


Figura 26 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8290



Figura 27 Fotografia della superficie del campione 8291

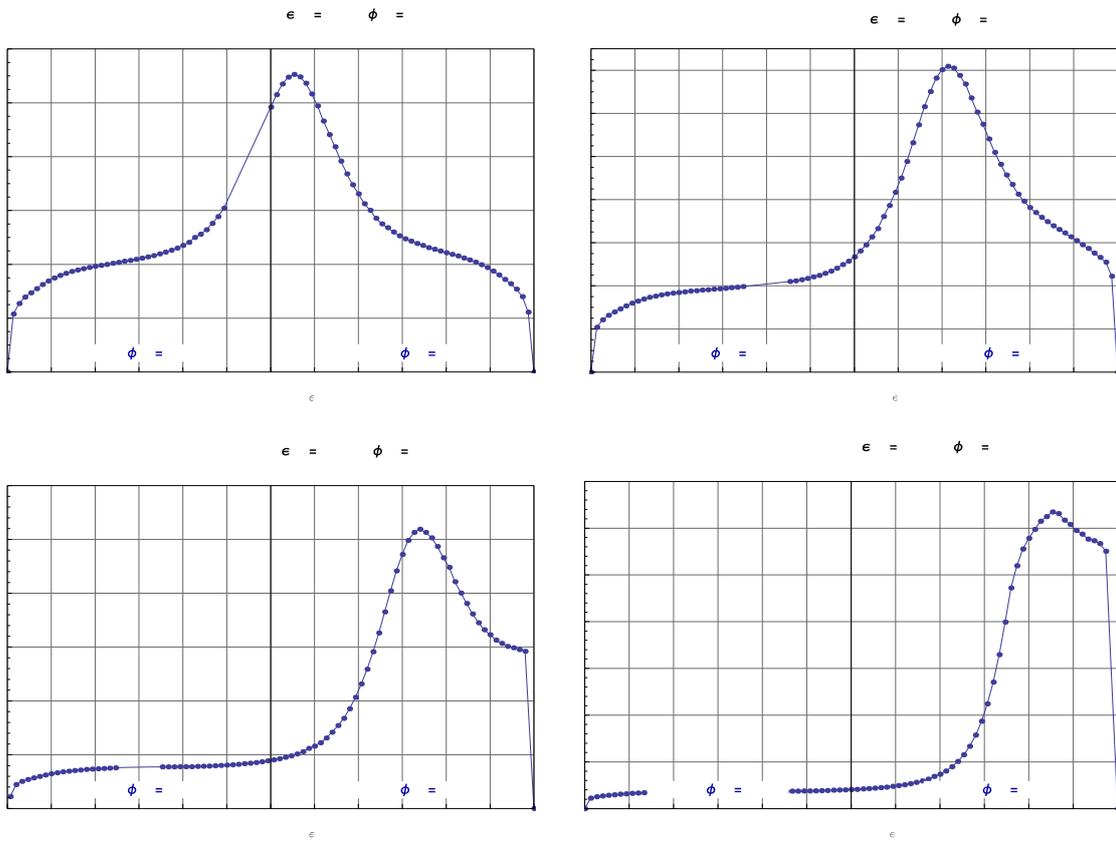


Figura 28 Coefficiente di luminanza del campione 8291

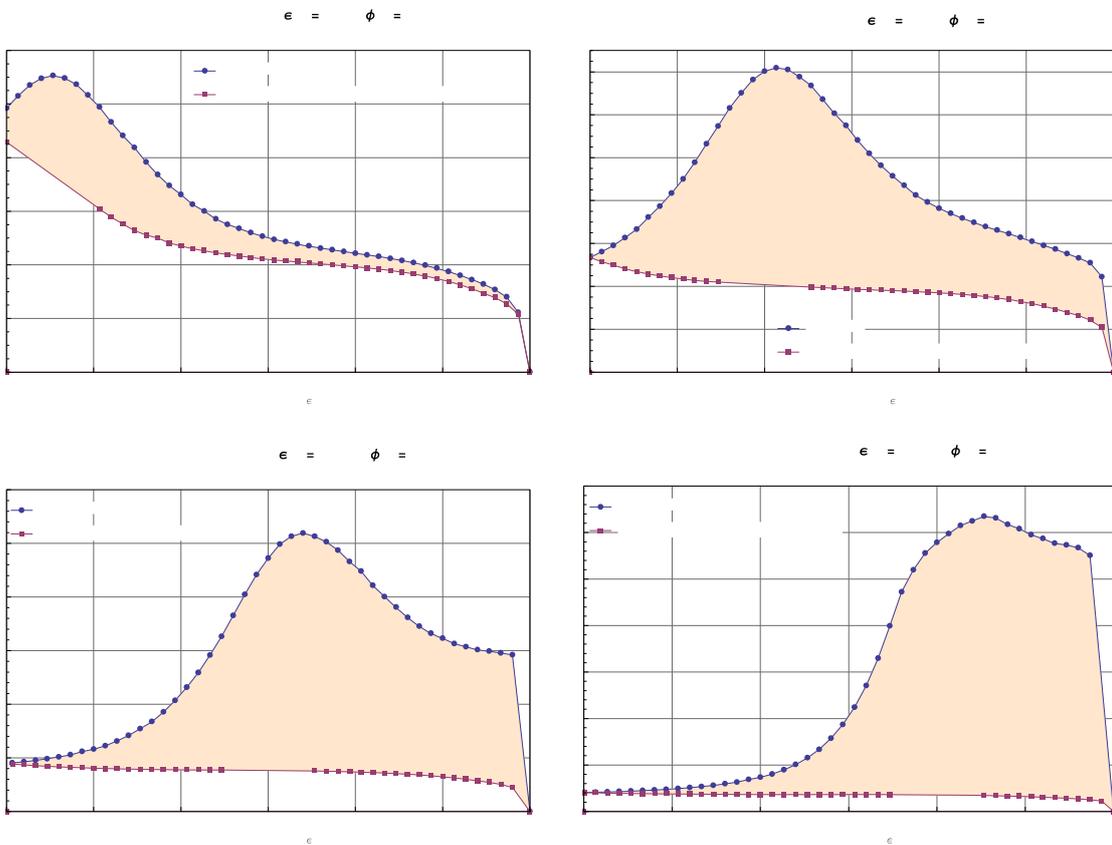


Figura 29 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8291



