

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

CONSIDERAZIONI SUI METODI DI
VALUTAZIONE DELL'ABBAGLIAMENTO
PER SORGENTI LUMINOSE NON UNIFORMI

Relatore: Prof. Pietro Fiorentin

Laureando: Matteo Tinazzo

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

Indice

Elenco delle figure.....	iii
Elenco delle tabelle.....	iv
Introduzione.....	v
Il problema dell'abbagliamento.....	1
1.1 Natura dell'abbagliamento.....	1
1.2 Fattori che influenzano l'abbagliamento	2
1.3 Aspetti soggettivi dell'abbagliamento	3
1.4 Metodi di limitazione dell'abbagliamento.....	4
1.4.1 Distribuzione costante	4
1.4.2 Distribuzione non costante	4
1.4.3 Distribuzione schermata (cut-off distribution).....	5
Abbagliamento per sorgenti luminose convenzionali	7
2.1 Metodi basati su formule	7
2.2 Metodi basati sulla limitazione della luminanza.....	8
2.3 Il metodo CGI.....	9
2.3.1 Interpretazione della formula CGI.....	9
2.4 Il metodo UGR.....	12
2.4.1 Interpretazione della formula UGR	12
2.4.2 Caratteristiche e limiti della formula UGR	14
2.4.3 Metodo dei prospetti.....	15
2.4.4 Metodo delle curve limite UGR	19
2.5 Formula CIE per l'abbagliamento debilitante	21
2.5.1 Correzione per l'effetto dell'età	22
2.5.2 Correzione per angoli piccoli	23
2.5.3 Equazione generale per l'abbagliamento debilitante.....	23
Abbagliamento per sorgenti piccole, estese e complesse.....	25

3.1	Abbagliamento per sorgenti di piccole dimensioni	25
3.2	Abbagliamento per sorgenti estese.....	27
3.3	Abbagliamento per sorgenti indirette e complesse	28
3.3.1	Formula CIE per sorgenti non uniformi.....	29
3.3.2	Formula CIE per sorgenti complesse	30
3.3.3	Calcolo di UGR basato sulle mappe di luminanza	31
3.3.4	Metodo UGR _{ZJU} per sorgenti non uniformi	32
Simulazioni illuminotecniche		35
4.1	Verifica della formula per l'indice di Guth.....	35
4.1.1	Metodo di calcolo	37
4.1.2	Risultati e conclusioni.....	37
4.2	Confronto tra UGR _{small} e UGR.....	39
4.2.1	Metodo di calcolo	39
4.2.2	Risultati e conclusioni.....	41
4.3	Considerazioni sul metodo GGR.....	43
4.3.1	Confronto tra GGR e UGR	43
4.3.1.1	Metodo di calcolo	44
4.3.1.2	Risultati e conclusioni.....	47
4.3.2	Confronto tra GGR e metodo per i soffitti luminosi	48
4.3.2.1	Metodo di calcolo	49
4.3.2.2	Risultati e conclusioni.....	50
4.4	Considerazioni sul calcolo tramite mappe di luminanza.....	51
4.4.1	Metodo di calcolo	52
4.4.2	Risultati e conclusioni.....	55
4.5	Considerazioni sui metodi per sorgenti non uniformi	57
4.5.1	Confronto al variare delle dimensioni dei dischi luminosi	59
4.5.1.1	Metodo di calcolo	59
4.5.1.2	Risultati ottenuti.....	65
4.5.2	Confronto al variare delle dimensioni dell'apparecchio.....	69
4.5.2.1	Metodo di calcolo	69
4.5.2.2	Risultati ottenuti.....	70
4.5.3	Confronto al variare dell'uniformità della luminanza	72
4.5.3.1	Metodo di calcolo	74
4.5.3.2	Risultati ottenuti.....	76

4.6	Esiti finali.....	77
	Conclusioni.....	81
	Bibliografia.....	83

Elenco delle figure

Parametri dell'abbagliamento	3
Misurazione dell'angolo di schermatura S.....	5
Principio della schermatura	6
Posizione dell'apparecchio rispetto all'osservatore	11
Sistema di coordinate (C,γ)	14
Diagramma delle curve limite UGR.....	20
Relazione tra l'abbagliamento debilitante e l'angolo di inclinazione θ	22
Esempio di mappa di luminanza di un apparecchio a LED.....	31
Interpretazione del calcolo di Contrast3.....	34
UGR e UGR_{small} in funzione dell'angolo solido	42
Diagramma polare della sorgente luminosa di dimensioni estese.....	44
Planimetria del locale per il confronto tra GGR e UGR	45
UGR e GGR in funzione dell'angolo solido	48
Diagramma polare del tubo a fluorescenza	52
Layout delle suddivisioni dell'apparecchio	53
UGR e UGR_{small} calcolati con il metodo delle mappe di luminanza.....	55
UGR calcolato con il metodo delle mappe di luminanza	56
Esempio di apparecchio a luminanza non uniforme.....	58
Profilo di luminanza dell'apparecchio non uniforme	59
Mappa di luminanza di un apparecchio usato per il test	62
Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme	67
Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme	68

Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme.....	72
Esempio di apparecchio a luminanza non uniforme	73
Profilo di luminanza dell'apparecchio non uniforme	73
Mappa di luminanza di un apparecchio usato per il test	75
Indici di abbagliamento in funzione della disuniformità della luminanza.....	77

Elenco delle tabelle

Indici di posizione di Guth per rapporti H/R e T/R	10
Esempio di prospetto completo dei valori dell'indice UGR.....	17
Esempio di prospetto ridotto dei valori dell'indice UGR.....	18
Due esempi di prospetti tipici dei valori non corretti dell'UGR	18
Esempio di prospetto dei fattori di utilizzazione	19
Differenza tra $UGR_{tabella}$ e $UGR_{formula}$	38
Risultati per UGR e UGR_{small}	41
Risultati per UGR e GGR	47
Risultati ottenuti per il confronto tra GGR e il metodo per soffitti luminosi	51
Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi.....	66
Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi.....	68
Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi.....	71
Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi.....	76

Introduzione

La presente tesi ha per oggetto l'analisi dei diversi metodi noti per la valutazione dell'abbagliamento molesto provocato da sorgenti luminose di dimensioni non convenzionali e di distribuzione di luminanza non uniforme. Per la valutazione dell'abbagliamento, da decenni si usa il metodo UGR, riconosciuto e recepito dalla *Commission Internationale de l'Eclairage* e dall'*Ente Nazionale Italiano di Unificazione* come metodo valido per sorgenti luminose di dimensioni "normali". Tuttavia, lo sviluppo e la diffusione di nuove tipologie di apparecchiature per l'illuminazione, soprattutto basate sulla tecnologia LED, hanno messo in evidenza i limiti di applicazione della formula UGR, perciò il problema della stima dell'abbagliamento dovuto a sorgenti con caratteristiche diverse da quelle considerate "normali" è diventato di primaria importanza: si pensi ad apparecchi di piccole dimensioni come i LED singoli o ad apparecchi di luminanza non uniforme consistenti in strisce o griglie di LED o ai pannelli luminosi diffondenti di dimensioni estese. L'UGR infatti, assegna un livello di abbagliamento troppo severo alle sorgenti di piccole dimensioni, mentre è troppo tollerante con le sorgenti di dimensioni estese. Anche per le sorgenti dotate di superficie a distribuzione di luminanza disuniforme UGR dà stime troppo tolleranti, dato che si basa sulla luminanza media calcolata su tutta la superficie, senza tenere conto della disuniformità. Attualmente sono stati proposti diversi metodi alternativi per la valutazione dell'abbagliamento molesto da sorgenti piccole, estese o complesse, tuttavia essi avanzano dubbi su alcuni aspetti, quali la congruenza tra i diversi metodi, ovvero la loro proprietà di assegnare gli stessi livelli di abbagliamento nelle zone di applicazione in cui due o più metodi si sovrappongono o nelle zone di transizione tra due metodi, oppure, per quanto riguarda i metodi per apparecchi non uniformi, quali siano i limiti di dimensione e disuniformità entro i quali esse riescano a stimare il giusto livello di abbagliamento.

L'attività svolta è consistita nell'eseguire test e simulazioni tramite il software di calcolo *MatLab* e il software di progettazione illuminotecnica *DIALux* per mettere a confronto tra loro i diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto, usando modelli di apparecchiature esistenti o creati appositamente, per verificarne la coerenza e il comportamento al variare dei parametri che in genere ne definiscono il campo di applicazione, quali la disuniformità della distribuzione della luminanza e le dimensioni, siano esse espresse in termini di angolo solido sotteso dalla sorgente o in termini di area apparente. I test hanno permesso di verificare diversi aspetti relativi alla coerenza, anche se rimangono irrisolte alcune questioni riguardanti le formule per la stima dell'abbagliamento dovuto a sorgenti non uniformi. È da sottolineare che, trattandosi di un lavoro basato su simulazioni, non si hanno a disposizione dati che correlino le stime ottenute dalle formule con le effettive sensazioni di abbagliamento riscontrate da osservatori reali, quindi è stato possibile ricavare solo valutazioni riguardanti il confronto tra due o più metodi, ma non possono essere fatte considerazioni sulla corrispondenza con la sensazione di abbagliamento percepita.

Capitolo 1

Il problema dell'abbagliamento

Gli scopi di un buon progetto illuminotecnico sono innanzitutto, fornire un illuminamento pienamente sufficiente a garantire lo svolgimento dei compiti visivi e in secondo luogo, assicurare che l'ambiente risulti confortevole dal punto di vista visivo [1]. Il problema dell'abbagliamento è strettamente legato al comfort ed è uno degli aspetti cui bisogna fare più attenzione in fase di progetto illuminotecnico, dato che l'insorgere di tale fenomeno determina sempre una situazione di disturbo, che talvolta può degenerare in una riduzione della prestazione visiva e arrivare fino a una perdita temporanea della visibilità [1]. Dato che la sensazione di fastidio è soggettiva e fortemente dipendente dall'attività che l'individuo sta svolgendo risulta molto difficile darne una valutazione generale.

1.1 Natura dell'abbagliamento

L'abbagliamento è definito come una condizione visiva che determina un disagio o una riduzione dell'abilità di percepire dettagli o interi oggetti, determinata da una distribuzione inadeguata delle luminanze o a variazioni estreme delle luminanze nel tempo e nello spazio [2], a causa della presenza nel campo visivo di sorgenti luminose primarie (abbagliamento diretto) o di superfici riflettenti (abbagliamento indiretto).

La natura dell'abbagliamento deriva dalla diffusione ottica della luce all'interno dell'occhio a causa dell'imperfetta trasparenza dell'occhio stesso e, in maniera minore, dalla luce diffusa che passa attraverso la membrana dell'iride.

È possibile identificare due categorie di abbagliamento [2]:

- a) abbagliamento molesto o psicologico (*discomfort glare*), che causa fastidio senza necessariamente compromettere la visione degli oggetti;
- b) abbagliamento debilitante o fisiologico (*disability glare*), che compromette temporaneamente la visione degli oggetti senza causare necessariamente fastidio.

Nonostante possano verificarsi contemporaneamente, queste due forme di abbagliamento sono fenomeni abbastanza diversi e distinti: l'abbagliamento molesto dipende soprattutto dalla quantità di luce che interessa l'occhio ed è sostanzialmente indipendente dalla luminanza della sorgente luminosa, mentre l'abbagliamento debilitante è legato principalmente alla luminanza [3]. Inoltre, l'abbagliamento debilitante dipende molto poco dal tempo di esposizione, mentre l'abbagliamento molesto può crescere gradualmente con il tempo: ciò non va trascurato soprattutto nei luoghi di lavoro, in cui le persone sono solite trascorrere parecchie ore della

giornata e possono rimanere esposte ad apparecchi ad alta luminanza per periodi lunghi. Tutto ciò porta ad un calo della prestazione visiva o del benessere visivo.

Quando si eseguono misure per la stima dell'abbagliamento prodotto da un apparecchio o in fase di progettazione di un sistema di illuminazione, è più importante valutare l'abbagliamento molesto che quello debilitante perché, nella maggior parte dei casi, se l'abbagliamento molesto è adeguatamente contenuto, anche l'abbagliamento debilitante risulterà entro i limiti prescritti.

1.2 Fattori che influenzano l'abbagliamento

L'abbagliamento prodotto da una singola sorgente luminosa può essere relazionato a quattro parametri principali [3]:

L_s – luminanza dalla sorgente nella direzione dell'osservatore, che corrisponde all'intensità luminosa [cd] nella direzione dell'osservatore divisa per l'area apparente della sorgente [m^2];

L_f – luminanza dello sfondo, ossia la media della luminanza delle superfici dell'ambiente incluse nel campo visivo, escluse le sorgenti luminose abbaglianti;

ω – angolo solido sotteso dalla sorgente luminosa, è pari al rapporto tra l'area apparente della sorgente e la distanza dell'osservatore dal centro delle parti luminose dell'apparecchio preso in considerazione;

θ – angolo di dislocazione tra la direzione di osservazione e la linea occhio-sorgente.

Quindi l'abbagliamento prodotto da un apparecchio sarà grande:

- a) quando la sua immagine ricade sulla retina in una zona vicina alla fovea, cioè quando l'angolo di dislocazione θ è piccolo;
- b) quando la sua immagine è grande, cioè quando l'angolo solido descritto ω è grande o, equivalentemente, quando sono presenti numerosi apparecchi nel campo visivo;
- c) quando il flusso luminoso per unità di area dell'immagine dell'apparecchio è grande in confronto al flusso luminoso per unità di area del resto dell'immagine, cioè quando la luminanza L_s è grande rispetto a L_f .

In passato sono stati realizzati diversi studi con lo scopo di ottenere un metodo oggettivo per la valutazione dell'abbagliamento molesto. Sono state pubblicate molte equazioni differenti, ma in generale la sensazione soggettiva di abbagliamento percepita da un osservatore può essere espressa numericamente tramite il calcolo della *Costante di Abbagliamento G* nel modo presentato nella formula (1.1).

$$G = \frac{L_s^a \cdot \omega^b}{L_f^c \cdot f(\theta)}, \quad (1.1)$$

nella quale gli esponenti a , b e c servono a pesare in modo adeguato i diversi fattori e $f(\theta)$ è una funzione dell'angolo di dislocazione che tiene conto delle sue due componenti: verticale e azimutale [3].

Sono state condotte numerose ricerche per attribuire dei valori adeguati agli esponenti dell'equazione (1.1), tuttavia un confronto diretto tra esse risulta difficile a causa delle differenze nei metodi di ricerca.

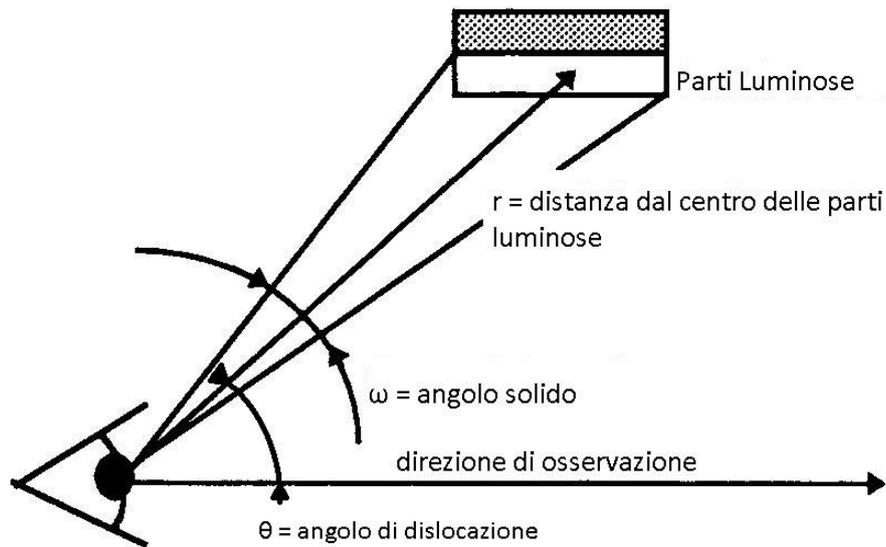


Figura 1.1 Parametri dell'abbagliamento [5].

1.3 Aspetti soggettivi dell'abbagliamento

Oltre a dare una valutazione numerica del livello di abbagliamento attraverso la relazione (1.1), è necessario che tale stima quantitativa sia in corrispondenza con il grado di fastidio soggettivo percepito dall'osservatore medio. Per fare ciò diventa indispensabile, nella realizzazione di un esperimento mirato alla definizione di un metodo di valutazione dell'abbagliamento, coinvolgere un numero di osservatori ai quali sottoporre una serie di installazioni, che possono essere realizzate a grandezza naturale o in scala. Dato che la sensibilità all'abbagliamento varia da persona a persona, il numero degli osservatori dovrà essere grande abbastanza da fornire un campione significativo per ottenere dei dati statistici attendibili.

Aspetti soggettivi che riguardano l'abbagliamento sono, ad esempio l'età dell'osservatore e la durata dell'esposizione alla fonte di abbagliamento [4]: è stato osservato che, nella valutazione soggettiva del livello di abbagliamento molesto, individui di età superiore a 50 anni presentano una minore sensibilità rispetto ad individui più giovani. Nonostante ciò, negli individui più anziani, l'esposizione per 65 minuti ad una situazione di abbagliamento ha causato un decremento maggiore delle prestazioni visive e un aumento della sensibilità all'abbagliamento rispetto agli individui più giovani. A contrario gli individui più giovani, sembrano avere maggiore sensibilità all'abbagliamento, nonostante presentino una sostanziale assenza di cambiamenti nelle prestazioni visive dovuti all'affaticamento con il passare del tempo. Tale aspetto può dare un'idea di quanto il problema dell'abbagliamento sia una questione complessa e difficile da affrontare in maniera oggettiva; d'altra parte, le conseguenze di una lunga esposizione ad una situazione di abbagliamento sottolineano anche quanto sia importante trovare il modo di limitare l'abbagliamento e, per far questo, anche di misurarlo in maniera oggettiva.

Ad ogni modo, l'obiettivo del presente elaborato non è affrontare gli aspetti soggettivi legati al fenomeno dell'abbagliamento, ma cercare di fare chiarezza sui diversi metodi di valutazione

dell'abbagliamento molesto esistenti e analizzarne le prestazioni. Perciò gli aspetti soggettivi verranno trascurati, a favore di soli parametri misurabili e formule pensate per dare stime di abbagliamento più oggettive possibile.

1.4 Metodi di limitazione dell'abbagliamento

Se l'abbagliamento diretto causato da una lampada supera la soglia massima, è possibile limitarlo inserendo la lampada all'interno di un apparecchio dotato di particolari accorgimenti. A tale scopo esistono principalmente dispositivi di tre tipologie: diffusori traslucidi, pannelli rifrattori e schermi opachi. Le distribuzioni di luminanza degli apparecchi che impiegano queste tre categorie di dispositivi possono essere riassunte come distribuzione *costante*, *non costante* e *schermata* (*cut-off distribution*).

Altri rimedi che possono essere presi in considerazione per limitare l'abbagliamento sono ad esempio la scelta di apparecchiature dotate di curve di emissione i cui valori di luminanza alle angolazioni critiche siano contenuti e la collocazione adeguata delle sorgenti luminose nei confronti degli osservatori e in relazione ai compiti visivi.

1.4.1 Distribuzione costante

Gli apparecchi che impiegano vetri o plastiche diffondenti in genere presentano luminanze moderate, minori di 15 kcd/m^2 , e la loro luminanza di norma rimane costante al variare dell'angolazione in tutto il range di criticità. Tale range di solito corrisponde a una variazione dell'angolo θ tra 0° e 45° . I materiali diffondenti hanno la caratteristica di scomporre il fascio luminoso e deviarlo in molte direzioni, dando luogo ad un'emissione che segue il cosiddetto *modello lambertiano*, ovvero un'emissione caratterizzata da una luminanza costante e da un'intensità luminosa che cala con il coseno dell'angolo che la direzione dei raggi luminosi forma con la normale alla superficie luminosa.

Per le apparecchiature a distribuzione costante è possibile quindi rielaborare l'equazione (1.1) in modo da ricavarne la luminanza limite L_s . Così facendo si ottiene la formula (1.2).

$$L_s = \sqrt{\frac{G \cdot L_f^c \cdot f(\theta)}{\omega^b}} \quad (1.2)$$

Per un utilizzo più agevole delle equazioni (1.1) e (1.2) ai fini della valutazione del livello di abbagliamento molesto può essere preferibile che i dati vengano organizzati dal produttore dell'apparecchio in forma di tabelle pre-calcolate, in modo che l'operatore non debba ricalcolare i parametri per ogni apparecchio.

1.4.2 Distribuzione non costante

Gli apparecchi che impiegano pannelli rifrattori presentano una luminanza non costante, ovvero che cambia al variare dell'angolazione all'interno del range di criticità dell'angolo θ tra 0° e 45° . I materiali rifrattori sfruttano il fenomeno della *rifrazione*, che consiste nel cambiamento di direzione della luce nell'attraversare due mezzi trasparenti di diverse densità.

Gli apparecchi di qualità migliore presentano una luminanza L_s che si riduce progressivamente via via che li si osserva da una posizione che si avvicina all'orizzontale, cioè all'avvicinarsi di

θ a 0. Sono largamente usati nelle installazioni ad incasso a filo con il soffitto e nelle stanze spaziose, perché essi fanno in modo che la regione che causa effettivamente un abbagliamento sia determinata solo dalla distribuzione del flusso luminoso del singolo apparecchio e non dalle dimensioni della stanza o da quanti apparecchi sono stati installati.

1.4.3 Distribuzione schermata (cut-off distribution)

La distribuzione schermata riguarda gli apparecchi in cui l'abbagliamento è limitato da schermature: la lampada si trova all'interno di un apparecchio che fornisce una schermatura totale per angoli θ minori dell'angolo di schermatura S .

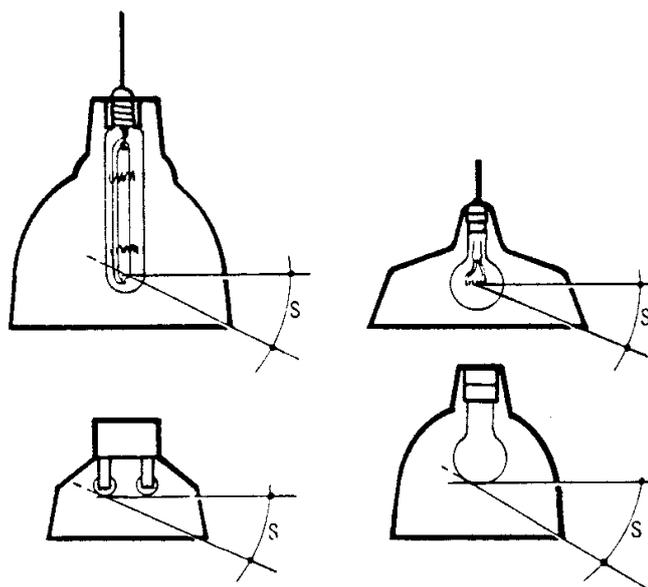


Figura 1.2 Misurazione dell'angolo di schermatura S
[3]

Il metodo della schermatura è illustrato nella Figura 1.3. Tale metodo si basa su due assunzioni: la prima consiste nel fatto che, nella maggior parte dei casi, la direzione di osservazione non va al di sopra dell'orizzontale; la seconda è che le lampade di potenza elevata non vengano mai montate troppo in basso e vicino alla testa dell'osservatore.

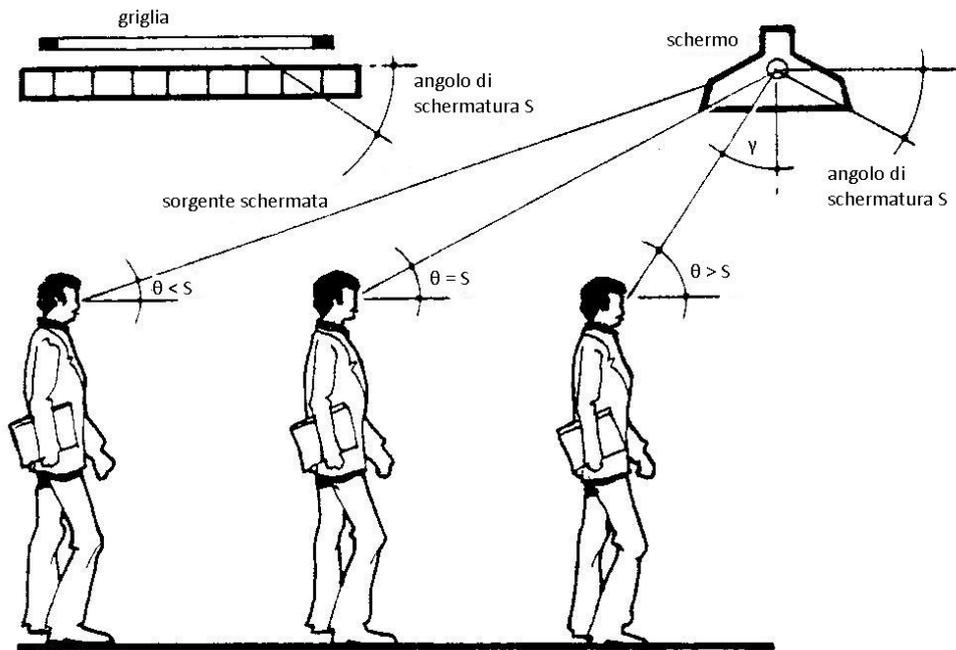


Figura 1.3 Principio della schermatura
La sorgente risulta nascosta per θ minore di S [3].

La distribuzione schermata ha diversi vantaggi: innanzitutto la schermatura è un concetto semplice da applicare e da misurare; inoltre, quando la sorgente è schermata, la luminanza delle parti visibili è molto bassa, perciò il livello di abbagliamento diventa indipendente dalle dimensioni della stanza e dalla quantità di apparecchi installati. Inoltre, è possibile limitare ulteriormente l'abbagliamento utilizzando delle griglie che impediscono la visione diretta della lampada da certe angolazioni.

Capitolo 2

Abbagliamento per sorgenti luminose convenzionali

I metodi per la valutazione dell'abbagliamento sono necessari ai progettisti di sistemi di illuminazione per assicurare che una particolare installazione in un locale non causi un abbagliamento troppo elevato. Tali metodi, pur consistendo nella stima di sensazioni soggettive, devono avere una formulazione che non permetta ambiguità e che sia semplice abbastanza da essere accettabile per un uso pratico.

Per molti anni, in diversi paesi sono state portate avanti numerose ricerche allo scopo di sviluppare dei sistemi di valutazione della sensazione soggettiva di abbagliamento. Ciò ha portato alla definizione di numerosi sistemi, ciascuno adottato e raccomandato da diverse nazioni. Successivamente, ad opera della *CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)*, sono stati proposti prima il metodo *CGI*, poi il metodo *UGR*, allo scopo di unificare i diversi sistemi e ottenere così un metodo efficace ed universalmente accettato.

2.1 Metodi basati su formule

Lo sviluppo dei metodi basati sulle formule si può ricondurre all'attribuzione dei coefficienti appropriati alla formula generale (1.1). Nonostante le formulazioni proposte dai diversi centri di studio all'apparenza possano sembrare discordi tra loro, le stime dell'abbagliamento che ne risultano sono pressoché simili.

Alcuni esempi delle formulazioni proposte [3] sono la formula *DGR (Discomfort Glare Rating)* proposta da S. K. Guth, poi convertita in *VCP (Visual Comfort Probability)*, oppure il *GI (Glare Index)* proposto dai britannici R. G. Hopkinson e P. Petherbridge:

(i) S. K. Guth propose un'equazione della forma illustrata nella formula (2.1).

$$M = \frac{0.5 L Q}{P F^{0.44}} \quad (2.1)$$

dove

$$Q = 20.4 \omega + 1.52 \omega^{0.2} - 0.075,$$

L è la luminanza della sorgente luminosa [cd/m^2],

F è la luminanza media del campo visivo [cd/m^2],

P è l'indice di posizione di Guth (formula 2.5),

ω è l'angolo solido sotteso dalla sorgente [sr].

Per un'installazione caratterizzata da più sorgenti luminose, Guth indicò il *Discomfort Glare Rating* espresso dall'equazione (2.2).

$$DGR = (\Sigma M)^a \quad (2.2)$$

dove a è una funzione del numero di apparecchi installati.

Dal *Discomfort Glare Rating* è stato poi ricavato il metodo *Visual Comfort Probability*, che esprime la percentuale di osservatori che ci si aspetta collocheranno un sistema di illuminazione ad un livello di comfort maggiore o uguale al confine tra comfort e disagio.

(ii) il sistema BRS (o BGI) sviluppato da R. G. Hopkinson e P. Petherbridge si basa sulla classificazione della sensazione di abbagliamento con la seguente scala: appena percettibile, appena accettabile, appena fastidioso e appena intollerabile. L'equazione, sviluppata empiricamente, è presentata nella formula (2.3).

$$BGI = 10 \log_{10} 0.478 \sum_{i=1}^n \frac{L^{1.6} \omega^{0.8}}{L_b P^{1.6}} \quad (2.3)$$

dove L_b è la luminanza dello sfondo [cd/m^2] e n è il numero di apparecchi installati.

Il campo di applicazione di tale formula si limita a angoli solidi ω inferiori a 0.027 sr, quindi è adatto solo a sorgenti concentrate e non a sorgenti estese. Inoltre, non tiene in considerazione l'adattamento dell'occhio al sistema luminoso al quale è sottoposto.

2.2 Metodi basati sulla limitazione della luminanza

Come per l'installazione di schermature per gli apparecchi di illuminazione presentata nel §1.4.3, anche la limitazione della luminanza si basa su una caratteristica degli apparecchi abbastanza facile da misurare o ricavare, per cui si tratta di un metodo più diretto e agevole da applicare rispetto alle formule per il calcolo degli indici di abbagliamento. In generale i sistemi basati sulla limitazione della luminanza possono essere impiegati con due scopi:

a) per determinare il valore della luminanza limite che, in determinate condizioni, assicura che il livello di abbagliamento non superi un valore prestabilito. Un'applicazione di questo genere si adatta molto bene agli apparecchi dotati di una distribuzione di luminanza abbastanza costante nel range delle angolazioni critiche, come gli apparecchi a distribuzione costante presentati nel §1.4.1;

b) per determinare la distribuzione della luminanza che, in determinate condizioni, assicura che il livello di abbagliamento non superi un valore prestabilito. Questo sistema si adatta molto meglio agli apparecchi con luminanza che si riduce progressivamente via via che li si osserva

da una posizione che si avvicina all'orizzontale, come quelli a distribuzione non costante discussi nel §1.4.2.

2.3 Il metodo CGI

Il metodo CGI (*CIE Glare Index*) è stato sviluppato dalla Commissione Tecnica 3.4 della CIE e presentato per la prima volta nella Pubblicazione n° 29 del 1975, *Guide on Interior Lighting* [6]. Tale metodo si basa su due regole principali [3]:

- la prima regola indica, per l'apparecchio in questione, le luminanze limite relative alle quattro angolazioni di emissione $\gamma = 55^\circ, 65^\circ, 75^\circ$ e 85° ; pertanto il metodo CIE è un metodo che rientra nella categoria dei sistemi basati sulla determinazione della distribuzione della luminanza limite presentati nel §2.2. Tale regola si applica a tutti i tipi di apparecchi ma la norma fa una distinzione tra apparecchi allungati (con un rapporto lunghezza-larghezza maggiore di 2:1, ad esempio i tubi a fluorescenza montati orizzontalmente) e non allungati (tutti gli altri tipi). Vengono poi specificate tre classi di qualità per rispondere alle esigenze delle diverse aree di lavoro. La I Classe di qualità deve essere considerata nell'illuminazione di aree dove è richiesta una alta qualità dell'impianto, come le zone adibite a compiti visivi con esigenze particolari. La II Classe rappresenta lo standard minimo da rispettare nelle aree adibite a compiti visivi normali, come ad esempio lavori d'ufficio. La III Classe rappresenta lo standard minimo da rispettare nelle zone industriali o nelle aree di transito;
- la seconda regola esprime delle raccomandazioni riguardanti gli angoli di schermatura.

Per poter valutare l'abbagliamento causato da uno o più apparecchi in maniera più immediata o per l'implementazione tramite un software, il metodo CGI ha anche una formulazione matematica più pratica da usare, illustrata nella formula (2.4), che prende il nome di parametro *CGI*.

$$CGI = 8 \log_{10} 2 \left(\frac{1 + E_d/500}{E_d + E_i} \cdot \sum \frac{L^2 \omega}{P^2} \right), \quad (2.4)$$

nel quale

E_d = illuminamento diretto sull'occhio dell'osservatore, dovuto a tutte le sorgenti [lx],

E_i = illuminamento indiretto sull'occhio dell'osservatore [lx],

L = luminanza dell'apparecchio nella direzione dell'occhio [cd/m^2],

ω = angolo solido sotteso dall'apparecchio [sr],

P = indice di posizione di Guth (formula 2.5).

2.3.1 Interpretazione della formula CGI

(i) *Posizione*. L'informazione sulla posizione reciproca tra osservatore e apparecchio viene data dall'indice di posizione di Guth P . L'indice di Guth è un parametro che dà un'indicazione sulla posizione in cui si trova ogni singolo apparecchio all'interno del campo visivo dell'osservatore e può essere ricavato utilizzando la tabella appositamente stilata da S. K. Guth e presentata nella Tabella 2.1. Le tre coordinate R , T e H necessarie come dati di ingresso sono illustrate nella Figura 2.1 e sono le coordinate del sistema lungo gli assi x , y , z con l'osservatore preso come

punto di riferimento. Tutte le coordinate sono riferite al centro delle parti luminose. Si precisa che l'indice di Guth è simmetrico rispetto al parametro T/R , quindi la tabella contiene solo valori non negativi di tale parametro.

Tabella 2.1 Indici di posizione di Guth per rapporti H/R e T/R

T/R	H/R																			
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
0,00	1,00	126,00	1,53	1,90	2,35	2,86	3,50	4,20	5,00	6,00	7,00	8,10	9,25	10,35	11,70	13,15	14,70	16,20	-	-
0,10	1,05	1,22	1,46	1,90	2,20	2,75	3,40	4,10	4,80	5,80	6,90	8,00	9,10	10,30	11,60	13,00	14,60	16,10	-	-
0,20	1,12	1,30	1,50	1,80	2,20	2,66	3,18	3,88	4,60	5,50	6,50	7,60	8,75	9,85	11,20	12,70	14,00	15,70	-	-
0,30	1,22	1,38	1,60	1,97	2,25,00	2,70	3,25	3,90	4,60	5,45	6,45	7,40	8,40	9,50	10,85	12,10	13,70	15,00	-	-
0,40	1,32	1,47	1,70	1,96	2,35	2,80	3,30	3,90	4,60	5,40	6,40	7,30	8,30	9,40	10,60	11,90	13,20	14,60	16,00	-
0,50	1,43	1,50	1,82	2,10	2,49	2,91	3,40	3,98	4,70	5,50	6,40	7,30	8,30	9,40	10,50	11,75	13,00	14,40	15,70	-
0,60	1,55	1,72	1,98	2,30	2,65	3,10	3,60	4,10	4,80	5,50	6,40	7,35	8,40	9,40	10,50	11,70	13,00	14,10	15,40	-
0,70	1,70	1,88	2,12	2,49	2,87	3,30	3,78	4,30	4,88	5,60	6,50	7,40	8,50	9,50	10,50	11,70	12,85	14,00	15,20	-
0,80	1,82	2,00	2,32	2,70	3,08	3,50	3,92	4,50	5,10	5,75	6,60	7,50	8,60	9,50	10,60	11,75	12,80	14,00	15,10	-
0,90	1,96	2,20	2,54	2,80	3,30	3,70	4,20	4,75	5,30	6,00	6,75	7,70	8,70	9,65	10,75	11,80	12,90	14,00	15,00	16,00
1,00	2,11	2,40	2,75	3,10	3,50	3,91	4,40	5,00	5,60	6,20	7,00	7,90	8,80	9,75	10,80	11,90	12,95	14,00	15,00	16,00
1,10	2,30	2,55	2,92	3,30	3,72	4,20	4,70	5,25	5,80	6,55	7,20	8,15	9,00	9,90	10,95	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00
1,20	2,40	2,75	3,12	3,50	3,90	4,35	4,85	5,50	6,05	6,70	7,50	8,30	9,20	10,00	11,02	12,10	13,10	14,00	15,00	16,00
1,30	2,55	2,90	3,30	3,70	4,20	4,65	5,20	5,70	6,30	7,00	7,70	8,55	9,35	10,20	11,20	12,25	13,20	14,00	15,00	16,00
1,40	2,70	3,10	3,50	3,90	4,35	4,85	5,35	5,85	6,50	7,25	8,00	8,70	9,50	10,40	11,40	12,40	13,25	14,05	15,00	16,00
1,50	2,85	3,15	3,65	4,10	4,55	5,00	5,50	6,20	6,80	7,50	8,20	8,85	9,70	10,55	11,50	12,50	13,30	14,05	15,02	16,00
1,60	2,95	3,40	3,80	4,25	4,75	5,20	5,75	6,30	7,00	7,65	8,40	9,00	9,80	10,80	11,75	12,60	13,40	14,20	15,10	16,00
1,70	3,10	3,55	4,00	4,50	4,90	5,40	5,95	6,50	7,20	7,80	8,50	9,20	10,00	10,85	11,85	12,75	13,45	14,20	15,10	16,00
1,80	3,25	3,70	4,20	4,65	5,10	5,60	6,10	6,75	7,40	8,00	8,85	9,35	10,10	11,00	11,90	12,80	13,50	14,20	15,10	16,00
1,90	3,43	3,86	4,30	4,75	5,20	5,70	6,30	6,90	7,50	8,17	8,80	9,50	10,20	11,00	12,00	12,82	13,55	14,20	15,10	16,00
2,00	3,50	4,00	4,50	4,90	5,35	5,80	6,40	7,10	7,70	8,30	8,90	9,60	10,40	11,10	12,00	12,85	13,60	14,30	15,10	16,00
2,10	3,60	4,17	4,65	5,05	5,50	6,00	6,60	7,20	7,82	8,45	9,00	9,75	10,50	11,20	12,10	12,90	13,70	14,35	15,10	16,00
2,20	3,75	4,25	4,72	5,20	5,60	6,10	6,70	7,35	8,00	8,55	9,15	9,85	10,60	11,30	12,10	12,90	13,70	14,40	15,15	16,00
2,30	3,85	4,35	4,80	5,25	5,70	6,22	6,80	7,40	8,10	8,65	9,30	9,90	10,70	11,40	12,20	12,95	13,70	14,40	15,20	16,00
2,40	3,95	4,40	4,90	5,35	5,90	6,30	6,90	7,50	8,20	8,80	9,40	10,00	10,80	11,50	12,25	13,00	13,75	14,45	15,20	16,00
2,50	4,00	4,50	4,96	5,40	5,85	6,40	6,95	7,55	8,25	8,85	9,50	10,05	10,85	11,55	12,30	13,00	13,80	14,50	15,25	16,00
2,60	4,07	4,55	5,05	5,47	5,95	6,46	7,00	7,65	8,35	8,95	9,55	10,10	10,90	11,60	12,32	13,00	13,80	14,50	15,25	16,00
2,70	4,10	4,60	5,10	5,53	6,00	6,50	7,50	7,70	8,40	9,00	9,60	10,16	10,92	11,63	12,35	13,00	13,80	14,50	15,25	16,00
2,80	4,15	4,62	5,15	5,56	6,05	6,55	7,08	7,73	8,45	9,05	9,65	10,20	10,95	11,85	12,35	13,00	13,90	14,50	15,25	16,00
2,90	4,20	4,65	5,17	5,60	6,07	6,57	7,12	7,75	8,50	9,10	9,70	10,23	10,95	11,65	12,35	13,00	13,80	14,50	15,25	16,00
3,00	4,22	4,67	5,20	5,65	6,12	6,60	7,15	7,80	8,55	9,12	9,70	10,23	10,95	11,65	12,35	13,00	13,80	14,50	15,25	16,00

Alternativamente è possibile ricavare l'indice di posizione di Guth dalla formula (2.5).

$$P = \exp[(35.2 - 0.31889\tau - 1.22e^{-2\tau/9})10^{-3}\sigma + (21 + 0.26667\tau - 0.002963\tau^2)10^{-5}\sigma^2] \quad (2.5)$$

in cui τ e σ sono gli angoli illustrati nella Figura 2.1, espressi in gradi. Costruendo tale formula si è cercato di interpolare al meglio l'andamento del parametro P presentato nella Tabella 2.1, mantenendo una semplicità tale da consentirne un uso agevole. Per questa ragione la formula dà una stima approssimata dell'indice di Guth, che tuttavia risulta sufficientemente precisa da dare errori trascurabili nella valutazione dell'abbagliamento.

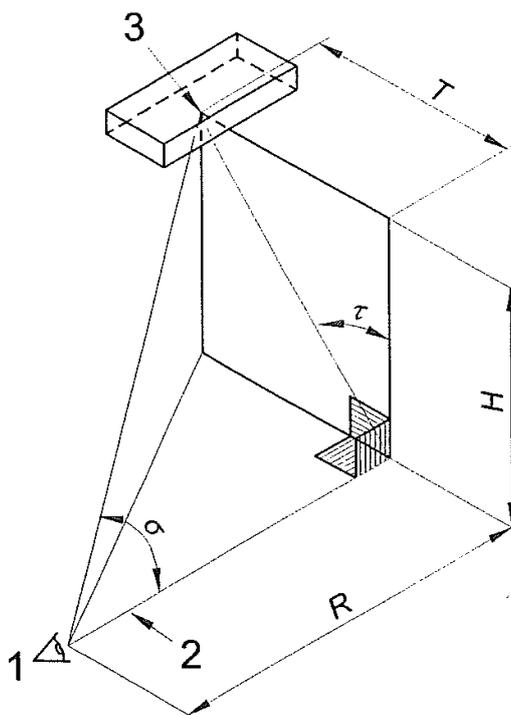


Figura 2.1 Posizione dell'apparecchio rispetto all'osservatore
R, T e H sono le coordinate dell'apparecchio rispetto all'occhio dell'osservatore [7].

Le norme raccomandano di trascurare nel calcolo dell'abbagliamento gli apparecchi con un rapporto T/R fuori dal range presentato in tabella, ovvero quelli con T/R non compreso tra 0 e 3. Inoltre, si noti che nella stesura della Tabella 2.1, per rapporti H/R elevati, alcuni indici di posizione sono stati omessi: essi corrispondono a posizioni in cui gli apparecchi di norma sono nascosti alla vista dalle sopracciglia e dalla fronte dell'osservatore e quindi non si trovano all'interno del campo visivo e non danno un contributo all'abbagliamento [5]. L'indice di Guth dà un contributo adeguato solo se si trattano sorgenti luminose che si trovano al di sopra della direzione di osservazione di un angolo di almeno 5° [8].

(ii) *Luminanza e dimensioni.* L'angolo solido ω [sr] viene valutato tramite la formula (2.6).

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} \quad (2.6)$$

dove A_p è l'area apparente dell'apparecchio [m^2] vista dalla posizione dell'osservatore, mentre r è la distanza dall'osservatore al centro delle parti luminose dell'apparecchio [m]. Nella formula (2.3), come in qualunque altra formula per la valutazione dell'abbagliamento, è matematicamente indispensabile che l'esponente di ω sia 1, per garantire la sommabilità degli angoli solidi e quindi dei contributi dati da più apparecchi, altrimenti sommare tra loro dei termini non direttamente proporzionali a ω potrebbe portare ad incongruenze di tipo matematico: ad esempio se per motivi di calcolo una sorgente luminosa estesa viene suddivisa

in più sezioni, l'abbagliamento totale risultante deve ragionevolmente rimanere invariato; tuttavia con un esponente di ω non unitario ciò non avverrebbe.

L [cd/m^2] è la luminanza dell'apparecchio nella direzione dell'occhio e si calcola come nella formula (2.7).

$$L = \frac{I}{A_p} \quad (2.7)$$

dove I è l'intensità luminosa nella direzione dell'occhio [cd]. Nella formula (2.3) l'esponente 2 di L è giustificato da basi sperimentali.

2.4 Il metodo UGR

L'indice *UGR* (*Unified Glare Rating*) è un indicatore unificato in campo internazionale, sviluppato dalla CIE per la valutazione dell'abbagliamento molesto. A riguardo, esiste una normativa specifica che ne definisce le caratteristiche: si tratta della norma CIE 117 del 1995 - *Discomfort Glare in Interior Lighting* [5], successivamente recepita dalla normativa italiana con la norma UNI 11165 del 2005 - *Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR* [7], attualmente in uso, che illustra i criteri per il calcolo dell'indice UGR per locali interni. Il metodo UGR permette la valutazione dell'abbagliamento considerando solo i contributi delle sorgenti luminose artificiali. Dato che si tratta di un metodo per la valutazione dell'abbagliamento molesto, è a tutti gli effetti errato considerare il metodo UGR in tutte le situazioni in cui sono presenti condizioni di abbagliamento debilitante.

La formula per calcolare l'*UGR* è presentata nell'equazione (2.8).

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{P^2} \right) \quad (2.8)$$

dove

L_b è la luminanza di sfondo [cd/m^2]

L è la luminanza dell'apparecchio di illuminazione nella direzione dell'occhio [cd/m^2]

ω è l'angolo solido sotteso dalla sorgente luminosa [sr]

P è l'indice di posizione di Guth

2.4.1 Interpretazione della formula UGR

(i) *Luminanza di sfondo*. L_b è definita come la luminanza uniforme che produce su un piano verticale posto in corrispondenza dell'occhio dell'osservatore lo stesso illuminamento prodotto dal campo visivo in esame, dal quale vanno escluse le sorgenti luminose [5]. Essa può essere quantificata in uno dei seguenti modi:

- calcolando le luminanze delle superfici dell'ambiente in esame comprese nel campo visivo, con l'esclusione delle sorgenti luminose e assumendone il valore medio;

- calcolando la componente dell'illuminamento indiretto E_i [lx] sull'occhio dell'osservatore e usando la formula (2.9). Tale formula dà una valutazione approssimata della luminanza di sfondo L_b : l'approssimazione deriva dal fatto di considerare lo sfondo come se fosse una sorgente estesa infinitamente in tutte le direzioni, alla quale corrisponde un angolo solido la cui proiezione sulla superficie in cui si trova l'osservatore è pari a π .

$$L_b = \frac{E_i}{\pi} \quad (2.9)$$

In genere la luminanza di sfondo viene calcolata a partire dall'illuminamento E_i , in quanto esso può essere valutato facilmente quando si sta svolgendo un calcolo tramite un software di progettazione illuminotecnica.

La luminanza di sfondo influenza relativamente poco la valutazione dell'UGR: ad esempio, un errore di +33% di L_b porta ad un errore dell'UGR di 1 unità [7].

(ii) *Luminanza dell'apparecchio*. Generalmente L viene valutata come rapporto tra intensità luminosa e area apparente, come nella formula (2.4). Per la determinazione dell'intensità luminosa, le coordinate (R, T, H) mostrate nella Figura 2.1 risultano molto utili: tramite tali coordinate infatti è possibile calcolare tramite le formule dalla (2.10-2.12) le coordinate angolari (C, γ) che descrivono qualsiasi direzione relativa all'apparecchio. Le coordinate angolari vengono poi utilizzate per risalire all'intensità luminosa attraverso la tabella dell'intensità luminosa in funzione di C e γ compresa nei file fotometrici.

$$C = \tan^{-1}(T/R) \quad \text{per montaggio trasversale} \quad (2.10)$$

$$C = 90^\circ - \tan^{-1}(T/R) \quad \text{per montaggio longitudinale} \quad (2.11)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{R^2 + T^2}}{H}\right) \quad (2.12)$$

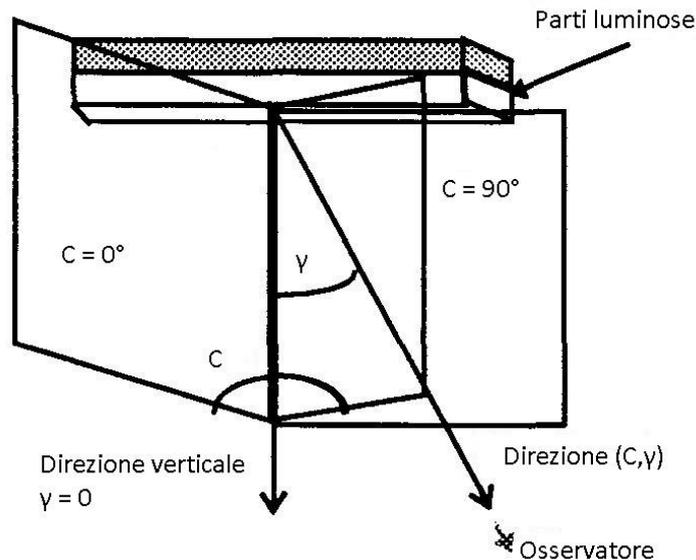


Figura 2.2 Sistema di coordinate (C, γ)
[5]

Una variazione della luminanza L di +33% o -25% causa un errore nel calcolo dell'UGR di 1 unità [7].

(iii) *Angolo solido*. ω è l'angolo solido sotteso dalle parti luminose di ogni singolo apparecchio nella direzione dell'occhio dell'osservatore ed è determinato come rapporto tra area apparente e distanza al quadrato come nella formula (2.3).

(iv) *Indice di posizione di Guth*. L'abbagliamento varia considerevolmente con la posizione della sorgente rispetto alla direzione di osservazione. L'indice di posizione di Guth P dà un'indicazione sulla posizione in cui si trova ogni singolo apparecchio all'interno del campo visivo dell'osservatore. Esso viene ricavato dalla Tabella 2.1 ma può essere equivalentemente espresso tramite la Formula (2.4). L'indice di Guth dà un contributo adeguato solo se si trattano sorgenti luminose che si trovano al di sopra della direzione di osservazione di un angolo di almeno 5° [8].

2.4.2 Caratteristiche e limiti della formula UGR

La formula per il calcolo dell'UGR genera un indice di abbagliamento oggettivo che rappresenta un parametro psicologico; essa si propone di misurare qualsiasi reazione soggettiva di abbagliamento molesto derivante dalla presenza di fonti luminose nell'ambiente in esame.

Secondo la norma, i valori dell'indice UGR da tenere in considerazione per la valutazione dell'abbagliamento sono solo i valori compresi tra 10 e 30, secondo una scala a intervalli di 3 unità (10, 13, 16, 19, 22, 25 e 28), nella quale le differenze tra i valori della scala rappresentano le minime differenze percepibili dall'osservatore; perciò, nella scala UGR solo le differenze tra tali valori sono da considerare significative. Un valore di UGR elevato indica una significativa probabilità di abbagliamento molesto alto, mentre un valore basso è indice di una bassa probabilità di tale abbagliamento. I sistemi di illuminazione caratterizzati da un UGR minore

di 10 possono essere considerati come non affetti da abbagliamento molesto e, in genere, per caratterizzarli è sufficiente l'indicazione: $UGR < 10$.

Uno dei pregi più importanti della formula UGR (rispetto ad alcuni metodi che sono stati sviluppati in precedenza), è il fatto che in essa il termine che rappresenta l'angolo solido sotteso ω è presente con esponente unitario: tale caratteristica risulta molto favorevole nei numerosi casi in cui ci si trova a dover analizzare un'installazione che comprende più apparecchi, in quanto permette la sommabilità degli effetti derivanti da più sorgenti luminose [10]. Se così non fosse, sommare tra loro dei termini non direttamente proporzionali a ω potrebbe portare ad incongruenze di tipo matematico: ad esempio se per motivi di calcolo una sorgente luminosa estesa viene suddivisa in più sezioni, l'abbagliamento totale risultante deve ragionevolmente rimanere invariato; tuttavia con un esponente di ω non unitario ciò non avverrebbe.

Il campo di applicazione della formula UGR è limitato alle sole sorgenti luminose cosiddette di dimensioni 'normali', che determinano, nelle condizioni supposte, un angolo solido ω compreso tra 0,0003 sr e 0,1 sr. Un angolo solido di 0,0003 sr ad esempio, può essere determinato da una lampada ad incandescenza con vetro traslucido di 20 cm di diametro vista da una distanza di 10 m, mentre un angolo solido di 0,1 sr può essere determinato da un apparecchio di forma quadrata con lato di 1 m visto da una distanza di circa 3 m. Per sorgenti di dimensioni molto ridotte l'abbagliamento molesto non è determinato dalla luminanza dell'apparecchio ma dalla sua intensità luminosa, di conseguenza il metodo UGR non è applicabile a sorgenti che determinano un angolo solido minore di 0,0003 sr. Per le sorgenti di piccole dimensioni e di dimensioni estese si rimanda la trattazione al §2.6.

2.4.3 Metodo dei prospetti

La formula per il calcolo di UGR (2.8) può essere utilizzata per compilare delle serie di tabelle o prospetti che permettono una determinazione più rapida dell'indice di abbagliamento, rispetto al calcolo secondo la formula. L'uso di tali prospetti è una procedura semplificata, che dà risultati che concordano con i dati ottenibili tramite la formula nella maggior parte dei casi; tuttavia è consigliabile l'applicazione della formula in tutte le situazioni in cui è possibile, in quanto essa fornisce una valutazione più precisa del livello di abbagliamento.

Tali prospetti sono creati dai produttori di apparecchiature di illuminazione a partire dalle informazioni fotometriche delle sorgenti luminose e vengono forniti come integrazione dei file fotometrici. Essi sono inoltre accompagnati da alcuni parametri correttivi, che vengono messi a disposizione per perfezionare la stima dell'abbagliamento. In alcuni casi, ad esempio, se un apparecchio viene installato più frequentemente con un certo tipo di lampada, è opportuno che il redattore del prospetto fornisca dei termini correttivi relativi alla lampada in questione. I prospetti per la determinazione del valore di UGR sono di due tipi: prospetti completi e prospetti ridotti.

I *prospetti completi* includono l'uso di un numero relativamente elevato di informazioni fotometriche riguardanti l'abbagliamento e di un numero ridotto di termini correttivi. Il prospetto presentato come esempio nella Tabella 2.2 riporta i valori dell'indice UGR calcolati per apparecchi con flusso totale delle lampade di 1000 lm. H [m] rappresenta la differenza di altezza utile tra il piano dell'occhio dell'osservatore e il piano dell'apparecchio considerato (come in Figura 2.1), con l'occhio dell'osservatore posto ad un'altezza di 1,2 m da terra. Le dimensioni del locale sono disposte in verticale nella tabella e sono espresse in multipli di H mentre in orizzontale ci sono diverse combinazioni di fattori di riflessione di soffitto, pareti e piano di lavoro. Viene fatta una distinzione tra i due casi in cui gli apparecchi sono montati

trasversalmente o longitudinalmente rispetto alla direzione di osservazione. Il prospetto viene completato da fattori correttivi che tengono conto delle interdistanze tra gli apparecchi e delle diverse potenze: il valore del fattore correttivo da prendere in considerazione è sempre il più elevato perché così facendo si ottiene una stima più cautelativa esaminando il caso peggiore.

Il valore di UGR ricavato dalla Tabella 2.2 è riferito ad un flusso di 1000 lm, perciò è necessario calcolare un fattore correttivo C_ϕ relativo al flusso nominale delle lampade installate in un singolo apparecchio tramite la formula (2.13), che poi va sommato algebricamente al valore di UGR ottenuto.

$$C_\phi = 8 \log_{10}(\phi/1000) \quad (2.13)$$

Tabella 2.2 Esempio di prospetto completo dei valori dell'indice UGR [7]

Valori di UGR (riferiti a 1000 lm)												
Fattori di riflessione:												
Vano soffitto		0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	
Pareti		0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	
Piano di lavoro		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
Dimensioni del locale		Apparecchio visto trasversalmente					Apparecchio visto longitudinalmente					
x	y											
2H	2H	14,4	15,4	14,6	15,6	16,0	13,5	14,5	13,7	14,7	15,1	
	3H	14,3	15,3	14,6	15,5	15,8	13,3	14,3	13,6	14,5	14,8	
	4H	14,2	15,1	14,5	15,3	15,6	13,2	14,1	13,5	14,3	14,6	
	6H	14,0	14,8	14,4	15,1	15,5	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4	
	8H	14,0	14,8	14,4	15,1	15,4	13,0	13,8	13,4	14,1	14,4	
4H	12H	14,0	14,8	14,3	15,0	15,4	13,0	13,8	13,3	14,0	14,4	
	2H	14,4	15,3	14,7	15,5	15,8	13,6	14,5	13,9	14,7	15,0	
	3H	14,3	15,1	14,6	15,3	15,8	13,4	14,2	13,7	14,4	14,8	
	4H	14,1	15,0	14,5	15,2	15,7	13,2	14,1	13,6	14,3	14,8	
	6H	14,1	14,7	14,6	15,1	15,6	13,2	13,8	13,7	14,2	14,7	
8H	8H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6	
	12H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6	
	4H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6	
	6H	14,0	14,5	14,5	14,9	15,3	13,1	13,6	13,6	14,0	14,4	
	8H	13,9	14,3	14,4	14,7	15,3	13,0	13,4	13,5	13,8	14,4	
12H	12H	13,9	14,3	14,4	14,6	15,3	13,0	13,4	13,5	13,7	14,4	
	4H	14,0	14,6	14,6	15,0	15,5	13,1	13,7	13,7	14,1	14,6	
	6H	13,9	14,3	14,4	14,6	15,3	13,0	13,4	13,5	13,1	14,4	
	8H	13,9	14,3	14,4	14,6	15,3	13,0	13,4	13,5	13,7	14,4	
Campo di variazione di UGR per interdistanze S degli apparecchi												
S=	1,0H	+0,9/-2,1					+0,8/-1,5					
	1,5H	+2,21-7,9					+2,6/-12,1					
	2,0H	+4,0/-16,0					+4,0/-22,9					
Correzioni per apparecchi dello stesso tipo con potenze diverse:												
1x18W: +24		1x36W: 0		1x58W: -0,8								

I *prospetti ridotti* invece prevedono l'uso di poche informazioni fotometriche e per questo necessitano di più fattori correttivi. Un prospetto ridotto come quello presentato ad esempio nella Tabella 2.3 riporta, per apparecchi visti trasversalmente e longitudinalmente, la classe che permette di scegliere il prospetto tipico, cioè il prospetto in cui sono indicati i valori di UGR, come ad esempio quelli presentati nelle Tabelle 2.4. Il prospetto ridotto indica inoltre i fattori correttivi per le diverse potenze di apparecchi dello stesso tipo e per diverse interdistanze tra gli apparecchi. Anche nel caso dei prospetti ridotti il valore dei fattori correttivi da prendere in considerazione è sempre il più elevato, perché così facendo si ottiene una stima cautelativa.

Tabella 2.3 Esempio di prospetto ridotto dei valori dell'indice UGR [7]

Apparecchio visto:		Trasversalmente	Longitudinalmente
Prospetto tipico		Classe 0	Classe 0
Correzioni per altri apparecchi dello stesso tipo	1x18W	-3,1	-4,0
	1x36W	-5,5	-6,4
	1x58W	-6,3	-7,2
Campo di variazione di UGR per interdistanza apparecchi	S = 1,0H	+0,9/-2,1	+0,8/-1,5
	1,5H	+2,2/-7,9	+2,6/-12,1
	2,0H	+4,0/-16,0	+4/-22,9

Tabella 2.4 Due esempi di prospetti tipici dei valori non corretti dell'UGR [7]

Classe 0	x	2	3	4	6	8	12
y	2	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	3	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	4	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	6	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	8	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
	12	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Classe 1	x	2	3	4	6	8	12
y	2	19,0	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5
	3	19,3	19,7	19,9	19,9	19,9	19,9
	4	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
	6	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
	8	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0
	12	19,4	19,8	19,9	20,0	20,0	20,0

Anche nei prospetti ridotti il valore di UGR ottenuto è riferito a 1000 lm, perciò sarà necessario calcolare il termine correttivo C_{ϕ} relativo al flusso nominale delle lampade installate attraverso la formula (2.13). Inoltre, è necessario calcolare anche il fattore correttivo C_{LR} che tenga conto dei fattori di riflessione del locale attraverso la formula (2.14).

$$C_{LR} = -8 \log_{10} L_R \quad (2.14)$$

Il valore di L_R si ricava dai fattori di utilizzazione dell'apparecchio usato tramite la formula (2.15).

$$L_R = 6Fu_{(totale)} - 5Fu_{(diretto)}, \quad (2.15)$$

dove

$Fu_{(totale)}$ corrisponde al fattore di utilizzazione totale, individuato in funzione dell'indice di locale e dei fattori di riflessione della stanza;

$Fu_{(diretto)}$ corrisponde al fattore di utilizzazione diretto, individuato in funzione dell'indice di locale della stanza ponendo tutti i fattori di riflessione pari a 0.

Un esempio di prospetto dei fattori di utilizzazione è riportato nella Tabella 2.5.

Tabella 2.5 Esempio di prospetto dei fattori di utilizzazione [7]

Fattori di riflessione									
Vano soffitto	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,0
Pareti	0,5	0,3	0,1	0,5	0,3	0,1	0,3	0,1	0,0
Piano di lavoro	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0
Indice del locale	Fattori di utilizzazione								
K= 0,60	0,34	0,29	0,26	0,33	0,29	0,25	0,28	0,25	0,24
0,80	0,42	0,37	0,34	0,41	0,37	0,34	0,36	0,33	0,32
1,00	0,48	0,44	0,40	0,47	0,43	0,40	0,42	0,39	0,38
1,25	0,53	0,49	0,46	0,52	0,48	0,45	0,47	0,44	0,43
1,50	0,57	0,53	0,50	0,55	0,52	0,49	0,51	0,48	0,46
2,00	0,62	0,58	0,55	0,59	0,57	0,54	0,55	0,53	0,51
2,50	0,65	0,62	0,59	0,62	0,60	0,58	0,58	0,56	0,54
3,00	0,67	0,64	0,62	0,64	0,62	0,60	0,60	0,59	0,56
4,00	0,69	0,67	0,65	0,67	0,65	0,63	0,63	0,61	0,58
5,00	0,71	0,69	0,67	0,68	0,67	0,65	0,64	0,63	0,60
	$Fu_{(totale)}$								$Fu_{(diretto)}$

Il fattore di utilizzazione viene individuato in funzione dell'indice di locale K , che tiene conto della geometria dell'ambiente e si calcola come nella formula (2.16).

$$K = \frac{(a \cdot b)}{H \cdot (a + b)} \tag{2.16}$$

dove

a è la lunghezza del locale [m];

b è la larghezza del locale [m];

H è l'altezza delle sorgenti rispetto all'occhio dell'osservatore (come in Figura 2.1).

2.4.4 Metodo delle curve limite UGR

Le curve limite UGR sono dei grafici che descrivono l'andamento del logaritmo della luminanza in funzione dell'angolo γ . Ogni curva UGR presente in un diagramma corrisponde a un particolare livello di abbagliamento; i diagrammi in genere mostrano i valori di UGR tra 10 e 28. La Figura 2.3 mostra un esempio di diagramma di curve limite UGR: in esso la linea spessa indica l'andamento della luminanza per l'apparecchio in questione visto trasversalmente, la linea sottile invece riguarda l'apparecchio visto longitudinalmente. Come si può notare, entrambe le linee rientrano nel limite di $UGR = 19$, pertanto è ragionevole assumere che l'abbagliamento rimarrà entro tale limite nella maggior parte delle situazioni. Tuttavia, la linea

relativa alla vista trasversale (linea spessa) entra nella regione tratteggiata della curva UGR, quindi in alcuni casi il massimo abbagliamento potrebbe eccedere il limite di 19.

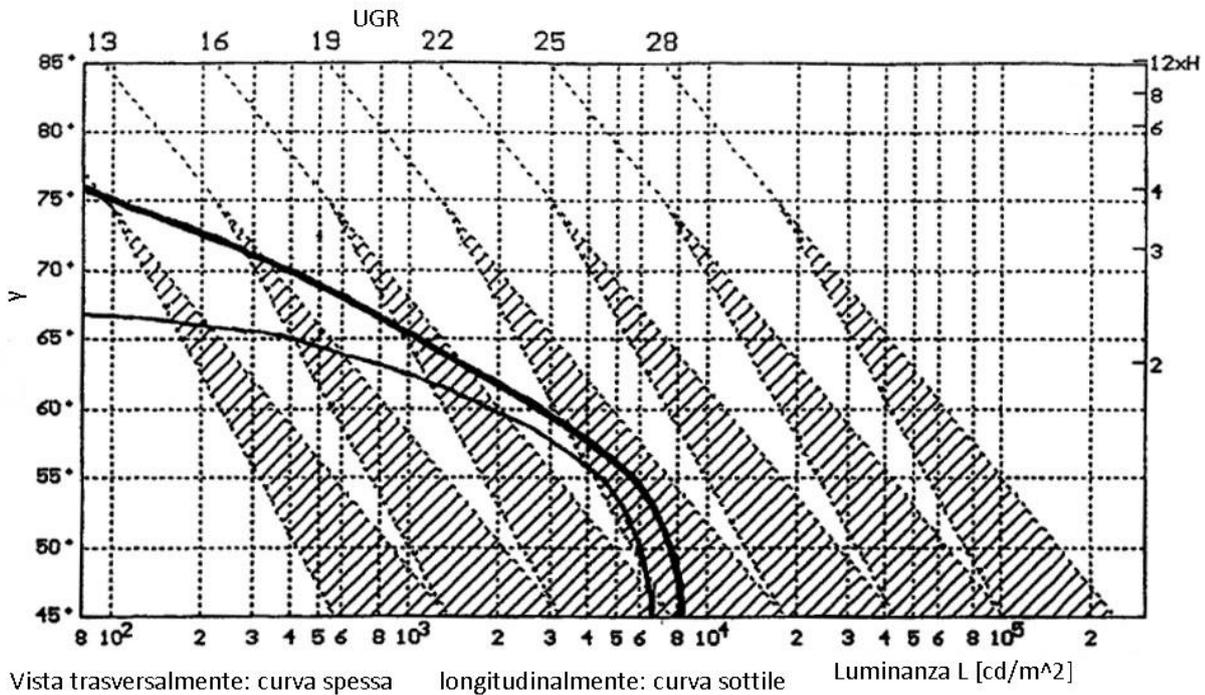


Figura 2.3 Diagramma delle curve limite UGR

I valori di UGR mostrati sono 10, 13, 16, 19, 22, 25 e 28. La linea spessa indica il caso in cui l'apparecchio sia visto trasversalmente, mentre la linea sottile indica un apparecchio visto longitudinalmente. L'area tratteggiata indica una zona di tolleranza in cui è ragionevole pensare di essere entro il limite nella maggior parte delle applicazioni, ma il massimo dell'abbagliamento potrebbe eccedere [5].