Figura 30 Fotografia della superficie del campione 8292

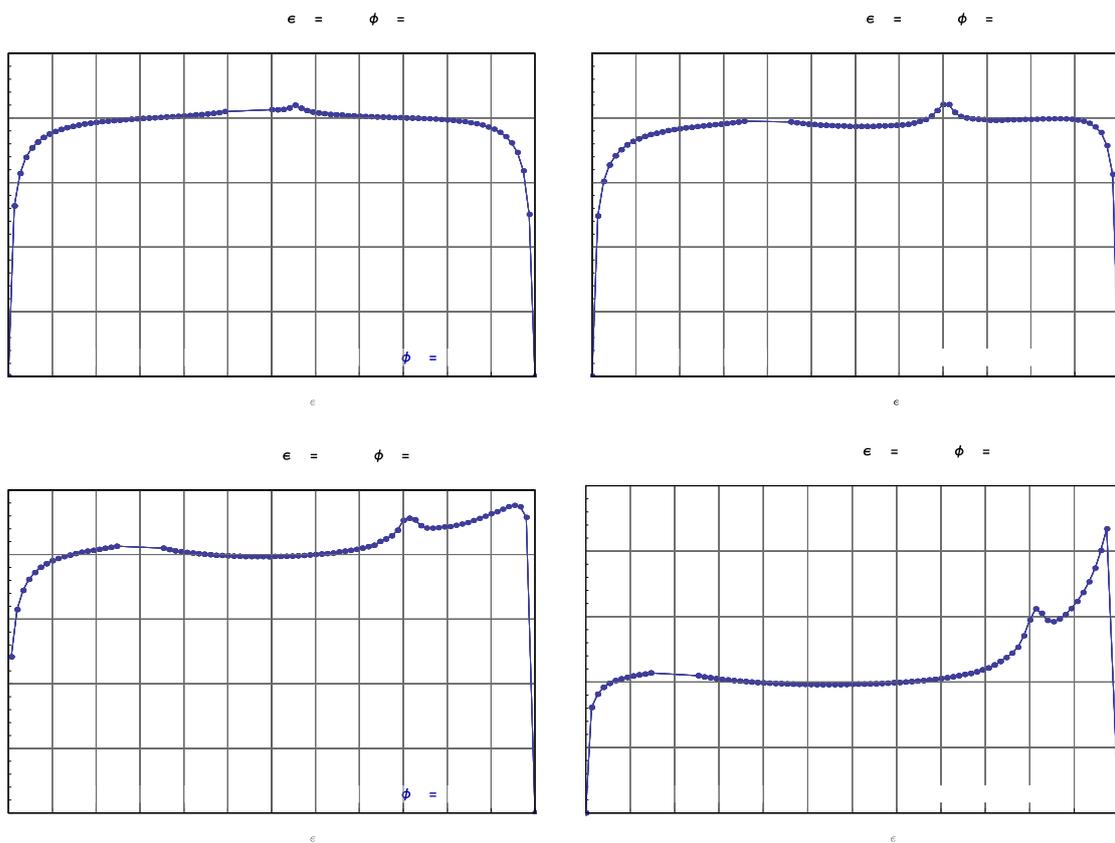


Figura 31 Coefficiente di luminanza del campione 8292

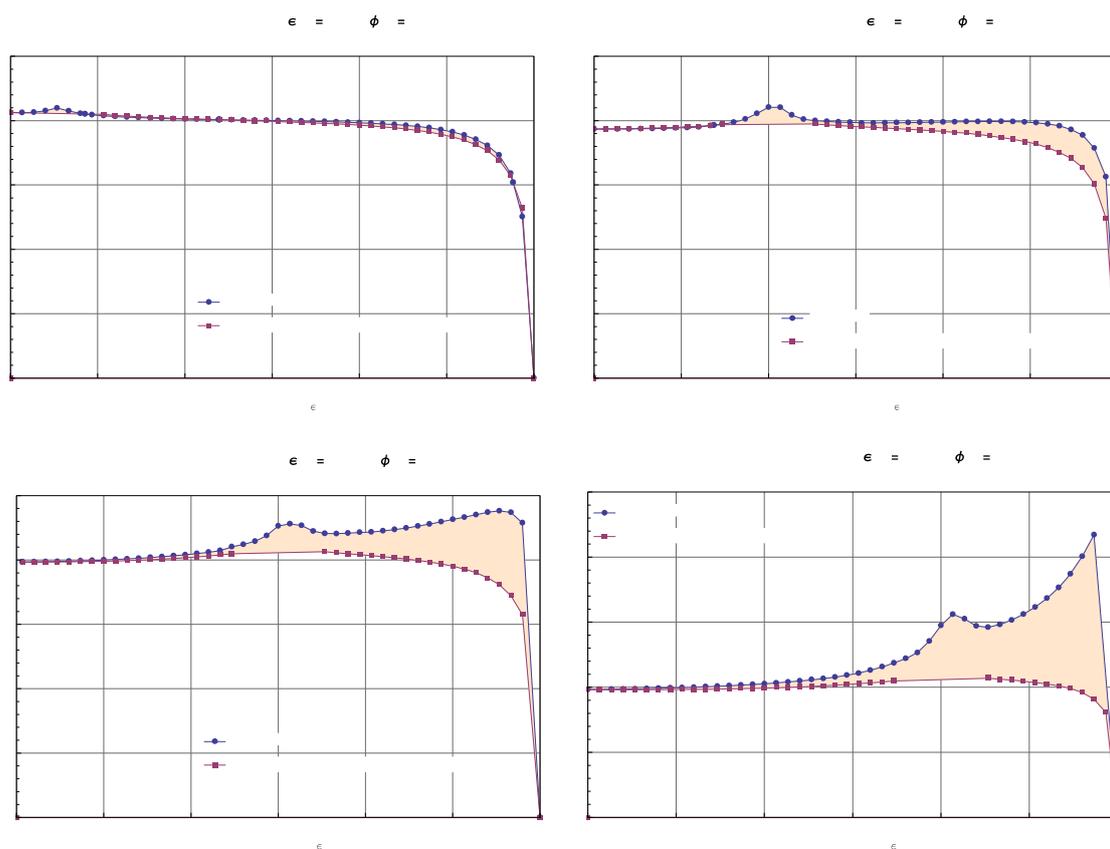


Figura 32 Componente regolare e componente diffusa del coefficiente di luminanza del campione 8292