Il concetto che sta alla base dell'applicazione del metodo delle curve limite consiste nel fatto che, una volta scelto il valore limite di UGR, la luminanza L dell'apparecchio in questione deve essere limitata dalla curva corrispondente, all'interno del range di angolazioni γ permesso dalle dimensioni del locale.

Per tracciare tali curve, è necessario dare un valore alla luminanza dello sfondo in funzione dell'illuminamento fornito dall'apparecchio sul piano di lavoro: per il diagramma in Figura 2.3 ad esempio, tale valore è assunto pari a 1 cd/m^2 , con un illuminamento pari a $10\pi \text{ lx}$. Con questi presupposti, le curve UGR sono espresse dalla formula (2.17).

$$\log_{10} L = (29 + UGR - 0.308 \gamma) / 8 \quad (2.17)$$

in cui l'angolo γ è espresso in gradi.

2.5 Formula CIE per l'abbagliamento debilitante

Con il termine ‘abbagliamento debilitante’ si intende un abbagliamento tale da compromettere la visione degli oggetti. Esso è provocato dalla diffusione della luce all’interno dell’occhio, soprattutto a causa dell’imperfetta trasparenza della cornea, del cristallino e del corpo vitreo e in minima parte alla luce che attraversa la sclera e l’iride [9]. La sovrapposizione di questa luce diffusa all’immagine dell’oggetto causa una riduzione del contrasto dell’immagine impressa sulla retina, come se si osservasse l’oggetto attraverso un velo; per questo motivo la luce diffusa viene descritta in termini di *luminanza di velo* (L_{veil}).

La luminanza di velo della luce diffusa ha un effetto debilitante significativo quando nella zona periferica del campo visivo sono presenti delle sorgenti luminose di notevole intensità e il contrasto tra la luminanza dell’oggetto da percepire e la luminanza dello sfondo è basso. La riduzione di tale contrasto, a causa della luce diffusa all’interno dell’occhio, può farlo scendere ad un livello vicino alla soglia di percezione causando delle difficoltà nella visione o addirittura farlo scendere al di sotto della soglia di percezione, impedendo completamente la visione. L’abbagliamento debilitante è più frequente in condizioni di scarsa illuminazione, tipicamente di notte, quando la sensibilità al contrasto è ridotta e vicino alla direzione di osservazione possono trovarsi numerose sorgenti luminose intense, come ad esempio fari di automobili, segnaletica stradale luminosa o insegne luminose. Tuttavia, anche di giorno l’abbagliamento debilitante può diventare importante: si pensi alla difficoltà di guardare un semaforo quando il sole si trova vicino alla direzione di osservazione o alla difficoltà di svolgere un compito visivo vicino ad una finestra in una giornata di sole.

L’entità della luminanza di velo dipende dall’intensità luminosa I_{glare} [cd], dalla distanza d [m] della sorgente abbagliante dall’osservatore e dall’angolo θ [sr] tra la direzione di osservazione e la direzione occhio-sorgente, che insieme determinano l’illuminamento sull’occhio causato dalla sorgente E_{glare} , secondo la formula (2.18).

$$E_{glare} = \frac{I_{glare}}{d^2} \cos \theta \quad (2.18)$$

La prima stima della luminanza di velo è stata ricavata da dati empirici fu presentata dalla CIE nel 1942 [9] ed è espressa dalla formula (2.19).

$$\frac{L_{veil}}{E_{glare}} = \frac{10}{\theta^2} \quad (2.19)$$

Pur non essendo mai stata formalmente adottata dalla CIE, tale formulazione è stata usata per molti anni per quantificare l’abbagliamento debilitante, nonostante i suoi limiti fossero già ben noti: in particolare la sua divergenza per $\theta = 0$ che ne limita la validità per angoli troppo piccoli e il fatto che non tenga conto dei fattori soggettivi che influiscono sull’abbagliamento, come la pigmentazione dell’occhio e l’età dell’osservatore. La non proporzionalità della luminanza di velo con il termine $1/\theta^2$ può essere notata nel grafico in Figura 2.4. Allo scopo di porre rimedio a tali incongruenze, sono stati sviluppati dalla CIE alcuni termini correttivi di seguito esposti. Vengono presentate tre versioni dell’equazione dell’abbagliamento debilitante: la prima è la più semplice ed è valida in un intervallo ristretto di angoli θ , la seconda è poco più complicata

ma ha un campo di validità più esteso, mentre la terza, detta *Equazione Generale CIE per l'Abbagliamento Debilitante*, copre un campo più completo.

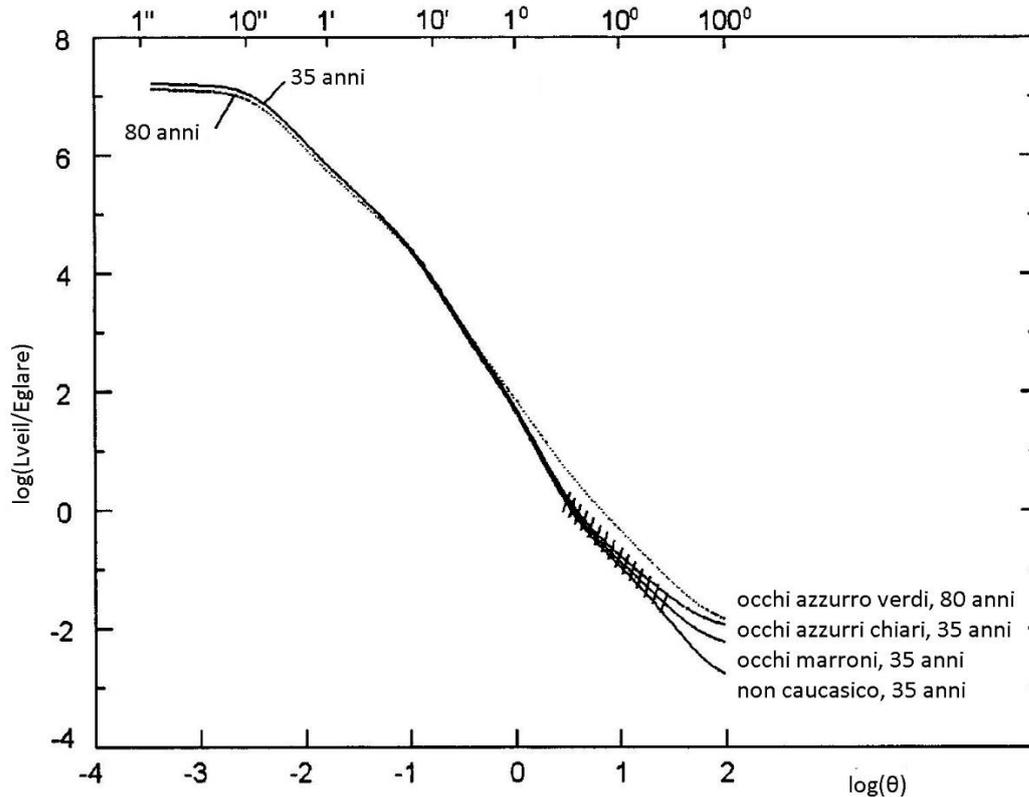


Figura 2.4 Relazione tra l'abbagliamento debilitante e l'angolo di inclinazione θ . Il tratteggio rappresenta la zona in cui l'effetto delle diverse pigmentazioni dell'iride comincia ad essere rilevante [9].

Per l'implementazione di un calcolo tramite software è opportuno usare sempre l'equazione più completa, mentre le altre sono da intendere come formulazioni di utilizzo più pratico ma approssimate.

2.5.1 Correzione per l'effetto dell'età

Nell'intervallo di angoli θ compresi tra 1° e 30° , la dipendenza della luminanza di velo dall'angolazione è ben rappresentata dalla formula (2.19). L'influenza della pigmentazione dell'occhio dell'osservatore in questo intervallo non è particolarmente rilevante, quindi l'unico termine correttivo da applicare in questo caso è un fattore che tenga conto dell'età dell'osservatore, detto *Age Factor*, che può essere espresso come nella formula (2.20). Da dati sperimentali si è osservato che l'effetto dell'età sull'abbagliamento debilitante comincia ad essere rilevante al di sopra dei 40 anni e che si ha un aumento della luminanza di velo ancora più importante al di sopra dei 70 anni.

$$Age\ Factor = 1 + \left(\frac{A}{70}\right)^4 \quad (2.20)$$

in cui A è l'età del soggetto, espressa in anni.

Di conseguenza, riformulando la formula CIE (2.19) applicandole la correzione per l'effetto dell'età, si ottiene la (2.21).

$$\left[\frac{L_{veil}}{E_{glare}} \right]_{età} = \frac{10}{\theta^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{70} \right)^4 \right] \quad (2.21)$$

valida per angoli $1^\circ < \theta < 30^\circ$.

2.5.2 Correzione per angoli piccoli

Come si può notare dalla Figura 2.4, per angoli θ compresi tra $0,1^\circ$ e 1° , ovvero per $\log(\theta)$ compreso tra -1 e 0, la dipendenza della luminanza di velo dall'angolo diventa più ripida di $1/\theta^2$. Inoltre, è possibile osservare che la dipendenza dell'abbagliamento debilitante dall'età dell'osservatore diventa via via meno rilevante per angoli piccoli. Perciò la CIE ha proposto una seconda estensione della (2.19), detta equazione CIE per angoli piccoli e illustrata nella formula (2.22).

$$\left[\frac{L_{veil}}{E_{glare}} \right]_{angoli\ piccoli} = \frac{10}{\theta^3} + \frac{5}{\theta^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{62.5} \right)^4 \right] \quad (2.22)$$

valida per angoli $0,1^\circ < \theta < 30^\circ$.

2.5.3 Equazione generale per l'abbagliamento debilitante

Per angolazioni al di sotto di $0,1^\circ$ l'effetto abbagliante di una sorgente non riguarda più tanto l'ambito dell'abbagliamento debilitante, quanto quello dell'aberrazione ottica [9]. La CIE non definisce una funzione per valutare l'abbagliamento in questo campo, soprattutto per la complicazione determinata dal fatto che l'aberrazione ottica dipende fortemente dalle dimensioni della pupilla, quindi si tratta di una problematica particolarmente mutevole e soggettiva. Per angolazioni al di sopra dei 30° , la definizione di un'equazione per la stima dell'abbagliamento debilitante può essere rilevante in alcune circostanze, pur trattandosi di un range di angoli di poca importanza nella maggior parte delle situazioni pratiche. Tale equazione richiede la definizione di un fattore p che tenga conto della pigmentazione dell'iride dell'osservatore perché, come si può notare dalla Figura (2.3), per angolazioni superiori a 30° la luminanza di velo assume valori diversi a seconda della pigmentazione. La CIE ha proposto, come elaborazione più completa della (2.19), la l'equazione (2.23), detta *Equazione Generale CIE per l'Abbagliamento Debilitante*.

$$\left[\frac{L_{veil}}{E_{glare}} \right]_{generale} = \frac{10}{\theta^3} + \left(\frac{5}{\theta^2} + \frac{0.1p}{\theta} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{62.5} \right)^4 \right] + 0.0025p \quad (2.23)$$

Essa è valida nell'intervallo di angoli $0,1^\circ < \theta < 100^\circ$, nella quale p rappresenta il fattore di pigmentazione dell'iride che varia da 0 per occhi neri, a 0.5 per occhi marroni, a 1.0 per occhi chiari fino ad arrivare a 1.2 per occhi azzurri molto chiari. L'effetto delle diverse pigmentazioni diventa rilevante solo per angoli θ grandi, ai quali la diffusione della luce nella cornea e nella lente del cristallino diventa trascurabile e quindi la dipendenza della luminanza di velo da θ diventa marginale.

Capitolo 3

Abbagliamento per sorgenti piccole, estese e complesse

Il metodo UGR, essendo valido solo per gli apparecchi che determinano un angolo solido ω compreso tra 0,0003 sr e 0,1 sr (come visto nel §2.4.2), non si applica opportunamente alla valutazione dell'abbagliamento molesto dovuto a sorgenti piccole e alle sorgenti estese: infatti esso tende a sovrastimare l'abbagliamento provocato dalle sorgenti piccole ($< 0,005 \text{ m}^2$), mentre sottovaluta l'abbagliamento derivante dalle sorgenti estese ($> 1,5 \text{ m}^2$). Inoltre, il metodo UGR tiene in considerazione solo la luminanza media dell'apparecchio luminoso, il che è sufficiente per distribuzioni di luminanza relativamente uniformi ma non per distribuzioni non uniformi, le quali risultano più abbaglianti delle prime, a parità di luminanza media. Perciò risulta necessario fornire delle metodologie alternative, specifiche per la stima dell'abbagliamento molesto dovuto a tali sorgenti non convenzionali, considerato anche il fatto che, con l'impiego sempre più ampio di apparecchi a tecnologia LED, esse ormai sono molto frequenti.

3.1 Abbagliamento per sorgenti di piccole dimensioni

Il metodo UGR “classico”, presentato nel §2.4, assegna un abbagliamento troppo elevato alle sorgenti di dimensioni ridotte, nonostante sia esperienza comune che esse vengano usate senza essere considerate particolarmente abbaglianti. Ciò è dovuto al fatto che la formula UGR (2.8) è basata su ricerche fatte su sorgenti di dimensioni “normali” e dà un peso troppo importante alla luminanza della sorgente in esame, quindi non è idonea per le sorgenti piccole, per le quali l'abbagliamento molesto non è determinato dalla luminanza, ma dall'intensità luminosa.

Il calcolo dell'abbagliamento molesto tramite il nuovo metodo per le sorgenti di piccole dimensioni, detto metodo $\text{UGR}_{\text{small}}$, si basa sull'assunzione che una sorgente luminosa viene definita di piccole dimensioni quando ad essa corrisponde un'area apparente inferiore a $0,005 \text{ m}^2$, che equivale ad una superficie circolare di circa 80 mm di diametro. Dalle ricerche di B. M. Paul e H. D. Einhorn [10] infatti è emerso che quando si vuole valutare l'abbagliamento molesto, al di sotto della dimensione minima pari a $0,005 \text{ m}^2$, le dimensioni effettive di una sorgente vengono percepite dall'osservatore non in termini di angolo solido, ma in termini di area apparente A_p , la quale è da considerare costante. Per mettere in evidenza le motivazioni di tale scelta, è necessario riformulare la formula (2.8).

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \frac{L^2 \omega}{P^2} \right)$$

Considerando che $L_b = E_i/\pi$, $L = E_d/\omega$, $\omega = A/r^2$ si ottiene la formula (3.1).

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25 \pi}{P^2} \cdot \frac{E_d^2}{E_i} \cdot \frac{r^2}{A} \right) \quad (3.1)$$

dove

E_d è l'illuminamento diretto sull'occhio dell'osservatore [cd];

E_i è l'illuminamento indiretto sull'occhio dell'osservatore [cd];

r è la distanza tra occhio e sorgente [m].

Da test sperimentali ottenuti sottoponendo un campione di soggetti a una situazione di abbagliamento causato da sorgenti di piccole dimensioni [10], è emerso che il rapporto E_d^2/E_i , decresce con proporzionalità inversa con il quadrato della distanza di osservazione r . Dato che anche l'angolo solido sotteso da una sorgente luminosa decresce con proporzionalità inversa con il quadrato della distanza di osservazione, ciò si traduce nel fatto che le dimensioni effettive di una sorgente di piccole dimensioni vanno espresse in termini non di angolo solido ma di area apparente, la quale invece rimane costante. Pertanto, invece di modificare il metodo di calcolo dell'abbagliamento, è sufficiente correggere il calcolo facendo due assunzioni: (1) per le sorgenti di piccole dimensioni è necessario considerare un'area apparente effettiva costante e più grande di quella reale; (2) di conseguenza si deve considerare anche una luminanza effettiva minore di quella reale, ricavata dall'intensità luminosa reale (secondo la relazione $I = L \cdot A = L_p \cdot A_p$). Quindi se si considera un'area apparente effettiva A_p pari a $0,005 \text{ m}^2$, cioè pari all'area effettiva di una sorgente di piccole dimensioni, si ottiene una luminanza effettiva dalla formula (3.2).

$$L_p = \frac{I}{A_p} = 200 \cdot I \quad (3.2)$$

L'angolo solido sotteso dalla sorgente è espresso dalla formula (3.3).

$$\omega = \frac{A_p}{r^2} = \frac{1}{200 r^2} \quad (3.3)$$

Di conseguenza, per una sorgente di piccole dimensioni, sostituendo le formule (3.2-3.3) nella formula dell'UGR (2.8), si ottiene la (3.4), detta equazione UGR_{small} per la valutazione dell'abbagliamento molesto dovuto a sorgenti di piccole dimensioni.

$$UGR_{small} = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \sum \frac{I^2}{A_p r^2 P^2} \right) = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \sum \frac{200 I^2}{r^2 P^2} \right) \quad (3.4)$$

in cui:

L_b è la luminanza di sfondo [cd/m^2];

I è l'intensità luminosa nella direzione dell'occhio [cd];

r è la distanza tra l'occhio e la sorgente [m];

P è l'indice di posizione di Guth (formula 2.4).

In conclusione, è possibile affermare che quando si parla di abbagliamento molesto, per le distanze in gioco nell'illuminazione di locali interni, le sorgenti di piccole dimensioni vengono percepite dall'occhio come se avessero un'area effettiva costante, che è pari a $0,005 \text{ m}^2$. Tale area è da intendere costante sia rispetto alle dimensioni reali, sia rispetto alla distanza di osservazione. Di conseguenza è possibile concludere che, a parità di intensità luminosa, due lampade di dimensioni diverse ma piccole generano lo stesso livello di abbagliamento. Quindi, ad esempio, le lampade a incandescenza con vetro traslucido non sono meno abbaglianti delle lampade a incandescenza con vetro trasparente, dato che le loro aree apparenti effettive sono uguali. Si sottolinea che l'invariabilità dell'area effettiva A_p vale anche al variare della distanza tra osservatore e sorgente luminosa, a patto di rimanere a distanze tipiche dell'illuminazione d'interni, dell'ordine di qualche metro, dato che nelle ricerche di B. M. Paul e H. D. Einhorn [10] non sono stati eseguiti test per distanze superiori a 4 m.

Sono stati eseguiti anche dei test anche per verificare le eventuali influenze della sensibilità dell'occhio dell'osservatore e dell'adattamento sull'area effettiva A_p [10]. La sensibilità dell'occhio è stata quantificata usando i valori di UGR ottenuti sottoponendo i soggetti del test una sorgente di dimensioni normali. L'adattamento dell'occhio invece è stato espresso in termini di illuminamento indiretto sull'occhio E_i . In entrambi i casi è stata riscontrata una sostanziale indipendenza di A_p .

3.2 Abbagliamento per sorgenti estese

La formula UGR non è adatta alla valutazione dell'abbagliamento molesto provocato da sorgenti luminose di dimensioni estese, dato che tende ad assegnare dei valori di abbagliamento troppo tolleranti e può permettere livelli di abbagliamento inaccettabili.

Per quanto riguarda i soffitti luminosi o le sorgenti uniformi indirette poste sui soffitti, per limitare l'abbagliamento, la norma CIE 147 del 2002 fornisce delle raccomandazioni sui livelli di illuminamento medio massimi che non dovrebbero essere superati [11]. Secondo tale norma, l'illuminamento medio derivante da un soffitto luminoso diffondente o da una sorgente indiretta uniforme non dovrebbe superare:

300 lx per ottenere un UGR non superiore a 13,

600 lx per ottenere un UGR non superiore a 16,

1000 lx per ottenere un UGR non superiore a 19,

1600 lx per ottenere un UGR non superiore a 22.

Se sono richiesti livelli di illuminamento più elevati è possibile aggiungere all'installazione anche degli apparecchi luminosi convenzionali, purché siano ben schermati, per non superare il limite di abbagliamento prefissato.

Per quanto concerne, invece, le sorgenti luminose che si trovano nell'intervallo di mezzo tra le sorgenti di dimensioni 'normali' e i soffitti luminosi, serve un metodo di previsione diverso, che sia coerente nei punti di transizione tra i campi di applicazione dei diversi metodi: ciò significa che nei punti di transizione tra due metodi, entrambi dovranno predire lo stesso livello di abbagliamento, con un'accuratezza adeguata. Il metodo per la previsione dell'abbagliamento molesto proposto dalla CIE per tali sorgenti si chiama GGR (*'great-room' glare rating*) e si basa sulle formule (3.5-3.6). Nella norma CIE 147 del 2002 [11] vengono proposte due formulazioni per il calcolo di GGR: una estesa e una contratta. Nonostante esse vengano presentate come equivalenti, confrontandole tra loro ci si accorge che non sono uguali. Ciò può essere dovuto ad un errore di trascrizione o di battitura durante la stesura della norma. Dopo alcune considerazioni, presentate nel §4.3, ci si è accorti che la formulazione estesa presentata nella norma non dà risultati plausibili. Si è quindi pensato di considerare come esatta la formulazione contratta. Nel presente paragrafo, la formula (3.6) è la formula contratta presentata nella norma, mentre la formula (3.5) è una formulazione estesa ricavata dalla (3.6) e ad essa equivalente.

$$GGR = \left(\frac{0.18}{CC} - 0.18\right) \cdot 8 \log_{10} \left(\frac{0.785}{E_i} \cdot \frac{L^2 \omega}{P^2}\right) + \left(1.18 - \frac{0.18}{CC}\right) \cdot 8 \log_{10} \left[\frac{2\left(1 + \frac{E_d}{220}\right)}{(E_d + E_i)} \cdot \frac{L^2 \omega}{P^2}\right] \quad (3.5)$$

che equivale a

$$GGR = UGR + \left(1.18 - \frac{0.18}{CC}\right) \cdot 8 \log_{10} \left[\frac{2.55 \left(1 + \frac{E_d}{220}\right)}{\left(1 + \frac{E_d}{E_i}\right)}\right] \quad (3.6)$$

dove

CC è il *ceiling coverage*, ossia il rapporto tra l'area del soffitto coperta dalle sorgenti luminose e l'area del soffitto totale;

UGR è il valore di abbagliamento ottenuto tramite la formula (2.8).

I valori dell'indice GGR, applicato a sorgenti estese, esprimono la stessa sensazione di abbagliamento espressa dai valori dell'indice UGR, applicato a sorgenti 'normali': ad esempio $GGR = 19$ corrisponde allo stesso livello di abbagliamento di $UGR = 19$. Le formule GGR e UGR coincidono per CC pari a 0.152 (il secondo addendo dell'espressione 3.6 si annulla per tale valore di CC) e GGR è sufficientemente coerente con i livelli di illuminamento medio sopra proposti per i soffitti luminosi. L'equazione GGR è piuttosto complicata e necessita l'uso di un calcolatore per essere implementata; tuttavia essa è basata sugli stessi dati di input della formula UGR con l'aggiunta di CC e dell'illuminamento diretto E_d , entrambi ottenibili tanto facilmente quanto i dati necessari per il calcolo dell'UGR.

3.3 Abbagliamento per sorgenti indirette e complesse

Dato che le sorgenti luminose non uniformi non sono state prese in considerazione per lo sviluppo di una vera e propria formula che consenta il calcolo di un indice di abbagliamento, il tema delle sorgenti luminose indirette è stato a lungo dibattuto. Inoltre, con la crescita del

mercato dell'illuminazione d'interni con tecnologia a LED, un metodo per quantificarne l'abbagliamento molesto è divenuto essenziale: infatti le sorgenti a LED presentano spesso una distribuzione di luminanza disuniforme, caratterizzata da un alternarsi di zone a luminanza elevata e zone relativamente scure. Per far fronte a tale problematica la CIE e altri centri di studio hanno sviluppato dei metodi specifici per sorgenti dalla distribuzione di luminanza non uniforme e per sorgenti complesse, tuttavia la loro validità rimane ancora oggi in discussione.

3.3.1 Formula CIE per sorgenti non uniformi

La stima dell'abbagliamento molesto causato da sorgenti non uniformi indirette, ad esempio i soffitti illuminati da lampade con emissione verso l'alto (*uplighter*), risulta difficoltoso in quanto alcuni dati, come il *ceiling coverage* o l'angolo solido ω , in questi casi sono difficili da ricavare o misurare, data la difficoltà nel distinguere i contorni delle parti luminose. Per tali casistiche la CIE fornisce una formula più semplice, basata sul calcolo dell'illuminamento massimo consentito da un limite di abbagliamento prefissato [11].

Per limitare l'abbagliamento, l'illuminamento medio generato da una sorgente indiretta su un soffitto non uniformemente illuminato non dovrebbe superare il valore di illuminamento calcolato con la formula (3.7).

$$E_{av} = 1500 - \left(2.1 - \frac{1.5}{K} - 1,4R_w \right) \cdot L_s \quad (3.7)$$

dove

L_s è la luminanza media dell'area del soffitto illuminata [cd/m^2];

K è l'indice di locale (formula 2.16);

R_w è il coefficiente di riflessione delle pareti;

per lo sviluppo della formula (3.7) i coefficienti di riflessione del soffitto e del pavimento sono stati supposti rispettivamente pari a 0.7 e 0.2.

La formula (3.7) si applica per ottenere un valore di UGR pari a 19. Se invece si desiderano livelli di UGR diversi è necessario moltiplicare E_{av} :

per 0.3 se si desidera un UGR non superiore a 13,

per 0.6 se si desidera un UGR non superiore a 16,

per 1.6 se si desidera un UGR non superiore a 22.

Secondo la norma CIE, tale procedura è ampiamente applicabile a una vasta categoria di sorgenti luminose diffondenti, anche uniformi e a soffitti luminosi con strisce scure tra i pannelli luminosi. Tuttavia, tale metodo non è presentato come molto accurato: applicandolo si può assumere di essere al di sotto del livello di abbagliamento desiderato con buona probabilità ma non se ne ha la certezza. Inoltre, nonostante E_{av} , K e R_w siano relativamente facili da valutare, rimane un certo livello di incertezza su L_s dato che non è sempre agevole dare una valutazione della distribuzione della luminanza sul soffitto. La CIE raccomanda quindi usare la formula GGR (3.5-3.6) ogniqualvolta sia possibile, in quanto più accurata.

3.3.2 Formula CIE per sorgenti complesse

Con il termine ‘sorgenti complesse’ la CIE intende le sorgenti luminose, come quelle dotate di griglie o schermi, per le quali la luminanza può non essere uniforme su tutta l’area dell’apparecchio o può variare anche a seconda dell’angolo di osservazione. Per quanto riguarda tale categoria di apparecchi, la CIE stabilisce che è necessario che il calcolo dell’abbagliamento molesto presti attenzione alle luminanze nelle diverse direzioni. Per semplicità è possibile distinguere due modelli base di apparecchi [11]:

- (i) sorgenti diffondenti, nelle quali la luminanza può essere considerata costante su tutta l’area, ma variabile con l’angolo di osservazione;
- (ii) sorgenti speculari, nelle quali la luminanza può essere considerata indipendente dall’angolazione.

Il tipo (i) è chiamato *Acos*, dato che l’area apparente è pari al prodotto tra l’area reale A_0 e il coseno dell’angolo γ ($A_p = A_0 \cos \gamma$), mentre il tipo (ii) è chiamato *Lcon*, dato che L è costante al variare di γ . Per entrambi le tipologie vale la relazione (3.8).

$$L^2 \omega = \frac{L \cdot I}{r^2} \quad (3.8)$$

Per il tipo *Acos*, dalla proporzionalità tra luminanza e intensità luminosa, si ottiene la relazione (3.9).

$$L^2 \omega = \frac{I^2}{r^2 \cdot A_0 \cos \gamma}. \quad (3.9)$$

Per il tipo *Lcon* invece è necessario definire la luminanza effettiva: essa sarà maggiore della luminanza del tipo *Acos*, dato che le aree non luminose presenti sulla superficie ne riducono l’area apparente, ma minore della luminanza della lampada installata al suo interno, dato che il coefficiente di riflessione dell’apparecchio è sempre inferiore a 1. Una quantificazione prudente di luminanza può essere ottenuta dall’ipotesi di considerare l’intensità luminosa massima I_{max} nella direzione γ_{max} (per la maggior parte degli apparecchi, l’intensità luminosa massima si ha per $\gamma = 0$), per cui si ottiene la relazione (3.10).

$$L = \frac{I_{max}}{A_0 \cos \gamma_{max}}. \quad (3.10)$$

Sostituendo la (3.10) nella (3.8) si ottiene la relazione (3.11).

$$L^2 \omega = \frac{I \cdot I_{max}}{r^2 \cdot A_0 \cos \gamma_{max}}. \quad (3.11)$$

Per una sorgente piana, la stima ottenuta tramite la metodologia relativa a *Lcon* predice sempre un valore di UGR maggiore rispetto ad *Acos*. La differenza di UGR che si ottiene è pari alla quantità espressa dalla formula (3.12).

$$dUGR = 8 \log_{10} \frac{I_{max} \cos \gamma}{I \cdot \cos \gamma_{max}}. \quad (3.12)$$

Se si vuole stimare l'abbagliamento di una sorgente semi-speculare, ovvero con caratteristiche intermedie tra i due tipi, una soluzione abbastanza efficace si può raggiungere facendo la media tra le soluzioni ottenute nei due metodi.

3.3.3 Calcolo di UGR basato sulle mappe di luminanza

Il principio che sta alla base del metodo delle mappe di luminanza è la valutazione dell'abbagliamento provocato da sorgenti uniformi e non uniformi attraverso il calcolo della formula UGR (2.8) applicato alle mappe di luminanza: si tratta di immagini che danno una rappresentazione ad alta risoluzione della distribuzione della luminanza punto a punto sulla superficie dell'apparecchio di illuminazione. Oggigiorno, le mappe di luminanza sono ottenibili facilmente tramite l'uso di fotocamere CCD e sono usate abitualmente per la valutazione dell'abbagliamento provocato dalla luce naturale in applicazioni indoor [12]; pertanto G. H. Scheir *et al.* nelle loro ricerche [13] hanno pensato di applicare tale approccio anche agli apparecchi per l'illuminazione artificiale.

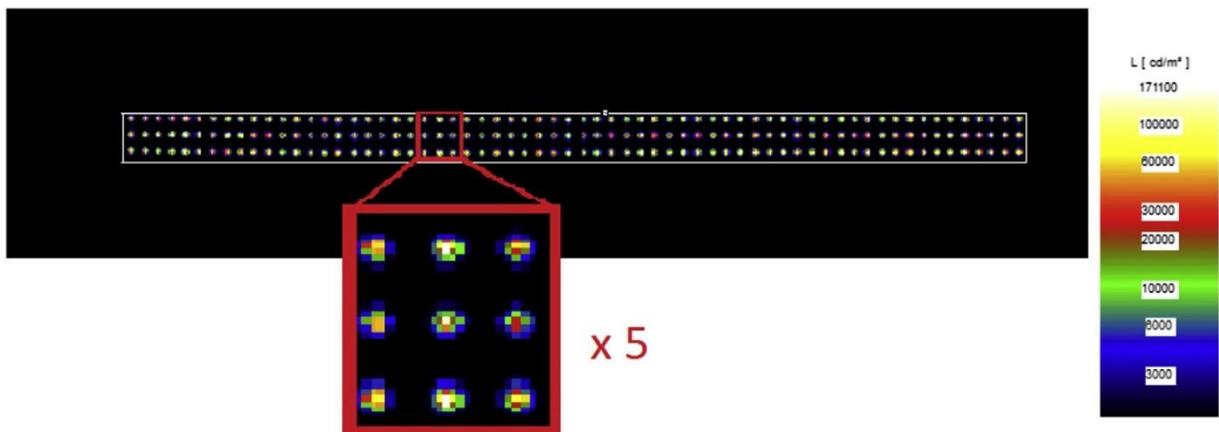


Figura 3.3.1 Esempio di mappa di luminanza di un apparecchio a LED [13]

Partendo da una mappa di luminanza ad alta risoluzione, si ricava una matrice dei valori di luminanza (in cd/m^2) che fornisce la luminanza puntuale in ogni pixel della superficie dell'apparecchio. Ad ogni pixel possono essere associate anche le informazioni riguardanti l'angolo solido e l'indice di posizione di Guth corrispondenti. I pixel possono essere poi trattati indipendentemente o essere raggruppati tra loro in suddivisioni, dotate di luminanza media tra i pixel in esse inclusi. Ogni pixel o suddivisione viene poi considerato come se fosse una sorgente luminosa a sé stante e se ne calcola il contributo di abbagliamento tramite la formula dell'UGR (2.8); successivamente tutti i contributi vengono sommati per calcolare l'abbagliamento.