Figura 33 Fotografia della superficie del campione 8293

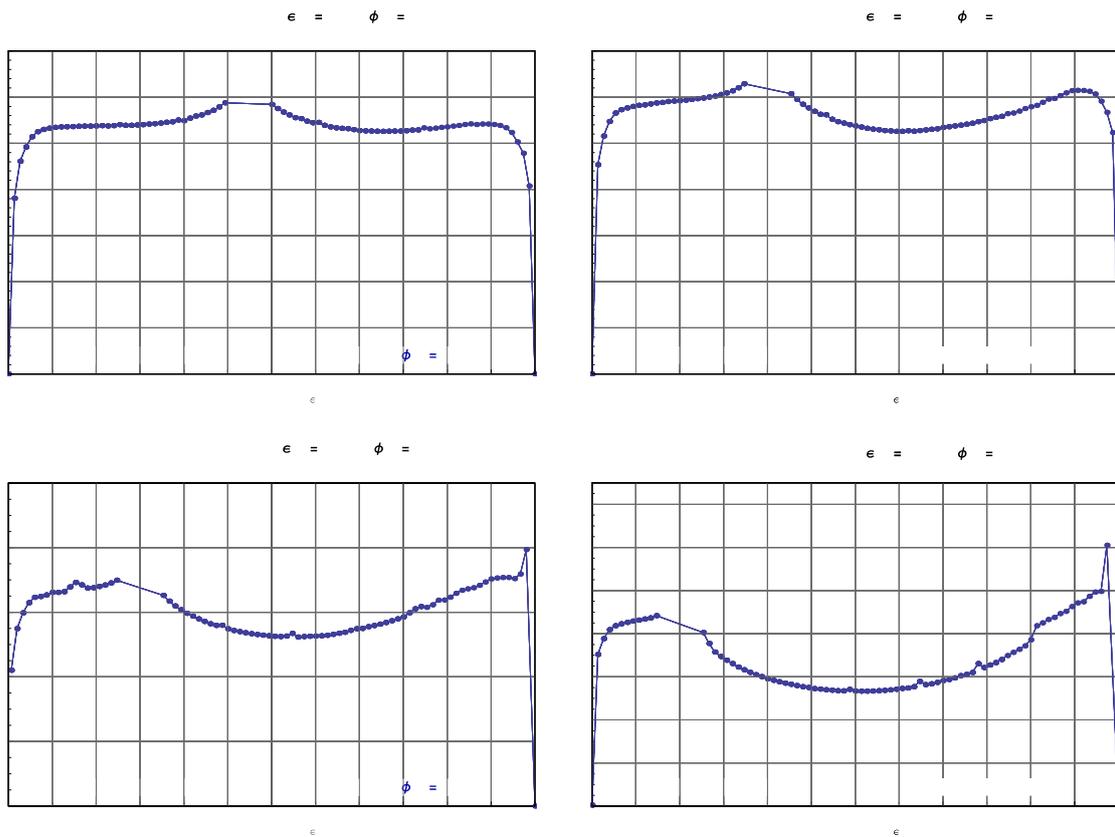


Figura 34 Coefficiente di luminanza del campione 8293

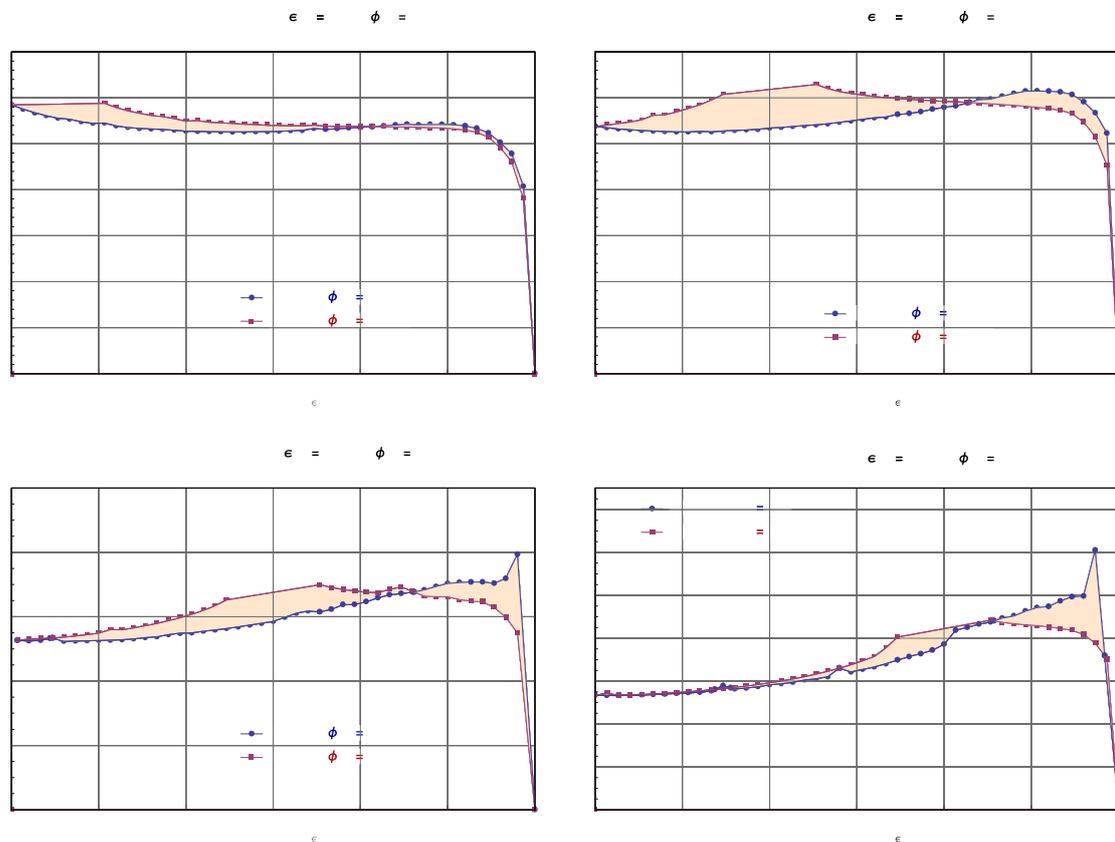


Figura 35 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8293 nei due semipiani misurati



Figura 36 Fotografia della superficie del campione 8294

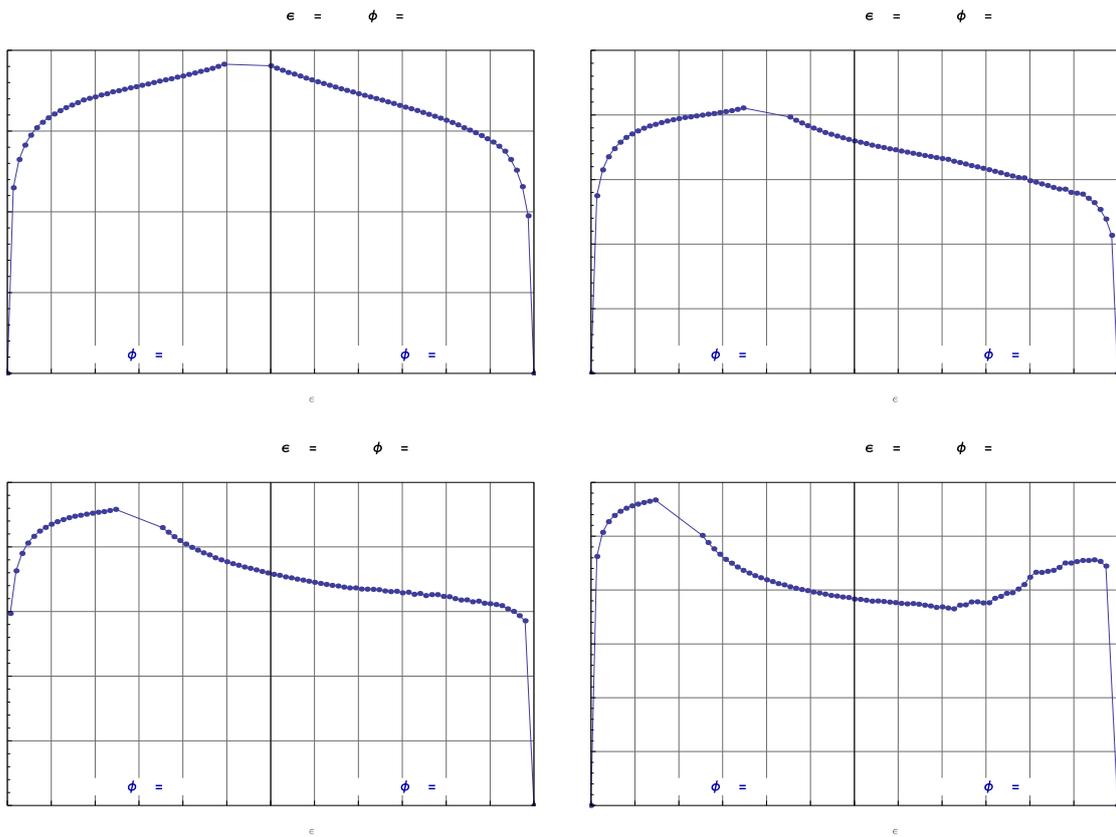


Figura 37 Coefficiente di luminanza del campione 8294

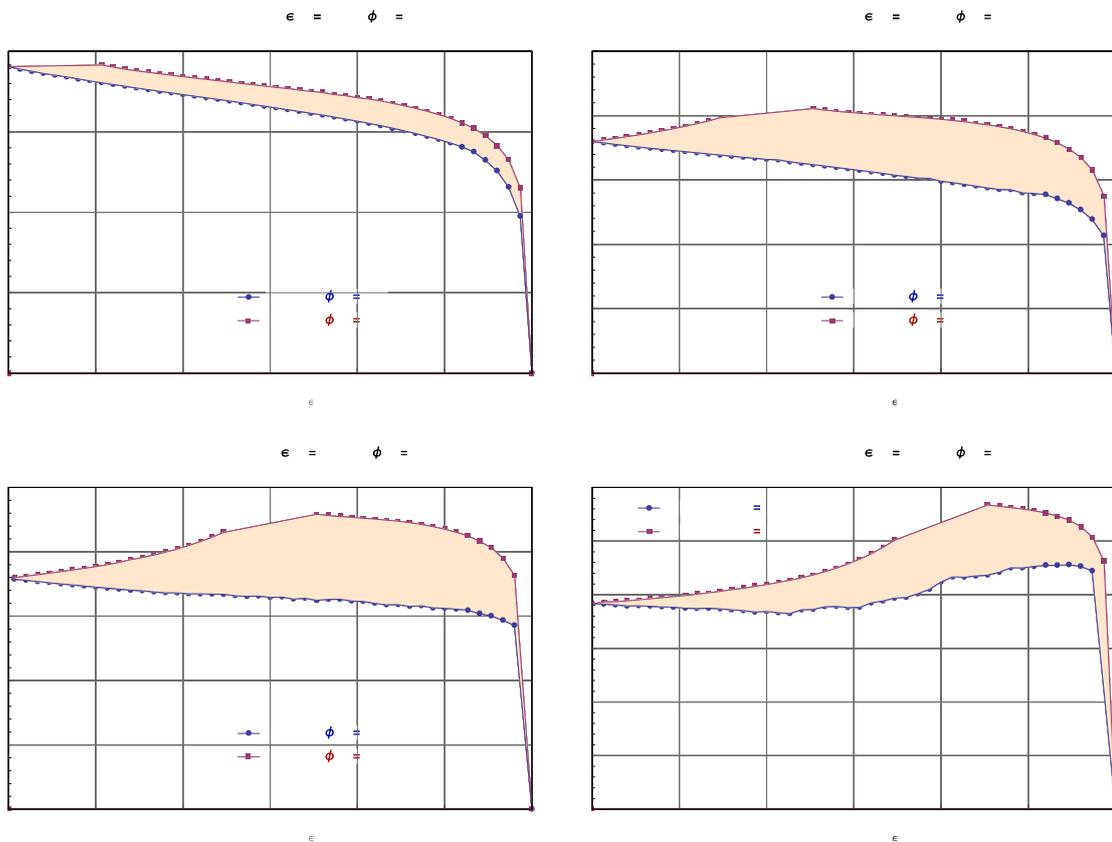


Figura 38 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8294 nei due semipiani misurati



Figura 39 Fotografia della superficie del campione 8295

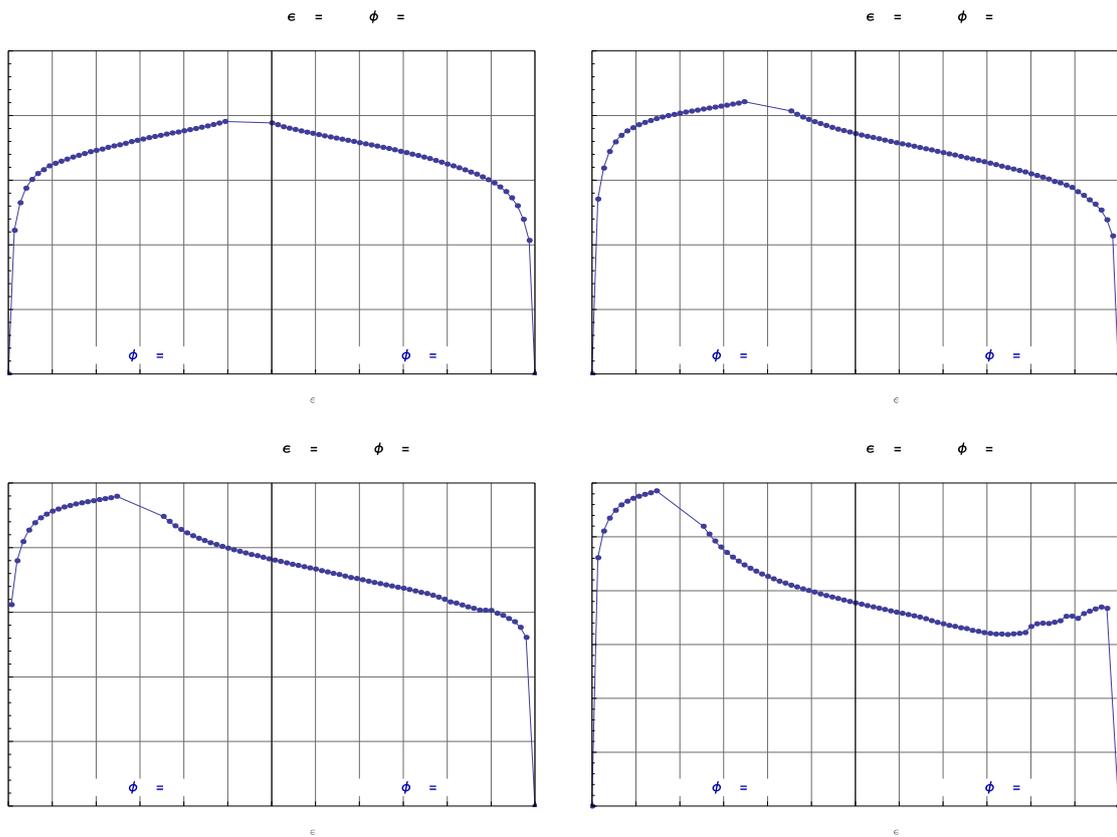


Figura 40 Coefficiente di luminanza del campione 8295

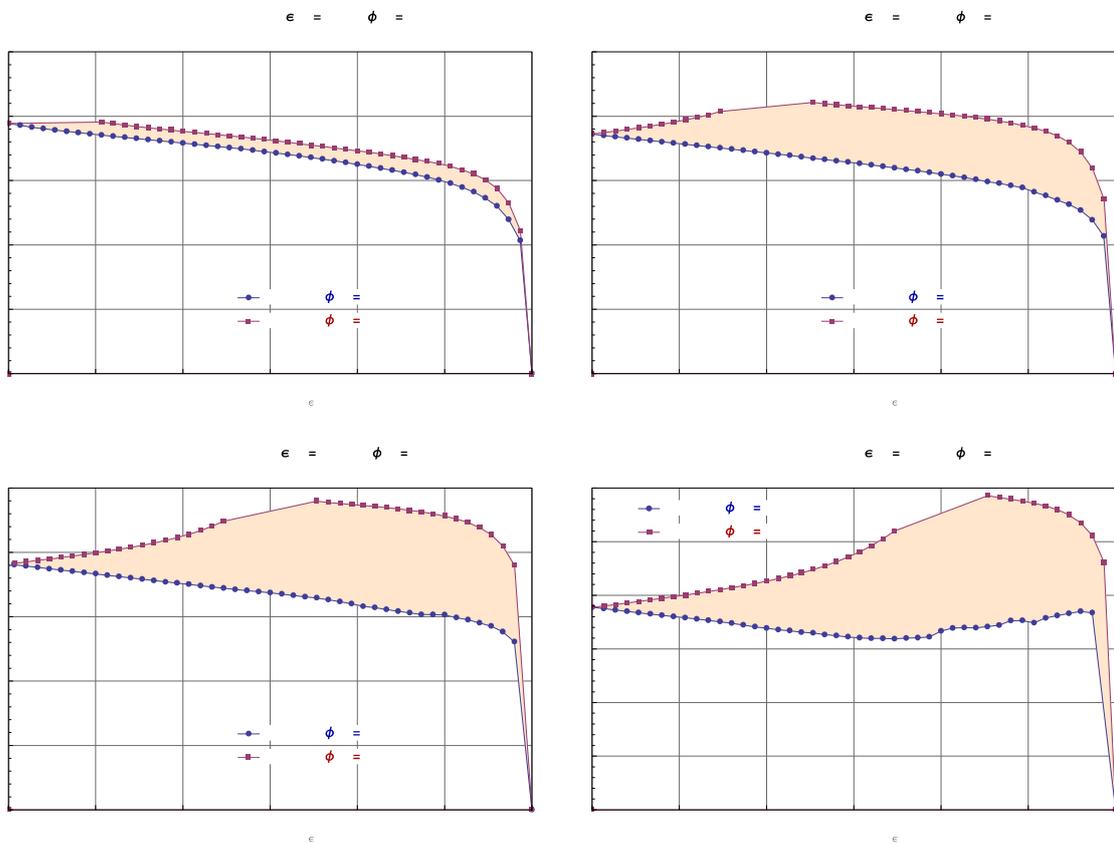


Figura 41 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8295 nei due semipiani misurati