Sono stati esaminati diversi algoritmi di raggruppamento dei pixel [13]:

- *Pixel*: ogni pixel può essere considerato come una sorgente luminosa indipendente, mantenendo in questo modo il maggior numero di suddivisioni della mappa di luminanza e il massimo numero di informazioni disponibili;
- *Square*: i pixel possono essere raggruppati in quadrati di dimensioni fissate (2x2, 3x3, ...) ottenendo, di fatto, un numero minore di pixel di dimensioni più grandi. Ai bordi della mappa possono avanzare dei pixel con i quali non sempre è possibile formare dei quadrati: in genere, se il numero dei pixel rimanenti è minore della metà dei pixel inclusi in un quadrato, tali pixel vengono raggruppati al gruppo a loro adiacente, altrimenti vengono raccolti in un gruppo indipendente;
- *Luminance grouping*: i pixel possono essere raggruppati in base alla loro luminanza: all'interno dello stesso gruppo verranno riuniti pixel caratterizzati da luminanze entro un intervallo prefissato;
- *Uniform*: tutti i pixel possono essere raccolti in un unico gruppo, il che equivale a calcolare l'UGR con il metodo convenzionale, ovvero come se l'apparecchio fosse di luminanza uniforme e pari alla luminanza media calcolata su tutta la superficie.

Per le sorgenti luminose uniformi, dato che la luminanza media calcolata su tutta la superficie non differisce dai valori di luminanza dei singoli pixel, il valore di UGR basato sulle mappe di luminanza non è influenzato dal numero di suddivisioni o dall'algoritmo di raggruppamento dei pixel ed è in accordo con il valore di UGR calcolato usando la luminanza media. Per le sorgenti non uniformi invece, i valori di luminanza di alcune suddivisioni potrebbero essere significativamente più grandi della luminanza media. Dato che nella formula dell'UGR (2.8) la luminanza L è elevata al quadrato, le suddivisioni con un livello di luminanza più alto daranno un contributo più importante alla determinazione dell'abbagliamento rispetto a quelle con un livello di luminanza più ridotto. Ne consegue che per un apparecchio di dimensioni e distribuzione di luminanza prestabiliti, nonostante la luminanza media rimanga invariata, più è alta la luminanza di alcune suddivisioni, più è alto l'UGR calcolato con le mappe di luminanza e ciò causa una iniziale crescita della stima di abbagliamento all'aumentare del numero di suddivisioni. Tuttavia, un valore stabile si ottiene già ripartendo l'apparecchio in una decina di suddivisioni con il metodo *luminance grouping* e in un centinaio di suddivisioni per il metodo *square*.

3.3.4 Metodo UGR_{ZJU} per sorgenti non uniformi

Un diverso approccio per trovare una soluzione al problema dell'abbagliamento molesto provocato dalle sorgenti luminose non uniformi è stato praticato recentemente da Y. Yang *et al.* [14, 15]: basandosi sulle ricerche di T. Tashiro *et al.* [16] e su dati ottenuti sottoponendo un campione di persone a diverse situazioni di illuminazione da sorgenti dalle luminanze uniformi e non uniformi, essi hanno proposto tre formulazioni alternative al metodo UGR. Non si tratta di formule completamente nuove, ma di formule che applicano dei fattori correttivi all'UGR convenzionale visto nel §2.4, in modo da tener conto anche del contributo all'abbagliamento dato dalla disuniformità della distribuzione di luminanza. Per fare ciò è necessario avere a disposizione la mappa della luminanza sulla superficie dell'apparecchio luminoso in esame, oltre che tutti i dati necessari al calcolo di UGR. Le formulazioni proposte [15] sono tutte del tipo presentato nell'equazione (3.13).

$$UGR_{ZJU} = UGR + a \log_{10}(Contrast + 1). \quad (3.13)$$

dove

UGR è l'abbagliamento secondo la formula (2.8);

a è un coefficiente scelto in modo da far coincidere al meglio UGR_{ZJU} con le stime di abbagliamento messe in evidenza dai soggetti durante il test;

$Contrast$ corrisponde al contrasto, che dà un'indicazione sull'uniformità della luminanza sulla superficie dell'apparecchio luminoso: maggiore è la disuniformità, maggiori sono il contrasto e, di conseguenza, UGR_{ZJU} . Per una distribuzione di luminanza perfettamente uniforme invece, $Contrast$ è pari a 0 e UGR_{ZJU} avrà lo stesso valore di UGR .

Sono state proposte tre diversi modi di calcolare il contrasto, mostrati nelle equazioni (3.14-3.16).

$$Contrast1 = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{ave}}, \quad (3.14)$$

$$Contrast2 = \frac{Std}{L_{ave}}, \quad (3.15)$$

dove L_{ave} , L_{max} e L_{min} corrispondono rispettivamente alla luminanza media, massima e minima, ricavate dalla mappa della luminanza dell'apparecchio luminoso. Si sottolinea che L_{max} e L_{min} non sono semplicemente gli estremi superiore e inferiore dell'intervallo di luminanza, ma sono calcolate facendo la media delle luminanze dei pixel relativi al 5% delle luminanze più alte (per L_{max}) e più basse (per L_{min}). Std è lo scarto quadratico medio dei valori di luminanza per tutti i pixel sulla mappa di luminanza.

$$Contrast3 = \frac{Sum}{N} \quad (3.16)$$

dove Sum corrisponde alla somma descritta nell'equazione (3.17) e N è il numero di termini quadratici presenti in Sum .

$$Sum = \sum_i \sum_j \left[(L'_{i,j} - L'_{i,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i,j+1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j})^2 \right. \\ \left. + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i-1,j+1})^2 \right. \\ \left. + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j-1})^2 + (L'_{i,j} - L'_{i+1,j+1})^2 \right] \quad (3.17)$$

dove $L'_{i,j}$ equivale alla luminanza del pixel i,j -esimo ($L_{i,j}$) divisa per L_{ave} : tale accorgimento serve a garantire che sorgenti luminose con uguale distribuzione di luminanza ma con diversi livelli di luminanza diano origine allo stesso $Contrast3$. Nel calcolo di Sum si calcola prima la somma degli scarti quadratici tra la luminanza del pixel i,j -esimo e le luminanze dei pixel ad

esso adiacenti, chiamata *SumI*; poi si sommano le *SumI* calcolate per ogni pixel della mappa di luminanza.

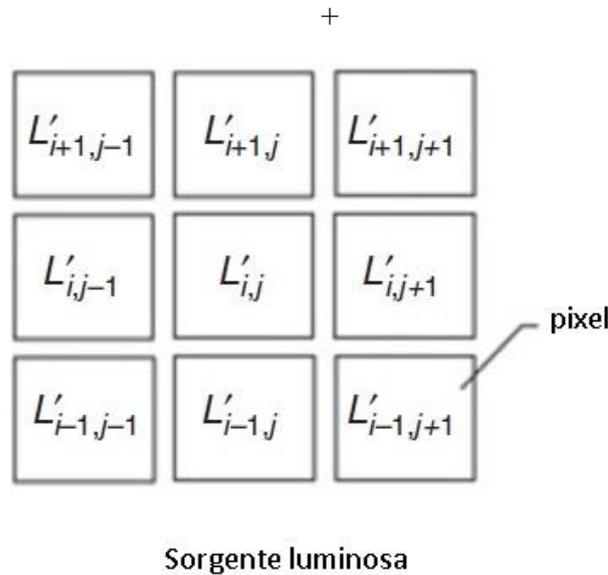


Figura 3.3.2 Interpretazione del calcolo di *Contrast3* [13]

Usando le tre diverse definizioni di *Contrast*, sono state formulate tre equazioni di UGR modificate (UGR_{ZJU}), presentate nelle equazioni (3.18-3.20).

$$UGR_{ZJU1} = UGR + 5.7 \log_{10}(\text{Contrast1} + 1) \quad (3.18)$$

$$UGR_{ZJU2} = UGR + 11 \log_{10}(\text{Contrast2} + 1) \quad (3.19)$$

$$UGR_{ZJU3} = UGR + 4.6 \log_{10}(\text{Contrast3} + 1) \quad (3.20)$$

dove a assume rispettivamente i valori 5.7, 11 e 4.6, derivati da dati sperimentali.

Comparando i livelli di abbagliamento predetti dalle formule UGR_{ZJU} con i dati raccolti dai test, risulta che le tre formule UGR_{ZJU} hanno prestazioni simili tra loro e sembrano essere molto migliori nella previsione dell'abbagliamento rispetto all' UGR della formula (2.8), che non è in grado di stimare l'abbagliamento da sorgenti non uniformi: le formule UGR_{ZJU} sono in grado di stimare l'abbagliamento sia da sorgenti uniformi sia da sorgenti non uniformi, dato che per le sorgenti uniformi, i termini relativi al contrasto risultano pari a zero e le tre formule UGR_{ZJU} (3.18-3.20) equivalgono alla formula UGR (2.8). Inoltre, si ha che UGR_{ZJU2} è la formulazione che fornisce la migliore corrispondenza tra stima e sensazione di abbagliamento e quindi risulta essere la formulazione da preferire.

Capitolo 4

Simulazioni illuminotecniche

Sono state svolte numerose ricerche per stabilire quali siano i metodi più efficaci per la valutazione del livello dell'abbagliamento molesto causato dalle diverse categorie di sorgenti luminose, siano esse di piccole, medie o grandi dimensioni, dotate di luminanza uniforme o non uniforme. Tuttavia, in molti casi tali metodi non sono stati messi a confronto tra loro per verificarne la coerenza, ossia per verificare se, nei campi di applicazione in cui due o più metodi vengono detti equivalenti, essi effettivamente lo siano. Ciò può riguardare sia metodi pensati per essere applicati a sorgenti luminose diverse ma che si sovrappongono nella zona di transizione tra una tipologia di sorgenti e l'altra, sia metodi equivalenti, creati per lo stesso tipo di applicazione.

Il presente capitolo ha lo scopo di elaborare una comparazione tra i metodi più usati attualmente, ovvero quelli proposti dalla CIE che riguardano soprattutto le sorgenti luminose uniformi e i nuovi metodi proposti per la stima dell'abbagliamento dovuto a sorgenti non uniformi. Per fare ciò, sono stati svolti dei calcoli con diversi modelli di apparecchi luminosi, in diverse situazioni, utilizzando il software per la progettazione illuminotecnica *DIALux* e il calcolatore *MatLab*.

4.1 Verifica della formula per l'indice di Guth

L'indice di posizione di Guth P è un parametro che dà un'indicazione della posizione in cui si trova un apparecchio all'interno del campo visivo dell'osservatore. Per avere una valutazione esatta dell'indice di Guth è necessario utilizzare la tabella appositamente stilata da S. K. Guth e presentata nella Tabella 2.1. Le tre coordinate R , T e H necessarie per l'utilizzo di tale tabella sono rispettivamente le coordinate del sistema lungo gli assi x , y , z con l'osservatore preso come punto di riferimento. Per utilizzare la tabella servono come dati di ingresso i rapporti T/R e H/R corrispondenti a y/x e z/x . Si ricorda che tale tabella è simmetrica rispetto al parametro T/R del quale contiene sono valori non negativi, quindi se sono stati previsti degli apparecchi montati a sinistra dell'osservatore, cioè con coordinata negativa lungo l'asse y , si dovrà considerare solo il modulo di y .

Per rendere il calcolo dell'indice di Guth più agevole, in alternativa alla tabella è stata proposta la formula (2.5) che, pur non dando una stima esatta di P , è stata pensata per essere sufficientemente precisa da non causare errori significativi nel calcolo dell'abbagliamento. Tale formula non è scritta in funzione delle coordinate R , T e H o dei loro rapporti come la tabella, ma in funzione degli angoli τ e σ illustrati nella Figura 2.1, espressi in gradi.

Per fare il cambio di variabili dai parametri T/R e H/R agli angoli τ e σ si possono usare le relazioni (4.1-4.2).

$$\tau = \tan^{-1}\left(\frac{T}{H}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{T/R}{H/R}\right) \quad (4.1)$$

$$\sigma = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{T^2 + H^2}}{R}\right) = \tan^{-1}\sqrt{\left(\frac{T}{R}\right)^2 + \left(\frac{H}{R}\right)^2} \quad (4.2)$$

In generale si riscontrerà una differenza tra le due valutazioni dell'indice di Guth P . Tuttavia, dato che tale indice si usa solo nel calcolo dell'abbagliamento molesto, non è molto importante la differenza tra le due stime di P , ma in quale misura questa differenza si ripercuote nel calcolo dell'abbagliamento con i diversi metodi. Per esempio, si consideri l'indice UGR calcolato nel modo convenzionale come nella formula (2.8): per valutare quanto l'indice di Guth influenzi UGR, si può calcolare la differenza, mostrata nelle formule (4.3-4.4), tra l'UGR ottenuto da un indice di Guth valutato con la tabella e l'UGR ottenuto da un indice di Guth valutato con la formula, a parità di L_b , L e ω (cioè tutti gli altri parametri).

$$\begin{aligned} UGR_{tabella} - UGR_{formula} &= 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \frac{L^2 \omega}{P_{tabella}^2} \right) - 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \frac{L^2 \omega}{P_{formula}^2} \right) \\ &= 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \cdot \frac{L^2 \omega}{P_{tabella}^2} \cdot \frac{L_b}{0.25} \cdot \frac{P_{formula}^2}{L^2 \omega} \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

dalla quale, semplificando il coefficiente 0.25 e i parametri L_b , L e ω , deriva la relazione (4.4).

$$UGR_{tabella} - UGR_{formula} = 8 \log_{10} \left[\left(\frac{P_{formula}}{P_{tabella}} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

dove

$P_{tabella}$ e $P_{formula}$ sono gli indici di posizione di Guth, il primo ricavato dalla tabella e il secondo calcolato con la formula,

$UGR_{tabella}$ e $UGR_{formula}$ sono i valori di UGR corrispondenti.

È evidente che la differenza che si ottiene nel calcolo di UGR a causa del diverso metodi di valutazione dell'indice di Guth dipende solo dall'indice stesso, o meglio dal rapporto tra i due indici calcolati con i due metodi e non dipende da nessun'altra caratteristica dell'installazione. Ne consegue che è possibile calcolare numericamente a priori di quanto si discosta l'UGR usando la formula rispetto alla tabella, a prescindere dal tipo di installazione e dal tipo di lampade utilizzate: è sufficiente associare ad ogni $P_{tabella}$ presente nella tabella il corrispondente $P_{formula}$ e calcolare la differenza $UGR_{tabella} - UGR_{formula}$ come nella relazione (4.4).

Per quanto riguarda le altre formule per il calcolo dell'abbagliamento, come ad esempio UGR_{small} o le formule UGR_{ZJU} , il ragionamento è equivalente: come nella formula (4.3), se il calcolo viene svolto a parità di tutti i parametri diversi da P , essi si semplificano e di ottiene la stessa differenza ottenuta nell'uguaglianza (4.4).

4.1.1 Metodo di calcolo

Per quantificare la differenza espressa dalla relazione (4.4) è stato usato un codice compilato sul calcolatore *MatLab*. Dopo aver importato la tabella 2.1 degli indici di Guth, per ogni posizione di tale tabella, sono stati calcolati gli angoli τ e σ come nelle formule (4.1-4.2), in gradi. Successivamente è stata applicata la formula (2.5), per associare ad ogni indice presente in tabella il corrispondente indice di Guth calcolato con la formula. Come già spiegato nel §2.3.1, la porzione di tabella in alto a destra (per T/R bassi e H/R alti) rappresenta posizioni in cui la sorgente è nascosta alla vista dalla fronte e dalle sopracciglia dell'osservatore, per questo è stata esclusa dal calcolo. Poi sono state calcolate le differenze tra $UGR_{tabella}$ e $UGR_{formula}$ come nella formula (4.4) e sono stati estrapolati il valore massimo e le sue coordinate, sia in termini di R , T e H sia in termini di τ e σ .

Di seguito è riportato il codice sorgente del file *MatLab*. In esso, per “valore massimo” si intende il valore con modulo massimo, senza distinzione tra valori positivi e negativi.

```

TabGuth = xlsread('TabellaGuth.xlsx'); %importa la tabella degli indici di Guth

TsuR = (0:0.1:3)'; %T/R
HsuR = 0:0.1:1.9; %H/R

tau = atand(TsuR./HsuR); %in gradi
sigma = atand(sqrt(TsuR.^2 + HsuR.^2)); %in gradi

Pf = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3.*sigma + (21 + 0.26667*tau
- 0.002963*tau.^2)*10^-5.*sigma.^2); %indici di Guth calcolati con la formula
Pf(1:4,19:20) = NaN;
Pf(5:9,20) = NaN;

dUGR = 8*log10((TabGuth./Pf).^2); %differenza tra i valori di UGR calcolati usando
l'indice di Guth della tabella e della formula
[max_dUGR,pos_idx] = max(abs(dUGR(:)));
max_dUGR; %massima differenza tra UGR calcolati usando la tabella e la formula
[i,j] = ind2sub(size(dUGR),pos_idx);
TsuR_max = i*0.1 - 0.1; %T/R per il quale si ha la massima differenza
HsuR_max = j*0.1 - 0.1; %H/R per il quale si ha la massima differenza
Ptabella_max = TabGuth(i,j); %Ptabella per il quale si ha la massima differenza
tau_max = tau(i,j); %tau per il quale si ha la massima differenza
sigma_max = sigma(i,j); %sigma per il quale si ha la massima differenza
Pformula_max = Pf(i,j); %Pformula per il quale si ha la massima differenza

```

4.1.2 Risultati e conclusioni

I risultati per $dUGR$ sono mostrati in Tabella 4.1. In essa è possibile notare che la differenza $dUGR$ assume valori sia negativi (evidenziati con colore rosso) sia positivi (con colore verde), il che significa che la formula per il calcolo dell'indice di posizione di Guth può portare sia a sottostime sia a sovrastime dell'abbagliamento. Lo scostamento massimo ottenuto tra $UGR_{tabella}$ e $UGR_{formula}$ è una sovrastima massima di 0.70. Tale sovrastima si verifica per

$$T/R = 3.00$$

$H/R = 0.00$

$P_{tabella} = 4.22$

che equivalgono a

$\tau = 90^\circ$

$\sigma = 71.6^\circ$

$P_{formula} = 4.67$

Tabella 4.1 Differenza tra $UGR_{tabella}$ e $UGR_{formula}$ per tutti i valori dell'indice di posizione di Guth inclusi nella Tabella 2.1. I valori positivi sono evidenziati con colore verde più intenso via via che aumenta il modulo di $dUGR$. In modo analogo sono stati evidenziati in rosso i valori negativi. Lo scostamento massimo si ha per $T/R = 3$ e $H/R = 0$.

T/R	H/R																			
	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
0,00	-	0,21	0,10	0,11	0,10	0,00	-0,01	-0,08	-0,13	-0,04	-0,06	-0,06	-0,07	-0,15	-0,10	-0,02	0,08	0,12	-	-
0,10	0,03	0,09	0,00	0,35	-0,14	-0,08	-0,05	-0,12	-0,32	-0,21	-0,12	-0,12	-0,18	-0,20	-0,18	-0,13	-0,02	0,03	-	-
0,20	0,09	0,22	0,06	-0,01	-0,04	-0,17	-0,35	-0,33	-0,44	-0,41	-0,37	-0,33	-0,32	-0,39	-0,32	-0,21	-0,23	-0,08	-	-
0,30	0,22	0,20	0,16	0,39	-0,01	-0,10	-0,17	-0,22	-0,33	-0,35	-0,29	-0,38	-0,46	-0,50	-0,41	-0,42	-0,26	-0,28	-	-
0,40	0,25	0,13	0,13	-0,01	0,03	-0,02	-0,16	-0,25	-0,32	-0,36	-0,27	-0,38	-0,44	-0,46	-0,45	-0,41	-0,39	-0,35	-0,32	-
0,50	0,26	-0,28	0,10	0,03	0,08	-0,02	-0,14	-0,23	-0,23	-0,25	-0,24	-0,32	-0,36	-0,37	-0,41	-0,39	-0,39	-0,33	-0,34	-
0,60	0,25	0,11	0,16	0,20	0,11	0,10	0,01	-0,20	-0,20	-0,31	-0,27	-0,27	-0,24	-0,31	-0,33	-0,33	-0,29	-0,37	-0,36	-
0,70	0,32	0,17	0,11	0,26	0,24	0,17	0,06	-0,09	-0,25	-0,29	-0,22	-0,24	-0,15	-0,20	-0,28	-0,26	-0,29	-0,33	-0,36	-
0,80	0,23	0,06	0,21	0,35	0,31	0,22	0,01	-0,02	-0,13	-0,25	-0,21	-0,20	-0,09	-0,19	-0,18	-0,18	-0,25	-0,25	-0,32	-
0,90	0,21	0,19	0,34	0,14	0,37	0,24	0,18	0,10	-0,06	-0,10	-0,16	-0,09	-0,05	-0,09	-0,07	-0,11	-0,15	-0,19	-0,29	-0,39
1,00	0,20	0,30	0,42	0,40	0,38	0,27	0,20	0,20	0,11	-0,04	-0,03	0,01	-0,02	-0,05	-0,04	-0,03	-0,08	-0,14	-0,23	-0,31
1,10	0,31	0,25	0,39	0,42	0,42	0,42	0,36	0,29	0,15	0,18	0,04	0,13	0,08	0,03	0,05	0,04	-0,03	-0,10	-0,17	-0,25
1,20	0,14	0,32	0,43	0,44	0,39	0,35	0,30	0,37	0,24	0,17	0,19	0,16	0,16	0,06	0,07	0,10	0,05	-0,06	-0,12	-0,19
1,30	0,13	0,28	0,42	0,46	0,57	0,51	0,51	0,38	0,32	0,31	0,25	0,27	0,20	0,15	0,16	0,18	0,12	-0,03	-0,08	-0,14
1,40	0,11	0,35	0,46	0,48	0,50	0,51	0,46	0,34	0,35	0,40	0,38	0,29	0,24	0,23	0,26	0,25	0,15	0,02	-0,04	-0,09
1,50	0,11	0,10	0,41	0,51	0,52	0,46	0,41	0,54	0,49	0,48	0,43	0,31	0,32	0,28	0,29	0,30	0,18	0,04	0,00	-0,05
1,60	-0,01	0,29	0,38	0,46	0,55	0,49	0,50	0,46	0,52	0,48	0,49	0,34	0,32	0,40	0,41	0,34	0,24	0,13	0,06	-0,01
1,70	0,00	0,28	0,44	0,59	0,51	0,52	0,53	0,49	0,56	0,48	0,46	0,40	0,39	0,38	0,44	0,41	0,26	0,14	0,09	0,03
1,80	0,02	0,27	0,50	0,56	0,55	0,56	0,52	0,59	0,61	0,53	0,64	0,43	0,40	0,43	0,44	0,43	0,29	0,16	0,11	0,07
1,90	0,10	0,29	0,41	0,47	0,47	0,48	0,56	0,58	0,56	0,56	0,50	0,46	0,41	0,39	0,47	0,42	0,32	0,17	0,14	0,10
2,00	-0,03	0,28	0,48	0,46	0,46	0,42	0,51	0,64	0,62	0,57	0,49	0,46	0,48	0,41	0,45	0,43	0,34	0,23	0,16	0,13
2,10	-0,09	0,33	0,49	0,47	0,47	0,49	0,57	0,60	0,61	0,59	0,48	0,50	0,50	0,44	0,48	0,44	0,40	0,27	0,18	0,16
2,20	-0,05	0,24	0,38	0,48	0,42	0,44	0,53	0,62	0,66	0,58	0,52	0,51	0,52	0,46	0,46	0,43	0,40	0,30	0,23	0,19
2,30	-0,09	0,19	0,31	0,36	0,38	0,43	0,50	0,54	0,64	0,57	0,56	0,49	0,54	0,49	0,50	0,45	0,40	0,31	0,27	0,22
2,40	-0,12	0,07	0,27	0,33	0,46	0,38	0,48	0,53	0,63	0,61	0,57	0,50	0,56	0,53	0,51	0,47	0,43	0,35	0,29	0,25
2,50	-0,23	0,04	0,18	0,23	0,26	0,36	0,41	0,47	0,58	0,57	0,58	0,49	0,55	0,53	0,52	0,47	0,46	0,39	0,34	0,28
2,60	-0,30	-0,06	0,14	0,17	0,24	0,30	0,35	0,47	0,58	0,58	0,56	0,48	0,55	0,53	0,52	0,46	0,46	0,40	0,36	0,31
2,70	-0,43	-0,14	0,06	0,11	0,17	0,23	0,30	0,42	0,55	0,55	0,54	0,48	0,53	0,53	0,52	0,46	0,47	0,41	0,38	0,34
2,80	-0,51	-0,27	-0,02	0,02	0,11	0,18	0,23	0,37	0,52	0,53	0,52	0,46	0,52	0,64	0,51	0,46	0,52	0,43	0,40	0,36
2,90	-0,58	-0,37	-0,12	-0,06	0,02	0,10	0,18	0,31	0,49	0,51	0,51	0,45	0,49	0,50	0,50	0,46	0,48	0,44	0,42	0,39
3,00	-0,70	-0,48	-0,21	-0,11	-0,03	0,03	0,13	0,28	0,47	0,48	0,47	0,41	0,47	0,49	0,49	0,46	0,49	0,46	0,44	0,42

Dato che la scala UGR è una scala a intervalli di 3 unità, nella quale le differenze tra i valori della scala rappresentano le minime differenze percepibili dall'osservatore e le uniche da considerare percepibili [5-7], una sovrastima di 0.70 è da ritenere di gran lunga trascurabile. Inoltre, si ricorda che l'abbagliamento molesto è una sensazione soggettiva e che i valori di

UGR significativi sono compresi tra 10 e 30, quindi anche nel caso di un UGR pari a 10 (caso peggiore), un errore di 0.70 corrisponde ad un'impresione del 7%, la quale è ampiamente accettabile.

4.2 Confronto tra UGR_{small} e UGR

Il metodo UGR (§2.4) assegna un abbagliamento troppo elevato alle sorgenti di dimensioni ridotte. Ciò è dovuto al fatto che la formula UGR (2.8) è stata pensata per sorgenti di dimensioni "normali" e dà un peso troppo importante alla luminanza della sorgente in esame, mentre per le sorgenti piccole l'abbagliamento molesto non è determinato dalla luminanza, ma dall'intensità luminosa. Per sopperire a tale lacuna è stato sviluppato il metodo UGR_{small}, che si propone di assegnare il corretto livello di abbagliamento alle sorgenti luminose di piccole dimensioni. I due metodi vengono qui messi a confronto per accertarne la coerenza, ossia per verificare se nel punto di transizione tra i due metodi, entrambi predicano lo stesso livello di abbagliamento.

Dato che per le sorgenti luminose di piccole dimensioni l'abbagliamento molesto è determinato dall'intensità luminosa e non dalla luminanza [9], per fare un confronto tra i due metodi si è pensato di operare su una serie di apparecchi di diverse dimensioni dotati di distribuzione lambertiana, facendo variare la loro luminanza con proporzionalità inversa rispetto alla loro area, in modo da mantenere l'intensità luminosa invariata. Così facendo, ci si può aspettare che la formula UGR_{small} dia una valutazione dell'abbagliamento che rimane costante, perché tutti i termini che la caratterizzano rimangono invariati. La formula UGR invece dovrebbe dare livelli di abbagliamento che aumentano al diminuire delle dimensioni delle sorgenti luminose.

4.2.1 Metodo di calcolo

Il confronto è stato valutato compilando un codice con il software *MatLab*. Innanzitutto, sono state definite le coordinate relative, in metri, tra osservatore e sorgente luminosa: la sorgente è stata posta di fronte all'osservatore, a 4 m di distanza e a 1.3 m di altezza relativa, quindi le coordinate sono

$$x = 3.6 \text{ m}$$

$$y = 0 \text{ m}$$

$$z = 1.3 \text{ m}$$

Tali coordinate sono state scelte per fare il calcolo nelle stesse condizioni dello studio sulle formule per sorgenti non uniformi di Y. Yang *et al.* [14, 15]. Tuttavia, qualsiasi altra combinazione di coordinate sarebbe stata equivalente. Da esse sono poi state calcolati la distanza r [m], gli angoli τ e σ , espressi in gradi, tramite le formule (4.5-4.6) e l'indice di posizione di Guth P tramite la formula (2.5). La luminanza di sfondo L_b è stata scelta pari a 14.3 cd/m^2 , anch'essa per essere conforme alle condizioni dello studio di Y. Yang *et al.*

$$\tau = \tan^{-1} \left[\left(\frac{y}{z} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma = \tan^{-1} \left[\sqrt{\left(\frac{y}{x}\right)^2 + \left(\frac{z}{x}\right)^2} \right] \quad (4.6)$$

Le sorgenti luminose, di forma circolare e distribuzione lambertiana, sono state definite nel modo seguente:

Diametro d [cm]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Luminanza L [cd/m ²]	80000	20000	8889	5000	3200	2222	1633	1250	987	800

in modo da mantenere costante il prodotto tra luminanza e area, ovvero l'intensità luminosa.

Successivamente sono stati calcolati gli indici UGR e UGR_{small} . Per il calcolo di UGR , tutti i parametri necessari sono già stati definiti o calcolati, ad eccezione dell'angolo solido sotteso dalla sorgente luminosa ω [sr]: per ottenerlo si deve prima calcolare l'area apparente A , come prodotto tra l'area della sorgente luminosa e il coseno dell'angolo σ e poi dividere l'area apparente per il quadrato della distanza r^2 . Per quanto riguarda il calcolo di UGR_{small} , si ricorda che il concetto consiste nel considerare una nuova sorgente luminosa, detta sorgente luminosa apparente, dotata di area effettiva A_{eff} pari a 50 cm² e di intensità luminosa I [cd] pari all'intensità luminosa della sorgente reale. Quindi la sorgente apparente avrà una luminanza L_{eff} pari alla quantità espressa dalla formula (4.7) e un angolo solido ω_{eff} dato dal rapporto tra A_{eff} e r^2 .

$$L_{eff} = \frac{I}{A_{eff}} = L \cdot \frac{A}{A_{eff}} \quad (4.7)$$

Una volta ottenuti le luminanze e gli angoli solidi è stato sufficiente applicare la formula (2.8), una volta con L e ω per il calcolo di UGR e una volta con L_{eff} e ω_{eff} per il calcolo di UGR_{small} .

Di seguito è riportato il codice sorgente del file *MatLab*. In esso tutte le dimensioni sono espresse in metri. L'ultima parte di codice è stata inserita per creare il grafico di UGR e UGR_{small} in funzione dell'angolo solido sotteso dalla sorgente luminosa ω , proposto nel §4.2.2.

```
x = 3.6; %distanza lungo la direzione di osservazione
y = 0; %distanza perpendicolare alla direzione di osservazione
z = 1.3; %altezza relative
r = sqrt(x^2 + y^2 + z^2); %distanza

tau = atand(abs(y)/z); %in gradi
sigma = atand(sqrt((abs(y)/x)^2 + (z/x)^2)); %in gradi
P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 + 0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indice di Guth

Lb = 14.3; %luminanza di sfondo
d = 0.02:0.02:0.2; %vettore dei diametri delle sorgenti luminose
L = 80000*(d(1)./d).^2; %vettore delle luminanze delle sorgenti

%calcolo UGR
```

```

A = pi*(d/2).^2*cosd(sigma); %vettore delle aree reali delle sorgenti
omega = A/r^2; %vettore degli angoli solidi reali delle sorgenti
UGR = 8*log10(0.25/Lb*L.^2.*omega/P^2); %errore dei valori di UGR

%calcolo UGRsmall
Aeff = 0.005; %area effettiva di una sorgente di piccole dimensioni
Leff = L.*A/Aeff; %vettore delle luminanze effettive
omegaeff = Aeff/r^2; %vettore degli angoli solidi effettivi
UGRsmall = 8*log10(0.25/Lb*Leff.^2*omegaeff/P^2); %vettore dei valori di UGRsmall

%grafico
plot(omega,UGR,'r','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15)
hold on
plot(omega,UGRsmall,'b','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15)
xlabel('Angolo solido della sorgente \omega [sr]')
ylabel('Indici di abbagliamento')
line([0.0003 0.0003],[0 30],'Color','r','LineStyle','--','LineWidth',2)
line([omegaeff omegaeff],[0 30],'Color','b','LineStyle','--','LineWidth',2)
legend('UGR','UGRsmall','Limite della formula UGR','Angolo solido corrispondente ad Aeff','Location','northeast')

```

4.2.2 Risultati e conclusioni

I risultati ottenuti per UGR e UGR_{small} sono presentati nella Tabella 4.2. Per come sono definiti, UGR e UGR_{small} dovrebbero coincidere per sorgenti di area A_{eff} pari a 50 cm^2 , che corrisponde a un disco di diametro pari a circa 8 cm. I dati ottenuti rispecchiano tale proprietà, inoltre si può notare che già per dischi di 6 cm la sovrastima data da UGR è notevole, pari a 2.2 unità.

Tabella 4.2 Risultati per UGR e UGR_{small} per sorgenti di piccole dimensioni, a parità di intensità luminosa.

Diametro d [cm]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Angolo solido ω [sr]	2,02E+09	8,07E+09	1,82E-04	3,23E-04	5,04E-04	7,26E-04	9,88E-04	1,29E-03	1,63E-03	2,02E-03
UGR	21,6	16,7	13,9	11,9	10,4	9,11	8,04	7,11	6,30	5,56
UGR_{small}	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7

In Figura 4.1 sono stati rappresentati graficamente gli indici UGR e UGR_{small} al variare delle dimensioni della sorgente luminosa; le dimensioni delle sorgenti sono state espresse in termini di angolo solido ω sotteso dalla sorgente luminosa. Da tale grafico si può notare che UGR_{small} rimane costante, mentre UGR decresce all'aumentare delle dimensioni della sorgente.

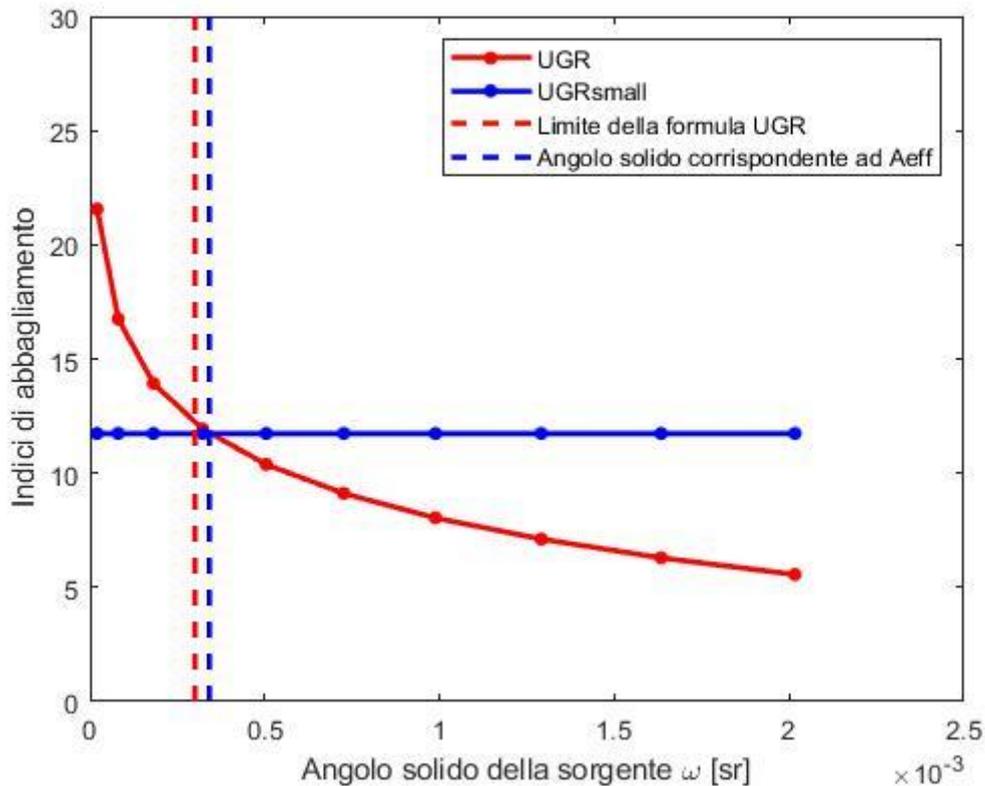


Figura 4.1 UGR e UGR_{small} in funzione dell'angolo solido per sorgenti luminose di dimensioni variabili, a parità di intensità luminosa

Il comportamento di UGR_{small} è in linea con le aspettative in quanto, mantenendo costante l'intensità luminosa I , ossia il prodotto tra luminanza L e area A , rimangono costanti sia la luminanza effettiva L_{eff} sia l'angolo solido effettivo ω_{eff} . Per quanto riguarda UGR, la luminanza L in questo caso è inversamente proporzionale all'area reale A (perché è stata definita così), l'angolo solido ω è direttamente proporzionale a A , quindi il termine $L^2\omega$ risulta essere inversamente proporzionale ad A e a ω : ciò causa una decrescita di UGR all'aumentare delle dimensioni della sorgente, con andamento proporzionale a $\log_{10}(1/\omega)$.

Nel grafico di Figura 4.1 è stata disegnata una linea tratteggiata verticale blu per evidenziare l'angolo solido che corrisponde all'area effettiva A_{eff} : in corrispondenza di tale angolo solido si ha l'intersezione tra UGR e UGR_{small}; per angoli solidi più grandi, ci troviamo in un campo in cui il metodo UGR_{small} non ha validità, perché le sorgenti luminose sono di dimensioni più grandi della dimensione limite massima di 50 cm². Per angoli solidi più piccoli invece, ci troviamo nel campo in cui UGR dà una sovrastima dell'abbagliamento e la norma consiglia di usare UGR_{small}. È stato disegnato con una linea tratteggiata verticale rossa anche il limite minimo di validità della formula UGR, che secondo la norma è pari a 0.0003 sr. Come si può notare, in generale tale limite non corrisponde al limite massimo di validità di UGR_{small}: ciò è conseguenza del fatto che il primo limite è definito in termini di area apparente della sorgente A_{app} , mentre il secondo in termini di angolo solido ω . Nelle norme e nelle pubblicazioni non è ben specificato quale dei due limiti si debba considerare come punto di transizione da UGR a UGR_{small}. Tuttavia, se si considerasse valido come punto di passaggio il limite della formula

UGR, si avrebbe una discontinuità nel passaggio da una formula all'altra. Inoltre, la norma CIE 147 del 2002 che riguarda UGR_{small} [11] è più recente della norma che riguarda UGR [5] ed in essa non è nominato il limite di angolo solido di 0.0003 sr ma solo un limite di area apparente di 0.005 m². Per tali motivi si ritiene che il punto di transizione da considerare sia quello corrispondente all'area effettiva A_{eff} (linea tratteggiata blu).

4.3 Considerazioni sul metodo GGR

Il metodo UGR (§2.4) assegna un abbagliamento troppo ridotto alle sorgenti luminose di dimensioni estese. Ciò è dovuto al fatto che quando si ha a che fare con le sorgenti di dimensioni estese, all'abbagliamento contribuiscono altri fattori, quali l'illuminamento sull'occhio dell'osservatore e le dimensioni relative tra sorgente e locale, che non sono tenuti in considerazione nel calcolo dell'UGR. Il metodo GGR e la formula corrispondente (3.5-3-6) si propongono di tener conto di tali aspetti e di assegnare il corretto livello di abbagliamento alle sorgenti luminose che si collocano nella zona di transizione tra le sorgenti di dimensioni cosiddette "normali" ed i soffitti completamente luminosi.

Nella norma CIE 147 del 2002 [11] vengono fornite due formulazioni alternative per il calcolo di GGR, una estesa e una contratta. Confrontando tra loro queste due formulazioni ci si accorge che, sebbene siano presentate come equivalenti, esse non sono uguali: ciò probabilmente è dovuto ad un errore di trascrizione o di battitura durante la stesura del testo ed è comprovato dal fatto che, provando ad applicare entrambe le formulazioni si ottengono risultati molto diversi tra loro. Dopo averle applicate entrambe nelle prove proposte nel presente paragrafo, è risultato evidente che la formulazione estesa esposta nella norma fornisce valori di abbagliamento non verosimili, addirittura minori di UGR per sorgenti luminose di grandi dimensioni, il che è irragionevole. La formulazione contratta invece dà valori maggiori di UGR di alcune unità, perciò si è scelto di considerare tale formula come corretta e di usarla per svolgere le prove di seguito proposte. Nel §3.2 sono presentate la formula contratta (3.6) e una formula estesa da essa ricavata e ad essa equivalente (3.5), ma diversa da quella proposta nella norma.

4.3.1 Confronto tra GGR e UGR

I metodi GGR e UGR sono stati messi a confronto per accertarne la coerenza, ossia per verificare se, nel punto di transizione tra l'uno e l'altro, entrambi predicono lo stesso livello di abbagliamento. Il confronto tra i due metodi è stato eseguito per apparecchi luminosi di dimensioni variabili. Gli apparecchi sono stati definiti di luminanza non variabile in quanto in genere gli apparecchi di dimensioni estese vengono realizzati disponendo numerose strisce di LED dietro ad uno strato di materiale diffondente, come ad esempio un telo o un pannello traslucido, quindi se la disposizione dei LED per unità di area non cambia, la luminanza rimane invariata.

Per il calcolo di GGR, oltre ai parametri necessari per il calcolo di UGR, servono anche il *ceiling coverage* CC e gli illuminamenti diretto e indiretto sull'occhio dell'osservatore E_d e E_i . Per reperire tali dati è necessario fare una simulazione tramite un software di progettazione illuminotecnica come *DIALux*.

4.3.1.1 Metodo di calcolo

Per quanto riguarda la sorgente luminosa, è stato scelto un apparecchio di forma quadrata, con emissione molto simile ad una distribuzione lambertiana, il cui diagramma polare è presentato in Figura 4.2. Per il test, le sue dimensioni sono state fatte variare tra 1.5 m e 3.5 m di lato, con intervalli di 0.2 m.

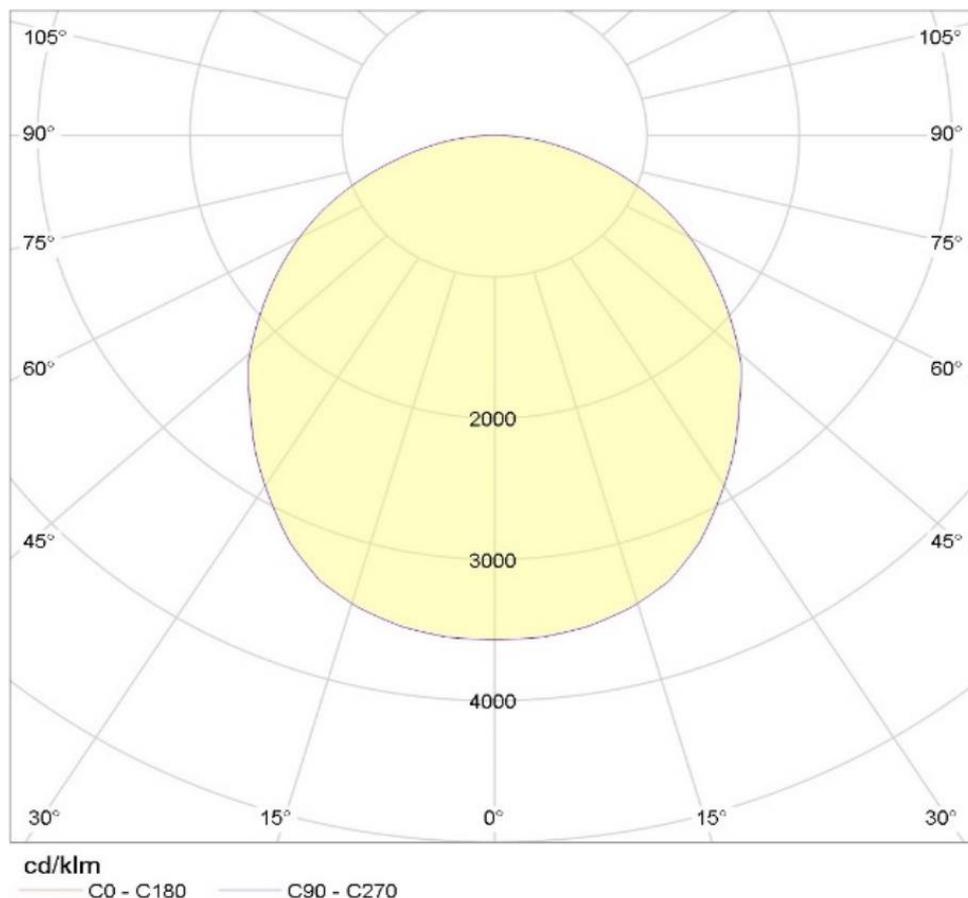


Figura 4.2 Diagramma polare della sorgente luminosa di dimensioni estese

Il locale è di forma quadrata, di 5 m di lato e alto 2.8 m, con coefficienti di riflessione del pavimento, delle pareti e del soffitto rispettivamente pari a

$$R_f = 0.2$$

$$R_w = 0.5$$

$$R_c = 0.7$$

L'apparecchio d'illuminazione è montato al centro del locale, mentre l'osservatore è collocato lungo una parete, con gli occhi ad un'altezza di 1.2 m e con lo sguardo rivolto verso la parete opposta in direzione orizzontale. La planimetria de locale e la disposizione di apparecchio e osservatore sono mostrate in Figura 4.3.

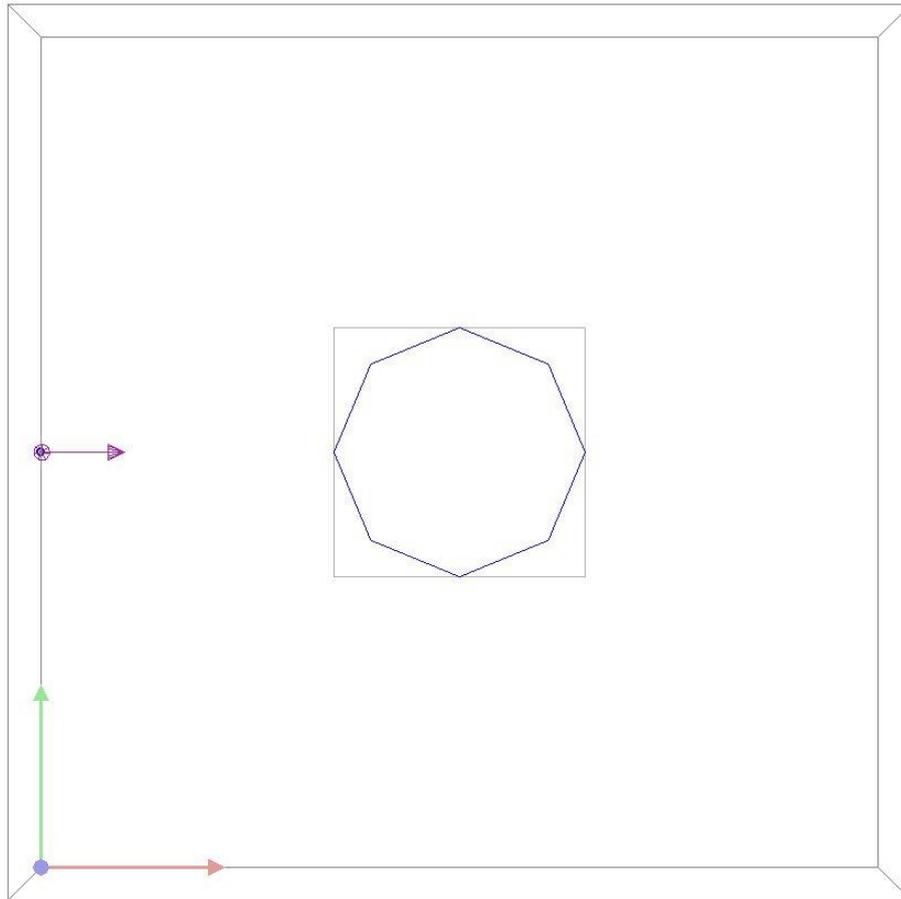


Figura 4.3 Planimetria del locale per il confronto tra GGR e UGR

Per prima cosa è stata eseguita la simulazione con *DIALux*, per calcolare i livelli di illuminamento sull'occhio dell'osservatore E_d e E_i . È stato necessario creare numerosi file Eulumdat che rappresentassero le caratteristiche fotometriche di ogni apparecchio considerato nella prova, per poi eseguire le simulazioni cambiando di volta in volta l'apparecchio al centro del locale. Si è dovuto fare così perché per mantenere immutata la luminanza al variare delle dimensioni dell'apparecchio, è necessario scalare l'intensità luminosa in modo direttamente proporzionale all'area apparente. Ad ogni simulazione, dai risultati illuminotecnici di output, sono stati trascritti i valori di E_d e E_i , qui riportati:

lato dell'apparecchio [m]	1.5	1.7	1.9	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.1	3.3	3.5
E_d [lx]	927	1079	1241	1412	1595	1788	1993	2209	2436	2675	2921
E_i [lx]	190	213	236	258	280	300	319	336	350	362	374

Successivamente è stato compilato un codice con *MatLab* per il calcolo di UGR e GGR. Dopo aver importato i valori di illuminamento diretto e indiretto E_d e E_i e definito le coordinate reciproche tra osservatore e apparecchio e le dimensioni del locale [m] sono state calcolate: la distanza r tra osservatore e apparecchio [m], gli angoli τ e σ espressi in gradi e l'indice di posizione di Guth P . Poi sono state definite le dimensioni degli apparecchi e sono stati calcolati

i parametri necessari per la stima di UGR: l'area apparente A_{app} [m²] ottenuta moltiplicando l'area per il coseno di σ , l'angolo solido sotteso dalla sorgente ω [sr] ottenuto dividendo A_{app} per la distanza elevata al quadrato. Per come è stata definita, la luminanza L dell'apparecchio è sempre la stessa ed è pari a 766 [cd/m²]. Con i parametri a disposizione è possibile calcolare UGR tramite la formula (2.8).

Per il calcolo di GGR è necessario prima ottenere il *ceiling coverage* CC , ossia il rapporto tra l'area del soffitto coperta degli apparecchi e l'area del soffitto totale, che nel caso di un solo apparecchio corrisponde al rapporto tra l'area dell'apparecchio e l'area del soffitto. GGR è stato calcolato applicando il termine correttivo a UGR, come nella formula (3.6).

Di seguito è riportato il codice sorgente del file *MatLab*. L'ultima parte del codice è stata inserita per generare il grafico che mostra l'andamento di UGR e GGR al variare di ω , riportato in Figura 4.4.

```
Ed = xlsread('illuminamenti.xlsx',1); %illuminamento diretto
Ei = xlsread('illuminamenti.xlsx',2); %illuminamento indiretto

x = 2.5; %distanza lungo la direzione di osservazione, R
y = 0; %distanza perpendicolare alla direzione di osservazione, T
z = 1.4; %altezza relativa, H
lung = 5; %lunghezza del locale
larg = 5; %larghezza del locale

r = sqrt(x^2 + y^2 + z^2); %distanza
tau = atand(y/z); %in gradi
sigma = atand(sqrt(y^2 + z^2)/x); % in gradi
P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 + 0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indici di Guth

lato = 1.5:0.2:3.5; %lato dell'apparecchio
A = lato.^2; %area reale
Aapp = A*cosd(sigma); %area apparente
omega = Aapp/r^2; %angolo solido sotteso
L = 766; %luminanza della sorgente lungo la direzione osservatore-sorgente
UGR = 8*log10(0.25*pi*omega*L^2./(Ei*P^2));

CC = A/(lung*larg); %ceiling coverage, rapporto tra area della sorgente e area del soffitto
GGR = UGR + (1.18 - 0.18./CC)*8.*log10(2.55*(1 + Ed/220)./(1 + Ed./Ei)); %secondo la norma CIE 147:2002 (formula 3.2)

%grafico
plot(omega,UGR,'r','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15)
hold on
plot(omega,GGR,'g','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15)
xlabel('Angolo solido della sorgente \omega [sr]')
ylabel('Indici di abbagliamento')
omegalim = 0.152*lung*larg*cosd(sigma)/r^2; %omega per il quale UGR = GGR
line([omegalim omegalim],[10 25], 'Color','k', 'LineStyle','--', 'LineWidth',2)
```

legend('UGR', 'GGR', 'Angolo solido corrispondente a CC = 0.152', 'Location', 'southeast')

4.3.1.2 Risultati e conclusioni

I risultati ottenuti per UGR e GGR sono presentati nella Tabella 4.3. Per come è definito GGR, i due metodi coincidono quando il *ceiling coverage* CC è pari a 0.152, che con un soffitto di 25 m² corrisponde a un apparecchio di circa 1.95 m di lato. Per apparecchi più piccoli, ci si trova nella zona in cui vale ancora UGR, infatti GGR dà una valutazione dell’abbagliamento minore rispetto a UGR: ciò è dovuto a come è stata pensata la formula GGR, in particolare al termine $(1.18 - 0.18/CC)$ presente nella formula (3.6), il quale è negativo per $CC < 0.152$. Per apparecchi di dimensioni maggiori, UGR dà una sottostima del livello di abbagliamento; tuttavia la differenza comincia ad essere notevole solo intorno ai 2.5 m di lato, ossia $CC = 0.25$, ai quali si ha una sottostima di 1.9 unità.

Tabella 4.3 Risultati per UGR e GGR per sorgenti di dimensioni estese, a parità di angolo solido

Lato apparecchio [m]	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5
Angolo solido ω [sr]	0,24	0,31	0,38	0,47	0,56	0,66	0,77	0,89	1,02	1,16	1,30
UGR	14,0	14,4	14,8	15,2	15,6	15,9	16,2	16,6	16,9	17,2	17,5
GGR	11,6	13,2	14,6	15,8	16,9	17,8	18,7	19,5	20,2	20,9	21,5

In Figura 4.4 è mostrata una rappresentazione grafica dell’andamento di UGR e GGR al variare dell’angolo solido ω . Come si può notare, entrambe le formule danno una stima dell’abbagliamento crescente all’aumentare delle dimensioni: l’aumento di UGR è causato dal fatto che l’angolo solido ω aumenta, dato che la luminanza L non influisce, essendo costante per com’è stata definita la prova. L’aumento di GGR è dovuto, oltre all’aumento dei UGR che ne costituisce una componente preponderante, anche all’aumento del *ceiling coverage* CC ,

legato a ω , e degli illuminamenti diretto e indiretto E_d e E_i che sono legati tra loro e aumentano di pari passo.

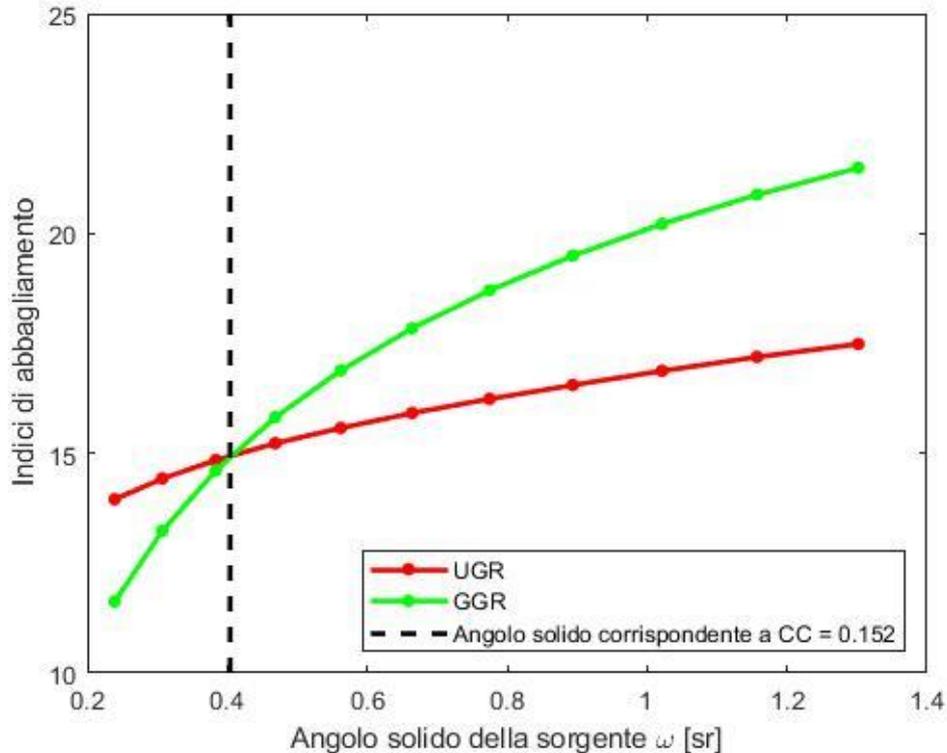


Figura 4.4 UGR e GGR in funzione dell'angolo solido per sorgenti di dimensioni estese, a parità di luminanza

4.3.2 Confronto tra GGR e metodo per i soffitti luminosi

Per quanto riguarda i soffitti luminosi, per limitare l'abbagliamento, la norma CIE 147 del 2002 dispone dei limiti sui livelli di illuminamento medio fornito dal soffitto luminoso, che non dovrebbero essere superati [11]. Si tratta di un principio estremamente semplice, che associa ai livelli di abbagliamento molesto i corrispondenti livelli di abbagliamento da non superare, senza dare alcuna indicazione riguardo alla forma e alle dimensioni del locale, alla posizione dell'osservatore e ai fattori di riflessione di pavimento, pareti e soffitto. Il metodo GGR, essendo pensato per valutare l'abbagliamento molesto nella zona di transizione tra sorgenti di dimensioni "normali" e soffitti luminosi, dovrebbe essere coerente, oltre che con UGR, anche con tali disposizioni sull'abbagliamento causato da soffitti luminosi. Dato che le raccomandazioni della CIE non danno altre indicazioni oltre all'illuminamento, si suppone che l'abbagliamento debba essere al di sotto dei livelli indicati in ogni caso. Pertanto, per mettere a confronto i due metodi, saranno necessari diversi test, in modo da poter verificare la coerenza tra GGR e livelli di illuminamento in svariate condizioni di geometria del locale e di riflessione delle sue superfici.

Anche per il confronto presente, dato che è indispensabile reperire i livelli di illuminamento, distinguendo tra illuminamento diretto e indiretto, è necessario svolgere delle simulazioni con *DIALux*.

4.3.2.1 Metodo di calcolo

Sono state svolte diverse prove, variando sia le dimensioni sia la forma del locale, sia i fattori di riflessione delle pareti, in modo da tener conto di una casistica più ampia possibile, alla ricerca di eventuali criticità da approfondire.

Sono stati impiegati tre locali con indici di locale diversi, ognuno con pareti caratterizzate da due fattori di riflessione diversi. Gli apparecchi luminosi coprono interamente il soffitto. Le loro caratteristiche sono così definite:

Lunghezza x [m]	5	8	10			
Larghezza y [m]	4	7	10			
Altezza h [m]	3	3	3			
Indice di locale K	0.74	1.2	1.7			
R_w	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5
R_c	0.7					
R_f	0.2					

dove R_w , R_c e R_f sono i fattori di riflessione rispettivamente delle pareti, del soffitto e del pavimento.

Si è scelto di limitare l'abbagliamento a 19 sulla scala UGR, di conseguenza l'illuminamento medio non dovrà superare i 1000 lx, come stabilito dalla norma CIE. Le sorgenti luminose utilizzate hanno un'emissione di tipo lambertiano. L'osservatore è posizionato sul lato corto del locale, al centro della parete, ad un'altezza di 1.2 m.

Per prima cosa sono state svolte le simulazioni con *DIALux*: dato che per ogni prova la geometria del locale e i fattori di riflessione variano, è necessario modificare sia le dimensioni delle sorgenti luminose in modo da mantenere il *ceiling coverage* pari a 1, sia il flusso per mantenere l'illuminamento pari a 1000 lx all'altezza dell'osservatore: per misurarla è stato necessario impiegare una superficie di calcolo, posta in corrispondenza delle coordinate dell'osservatore. Una volta eseguita la simulazione, dai risultati illuminotecnici resi disponibili come output sono stati trascritti i valori degli illuminamenti E_d e E_i . Successivamente è stato fatto un calcolo con *MatLab*: una volta inseriti la geometria del locale, le posizioni dell'apparecchio e dell'osservatore e gli illuminamenti E_d e E_i sono stati calcolati prima tutti i parametri utili per la stima dell'UGR. La luminanza della sorgente luminosa L è stata calcolata a partire dall'intensità luminosa: poiché la sorgente ha un'emissione molto simile ad un'emissione lambertiana, è stato sufficiente fare il rapporto tra l'intensità luminosa corrispondente alla direzione normale alla sua superficie e l'area della superficie stessa. La luminanza di sfondo L_b invece è stata calcolata facendo la media delle luminanze delle superfici del locale in esame comprese nel campo visivo: tali luminanze sono disponibili nei dati di

output di *DIALux* ma possono anche essere ricavate dai valori dell'illuminamento sulle superfici tramite i coefficienti di riflessione secondo la formula (4.8).

$$L_b = q \cdot E = \frac{\rho}{\pi} \cdot E \quad (4.8)$$

dove

q è detto coefficiente di luminanza

ρ è il coefficiente di riflessione

Tramite le coordinate x, y, z sono state calcolate la distanza r dell'osservatore dal centro delle parti luminose, l'angolo solido sotteso dalla sorgente ω e gli angoli τ e σ necessari al calcolo dell'indice di posizione di Guth P . dopo aver calcolato UGR è stato possibile calcolare GGR secondo la formula (4.9), che nel caso in cui $CC = 1$, equivale alla (3.6).

$$GGR = UGR + 8 \log_{10} \left[\frac{2.55 \left(1 + \frac{E_d}{220}\right)}{\left(1 + \frac{E_d}{E_i}\right)} \right] \quad (4.9)$$

Di seguito è riportato il codice del file *MatLab* usato per il calcolo.

```
x = 2.5; %distanza relativa tra centro della sorgente e osservatore, lungo l'asse x
y = 0; %distanza relativa lungo l'asse y
z = 1.8; %altezza relativa
r = sqrt(x^2 + y^2 + z^2); %distanza relativa

lung = 5; %lunghezza del locale (e della sorgente)
larg = 4; %larghezza del locale (e della sorgente)
A = lung*larg; %area del locale

Ed = 776; %illuminamento diretto
Ei = 254; %illuminamento indiretto
L = 671; %luminanza dell'apparecchio, calcolata come rapporto tra I0 e A
Lb = 83; %luminanza dello sfondo, calcolata tramite il coefficiente di riflessione
tau = atand(abs(y)/z); %in gradi
sigma = atand(sqrt(y^2 + z^2)/x); %in gradi
P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 + 0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indice di Guth
omega = A*cosd(sigma)/r^2; %angolo solido sotteso dalla sorgente

UGR = 8*log10(0.25/Lb*L^2*omega/P^2);
GGR = UGR + 8*log10(2.55*(1 + Ed/220)/(1 + Ed/Ei)); %GGR per CC = 1
```

4.3.2.2 Risultati e conclusioni

I risultati ottenuti sono presentati nella Tabella 4.4. È evidente che nei casi affrontati le stime date dalla formula GGR non rimangono mai entro il limite di abbagliamento di 19 come invece dovrebbe essere. Per fattori di riflessione delle pareti R_w pari a 0.3 si hanno livelli di abbagliamento maggiori rispetto ai casi con fattori di riflessione pari a 0.5, il che è dovuto alla

minore luminanza di sfondo L_b che ne deriva e quindi alla minore uniformità delle luminanze presenti nel campo visivo. All'aumentare delle dimensioni del locale e di conseguenza dell'apparecchio si ha un aumento notevole della stima di abbagliamento ottenuta tramite GGR; tale stima supera il limite di 19 già nella prima tipologia di locale e nella terza la supera di molto. Ciò è sicuramente dovuto all'aumento della componente che corrisponde a UGR nella formula (4.9), dato che E_d e E_i variano molto poco e la componente di correzione (secondo addendo della formula (4.9)) non subisce cambiamenti particolarmente significativi: per $R_w = 0.5$ essa vale all'incirca 4 indipendentemente dalla forma del locale, mentre per $R_w = 0.3$ assume valori compresi tra 2.5 e 2.9.

Tabella 4.4 Risultati ottenuti per il confronto tra GGR e il metodo per soffitti luminosi

Lunghezza x [m]	5		8		10	
Larghezza y [m]	4		7		10	
Altezza h [m]	3		3		3	
Rw	0,5	0,3	0,5	0,3	0,5	0,3
UGR	10,0	13,1	15,1	17,5	17,0	19,2
Ed [lx]	776	854	793	867	809	869
Ei [lx]	254	147	207	133	192	130
L [cd/m ²]	671	738	530	579	490	526
Lb [cd/m ²]	83	50	80	51	80	52
GGR	20,2	21,1	23,4	24,3	24,8	25,6

Sembra quindi che le raccomandazioni proposte dalla CIE nella norma 147 del 2002 non siano una regola generalmente valida ma che la loro validità si limiti a una casistica di locali con caratteristiche non eccessivamente critiche per quanto riguarda la geometria e i fattori di riflessione delle superfici.

Ad ogni modo la norma CIE 147 del 2002 sostiene che la formula GGR e le disposizioni per i soffitti luminosi portino a risultati coerenti tra loro. Tuttavia, la formula GGR è presentata come più accurata e più valida in senso generale, quindi si raccomanda di utilizzare tale formula ogniqualvolta si abbiano a disposizione i dati sufficienti.