Figura 42 Fotografia della superficie del campione 8296

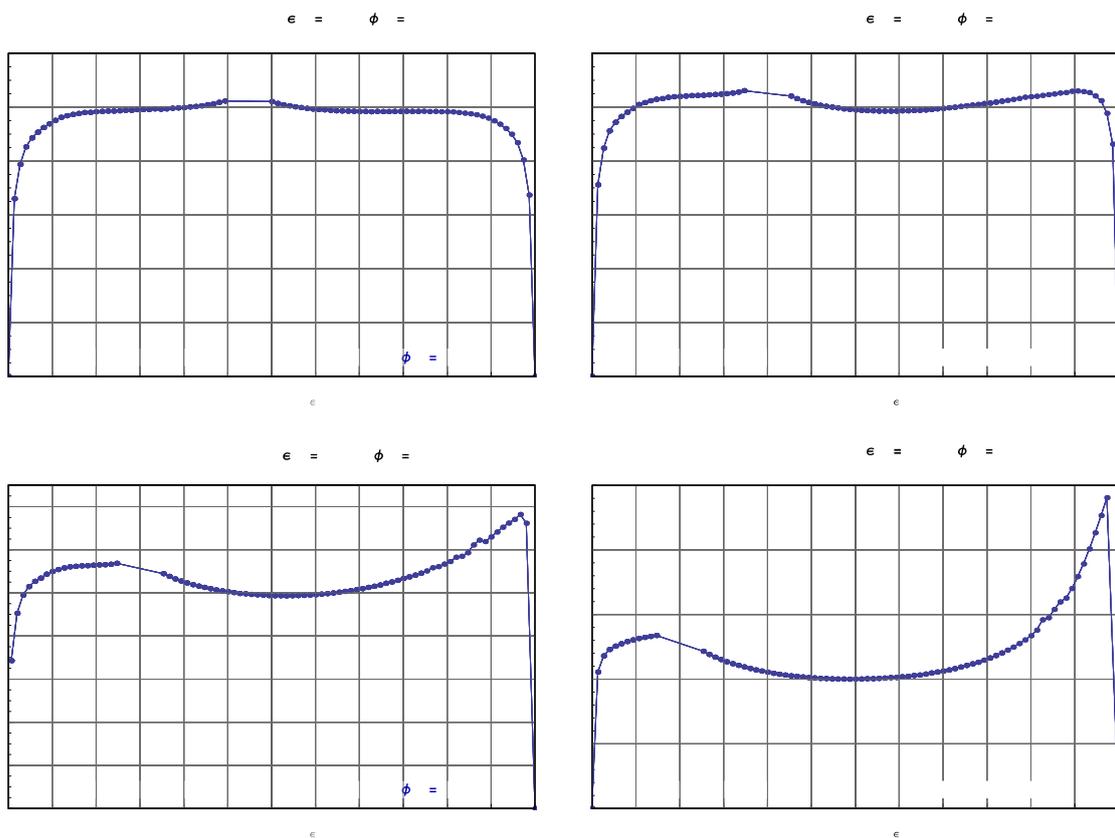


Figura 43 Coefficiente di luminanza del campione 8296

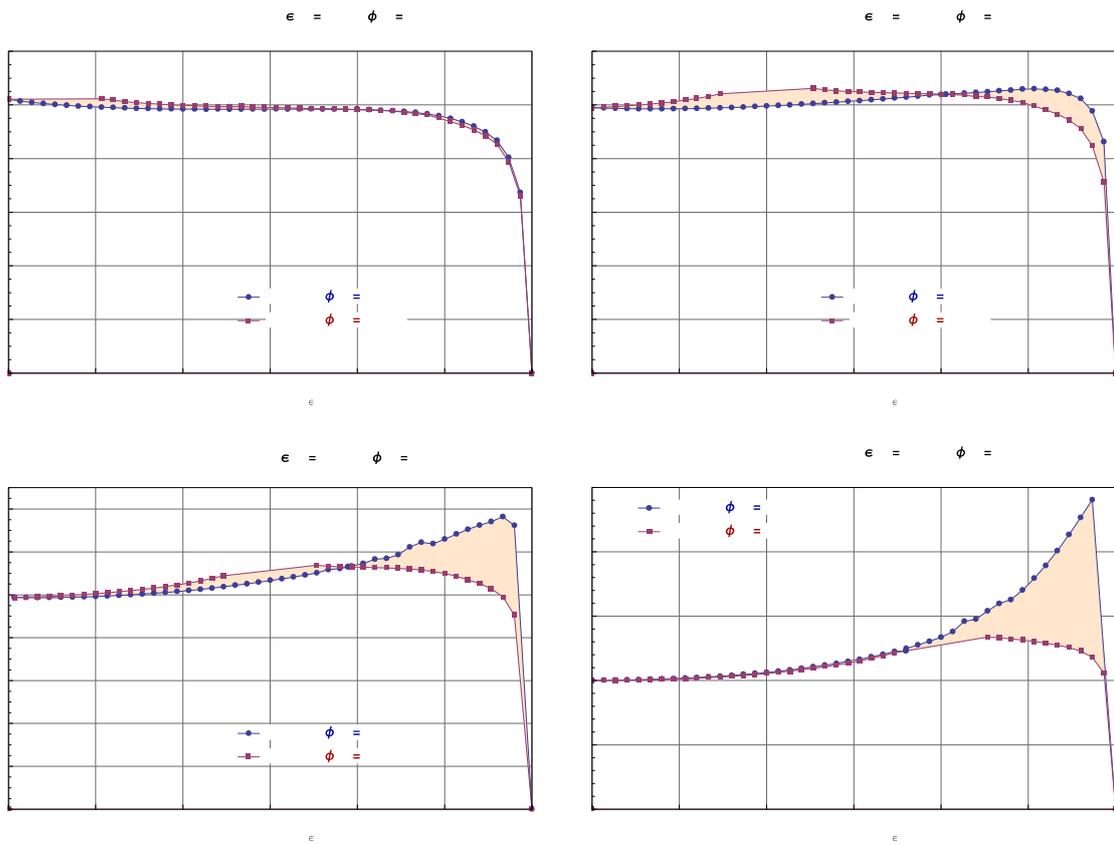


Figura 44 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8296 nei due semipiani misurati