4.4 Considerazioni sul calcolo tramite mappe di luminanza

Il presente test ha lo scopo di valutare le prestazioni del metodo di calcolo di UGR tramite l'uso delle mappe di luminanza per la stima dell'abbagliamento molesto. Tale scopo si basa sulla scomposizione dell'apparecchio luminoso in più pixel e sulla somma dei contributi dati all'UGR da ogni singolo pixel, ognuno trattato come se fosse un apparecchio indipendente di dimensioni più piccole. Per valutarne l'efficacia, prima di tutto si è pensato di confrontare l'UGR calcolato nel modo convenzionale con l'UGR calcolato scomponendo un apparecchio in un numero variabile di pixel. Ciò è stato fatto per un apparecchio di dimensioni normali e di luminanza uniforme sulla sua superficie, in modo da poter considerare l'UGR calcolato con il metodo convenzionale come valore vero da prendere come riferimento. Il test quindi si propone di valutare le prestazioni dell'UGR calcolato con la mappa di luminanza al variare del numero dei pixel, o equivalentemente, al variare delle loro dimensioni, mantenendo invariati la

geometria del sistema e l'apparecchio di illuminazione. Un secondo aspetto affrontato nel presente test riguarda il comportamento di UGR_{small} con sorgenti molto vicine o, come in questo caso, contigue. Si ricorda che il calcolo di UGR_{small} si basa sulla sostituzione delle sorgenti di piccole dimensioni con sorgenti equivalenti di dimensioni "normali" più estese; tuttavia, quando UGR_{small} viene applicato a numerose sorgenti contigue, non si tiene conto che le sorgenti equivalenti non sono indipendenti ma si sovrappongono tra loro: di conseguenza ci si aspetta che l'utilizzo di UGR_{small} con sorgenti contigue come nel caso del metodo dei pixel porti ad una sovrastima dell'angolo solido ω , che aumenta sempre di più all'aumentare del numero di pixel e che ciò si traduca in una sovrastima dell'abbagliamento tanto più elevata quanto più è alto il numero dei pixel impiegati.

4.4.1 Metodo di calcolo

Il calcolo è stato svolto compilando un codice con il software *MatLab*. L'apparecchio usato per il calcolo impiega un tubo a fluorescenza di 1.2 m di lunghezza e di 3 cm di diametro ed è dotato di una emissione molto simile ad una distribuzione lambertiana, presentata nel diagramma polare in Figura 4.5. Esso è posizionato di fronte all'osservatore e le coordinate relative tra i due rispetto agli assi x,y,z sono

$$x = 3 \text{ m}$$

$$y = 0$$

$$z = 1.4 \text{ m}$$

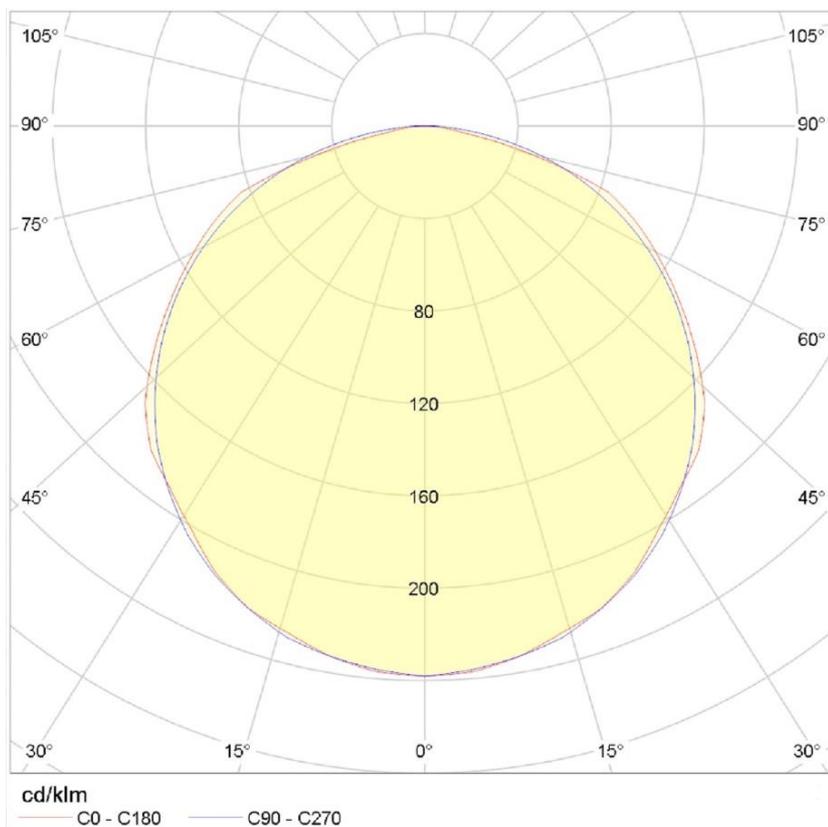


Figura 4.5 Diagramma polare del tubo a fluorescenza

Per il calcolo degli indici di abbagliamento, l'apparecchio è stato segmentato nel senso della dimensione maggiore in un numero di suddivisioni div variabile da 1 a 50, quindi sono stati analizzati 50 casi diversi. Così facendo, con una sola suddivisione si considera l'apparecchio intero e si ricade nel caso in cui la formula UGR è applicata nel modo convenzionale, mentre con 50 suddivisioni si hanno pixel di circa 7 cm^2 di area. A differenza di UGR, UGR_{small} non è stato calcolato per ogni numero di suddivisioni div , ma solo per i casi in cui i pixel sono di piccole dimensioni, o meglio quando le dimensioni dei pixel sono minori del limite di applicazione di UGR_{small} , cioè al di sotto di 50 cm^2 . In Figura 4.6 vengono mostrati alcuni esempi di configurazioni delle suddivisioni dell'apparecchio.

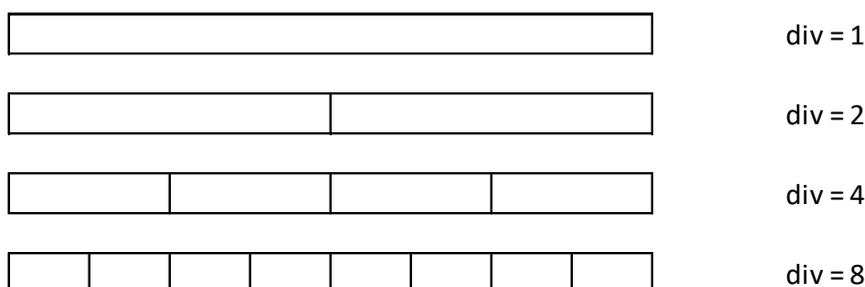


Figura 4.6 Layout delle suddivisioni dell'apparecchio

Dopo aver definito la geometria del sistema apparecchio-osservatore e aver importato in *MatLab* le informazioni relative alla fotometria dell'apparecchio usato, da quest'ultime è stata estrapolata l'intensità luminosa I dell'apparecchio nella direzione dell'osservatore: per ottenerla è necessario calcolare il valore degli angoli C e γ , definiti come nelle formule (2.10-2.12), a partire dalle coordinate relative tra osservatore e apparecchio x , y , z . La luminanza nella direzione dell'osservatore è ottenuta come rapporto tra l'intensità luminosa I e l'area apparente della sorgente. Dopodiché, al variare del parametro div tra 1 e 50 e per ognuno dei pixel ottenuti sono stati calcolate le grandezze necessarie alla valutazione degli indici di abbagliamento, quali la larghezza del pixel dl , la coordinata del pixel lungo y dy , gli angoli τ e σ per il calcolo dell'indice di posizione di Guth P corrispondente ad ogni pixel, la distanza dr tra l'osservatore e il pixel di apparecchio e l'angolo solido ω . Per la valutazione di UGR_{small} è stata posta una condizione: l'area del pixel deve essere minore di 50 cm^2 , in modo da evitare a priori di calcolare UGR_{small} nei casi in cui esso concettualmente non ha validità. Per il calcolo di UGR_{small} , come richiesto dalla norma, per ogni pixel si è fatto ricorso ad una sorgente luminosa equivalente definita con intensità luminosa pari all'intensità luminosa di origine e con area effettiva pari a 50 cm^2 , come richiesto dalla norma [11].

Di seguito è riportato il codice *MatLab* utilizzato per il calcolo. L'ultima parte del codice è stata inserita per generare i grafici utilizzati nel paragrafo successivo per il commento dei risultati ottenuti.

```
x = 3; %distanza lungo la direzione di osservazione
y = 0; %distanza perpendicolare alla direzione di osservazione
z = 1.4; %altezza relativa
r = sqrt(x^2 + y^2 + z^2); %distanza
```

```

Eulumdat = xlsread('TMS022 2xTL-D36W +GMS022 R_33-640.xlsx');
lung = Eulumdat(16)/1000; %lunghezza dell'apparecchio
larg = Eulumdat(17)/1000; %larghezza dell'apparecchio
Mc = Eulumdat(4); %numero di piani C tra 0° e 360°
Dc = Eulumdat(5); %distanza tra i piani C
Ng = Eulumdat(6); %numero di angoli gamma per ogni piano C
Dg = Eulumdat(7); %distanza tra gli angoli gamma

C = abs(round(atan2(y/x))); %piano C, in gradi
Cidx = round(C/Dc);
gamma = 90 - round(atan2(sqrt(x^2 + y^2)/z)); %angolo tra la linea osservatore-
sorgente e la normale, in gradi (apparecchio sulla parete)
gammaidx = round(gamma/Dg);
I = Eulumdat(42 + Mc + Ng + Cidx*Ng + gammaidx);
L = I/(lung*larg);
div = 50; %numero di suddivisioni
dl = zeros(1,div);
UGR = zeros(1,div);
UGRsmall = NaN(1,div);

Lb = 15;
for i = 1:div
    dl(i) = lung/i; %lunghezza del pixel
    sum = 0;
    sum_small = 0;
    for j = 1:i
        dy = y - lung/2 + (j - 1/2)*dl(i); %coordinata y del pixel
        tau = atan2(abs(dy)/z); %in gradi
        sigma = atan2(sqrt(dy^2 + z^2)/x); %in gradi
        dP = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 +
0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indice di Guth
        dr = sqrt(x^2 + dy^2 + z^2); %distanza osservatore-pixel
        omega = dl(i)*larg/dr^2; %angolo solido sotteso dal pixel
        sum = sum + L^2*omega/dP^2;
        if dl(i)*larg<0.005 %condizione per calcolare UGRsmall
            Leq = L*0.005/(dl(i)*larg); %luminanza della sorgente equivalente
            omegaeq = 0.005/dr^2; %angolo solido sotteso dalla sorgente
equivalente
            sum_small = sum_small + Leq^2*omegaeq/dP^2;
        end
    end
    UGR(i) = 8*log10(0.25*sum/Lb);
    UGRsmall(i) = 8*log10(0.25*sum_small/Lb);
end

%grafici
plot(1:div,UGR,'r','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15);
hold on
plot(1:div,UGRsmall,'b','LineWidth',2,'Marker','.', 'MarkerSize',15);
xlabel('Numero di suddivisioni')
ylabel('Indici di abbagliamento')

```

```

legend('UGR', 'UGRsmall', 'Location', 'northwest')
figure
plot(1:10, UGR(1:10), 'r', 'LineWidth', 2, 'Marker', '.', 'MarkerSize', 15);
xlabel('Numero di suddivisioni')
ylabel('UGR')

```

4.4.2 Risultati e conclusioni

La stima dell'abbagliamento molesto ottenuta applicando il metodo UGR nel modo convenzionale dà un valore pari a 19.7: dato che l'apparecchio è stato scelto volutamente di luminanza uniforme per fare in modo che tale valore sia attendibile, esso è da considerare come valore di riferimento. I risultati ottenuti con il metodo delle mappe di luminanza sono rappresentati in forma grafica in Figura 4.7, nella quale vengono mostrati gli andamenti delle formule di UGR e UGR_{small} calcolati suddividendo l'apparecchio in un numero di pixel variabile tra 1 e 50.

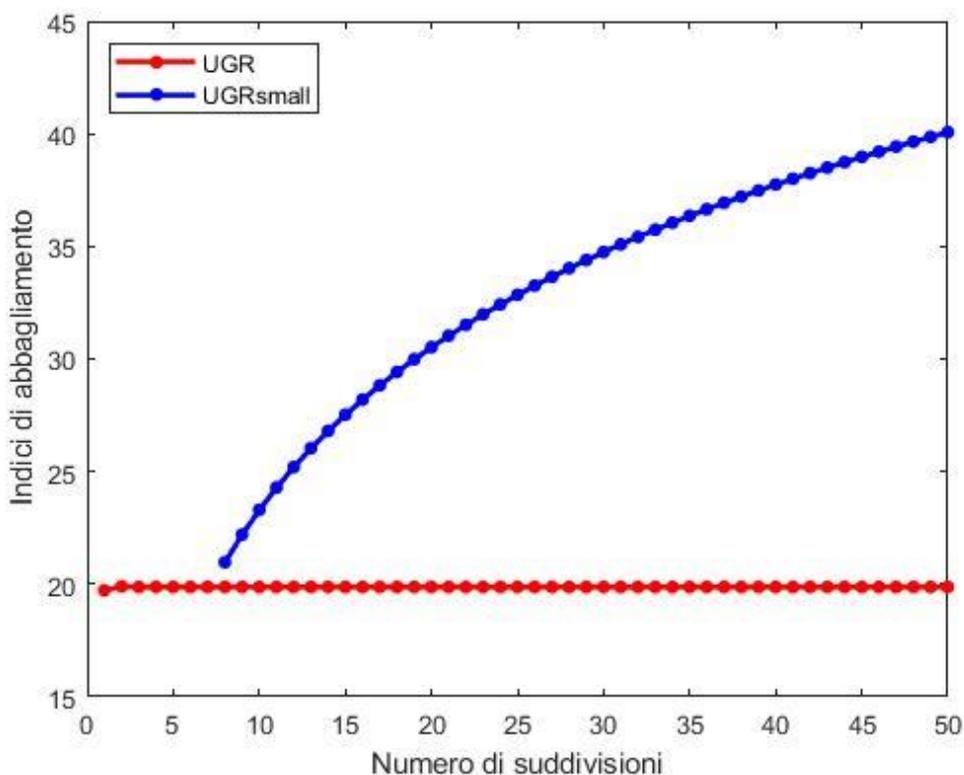


Figura 4.7 UGR e UGR_{small} calcolati con il metodo delle mappe di luminanza al variare del numero di suddivisioni

Come si può notare da tale grafico, UGR_{small} ha un andamento crescente all'aumentare del numero di suddivisioni. Tale comportamento è in linea con le aspettative: per prima cosa esso non dà mai una valutazione di abbagliamento attendibile in quanto le stime ottenute non si avvicinano mai al valore di riferimento; inoltre esso ha un andamento che dipende fortemente dal numero di suddivisioni, ovvero non dà un risultato stabile. Ciò porta ad una sovrastima dell'angolo solido ω , che aumenta sempre di più all'aumentare del numero di pixel. Perciò è

possibile confermare che UGR_{small} non è adatto ad essere utilizzato con il metodo delle mappe di luminanza e con sorgenti non isolate e che in tali applicazioni il suo utilizzo non dà stime attendibili.

Per quanto riguarda UGR invece, il suo valore rimane stabile al variare del numero di suddivisioni ed è sostanzialmente pari al valore di riferimento. Ciò è dovuto al fatto che la luminanza L e l'indice di posizione di Guth P variano molto poco da pixel a pixel, quindi sostanzialmente, la sommatoria presente nell'argomento del logaritmo nella formula (2.8) riguarda solo gli angoli solidi ω che vengono sommati dando come risultato l'angolo solido corrispondente all'intero apparecchio; di conseguenza, per una sorgente con distribuzione di luminanza omogenea sulla superficie, l'UGR calcolato scomponendo la sorgente luminosa è quasi equivalente a quello calcolato con il metodo convenzionale, che considera l'apparecchio intero. Infatti, il valore di UGR si assesta su 19.8, che è perfettamente in linea con il valore di riferimento 19.7 (si ricorda che la scala UGR è una scala a gradini di 3 unità, nella quale le differenze minori di 3 unità sono considerate non significative e non percepibili [7]). La piccola differenza è riconducibile alla variazione dell'indice di Guth P da pixel a pixel.

Dalla Figura 4.7 si può osservare che, per ridotti numeri di suddivisioni, UGR sembra presentare delle oscillazioni: per mettere in evidenza tale aspetto è stato fatto un ingrandimento del grafico per le prime 10 prove, da 1 a 10 suddivisioni, proposto in Figura 4.8. Da tale grafico si può notare che l'UGR ottenuto con una sola suddivisione è leggermente più basso del valore che si ha con un alto numero di suddivisioni, mentre l'UGR ottenuto con due suddivisioni è leggermente più alto. Anche i punti dal terzo al quinto hanno valori che oscillano, seppur in modo molto più attenuato. Ad ogni modo, la differenza massima tra il valore più alto e quello più basso, ovvero tra il primo ed il secondo punto, è di 0.2 sulla scala UGR, quindi corrisponde ad una differenza di abbagliamento assolutamente impercettibile e trascurabile.

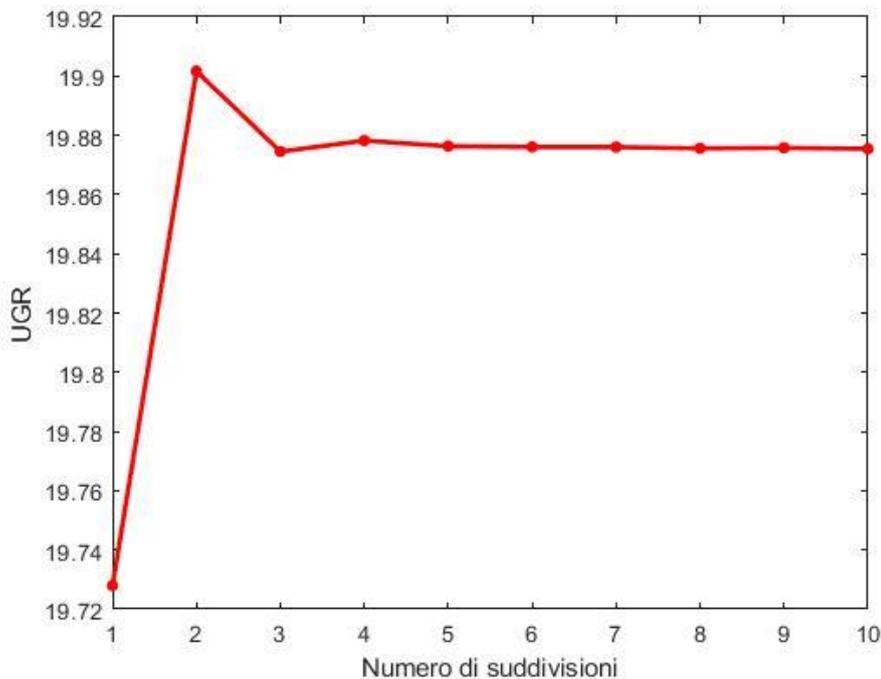


Figura 4.8 UGR calcolato con il metodo delle mappe di luminanza al variare del numero di suddivisioni

Per quanto riguarda le sorgenti luminose non uniformi, il metodo delle mappe di luminanza dovrebbe dare un valore stabile per un numero di suddivisioni sufficientemente alto, quindi dovrebbe avere un comportamento simile a quello che ha per sorgenti uniformi, ma che necessita di un numero di suddivisioni più alto per fornire un valore stabile. Quindi il metodo delle mappe di luminanza sembra dare valori attendibili ma purtroppo il numero di pixel nei quali suddividere l'apparecchio varia a seconda dell'apparecchio stesso e in particolare della disuniformità di luminanza sulla sua superficie. Per la valutazione dell'abbagliamento molesto causato da tale categoria di sorgenti si rimanda al §4.5.

4.5 Considerazioni sui metodi per sorgenti non uniformi

Lo scopo del presente paragrafo è mettere a confronto i diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto derivante da sorgenti luminose non uniformi presentati nei §§3.3.3-3.3.4, ovvero il metodo che impiega le mappe di luminanza e le tre formule del metodo UGR_{ZJU} (3.18-3.20). Le formule UGR_{ZJU} si basano su due componenti: il primo è la formula UGR "classica" (2.8), il secondo è un termine correttivo che tiene conto del contrasto tra le zone a luminanza elevata e le zone a luminanza ridotta presenti sulla superficie dell'apparecchio.

Innanzitutto, è stata fatta una verifica per accertare che i quattro metodi diano la stessa stima di abbagliamento molesto in caso di sorgenti con luminanza uniforme, ossia che per sorgenti uniformi il metodo delle mappe di luminanza e le tre formule UGR_{ZJU} ricadano nel metodo UGR convenzionale. Per quanto riguarda il metodo delle mappe di luminanza, ciò è già stato dimostrato nel §4.4, mentre per le formule UGR_{ZJU} serve una verifica. Per fare ciò, è stato fatto un confronto tra i diversi metodi per una sorgente luminosa quadrata, di lato pari a 50 cm e luminanza uniforme su tutta la superficie pari a 1000 cd/m^2 e montata verticalmente. Le distanze relative tra osservatore e sorgente lungo le coordinate x, y, z , sono:

$$x = 3.6 \text{ m}$$

$$y = 0$$

$$z = 1.3 \text{ m}$$

riferite al centro dell'apparecchio e scelte per replicare le coordinate del sistema utilizzato nello studio di Y. Yang *et al.* [14, 15]. La luminanza di sfondo è pari a 14.3 cd/m^2 . Il modello dell'apparecchio luminoso è stato creato impiegando un codice *MatLab*, con il quale sono stati svolti anche i calcoli. Il codice *MatLab* utilizzato per creare le sorgenti e per il calcolo degli indici di abbagliamento è presentato nel §4.5.1.

Le stime di abbagliamento ottenute sono:

$$UGR = 20.3$$

$$UGR_{pixel} = 20.9$$

$$UGR_{ZJU1} = 20.3$$

$$UGR_{ZJU2} = 20.3$$

$$UGR_{ZJU3} = 20.3$$

Dato che l'apparecchio è di dimensioni normali e di luminanza uniforme, il metodo più corretto per il calcolo dell'abbagliamento è senza dubbio l'UGR convenzionale, quindi UGR è il valore da prendere come riferimento. Come si può notare, UGR_{pixel} dà una stima leggermente diversa

rispetto a *UGR*: come già visto nel §4.4, il metodo delle mappe di luminanza applicato a sorgenti uniformi è affetto da una piccola differenza nella stima dell'abbagliamento, riconducibile alla variazione dell'indice di Guth P da pixel a pixel. Tuttavia, tale differenza è talmente ridotta da poter essere certamente trascurata. Per quanto riguarda invece le formule UGR_{ZJU} , esse danno una stima esattamente pari all'*UGR* convenzionale: ciò è dovuto al fatto che, per sorgenti dotate di luminanza uniforme, il contrasto tra i pixel è nullo e le tre formule equivalgono alla formula *UGR*. Infatti, se la luminanza è uniforme, le tre formule per il calcolo di *Contrast* (3.14-3.16) danno come risultato zero, quindi i termini correttivi applicati all'*UGR* nel metodo UGR_{ZJU} si annullano.

Per le prove con apparecchi a luminanza non uniforme è stato deciso di utilizzare degli apparecchi luminosi simili a quelli utilizzati nello studio di Y. Yang *et al.* [15], ovvero degli apparecchi di forma quadrata dotati di 16 dischi luminosi sulla superficie disposti uniformemente su 4 file, come quello presentato come esempio in Figura 4.9, la cui distribuzione di luminanza passa da zone a luminanza bassa a zone a luminanza alta con un profilo a gradini, come quello mostrato in Figura 4.10. Sono state svolte diverse prove, nelle quali si è cercato di analizzare le prestazioni dei diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento al variare sia delle dimensioni dell'apparecchio, sia delle dimensioni dei dischi luminosi. Nel metodo delle mappe di luminanza e per il calcolo del contrasto in tutte e tre le formule UGR_{ZJU} è necessario avere delle informazioni sulla distribuzione della luminanza sulla superficie dell'apparecchio, quindi anche nel presente test è fondamentale avere a disposizione la mappa di luminanza degli apparecchi presi in esame.

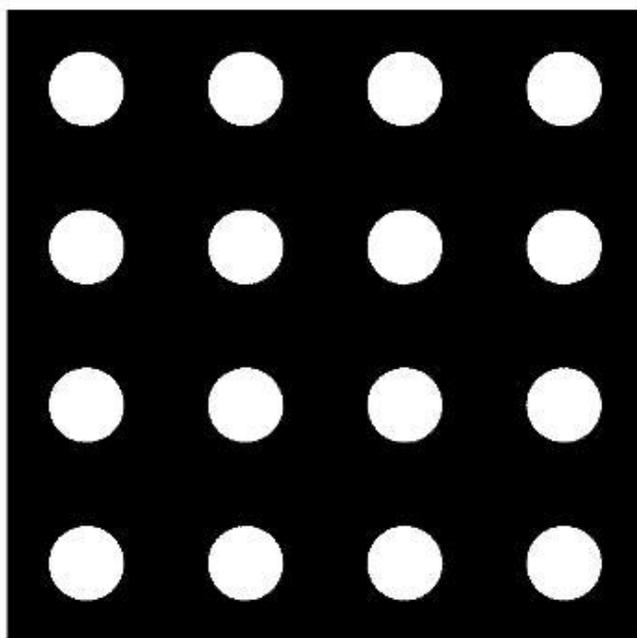


Figura 4.9 Esempio di apparecchio a luminanza non uniforme di forma quadrata e dotato di 16 dischi luminosi

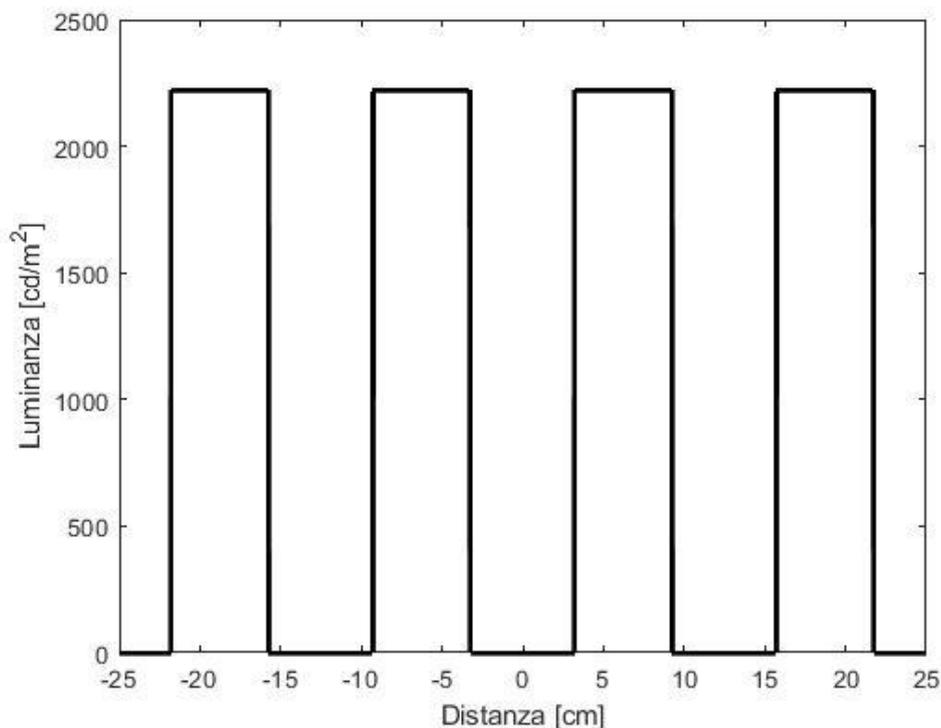


Figura 4.10 Profilo di luminanza dell'apparecchio non uniforme dotato di 16 dischi luminosi; i picchi corrispondono ai dischi, mentre i buchi corrispondono alla zona non luminosa

4.5.1 Confronto al variare delle dimensioni dei dischi luminosi

Il presente test ha lo scopo di confrontare le prestazioni dei diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto per apparecchi luminosi dotati di luminanza non uniforme al variare della loro uniformità di luminanza. I metodi messi a confronto sono il metodo delle mappe di luminanza, la formula per le sorgenti di piccole dimensioni UGR_{small} e il metodo UGR_{ZJU} , con apparecchi di forma simile a quella presentata in Figura 4.9, al variare delle dimensioni dei dischi luminosi ma mantenendo invariate le dimensioni dell'apparecchio e la luminanza media su tutta la sua superficie, in modo da fare un confronto a parità di luminanza media e quindi a parità di UGR.

4.5.1.1 Metodo di calcolo

Il confronto è stato eseguito per apparecchi di 50 cm di lato, facendo variare il diametro dei dischi luminosi tra 1 cm e 12 cm, con intervalli di 1 cm. La luminanza dei dischi è stata regolata di volta in volta per mantenere invariata la luminanza media, ovvero per mantenere UGR costante in modo da usarlo come valore di riferimento; per semplicità, si è scelto di predisporre a zero la luminanza delle parti non luminose dell'apparecchio: così facendo, per mantenere la luminanza media costante, è stato sufficiente far variare la luminanza dei dischi con proporzionalità inversa rispetto al quadrato del diametro dei dischi. Inoltre, grazie a questo espediente, è stato possibile calcolare più agevolmente l'indice UGR_{small} , dato che così facendo esso deve tenere conto solo del contributo dato dai dischi luminosi. Le distanze relative tra osservatore e sorgente lungo le coordinate x, y, z , sono:

$x = 3.6 \text{ m}$

$y = 0$

$z = 1.3 \text{ m}$

riferite al centro dell'apparecchio e scelte per replicare le coordinate del sistema utilizzato nello studio di Y. Yang *et al.* [14, 15]. La luminanza di sfondo è pari a 14.3 cd/m^2 .

I calcoli sono stati svolti utilizzando *MatLab*. Non avendo a disposizione una mappa di luminanza di un apparecchio reale, per prima cosa è stato necessario creare un modello di apparecchio: dopo aver stabilito le sue dimensioni, il diametro dei dischi e le luminanze dei dischi e delle parti non luminose, è stata creata una matrice che rappresenta l'immagine della superficie dell'apparecchio, denominata *Lmap*. È stato scelto di utilizzare una risoluzione di 2000×2000 pixel, in modo da ottenere un modello sufficientemente dettagliato e con dei dischi ben definiti (l'apparecchio mostrato in Figura 4.9 è stato disegnato con 2000×2000 pixel e, come si può notare, i dischi hanno una forma che corrisponde molto bene ad un cerchio). Di seguito è riportato il codice *MatLab* usato per la realizzazione del modello. L'ultima parte del codice serve a realizzare delle immagini che diano una raffigurazione dell'apparecchio, analoghe a quelle presentate nelle Figure 4.8-4.9.

```
% crea sorgente luminosa con dischi
d = 2000;
lato = 0.5; %lato dell'apparecchio
diam = 0.06; %diametro del disco luminoso;
dist = lato/4; %distanza tra il centro di un disco e l'altro
val_min = 0; % luminanza della zona dell'apparecchio fuori dai dischi
val_max = 2222; %luminanza dei dischi

Lmap = ones(d)*val_min;
for i = dist/2:dist:3.5*dist
    for j = dist/2:dist:3.5*dist
        for h = 1:d
            for k = 1:d
                if (h - i*d/lato)^2 + (k - j*d/lato)^2 <= (0.5*diam*d/lato)^2
                    Lmap(h,k) = val_max;
                end
            end
        end
    end
end

%grafici
image(Lmap)
contourf(Lmap,1)
colormap(gray)
axis square
axis off
figure
plot([-d/2:d/2 - 1]/d*lato*10^2,Lmap(d/8,:), 'k', 'LineWidth',2)
xlabel('Distanza [cm]')
ylabel('Luminanza [cd/m^2]')
```

Per ogni prova deve essere creato un diverso modello dell'apparecchio e deve essere ripetuto il calcolo; gli apparecchi utilizzati sono così definiti:

Diametro dischi [cm]	Angolo solido sotteso dai dischi [sr]	Luminanza dischi [cd/m ²]
1	8,0E-05	80000
2	3,2E-04	20000
3	7,2E-04	8889
4	1,3E-03	5000
5	2,0E-03	3200
6	2,9E-03	2222
7	3,9E-03	1633
8	5,1E-03	1250
9	6,5E-03	988
10	8,0E-03	800
11	9,7E-03	661
12	1,2E-02	556

Una volta creato il modello dell'apparecchio è stata creata la mappa di luminanza, denominata *Lmap2*: per semplicità, si è scelto di raggruppare i pixel dell'immagine originale dell'apparecchio con il metodo *square* citato nel §3.3.3, ovvero di raccogliarli in quadrati di dimensioni fissate ottenendo di fatto un'immagine composta da un minor numero di pixel di dimensioni più grandi, le cui luminanze sono date dalla media delle luminanze dei punti al loro interno. Un esempio di mappa di luminanza è mostrato in Figura 4.11. Per un apparecchio di 50 cm di lato si è scelto di usare 50 divisioni per lato; così facendo si ottengono 2500 pixel quadrati di 1 cm di lato, che dovrebbero risultare sufficientemente piccoli e numerosi da tener conto adeguatamente della disuniformità dell'apparecchio.

Dopo aver ottenuto la mappa di luminanza è stato possibile calcolare gli indici di abbagliamento. L'UGR calcolato con il metodo delle mappe di luminanza, qui denominato *UGR_{px}*, è stato ottenuto come nel test presentato nel §4.4, ossia considerando ogni pixel come se fosse una sorgente a sé stante e sommando gli effetti di tutti i pixel che formano la mappa. Sono stati calcolati anche UGR con la formula convenzionale e *UGR_{small}* applicato ai dischi luminosi, per avere un confronto più completo. Per quanto riguarda il metodo *UGR_{ZJU}*, è stato necessario calcolare le tre valutazioni del contrasto con le Formule 3.14-3.16 per *Contrast1*, *Contrast2* e *Contrast3*. Si ricorda che nella Formula 3.14 per *Contrast1*, le luminanze L_{max} e L_{min} non sono gli estremi superiore e inferiore dell'intervallo di luminanza, ma sono calcolate facendo la media delle luminanze dei pixel relativi al 5% delle luminanze più alte (per L_{max}) e più basse (per L_{min}). *Contrast3* invece è calcolato prima facendo la somma degli scarti quadratici tra la luminanza del pixel *i,j*-esimo e le luminanze dei pixel ad esso adiacenti, poi sommando i contributi di tutti i pixel e dividendo per numero di somme incluse nel calcolo e per la luminanza media. Una volta ottenuti i tre contrasti, *UGR_{ZJU1}*, *UGR_{ZJU2}* e *UGR_{ZJU3}* vengono calcolati semplicemente applicando le rispettive Formule 3.18-3.20. Di seguito è riportato il codice *MatLab* usato per il calcolo.

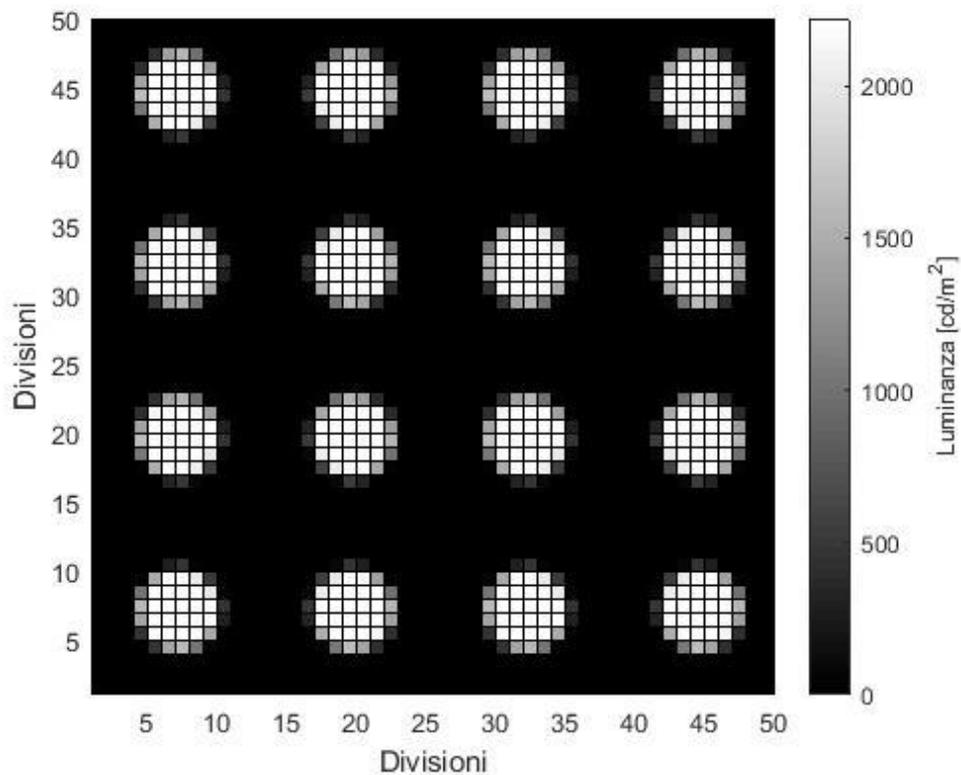


Figura 4.11 Mappa di luminanza di un apparecchio usato per il test con dischi luminosi

```

% crea mappa di luminanza
div = 50; %divisioni per lato, si ottengono div^2 pixel
Lmap2 = zeros(div);
m = d/div;

for h = 1:div
    for k = 1:div
        Lmap2(h,k) = mean(reshape(Lmap(round(m*h-m+1):round(m*h), round(m*k-
m+1):round(m*k)), [], 1));
    end
end

%grafico mappa di luminanza
figure
pcolor(Lmap2)
axis square
xlabel('Divisioni')
ylabel('Divisioni')
colorbar
c = colorbar;
c.Label.String = 'Luminanza [cd/m^2]';
c.Label.FontSize = 10;
    
```

```

colormap(gray)

% calcola indici di abbagliamento
x = 3.6; %coordinata relativa tra osservaotre e apparecchio lungo x
y = 0; %coordinata relativa tra osservaotre e apparecchio lungo y
z = 1.3; %coordinata relativa tra osservaotre e apparecchio lungo z
r = sqrt(x^2 + y^2 + z^2); %distanza osservatore-apparecchio
Lb = 14.3; %luminanza dello sfondo

%UGR con mappa di luminanza
sum = 0;
for i = 1:div
    dy = y - lato/2 + (i - 0.5)*lato/div; %distanza osservatore-pixel lungo y
    for j = 1:div
        dz = z - lato/2 + (j - 0.5)*lato/div; %distanza osservatore-pixel lungo z
        tau = abs(atan2(dy/dz)); %in gradi
        sigma = atan2(sqrt(dy^2 + dz^2)/x); %in gradi
        P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 + 0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indice di Guth
        omega = (lato/div)^2*cosd(sigma)/(x^2 + dy^2 + dz^2); %angolo solido sotteso dal pixel
        sum = sum + (Lmap2(i,j)/P)^2*omega;
    end
end
UGRpx = 8*log10(0.25*sum/Lb); %calcolato sui pixel

%UGR
L = mean(Lmap(:)); %luminanza media su tutta la superficie dell'apparecchio
tau = abs(atan2(y/z)); %in gradi
sigma = atan2(sqrt(y^2 + z^2)/x); %in gradi
P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 + 0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2); %indice di Guth
omega = lato^2*cosd(sigma)/r^2; %angolo solido totale
UGR = 8*log10(0.25*L^2*omega/(Lb*P^2)); %calcolato con la formula UGR tradizionale (non tiene conto della disuniformità)

%UGRzjul
sum_max = 0;
sum_min = 0;
N = 0;
M = 0;
Ltop = val_min + (val_max - val_min)*0.95; %limite minimo del top 5% del range di luminanze
Lbottom = val_min + (val_max - val_min)*0.05; %limite massimo del bottom 5% del range di luminanze
for i = 1:div
    for j = 1:div
        if Lmap2(i,j) >= Ltop && Lmap2(i,j) <= val_max
            sum_max = sum_max + Lmap2(i,j);
            N = N + 1;
        end
        if Lmap2(i,j) >= val_min && Lmap2(i,j) <= Lbottom

```

```

        sum_min = sum_min + Lmap2(i,j);
        M = M + 1;
    end
end
end
Lmax = sum_max/N; %luminanza massima, come richiesto dalla formula (10)
Lmin = sum_min/M; %luminanza minima, come richiesto dalla formula (10)
contrast1 = (Lmax - Lmin)/L; %contrasto, come da formula (10)
UGRzju1 = UGR + 5.7*log10(contrast1 + 1); %come da formula (14)

%UGRzju2
contrast2 = std(Lmap2(:))/L; %contrasto, come da formula (11)
UGRzju2 = UGR + 11*log10(contrast2 + 1); %come da formula (15)

%UGRzju3
sum = 0;
N = 0;
for i = 1:div
    if i == 1
        h = 0:1;
    elseif i == div
        h = -1:0;
    else
        h = -1:1;
    end
    for j = 1:div
        if j == 1
            k = 0:1;
        elseif j == div
            k = -1:0;
        else
            k = -1:1;
        end
        for H = h
            for K = k
                if H ~= 0 || K ~= 0
                    sum = sum + ((Lmap2(i,j) - Lmap2(i+H,j+K)))^2; %Sum, come da
                    formula (13), ma da dividere per L^2
                    N = N + 1; %numero di termini quadratici in sum
                end
            end
        end
    end
end
end
contrast3 = sum/(N*L^2); %contrasto, come da formula (12)
UGRzju3 = UGR + 4.6*log10(contrast3 + 1); %come da formula (16)

%UGRsmall
P = 0;
sum = 0;
Aeff = 0.005; %area effettiva di una sorgente di dimensioni ridotte
for i = dist/2:dist:3.5*dist

```

```

dy = y - lato/2 + i;
for j = dist/2:dist:3.5*dist
    dz = z - lato/2 + j;
    tau = abs(atan(dy/dz));
    sigma = atan(sqrt(dy^2 + dz^2)/x);
    P = exp((35.2 - 0.31889*tau - 1.22*exp(-2*tau/9))*10^-3*sigma + (21 +
0.26667*tau - 0.002963*tau^2)*10^-5*sigma^2);
    dr = sqrt(x^2 + dy^2 + dz^2); %distanza osservatore-disco
    I = val_max*pi*(diam/2)^2*cosd(sigma); %intensità luminosa del disco
    sum = sum + (I/(dr*P))^2;
end
end
UGRsmall = 8*log10(0.25*sum/(Aeff*Lb)); %come da CIE 147:2002

```

4.5.1.2 Risultati ottenuti

Ciò che ci si aspetta dalle formule per la valutazione dell'abbagliamento molesto dovuto a sorgenti luminose non uniformi è che diano una stima di abbagliamento che cala all'aumentare del diametro dei dischi e al diminuire delle loro luminanze: ci si aspetta tale comportamento non per una questione di dimensioni dei dischi, dato che gli studi su UGR_{small} hanno dimostrato che al di sotto di una certa dimensione delle sorgenti le dimensioni di questi ultimi non sono rilevanti, ma per una questione di uniformità della distribuzione di luminanza sulla superficie dell'apparecchio, che aumenta all'aumentare delle dimensioni dei dischi e al diminuire della loro luminanza.

Le stime di abbagliamento ottenute sono presentate in Tabella 4.5. Come si può notare, UGR e UGR_{small} non cambiano al variare delle dimensioni dei dischi luminosi. Per quanto riguarda UGR , ciò è una conseguenza di com'è stato definito il test: esso rimane invariato perché la luminanza media dell'apparecchio e le sue dimensioni rimangono invariate. UGR_{small} invece non varia perché rimane invariata l'intensità luminosa dei dischi. Tali comportamenti sono una conferma del fatto che UGR non è adatto alla stima dell'abbagliamento dovuto a sorgenti non uniformi e che UGR_{small} è adatto solo a stime di abbagliamento dovuto a sorgenti abbastanza distanziate tra loro da poter essere considerate indipendenti tra loro: sicuramente UGR_{small} non è adatto a sorgenti luminose i cui centri siano distanti tra loro meno di 8 cm, in quanto al di sotto di tale distanza le loro sorgenti equivalenti si sovrapporrebbero. Inoltre, si ricorda che per dischi con diametro superiore agli 8 cm circa, ci si trova al di fuori del campo di applicazione di UGR_{small} . Come previsto, gli altri indici vanno diminuendo all'aumentare delle dimensioni dei dischi luminosi. Il loro andamento in funzione dell'angolo solido sotteso dai dischi luminosi (angolo solido totale, dato dalla somma degli angoli solidi sottesi da tutti i 16 dischi) è messo in evidenza nel grafico in Figura 4.12. Oltre agli andamenti degli indici di abbagliamento, nel grafico sono state disegnate due linee verticali tratteggiate: la nera in corrispondenza di 0.0003 sr indica il limite di angolo solido minimo di applicazione di UGR , la verde in corrispondenza dell'angolo solido $5.1 \cdot 10^{-3}$ sr, pari a un'area apparente di 50 cm^2 , indica il limite massimo di applicazione di UGR_{small} .

Tabella 4.5 Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi di lato pari a 50 cm con 2500 divisioni, a parità di dimensioni e di luminanza media.

Diametro dischi [cm]	Angolo solido [sr]	UGR	UGR _{px}	UGR _{ZJU1}	UGR _{ZJU2}	UGR _{ZJU3}	UGR _{small}
1	8,0E-05	7,92	25,7	21,0	20,4	18,3	11,8
2	3,2E-04	7,92	21,4	17,6	17,7	13,2	11,8
3	7,2E-04	7,92	18,7	15,7	16,0	11,1	11,8
4	1,3E-03	7,92	16,7	14,3	14,9	9,83	11,8
5	2,0E-03	7,92	15,1	13,3	14,0	9,10	11,8
6	2,9E-03	7,92	13,9	12,6	13,3	8,69	11,8
7	3,9E-03	7,92	12,8	11,9	12,7	8,44	11,8
8	5,1E-03	7,92	11,9	11,4	12,2	8,28	11,8
9	6,5E-03	7,92	11,1	11,0	11,7	8,18	11,8
10	8,0E-03	7,92	10,4	10,6	11,2	8,11	11,8
11	9,7E-03	7,92	9,72	10,3	10,7	8,06	11,8
12	1,2E-02	7,92	9,13	10,1	10,2	8,04	11,8

Come si può notare dal grafico, gli indici di abbagliamento calcolati con la mappa di luminanza UGR_{px} e con le tre formule UGR_{ZJU} hanno un andamento crescente al diminuire dell'angolo solido sotteso dai dischi luminosi. Fatta eccezione per UGR_{ZJU3}, gli indici intercettano UGR_{small} all'incirca in corrispondenza di $5.1 \cdot 10^{-3}$ sr, ovvero del limite massimo di applicazione di UGR_{small}. Per angoli solidi maggiori, gli indici di UGR_{ZJU} tendono ad assestarsi su un valore pari a UGR: ciò è dovuto al fatto che, all'aumentare del diametro dei dischi, la luminanza massima cala perché è pari alla luminanza dei dischi, la luminanza minima rimane invariata perché pari alla luminanza delle parti non luminose, la luminanza media rimane invariata per com'è stato definito il test, di conseguenza il contrasto diminuisce, dando un contributo sempre meno significativo. Per un motivo analogo, anche UGR_{px} dà una stima in calo all'aumentare delle dimensioni: all'aumentare delle dimensioni dei dischi, i pixel che danno un contributo, ovvero quelli che includono i dischi, aumentano in numero, ma il loro contributo è sempre minore perché la loro luminanza decresce. Per gli stessi motivi, per angoli solidi piccoli, tali indici di abbagliamento sono elevati e crescono tanto più gli angoli solidi sono piccoli.

L'indice che ha il comportamento più diverso rispetto agli altri e rispetto alle aspettative è UGR_{ZJU3}: esso ha un andamento simile agli altri indici, ma assume valori più bassi su tutto l'intervallo studiato, come se tendesse a dare una sottostima dell'abbagliamento; dalle ricerche di Y. Yang *et al.* [15] emerge che UGR_{ZJU3} tende a dare una lieve sottostima del livello di abbagliamento, anche se non si spiega una sottostima di tale entità. Un altro comportamento anomalo riguarda l'indice UGR_{px} per i valori di angolo solido più ridotti, per i quali fornisce una valutazione di abbagliamento più elevata rispetto agli indici UGR_{ZJU1} e UGR_{ZJU2} al di sotto dei 0.003 sr.

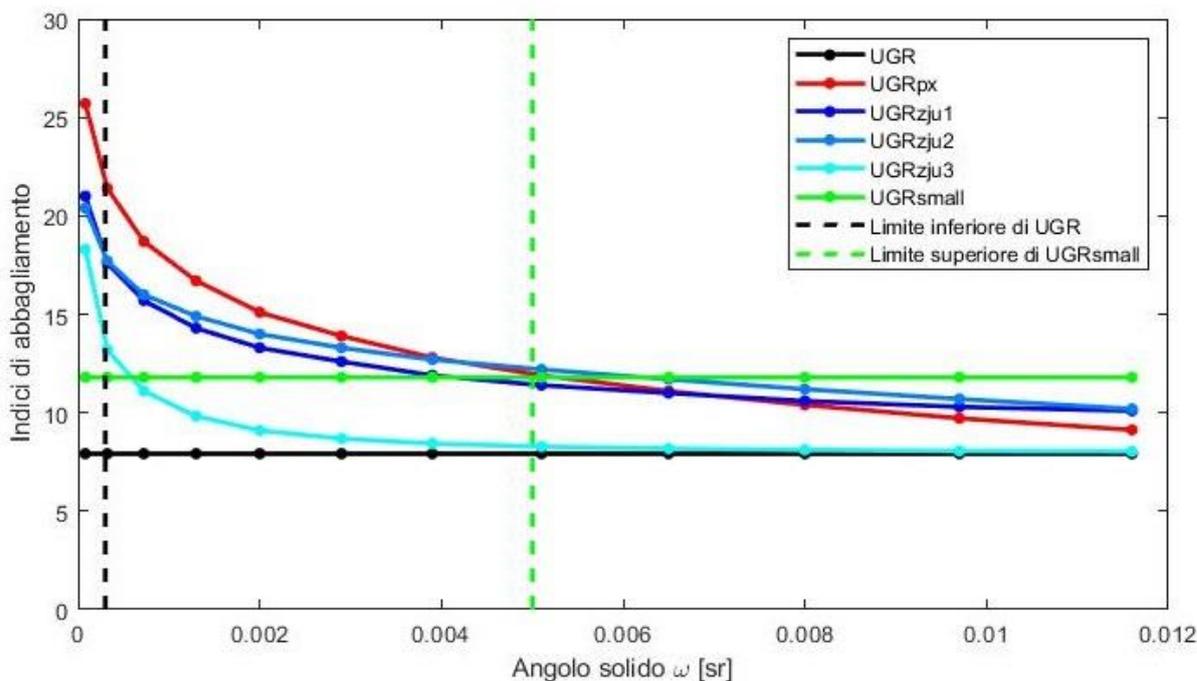


Figura 4.12 Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme di lato 50 cm

Per approfondire il caso è stato svolto un ulteriore test, con apparecchi di forma analoga ma di diverse dimensioni: sono stati usati apparecchi di 1 m di lato, con dischi luminosi di diametro compreso tra 1 e 16 cm. Le distanze relative tra osservatore e apparecchio sono le stesse del test visto in precedenza, come anche le luminanze dei dischi. Dato che la lunghezza del lato dell'apparecchio è stata raddoppiata, è stato raddoppiato anche il numero di suddivisioni della mappa di luminanza, da 50 a 100 suddivisioni.

I risultati ottenuti per tale test sono presentati in Tabella 4.6 e nel grafico in Figura 4.13. I livelli di abbagliamento sono ovviamente diversi ma l'andamento degli indici di abbagliamento è molto simile al caso precedente. La diversità più evidente sta nella differenza tra UGR_{px} e le due formule UGR_{zju1} e UGR_{zju2} : in questo caso infatti, la sovrastima data da UGR_{px} è di entità maggiore e inizia ad essere apprezzabile già per angoli inferiori a 0.015 sr, mentre nel caso precedente tale comportamento diventava evidente solo per gli angoli più piccoli, al di sotto di 0.003 sr.

Tabella 4.6 Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi di lato pari a 1 m con 10000 divisioni, a parità di dimensioni e di luminanza media

diametro dischi [cm]	angolo solido [sr]	UGR	UGRpx	UGRzju1	UGRzju2	UGRzju3	UGRsmall
1	8,0E-05	3,1	26,2	19,6	18,9	15,1	12,1
2	3,2E-04	3,1	21,6	16,2	15,9	11,0	12,1
3	7,2E-04	3,1	18,9	14,2	14,2	8,7	12,1
4	1,3E-03	3,1	16,9	12,8	12,9	7,07	12,1
5	2,0E-03	3,1	15,4	11,7	12,0	5,97	12,1
6	2,9E-03	3,1	14,2	10,9	11,3	5,20	12,1
7	3,9E-03	3,1	13,1	10,1	10,6	4,65	12,1
8	5,1E-03	3,1	12,2	9,5	10,1	4,27	12,1
9	6,5E-03	3,1	11,4	9,0	9,7	3,98	12,1
10	8,0E-03	3,1	10,6	8,5	9,2	3,78	12,1
11	9,7E-03	3,1	9,99	8,1	8,9	3,62	12,1
12	1,2E-02	3,1	9,4	7,8	8,5	3,52	12,1
13	1,4E-02	3,1	8,83	7,4	8,2	3,43	12,1
14	1,6E-02	3,1	8,32	7,1	7,9	3,37	12,1
15	1,8E-02	3,1	8,03	7,0	7,8	3,51	12,1
16	2,0E-02	3,1	7,41	6,6	7,4	3,30	12,1

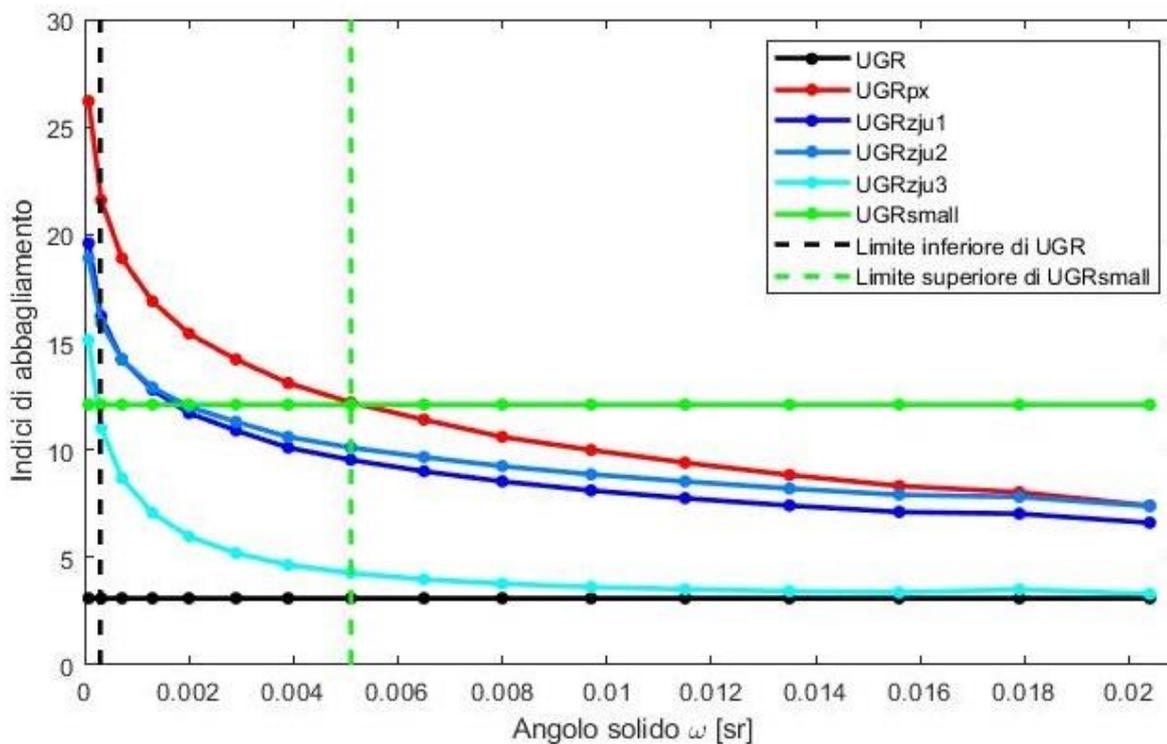


Figura 4.13 Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme

di lato 1 m

4.5.2 Confronto al variare delle dimensioni dell'apparecchio

Il presente test ha lo scopo di confrontare le prestazioni dei diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto per apparecchi luminosi dotati di luminanza non uniforme al variare delle distanze relative tra le parti luminose, per capire quando le sorgenti luminose si possano considerare indipendenti e quando invece si debbano considerare come parti di una stessa sorgente non uniforme. I metodi messi a confronto sono il metodo delle mappe di luminanza, la formula per le sorgenti di piccole dimensioni UGR_{small} e le formule UGR_{ZJU} , per apparecchi di forma simile a quella presentata in Figura 4.9 e nel test del §4.5.1, al variare delle dimensioni dell'apparecchio e della distanza tra i dischi luminosi ma mantenendo invariate le caratteristiche dei dischi luminosi, sia in termini di dimensioni, sia in termini di luminanza.

4.5.2.1 Metodo di calcolo

Il confronto è stato eseguito per apparecchi di forma quadrata e di lato variabile tra 10 e 120 cm, ad intervalli di 10 cm, dotati di 16 dischi luminosi di 2 cm di diametro, disposti come in Figura 4.9. La luminanza dei dischi è stata fissata a 20000 cd/m^2 : per semplicità di calcolo, si è scelto di predisporre a zero la luminanza delle parti dell'apparecchio non luminose: così facendo è stato possibile calcolare più agevolmente l'indice UGR_{small} , dato che esso dovrà tenere conto solo del contributo dato dai dischi luminosi. Le distanze relative tra osservatore e sorgente lungo le coordinate x, y, z , sono le stesse del test precedente:

$$x = 3.6 \text{ m}$$

$$y = 0$$

$$z = 1.3 \text{ m}$$

riferite al centro dell'apparecchio e scelte per replicare le coordinate del sistema utilizzato nello studio di Y. Yang *et al.* [14, 15]. La luminanza di sfondo è pari a 14.3 cd/m^2 .

I calcoli sono stati svolti utilizzando il calcolatore *MatLab* e il modello precedentemente creato per il test di §4.5.1, con l'unica differenza che, invece di far variare il diametro e la luminanza dei dischi, sono state variate di volta in volta la lunghezza del lato dell'apparecchio e le distanze relative tra i dischi. Per ogni prova è stato necessario creare un diverso modello dell'apparecchio e deve essere ripetuto il calcolo.

Anche per il presente test è stato scelto di raggruppare i pixel dell'immagine originale dell'apparecchio con il metodo *square*, ovvero di raccogliarli in quadrati di dimensioni fissate ottenendo di fatto un'immagine composta da un minor numero di pixel di dimensioni più grandi, le cui luminanze sono date dalla media delle luminanze dei punti al loro interno. Dato che le dimensioni dell'apparecchio variano ad ogni prova, anche il numero di pixel deve variare in modo analogo: si è scelto di usare un numero di suddivisioni tale da ottenere dei pixel quadrati di 1 cm di lato, che dovrebbero risultare sufficientemente piccoli e numerosi da tener conto adeguatamente della disuniformità dell'apparecchio. Quindi, ad esempio, per l'apparecchio di 10 cm sono state usate 10 suddivisioni per lato e sono stati ottenuti 100 pixel, per l'apparecchio di 20 cm sono state usate 20 suddivisioni per lato e sono stati ottenuti 400 pixel e così via.

Gli apparecchi utilizzati sono stati così definiti:

Lunghezza lato apparecchio [m]	Angolo solido [sr]	Numero di pixel
0.1	6.4E-04	100
0.2	2.6E-03	400
0.3	5.8E-03	900
0.4	1.0E-02	1600
0.5	1.6E-02	2500
0.6	2.3E-02	3600
0.7	3.1E-02	4900
0.8	4.1E-02	6400
0.9	5.2E-02	8100
1.0	6.4E-02	10000
1.1	7.8E-02	12100
1.2	9.2E-02	14400

dove l'angolo indica l'angolo solido sotteso da tutto l'apparecchio.

Dopo aver ottenuto la mappa di luminanza è stato possibile procedere con il calcolo degli indici di abbagliamento: l'UGR calcolato con il metodo delle mappe di luminanza considerando ogni pixel come se fosse una sorgente a sé stante, qui denominato UGR_{px} , l'UGR calcolato con la formula convenzionale, l' UGR_{small} applicato ai dischi luminosi e le tre formule del metodo UGR_{ZJU} . Per la creazione del modello dell'apparecchio e per il calcolo degli indici di abbagliamento sono stati usati gli stessi codici di calcolo *MatLab* riportati nel §4.5.1.1.

4.5.2.2 Risultati ottenuti

Ciò che ci si aspetta dal test è che il livello di abbagliamento per gli apparecchi più grandi presi in esame tenda a UGR_{small} , in quanto quando i dischi sono distanti tra loro, dovrebbe essere possibile considerarli come sorgenti autonome e il loro abbagliamento dovrebbe essere calcolabile sommando i contributi dati da ogni disco, con la formula UGR_{small} . Per gli apparecchi più piccoli invece ci si aspetta che la valutazione di abbagliamento sia più elevata, dato che per tali apparecchi le parti luminose sono collocate nella zona più centrale del campo visivo e quindi danno un contributo più importante. Inoltre, è ragionevole pensare che le formule pensate per la stima dell'abbagliamento da sorgenti non uniformi (UGR_{px} e UGR_{ZJU}) diano una stima sempre superiore ad UGR (calcolato con la formula convenzionale), dato che devono tener conto della disuniformità. Per di più, la differenza tra tali formule e UGR va crescendo all'aumentare della disuniformità e, di conseguenza, ci si aspetta che cresca anche all'aumentare delle dimensioni dell'apparecchio.

Le stime di abbagliamento ottenute sono presentate in Tabella 4.7 e nel grafico in Figura 4.14, nel quale sono tracciati gli andamenti dei diversi indici al variare dell'angolo solido sotteso dall'intero apparecchio. Come si può notare, UGR_{small} non presenta variazioni sostanziali al variare delle dimensioni dell'apparecchio, a riprova del fatto che il metodo UGR_{small} non è adatto a stabilire il livello di abbagliamento di sorgenti luminose di piccole dimensioni troppo vicine tra loro: ciò accade perché i dischi luminosi sono di dimensioni e luminanza fissate, quindi la loro intensità luminosa rimane fissa; la piccola variazione riscontrata è dovuta al cambiamento di posizione dei dischi all'interno del campo visivo, che influisce soltanto sull'indice di posizione di Guth, ma tra l'apparecchio più piccolo e quello più grande c'è uno scarto di sole 0.5 unità, il che è del tutto trascurabile perché corrisponde ad una variazione di abbagliamento impercettibile. Nel grafico in Figura 4.14 è stata disegnata una linea tratteggiata verticale: essa corrisponde alla distanza minima alla quale le aree equivalenti dei dischi

luminosi non si sovrappongono tra loro, secondo la teoria di UGR_{small} ; per distanze minori o, equivalentemente, per angoli solidi più piccoli non è teoricamente corretto applicare UGR_{small} perché di fatto si sta valutando l'abbagliamento di sorgenti equivalenti sovrapposte tra loro, mentre per distanze maggiori la correttezza dell'uso di UGR_{small} rimane da chiarire. UGR invece ha un andamento decrescente all'aumentare delle dimensioni dell'apparecchio, il che è dovuto unicamente al decrescere della luminanza media con l'aumentare delle dimensioni totali dell'apparecchio; anch'esso non è adatto alle applicazioni per sorgenti non uniformi ed è stato calcolato solo per essere usato come riferimento. Gli indici UGR_{ZJU} hanno un andamento decrescente secondo le aspettative, anche se UGR_{ZJU3} presenta una sostanziale differenza rispetto agli altri due: come nel test affrontato nel §4.4, UGR_{ZJU3} ha un andamento simile agli altri indici, ma assume valori più bassi su tutto l'intervallo studiato, come se tendesse a dare una sottostima dell'abbagliamento.

L'indice che presenta il comportamento più anomalo è UGR_{px} : essendo concepito proprio per valutare l'abbagliamento dovuto a sorgenti di luminanza non uniforme, dovrebbe avere un andamento perlomeno decrescente; al contrario esso assume su tutto l'intervallo preso in esame valori sostanzialmente invariati, tra 21.3 e 21.6.