Figura 45 Fotografia della superficie del campione 8297

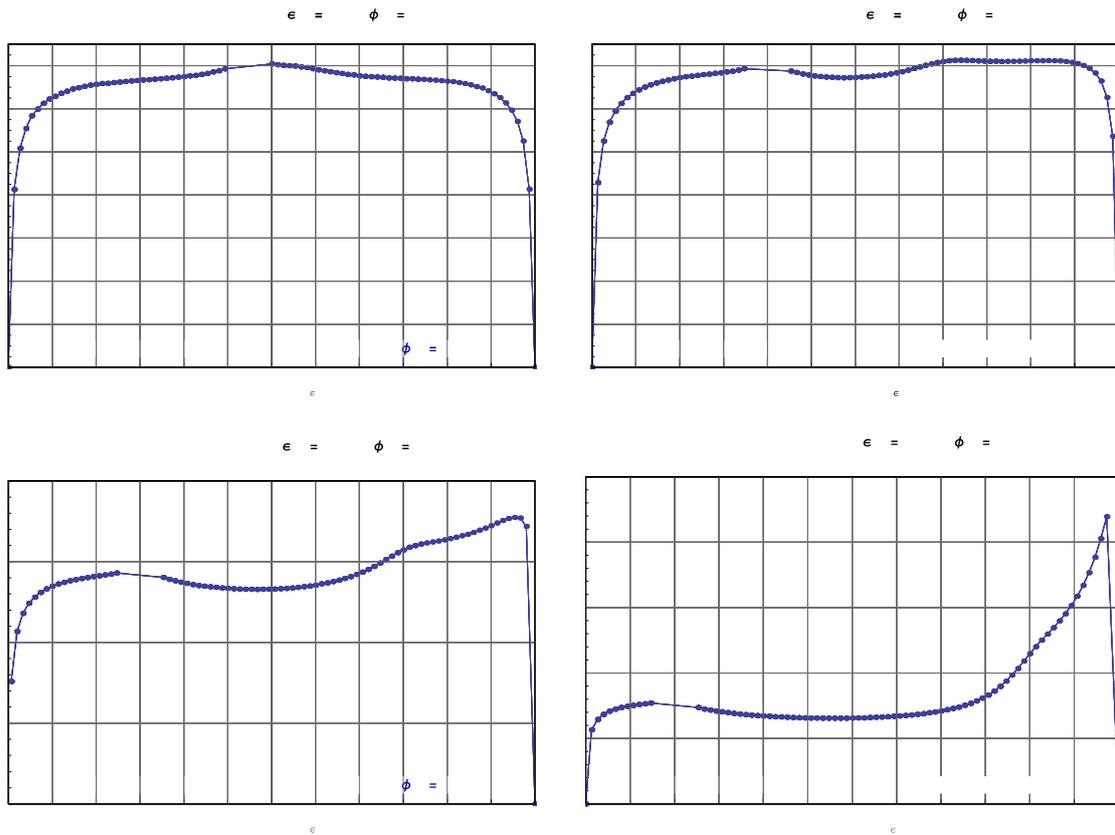


Figura 46 Coefficiente di luminanza del campione 8297

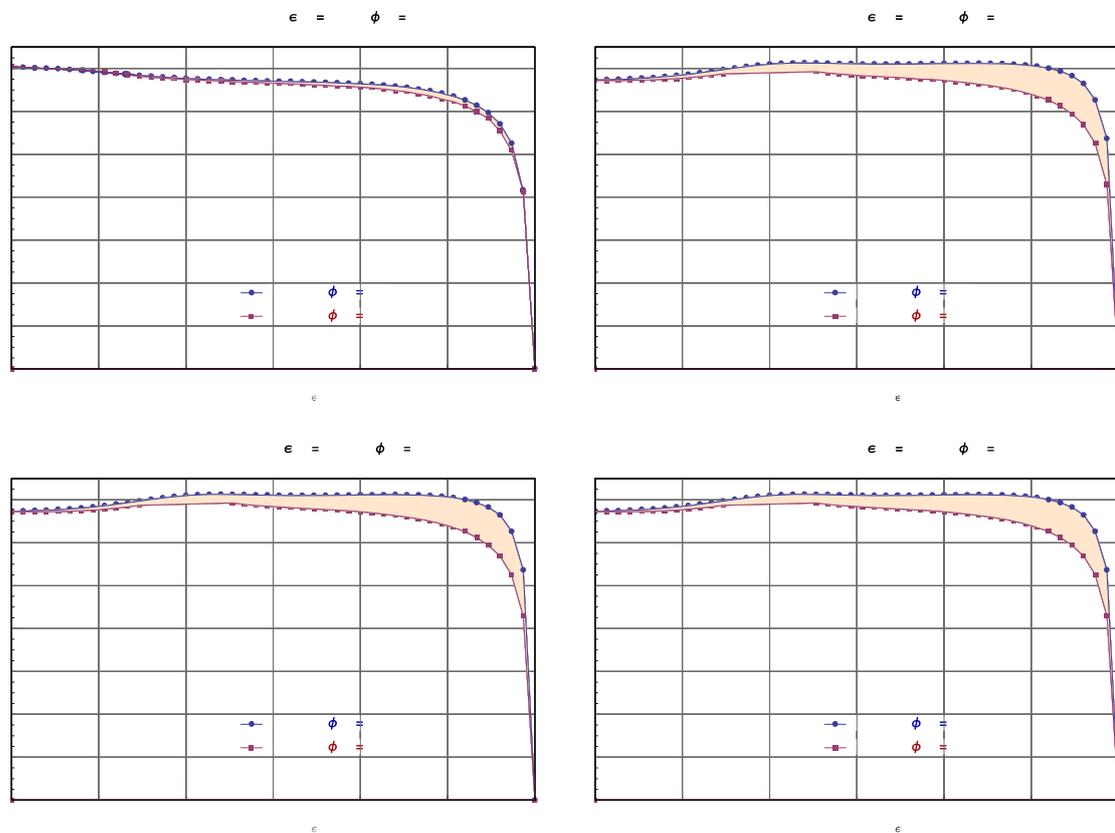


Figura 47 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8297 nei due semipiani misurati



Figura 48 Fotografia della superficie del campione 8298

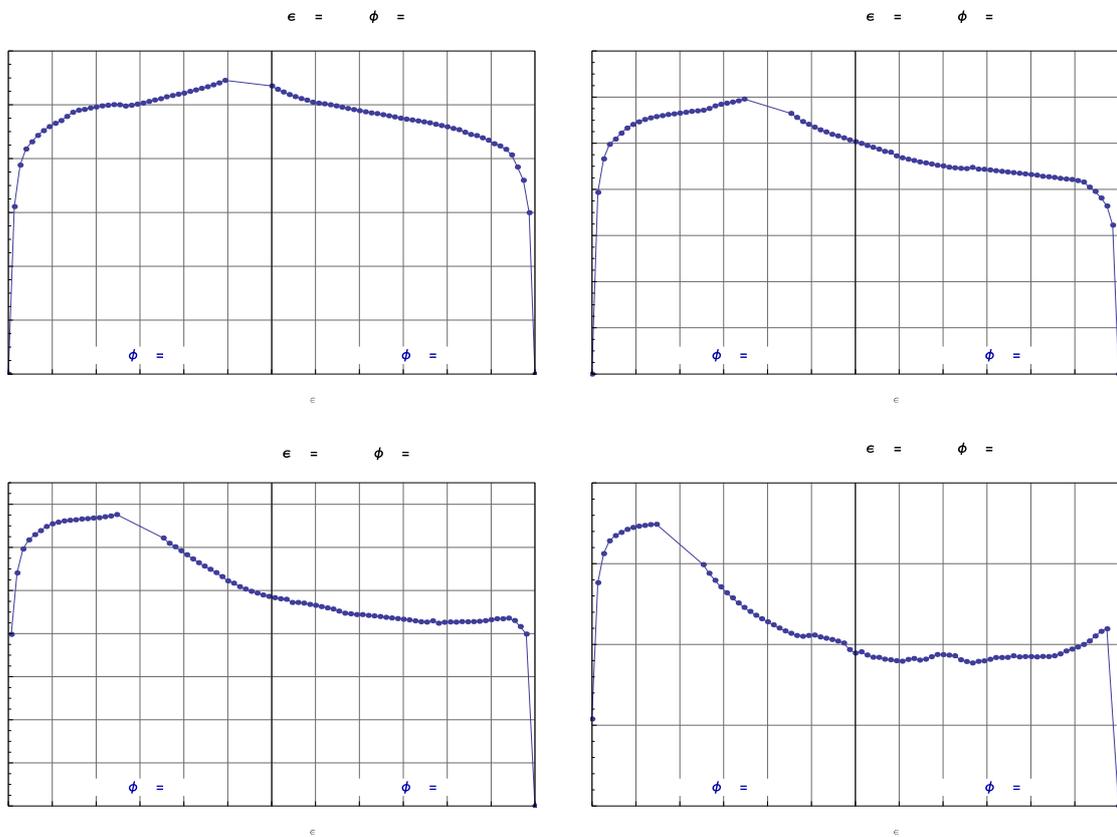


Figura 49 Coefficiente di luminanza del campione 8298

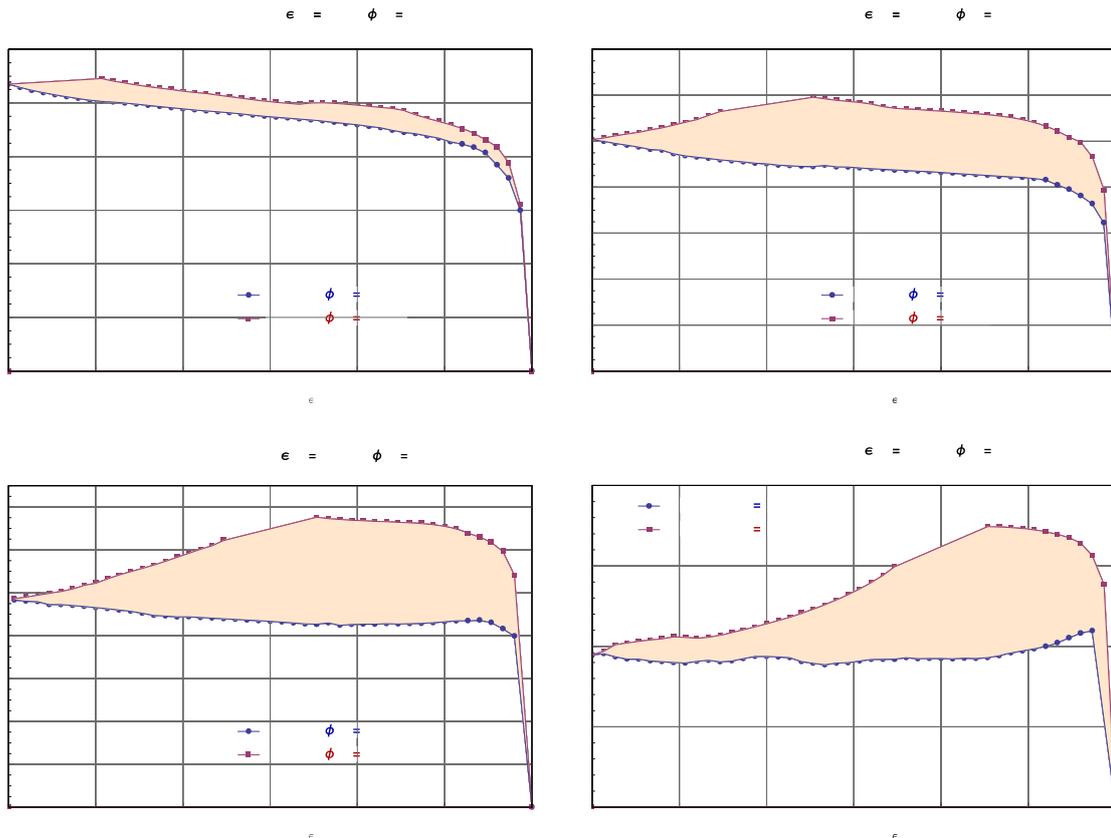


Figura 50 Confronto tra il coefficiente di luminanza del campione 8298 nei due semipiani misurati

2.4 Metodologia di simulazione e risultati

Dato valore del coefficiente di luminanza per tutte le direzioni di osservazione dello spazio, il fattore di riflessione direzionale-emisferico può essere calcolato, per la data direzione di incidenza, mediante la seguente integrazione:

$$\rho_{\epsilon_1, d} = \int_{\varphi_2=0}^{2\pi} \int_{\epsilon_2=0}^{\frac{\pi}{2}} q(\epsilon_1, \epsilon_2, \varphi_1, \varphi_2) \cos \epsilon_2 \sin \epsilon_2 d\epsilon_2 d\varphi_2$$

Essendo il coefficiente di luminanza misurato per direzioni specifiche, l'integrale viene in genere calcolato mediante integrazione numerica.

Nel nostro caso, dal momento che è stato misurato un solo piano, l'integrazione non può essere eseguita se non ricorrendo a delle approssimazioni.

Al fine di verificare, mediante confronto con la misurazione diretta del fattore di riflessione eseguita da ENEA, la possibilità di ottenere risultati attendibili per usi illuminotecnici anche con le sole misurazioni goniometriche limitate a un piano, è stata sviluppata la seguente procedura.

campioni essenzialmente lambertiani:

I valori misurati nel semipiano $\varphi_2 = 180^\circ$ vengono estesi allo spazio $90^\circ \leq \varphi_2 < 270^\circ$.

I valori misurati nel semipiano $\varphi_2 = 0^\circ$ vengono estesi allo spazio $0^\circ \leq \varphi_2 < 90^\circ$ e $270^\circ \leq \varphi_2 < 90^\circ$.

campioni con riflessione regolare presente:

la componente regolare è ben individuabile e viene integrata considerandola simmetrica rispetto all'asse individuato dalla direzione regolare. La rimanente componente (componente diffusa) viene integrata come nel caso dei campioni lambertiani.

campioni con riflessione prevalentemente direzionata nel semipiano della riflessione regolare:

la componente regolare è ben individuabile, ma ha una forma non simmetrica. La forma fino al picco, nel semipiano $\varphi_2 = 0^\circ$, viene usata come funzione peso applicata agli angoli azimutali per ridurre il valore di q , mantenuto costante nella forma. La rimanente componente (componente diffusa) viene integrata come nel caso dei campioni lambertiani.

campioni con riflessione prevalentemente direzionata nel semipiano di incidenza:

Come nel caso precedente ma considerando come riferimento il semipiano $\varphi_2 = 180^\circ$.

Ovviamente la suddivisione tra le due componenti (regolare e diffusa) è stata in qualche modo arbitraria e rappresenta una delle approssimazioni del metodo analizzato. I risultati sono riportati in Tabella 2. Per confronto con misure eseguite in ENEA e per esperienza con campioni, misurati in altre occasioni, si ritiene che l'incertezza dell'algoritmo proposto sia compresa tra il 5 e il 20 % in funzione del tipo di campione.

In Tabella 2 per ogni campione e per ogni direzione di incidenza sono riportati i valori totali del fattore di riflessione direzionale-emisferico e quello riferito alla sola componente diffusa. Inoltre per evidenziare l'importanza della componente regolare all'aumentare dell'angolo di incidenza viene anche riportato il rapporto diffuso/totale.

Tabella 2 Fattore di riflessione direzionale – emisferico ottenuto delle simulazioni

Numero campione	Angolo di incidenza											
	8°			30°			45°			60°		
	Totale	Diffuso	Rapporto	Totale	Diffuso	Rapporto	Totale	Diffuso	Rapporto	Totale	Diffuso	Rapporto
8284	0,278	0,274	0,988	0,284	0,270	0,951	0,292	0,275	0,940	- -	0,282	0,905
8285	0,505	0,497	0,983	0,515	0,492	0,955	0,529	0,491	0,928	0,566	0,470	0,832
8286	0,242	0,242	1,000	0,260	0,254	0,975	0,278	0,257	0,924	0,305	0,269	0,885
8287	0,321	0,311	0,970	0,330	0,319	0,965	0,337	0,322	0,953	0,349	0,343	0,982
8288	0,346	0,339	0,980	0,350	0,319	0,912	0,362	0,319	0,882	- -	0,306	0,844
8289	0,275	0,269	0,980	0,277	0,252	0,911	0,297	0,247	0,832	0,350	0,245	0,699
8290	0,482	0,478	0,992	0,490	0,470	0,959	0,504	0,466	0,925	0,524	0,446	0,851
8291	0,145	0,140	0,965	0,146	0,121	0,827	0,162	0,117	0,722	0,205	0,112	0,545
8292	0,621	0,621	1,000	0,623	0,620	0,996	0,634	0,632	0,996	0,646	0,639	0,989
8293	0,171	0,170	0,994	0,183	0,169	0,920	0,198	0,181	0,914	0,221	0,199	0,904
8294	0,548	0,543	0,992	0,576	0,567	0,985	0,617	0,588	0,952	0,700	0,628	0,898
8295	0,559	0,556	0,994	0,604	0,570	0,943	0,654	0,601	0,919	0,696	0,606	0,872
8296	0,309	0,309	0,999	0,322	0,311	0,965	0,341	0,319	0,937	0,365	0,344	0,943
8297	0,416	0,416	0,999	0,426	0,422	0,992	0,441	0,432	0,980	0,470	0,443	0,943
8298	0,313	0,310	0,991	0,329	0,319	0,970	0,351	0,319	0,909	0,382	0,325	0,851

3 Conclusioni

È stata condotta una campagna sperimentale di misurazione della funzione di riflessione bi-direzionale di 15 di campioni di materiali per applicazioni in edilizia. Le tipologie di prodotto includono: rivestimenti elastomerici, membrane bituminose, gres porcellanato, cotto, materiali lapidei.

In questa prima fase, tendente a identificare le principali caratteristiche per tipologia di prodotto, la misura del fattore di riflessione bi-direzionale ha considerato 4 angoli di incidenza (8°, 30°, 45° e 60°) e il piano di diffusione della radiazione comprendente la direzione di incidenza, in modo da evidenziare il cambio di comportamento (da diffuso a speculare) all'aumentare dell'inclinazione dei raggi solari con un numero relativamente ridotto di misure e considerando esclusivamente la radiazione visibile.

In base a questi risultati sperimentali si sono costruite delle ipotesi di curve angolari complete per ogni campione misurato. Per ottenere queste curve, oltre ai risultati di ENEA sul fattore di riflessione globale ottenuto mediante misurazioni con sfera integratrice, è stata applicata una metodologia semplificata di estrapolazione e una corretta di integrazione dei dati spaziali.

Dalle curve così ottenute sono stati calcolati i valori del fattore di riflessione diffuso e speculare al variare dell'angolo di incidenza, permettendo una prima classificazione delle caratteristiche ottiche dei campioni.

In una seconda fase verranno confrontati i risultati della simulazione con misurazioni complete in modo da stimare l'accuratezza dell'approccio ed estendere le possibilità della simulazione a qualsiasi tipologia di prodotto e con un numero ragionevolmente ridotto di misure iniziali, alla portata anche di laboratori industriali. Inoltre sarà opportuno considerare il comportamento anche nella regione spettrale del vicino infrarosso.

Dai risultati ottenuti e per ottenere incertezze minori del 10% nel calcolo del fattore di riflessione, si ritiene necessaria la misurazione in almeno due piani azimutali, con l'angolo del secondo determinato in base ai risultati ottenuti nel primo. Al contrario la misura diretta del fattore di riflessione permetterebbe di ottimizzare la ricostruzione delle proprietà di riflessione nello spazio del campione, operando una sorta di taratura sull'algoritmo di ricostruzione.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] CIE Publication N. 44, "Absolute Methods for Reflection Measurements", Commission International d'Eclairage, Paris 1979.
- [2] CIE Publication N. 17.4, CEI Publication 50(845) - "International Lighting Vocabulary", Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale, Genève 1987.
- [3] G. Rossi, G. Fusco, P. Soardo, "Photometric Characterization of Materials Through Goniorelectometry" in CIE Proceedings 23rd Session, New Delhi 1995, pp. 91-94.
- [4] G. Rossi, P. Soardo, "A new goniorelectometer" in CIE Proceedings 22nd Session, Melbourne 1991, pp 59-60.
- [5] W. Erb, "Computer controlled goniorelectometer for the measurement of spectral reflection characteristics", Applied Optics. Vol. 19 (22.1980), pp. 3789-3794.

Appendice: Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Ing. Giuseppe Rossi, è dirigente Tecnologo all'INRIM con più di 32 anni di esperienza in metrologia. Le sue principali attività di ricerca includono la fotometria, la caratterizzazione radiometrica dei materiali e degli apparecchi di illuminazione, la colorimetria e gli aspetti metrologici legati all'illuminotecnica.

Ha attivamente partecipato e coordinati molti programmi di ricerca riguardanti le condizioni di visibilità stradale, la caratterizzazione degli impianti di illuminazione sul campo, la caratterizzazione di materiali diffondenti e riflettenti, tutti con particolare attenzione agli aspetti metrologici e applicativi.

Collabora in comitati normativi nazionali. In Uni è coordinatore del GL5 "Illuminazione stradale". In CIE (International Lighting Commission) è membro italiano della divisione 4 (Lighting and Signalling for Transport), è stato coordinatore del comitato TC4-26 (Systems for Measurement of Photometric Quantities of Road Lighting Installations) ed è attualmente co-coordinatore del TC4-50 "Road surface characterization".

In INRIM ha sviluppato sistemi di misura per la caratterizzazione sul campo di impianti di illuminazione stradali e per le opere d'arte, laboratori per la misurazione della ripartizione dell'intensità luminosa di sorgenti e goniofotometri per la caratterizzazione di materiali.

Dal 2004 tiene, presso l'Università di Torino, il corso di Applicazioni colorimetriche per i beni culturali (Corsi di Laurea in tecnologie e scienze per i beni culturali) e il corso di Fotometria con laboratorio (Corso di laurea in ottica e optometria).

Dr Paola Iacomussi, è ricercatrice dell'INRIM, con più di 18 anni di esperienza in metrologia. La sua attività di ricerca include lo studio di tecniche assolute e relative per la caratterizzazione di materiali e di sistemi di illuminazione, la realizzazione e conservazione di unità fotometriche, le applicazioni e lo studio di sistemi di misura con rivelatori ILMD (Image Luminance Measuring Device), lo sviluppo di sistemi radiometrici e fotometrici per i beni culturali, lo studio delle caratteristiche dei sistemi di illuminazione con particolare attenzione agli aspetti della percezione.

È ispettore tecnico Accredia per la colorimetria e per la caratterizzazione radiometrica dei materiali, membro italiano della divisione 8 (Image Technology) della CIE (International Lighting Commission) e membro del comitato tecnico della rivista LUCE dell'AIDI.

Ha attivamente partecipato a programmi di ricerca nazionali ed europei sui materiali, la caratterizzazione di sorgenti luminose e sulla percezione di sistemi luminosi e di segnalazione.

Dal 2004 tiene presso l'Università di Torino, il corso di Applicazioni colorimetriche per i beni culturali (Corsi di Laurea in tecnologie e scienze per i beni culturali) e il corso di Fotometria con laboratorio (Corso di laurea in ottica e optometria).