Tabella 4.7 Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi di dimensioni variabili, con dischi di 2 cm di diametro e luminanza 20000 cd/m²

Lato apparecchio [m]	Angolo solido [sr]	UGR	UGR _{px}	UGR _{zju1}	UGR _{zju2}	UGR _{zju3}	UGR _{small}
0,1	6,42E-04	19,1	21,3	21,8	22,2	21,0	11,7
0,2	2,60E-03	14,3	21,3	19,7	20,3	16,6	11,7
0,3	5,80E-03	11,5	21,3	18,7	19,1	14,9	11,7
0,4	1,03E-02	9,47	21,3	18,1	18,3	13,9	11,7
0,5	1,61E-02	7,92	21,4	17,6	17,7	13,2	11,8
0,6	2,31E-02	6,65	21,5	17,3	17,2	12,7	11,8
0,7	3,15E-02	5,58	21,4	16,9	16,8	12,1	11,9
0,8	4,11E-02	4,65	21,5	16,6	16,4	11,7	11,9
0,9	5,20E-02	3,83	21,6	16,5	16,2	11,3	12,0
1,0	6,42E-02	3,10	21,4	16,2	15,8	10,9	12,1
1,1	7,77E-02	2,44	21,6	16,0	15,6	10,6	12,1
1,2	9,25E-02	1,83	21,6	15,9	15,3	10,3	12,2

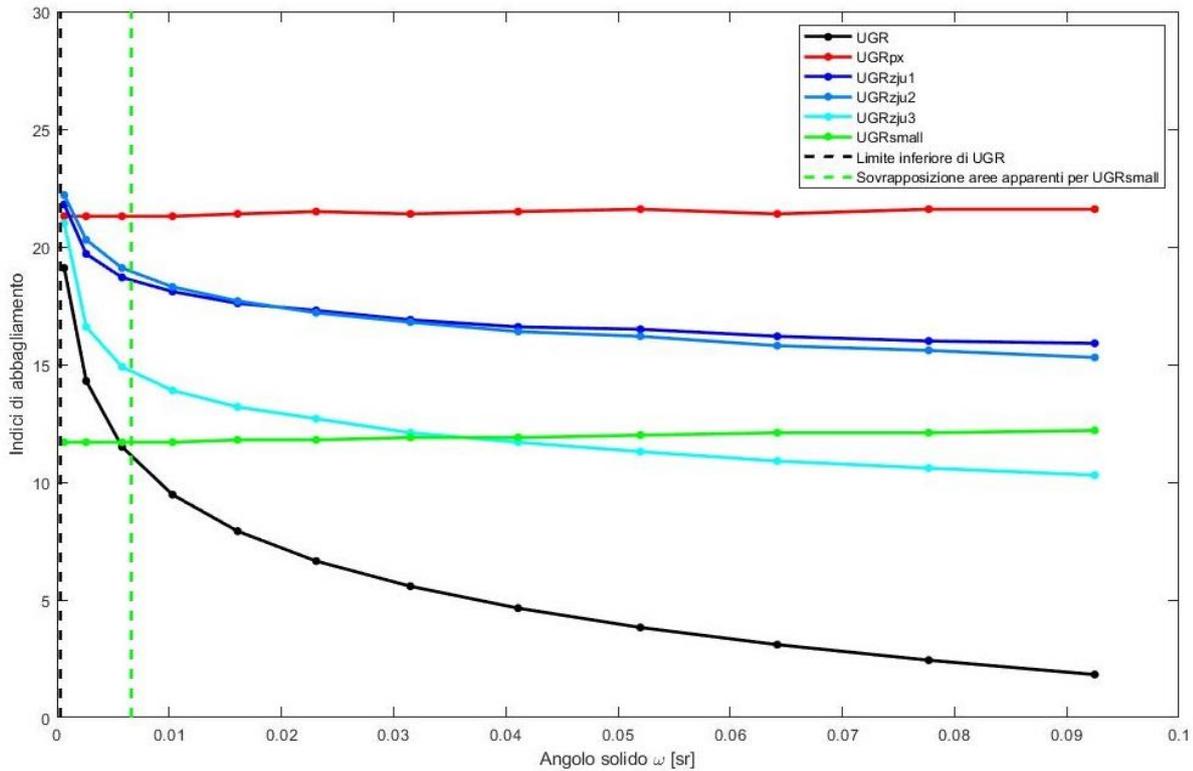


Figura 4.14 Indici di abbagliamento in funzione dell'angolo solido per apparecchi a luminanza non uniforme di lato variabile tra 10 e 120 cm

4.5.3 Confronto al variare dell'uniformità della luminanza

Nel presente test è stato affrontato il problema del confronto delle prestazioni dei diversi indici di valutazione dell'abbagliamento molesto impiegando apparecchi luminosi dotati di luminanza non uniforme ma con configurazione diversa da quella a dischi luminosi utilizzata nei test precedenti: è stata usata infatti una distribuzione di profilo sinusoidale analoga a quella mostrata in Figura 4.15. L'andamento della luminanza sulla superficie è messo in evidenza anche dal grafico in Figura 4.16, nel quale è stato tracciato il profilo della luminanza in funzione della larghezza dell'apparecchio, in corrispondenza delle creste della sinusoide. La forma sinusoidale è stata scelta per ottenere un profilo più "liscio", senza le discontinuità presentate dall'apparecchio con i dischi luminosi visto in precedenza. I metodi messi a confronto sono il metodo delle mappe di luminanza e il metodo UGR_{ZJU}, al variare della sola uniformità della distribuzione della luminanza. Per fare un confronto è stato deciso di calcolare anche UGR con il metodo convenzionale. Con una distribuzione così definita, non è possibile calcolare UGR_{small}, dato che non è possibile individuare i bordi delle parti luminose.

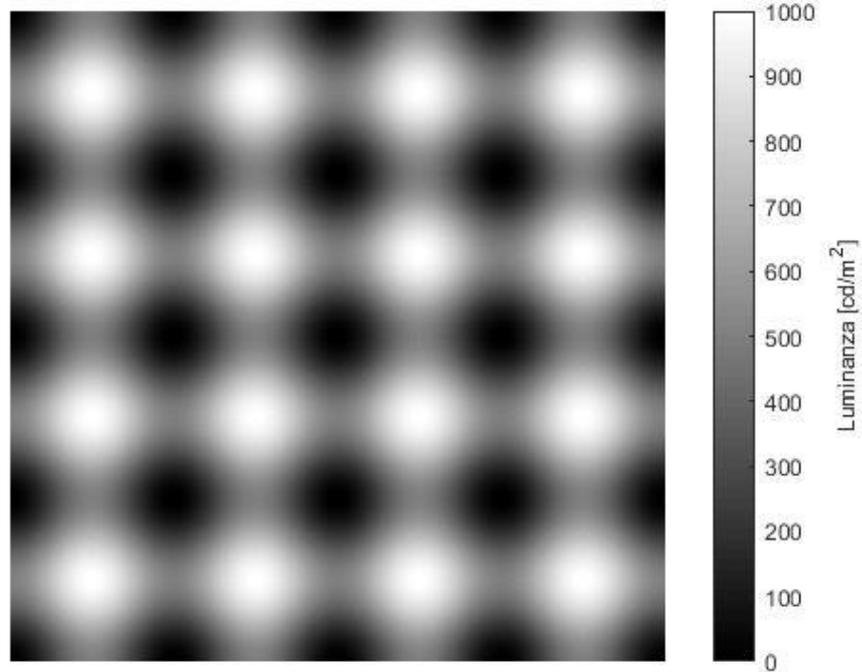


Figura 4.15 Esempio di apparecchio a luminanza non uniforme di forma quadrata e dotato di distribuzione sinusoidale

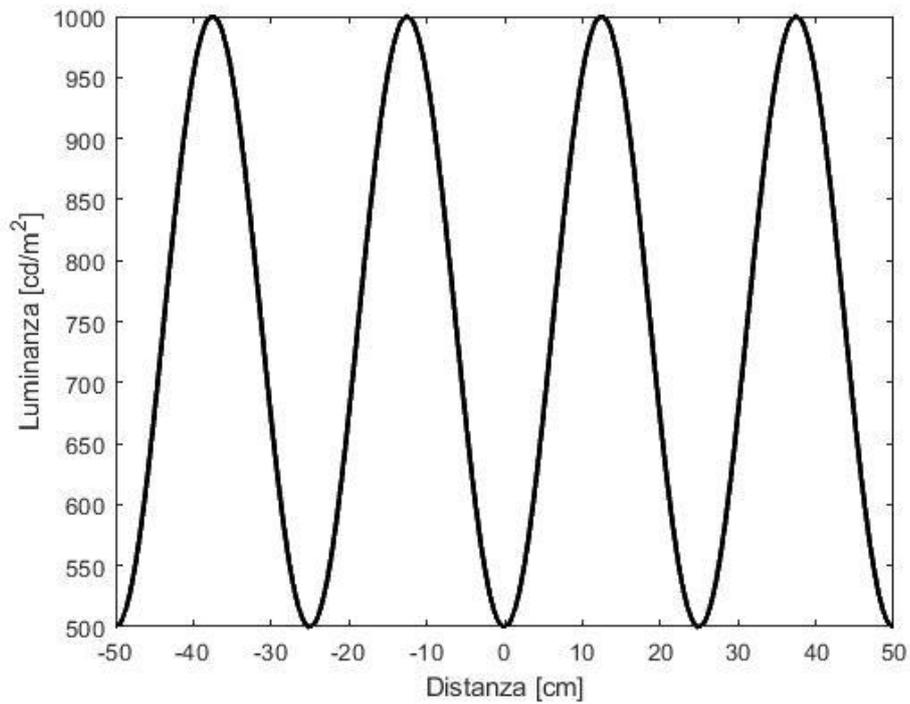


Figura 4.16 Profilo di luminanza dell'apparecchio non uniforme

dotato di distribuzione sinusoidale; i picchi corrispondono alle creste della sinusoide

4.5.3.1 Metodo di calcolo

Il test è stato eseguito mantenendo invariate le dimensioni dell'apparecchio luminoso e la geometria del sistema osservatore-sorgente. Gli apparecchi usati sono di 1 m di lato. La luminanza media dell'apparecchio è stata fissata a 500 cd/m^2 ma la distribuzione di luminanza è stata variata di volta in volta sovrapponendo a tale valore una sinusoide di ampiezza diversa, per passare da una distribuzione completamente uniforme a una distribuzione sinusoidale: l'ampiezza della sinusoide, ovvero la differenza tra luminanza massima e luminanza minima, varia da 0 a 1000 cd/m^2 , a intervalli di 100 cd/m^2 . Quindi, ad esempio, l'apparecchio con ampiezza pari a 0 presenterà una luminanza uniforme, quello con ampiezza pari a 100 cd/m^2 avrà una luminanza che varia tra 450 e 550 cd/m^2 , e così via fino all'apparecchio con sinusoide di ampiezza pari a 1000 cd/m^2 , il quale avrà una luminanza che varia tra 0 e 1000 cd/m^2 . Si è scelto di mantenere la luminanza media costante per ottenere un UGR costante, da usare come livello di riferimento. Le coordinate relative tra osservatore e sorgente luminosa rispetto agli assi x,y,z sono, come nei test precedenti:

$$x = 3 \text{ m}$$

$$y = 0$$

$$z = 1.4 \text{ m}$$

riferite al centro dell'apparecchio. La luminanza di sfondo L_b è pari a 14.3 cd/m^2 .

I calcoli sono stati svolti utilizzando un codice *MatLab*. Non avendo a disposizione una mappa di luminanza di un apparecchio con la distribuzione di luminanza scelta, per prima cosa è stato necessario creare un modello dell'apparecchio in modo analogo a quanto fatto nel §4.5.1: dopo aver stabilito le sue dimensioni, la luminanza media e l'ampiezza della sinusoide da sovrapporvi, è stata creata una matrice che rappresenta l'immagine della superficie dell'apparecchio, denominata *Lmap*. Di seguito è riportato il codice *MatLab* usato per la realizzazione del modello. L'ultima parte del codice serve a realizzare delle immagini che diano una rappresentazione dell'apparecchio, analoghe a quelle nelle Figure 4.14-4.15.

```
d = 2000;

lato = 1; %lato dell'apparecchio
dist = lato/4; %lunghezza della sinusoide
ampiezza =1000; %ampiezza
val_med = 500; %valore medio (luminanza media dell'apparecchio)

Lmap = zeros(d);
T = 2*pi*4/d; %periodo della sinusoide
for i = 1:d
    for j = 1:d
        Lmap(i,j) = val_med - ampiezza/4*(cos(T*i) + cos(T*j));
    end
end

%grafici
```

```

imagesc(Lmap)
colormap(gray);
caxis([0, val_med + 0.5*ampiezza]);
c = colorbar;
c.Label.String = 'Luminanza [cd/m^2]';
c.Label.FontSize = 10;
axis square
axis off
figure
plot((-d/2:d/2 - 1)/d*lato*10^2, Lmap(d/8, :), 'k', 'LineWidth', 2)
xlabel('Distanza [cm]')
ylabel('Luminanza [cd/m^2]')

```

Dopo aver creato il modello dell'apparecchio è stata generata la mappa di luminanza, denominata *Lmap2* con lo stesso metodo e lo stesso codice *MatLab* riportato nel §4.5.1.1: un esempio di mappa di luminanza, calcolato per l'apparecchio con luminanza che varia tra 0 e 1000 cd/m² è mostrato in Figura 4.17. Per apparecchi di 1 m di lato si è scelto di usare 100 suddivisioni per lato; così facendo si ottengono 1000 pixel quadrati di 1 cm di lato. Dopo aver ottenuto la mappa di luminanza, è stato possibile calcolare gli indici di abbagliamento UGR, UGR_{px} e i tre indici UGR_{ZJU}.

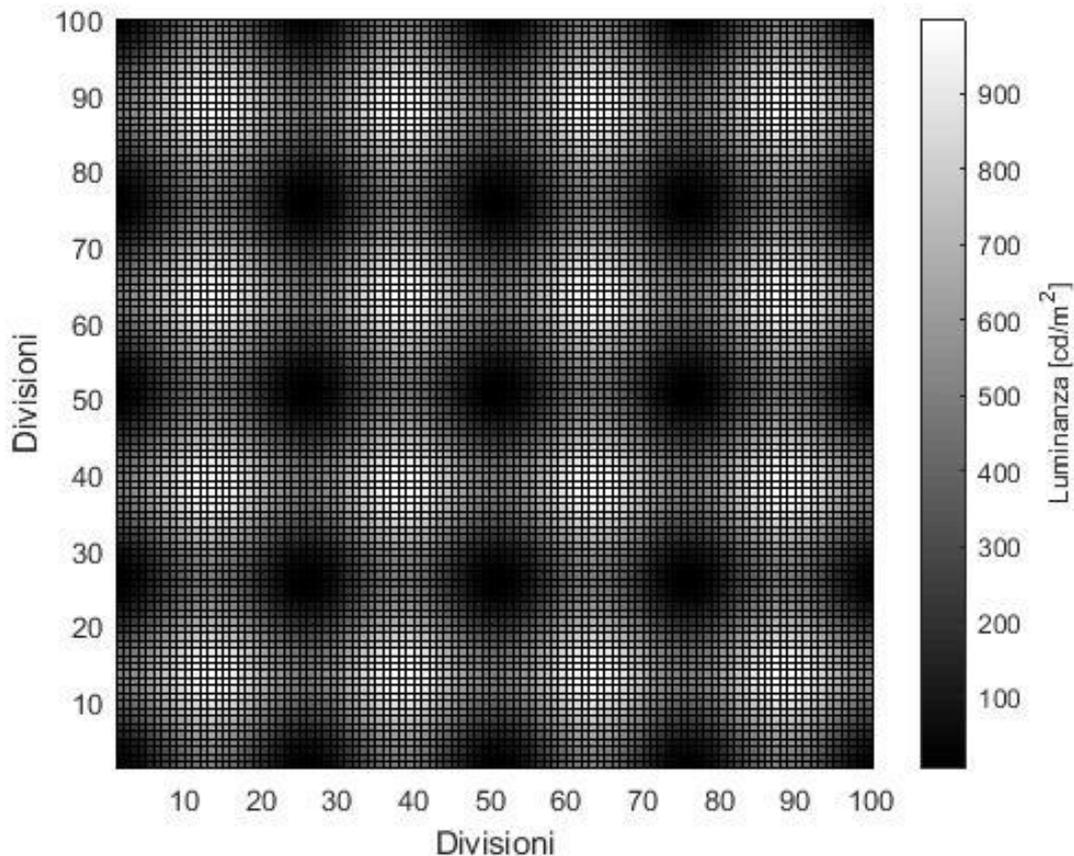


Figura 4.17 Mappa di luminanza di un apparecchio usato per il test con distribuzione sinusoidale

4.5.3.2 Risultati ottenuti

Dalle formule per la valutazione dell'abbagliamento molesto prese in esame nel presente test ci si aspetta che diano una stima di abbagliamento che cresce all'aumentare della disuniformità o, equivalentemente, della differenza tra luminanza massima e minima.

Le stime di abbagliamento ottenute sono presentate in Tabella 4.8. Il valore di riferimento dato da UGR è pari a 14.2. Come si può notare, nessuno degli indici calcolati non si discosta di molto dal valore di riferimento, come a indicare che la disuniformità di luminanza presa in esame nel test non è abbastanza elevata da avere conseguenze rilevanti sulla percezione dell'abbagliamento. L'indice che dà la stima più elevata è UGR_{ZJU1} che, nel caso con disuniformità maggiore, assegna un valore pari a 16.9, con una differenza rispetto a UGR di 2.7 unità, la quale, secondo la definizione della scala UGR, è una differenza di poco più piccola della minima differenza percepibile. UGR_{ZJU3} non dà mai una stima diversa rispetto a UGR: tale comportamento può essere dovuto al fatto che UGR_{ZJU3} valuta il contrasto presente sulla superficie della sorgente luminosa tenendo conto solo delle differenze di luminanza tra pixel adiacenti e in questo caso tali differenze non sono abbastanza elevate da dare un contributo apprezzabile, dato che la distribuzione di luminanza è particolarmente "liscia" e non presenta discontinuità. Nel primo caso, in cui viene impiegato l'apparecchio uniforme, tutti gli indici danno una stima pari a UGR, fatta eccezione per UGR_{px} che dà una stima leggermente diversa: come già visto in precedenza nel §4.4, ciò può essere attribuito al fatto che il metodo delle mappe di luminanza applicato a sorgenti uniformi è affetto da una piccola differenza nella stima dell'abbagliamento, riconducibile alla differenza che si ha nella determinazione dell'indice di Guth P da pixel a pixel. Tuttavia, tale differenza, pari a 0.4 unità, è talmente ridotta da poter essere indubbiamente considerata trascurabile. Nel grafico in Figura 4.18 sono stati tracciati gli andamenti degli indici di abbagliamento in funzione della differenza tra la luminanza massima e la luminanza minima.

Tabella 4.8 Risultati ottenuti per il test sugli apparecchi non uniformi
Di forma quadrata di 1 m di lato e con distribuzione di luminanza sinusoidale

Lmax-Lmin [cd/m ²]	Lmin [cd/m ²]	Lmax [cd/m ²]	UGR	UGR _{px}	UGR _{ZJU1}	UGR _{ZJU2}	UGR _{ZJU3}
0	500	500	14,2	14,6	14,2	14,2	14,2
100	450	550	14,2	14,7	14,7	14,5	14,2
200	400	600	14,2	14,7	15,0	14,7	14,2
300	350	650	14,2	14,7	15,4	14,9	14,2
400	300	700	14,2	14,8	15,6	15,1	14,2
500	250	750	14,2	14,9	15,9	15,3	14,2
600	200	800	14,2	14,9	16,1	15,5	14,2
700	150	850	14,2	15,0	16,3	15,7	14,2
800	100	900	14,2	15,2	16,5	15,9	14,2
900	50	950	14,2	15,3	16,7	16,0	14,2
1000	0	1000	14,2	15,4	16,9	16,2	14,2

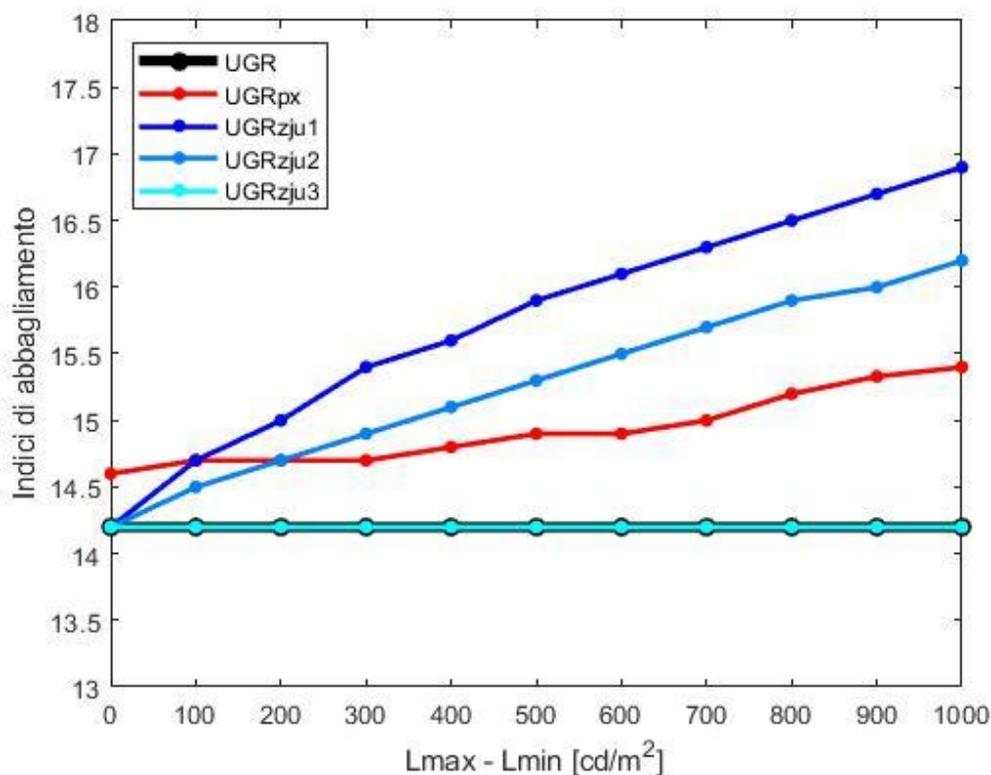


Figura 4.18 Indici di abbagliamento in funzione della disuniformità della luminanza per apparecchi con distribuzione sinusoidale

4.6 Esiti finali

Dai test svolti sono emerse diverse informazioni interessanti circa i diversi metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto esistenti. Per quanto riguarda l'abbagliamento dovuto alle sorgenti di piccole dimensioni, i risultati confermano che UGR assegna un valore troppo elevato di abbagliamento, il quale aumenta al diminuire delle dimensioni delle sorgenti, mentre UGR_{small} fornisce una stima più ridotta e non dipendente dal variare delle dimensioni reali dell'apparecchio. Le stime fornite da tali metodi tracciate in funzione dell'angolo solido si incrociano in corrispondenza del limite minimo di applicazione di UGR_{small} , per definizione pari ad un'area dell'apparecchio di 50 cm^2 . Ciò suggerisce che sia questo il punto di transizione tra un metodo e l'altro. Al contrario, la norma CIE 117-1995 [5] stabilisce un limite per il campo di applicazione di UGR pari a 0.0003 sr che, essendo definito in termini di angolo solido e non in termini di area, in generale non corrisponde al limite di 50 cm^2 di UGR_{small} e da ciò sorge un dubbio su quale sia il punto di transizione tra un metodo e l'altro. Tuttavia, dato che i due metodi si equivalgono in corrispondenza di un'area di 50 cm^2 si ritiene che il punto di transizione da considerare sia il limite di UGR_{small} : se così non fosse, ovvero se si considerasse valido come punto di passaggio l'angolo solido di 0.0003 sr , si avrebbe una discontinuità nella valutazione dell'abbagliamento nel passaggio da una formula all'altra ci sarebbero casi in cui sorgenti di

dimensioni piccole sono valutate come meno abbaglianti di sorgenti di dimensioni normali, il che è assurdo (vedi grafico in Figura 4.1).

Per le sorgenti luminose di dimensioni estese, UGR assegna un valore troppo ridotto all'abbagliamento, quindi si ricorre a GGR il quale dà una stima inferiore ma comunque dipendente dalle dimensioni dell'apparecchio. Oltre ai parametri legati alle caratteristiche della sorgente luminosa e alla posizione relativa tra osservatore e sorgente che rientrano nel calcolo di UGR, GGR tiene conto di aspetti quali l'illuminamento diretto E_d e l'area del soffitto, inclusa nel *ceiling coverage* CC . UGR e GGR sono coerenti per $CC = 0.152$, valore per il quale il termine correttivo di GGR si annulla. Ciò suggerisce che sia questo il punto di transizione tra un metodo e l'altro. Anche in questo caso la norma CIE stabilisce un limite diverso per il campo di applicazione di UGR in termini di angolo solido, pari a 0.1 sr, che in generale è diverso dal limite su CC . Tuttavia, si ritiene sia più corretto tenere in considerazione il limite su CC , perché è in corrispondenza di esso che UGR e GGR si equivalgono. Se si considerasse il limite di 0.1 sr, nel passaggio da un metodo all'altro si avrebbe una discontinuità (vedi grafico in Figura 4.4). La particolarità di GGR è che il suo limite di applicazione dipende non solo dall'area della sorgente luminosa ma anche dall'area del soffitto su cui è montata: quindi, più grande è il locale, più aumenta l'angolo solido al quale si ha la transizione da UGR a GGR, più grande potrà essere la sorgente luminosa senza oltrepassare il limite di transizione.

Per limitare l'abbagliamento dovuto a soffitti completamente luminosi la CIE propone delle raccomandazioni sui livelli massimi di illuminamento medio. Dai risultati ottenuti tuttavia, emerge che GGR non è coerente con tali raccomandazioni: per i locali più grandi la previsione di abbagliamento data da GGR può superare di molto i livelli di abbagliamento associati ai limiti di illuminamento. Ad ogni modo, secondo la CIE le limitazioni sull'illuminamento sono delle indicazioni semplici ma approssimate ed è sempre consigliabile usare la formula GGR, qualora possibile [11].

Per quanto riguarda le sorgenti luminose non uniformi il problema è più complesso, dato che gli apparecchi possono essere disuniformi in molti modi diversi: ad esempio possono presentare alternanza di parti luminose e non luminose oppure la loro luminanza può variare in modo più graduale, i punti luminosi possono essere a vista o possono essere nascosti da pannelli diffondenti o griglie. Il metodo UGR non sembra essere del tutto inadatto a valutarne il livello di abbagliamento, purché la disuniformità non sia troppo elevata o troppo brusca: dal test eseguito al variare dell'uniformità della luminanza si può notare che UGR non dà stime così diverse da altri metodi specificamente creati per le sorgenti non uniformi; d'altronde UGR è sempre stato usato per valutare l'abbagliamento da sorgenti convenzionali, anche di plafoniere dotate di griglie ad esempio, senza presentare particolari criticità. Negli altri test invece, dove la disuniformità è maggiore a causa della variazione brusca di luminanza tra dischi e zone non luminose, UGR dà stime molto diverse rispetto agli altri metodi e quindi non è da considerare attendibile.

I metodi candidati ad essere più adatti all'applicazione con sorgenti disuniformi sono il metodo delle mappe di luminanza UGR_{px} e le formule UGR_{ZJU} : essi sono stati ideati proprio come metodi validi per la stima dell'abbagliamento dovuto a sorgenti non uniformi, quindi dovrebbero perlomeno essere tra loro equivalenti tuttavia, dai risultati ottenuti, emerge che le loro stime non coincidono. Inoltre, nel confronto fatto al variare delle dimensioni dell'apparecchio con dischi luminosi di diametro costante (§4.5.2), essi hanno addirittura comportamenti diversi: UGR_{px} stima che l'abbagliamento rimane invariato, mentre le formule UGR_{ZJU} forniscono un andamento decrescente all'aumentare delle dimensioni. Per di più, in

tutti i test c'è anche una differenza sostanziale tra la valutazione ottenuta tramite UGR_{ZJU3} e le altre due formule UGR_{ZJU} . Tali incongruenze sono riconducibili al modo in cui i diversi metodi tengono conto della disuniformità della luminanza: come già detto in precedenza, gli apparecchi possono essere disuniformi in molti modi diversi e la disuniformità può essere determinata, ad esempio, da un'elevata differenza tra luminanza massima e minima, da variazioni di luminanza più o meno brusche o da variazioni più o meno ripetute; tuttavia nessuno dei metodi qui analizzati tiene conto di tutti questi aspetti. UGR_{px} , basandosi sulla suddivisione dell'apparecchio, analizza i pixel come se fossero indipendenti tra loro e così facendo tiene conto solo del livello di luminanza dei pixel ma non del contrasto di luminanza che i pixel hanno rispetto ai pixel adiacenti. Quindi, di fatto, UGR_{px} valuta il contributo dei pixel all'abbagliamento tenendo conto solo della loro luminanza e della luminanza di sfondo e non considera che tale pixel è circondato da altri pixel, che possono essere più o meno luminosi. Per quanto riguarda il comportamento di UGR_{ZJU} vanno esaminati i tre diversi modi di valutare il contrasto, perché esso è il parametro usato come indicatore dell'uniformità.

Contrast1 si basa sulla differenza tra luminanza massima e minima, normalizzate con la luminanza media. La normalizzazione viene fatta per garantire che sorgenti luminose aventi la stessa distribuzione di luminanza ma diversi livelli di luminanza diano origine allo stesso contrasto: ciò viene fatto anche per *Contrast2* e *Contrast3*. Anche se per ottenere dei valori di luminanza più consistenti le luminanze massima e minima non sono semplicemente gli estremi superiore e inferiore dell'intervallo di luminanza, ma sono calcolate facendo la media delle luminanze dei pixel relativi al 5% delle luminanze più alte (per la luminanza massima) e più basse (per la minima), *Contrast1* non tiene conto per nulla della distribuzione delle luminanze sulla superficie della sorgente ma solo dell'intervallo entro il quale tali luminanze sono comprese. Quindi *Contrast1* non sembra essere un parametro esaustivo per la valutazione della disuniformità di un apparecchio luminoso.

Contrast2 è pari al rapporto tra lo scarto quadratico medio della luminanza sulla superficie e la luminanza media. L'impiego dello scarto quadratico medio introduce un miglioramento rispetto a *Contrast1*, perché sfrutta le informazioni sulla luminanza di tutti i pixel. Tale metodologia permette di dare minor peso ai pixel con luminanza simile alla media e maggior peso ai pixel con luminanza diversa dalla media, indipendentemente dal fatto che la differenza sia positiva o negativa, quindi riduce il contributo al contrasto delle zone di luminanza uguale o simile alla luminanza media e allo stesso tempo accentua il contributo delle zone di luminanza molto diversa. Tuttavia, neanche *Contrast2* tiene conto della posizione delle luminanze sulla superficie della sorgente.

Contrast3 è calcolato facendo prima la somma degli scarti quadratici tra la luminanza del pixel i,j -esimo e le luminanze dei pixel ad esso adiacenti, poi sommando i contributi di tutti i pixel e dividendo per numero di somme incluse nel calcolo e per la luminanza media, quindi è una sorta di media tra gli scarti quadratici calcolati localmente rispetto alla luminanza del pixel i,j -esimo e normalizzati con la luminanza media. Così facendo si ottiene un contrasto che tiene conto della distribuzione delle luminanze sulla superficie ma, probabilmente, considera di volta in volta delle porzioni di superficie troppo piccole: ad esempio nel test eseguito al variare dell'uniformità della luminanza (§4.5.3), nel quale la disuniformità è meno accentuata rispetto ai test precedenti, *Contrast3* è sempre pari a zero, come se non esistesse alcuna disuniformità. Ciò avviene perché in tale test la variazione di luminanza tra due pixel adiacenti è sempre molto piccola e non dà un contributo apprezzabile. Quindi, in sostanza *Contrast3* tiene conto della

posizione relativa delle luminanze, ma solo tra pixel adiacenti tra loro e ciò potrebbe essere la causa della sottostima dell'abbagliamento riscontrata in UGR_{ZJU3} .

Plausibilmente, se le sorgenti luminose o le parti luminose all'interno di una sorgente sono più piccole di 50 cm^2 e sono isolate, ossia sono distanti tra loro più di 8 cm, per esse vale il modello UGR_{small} e al loro interno la distribuzione di luminanza non è rilevante ai fini del calcolo dell'abbagliamento. Quindi è ragionevole supporre che anche per la valutazione del contrasto le variazioni di luminanza tra pixel adiacenti non siano rilevanti e che si debba tener conto solo delle variazioni tra zone più ampie di 50 cm^2 . Una possibile soluzione potrebbe essere elaborare un nuovo modello, costruito a partire dal modello UGR_{zju} ma che si basi su una valutazione del contrasto calcolata su zone più ampie.

Per quanto riguarda il comportamento anomalo di UGR_{ZJU3} , in particolare il fatto che esso dia stime inferiori alle altre formule UGR_{ZJU} in tutti i test eseguiti, ciò ha un riscontro anche nello studio di Y. Yang *et al.* [15] nel quale esso dà sistematicamente stime di abbagliamento minori, a parità di abbagliamento percepito dai soggetti coinvolti nei test. Inoltre, dal test eseguito al variare dell'uniformità della luminanza nel §4.5.3 con apparecchi dotati di luminanza dal profilo sinusoidale è possibile notare che UGR_{ZJU3} non ha dimostrato di tenere in considerazione la disuniformità e ha dato stime sempre pari a UGR, quindi le sottostime riscontrate potrebbero essere riconducibili ad una scarsa sensibilità alla disuniformità di UGR_{ZJU3} . Ciò tuttavia non è una prova dell'inadeguatezza di tale modello.

Conclusioni

Il lavoro svolto durante l'attività di tesi ha permesso di ottenere indicazioni interessanti circa i campi di applicazione dei vari metodi di valutazione dell'abbagliamento molesto. Nei test eseguiti tali metodi sono stati implementati al variare di parametri quali le dimensioni delle sorgenti luminose e la disuniformità della luminanza. Per quanto riguarda il metodo UGR per la stima dell'abbagliamento causato da sorgenti "normali", risulta che i suoi limiti di applicazione minimo e massimo, ovvero i punti di transizione con i metodi UGR_{small} e GGR, andrebbero ridefiniti: il punto di passaggio di UGR_{small} andrebbe definito in termini di area apparente della sorgente luminosa e dovrebbe essere pari a 50 cm^2 , in quanto è in corrispondenza di tale area che ha luogo l'incrocio tra le due formule UGR e UGR_{small} . Diversamente, si avrebbe una discontinuità nella valutazione dell'abbagliamento nel passaggio da un metodo all'altro. Un ragionamento analogo vale per il punto di passaggio da UGR a GGR, il quale andrebbe ridefinito in termini di rapporto tra l'area dell'apparecchio e l'area del soffitto su cui è montato, ovvero in termini di *ceiling coverage* e dovrebbe essere pari a $CC = 0.152$.

Dai risultati ottenuti per il metodo delle mappe di luminanza UGR_{px} risulta che, l'uso della formula UGR "classica" porta ad ottenere una stima stabile ovvero indipendente dal numero di suddivisioni; al contrario la formula UGR_{small} , nonostante le suddivisioni possano risultare di piccole dimensioni, porta a una stima errata del livello di abbagliamento, oltre che instabile. Ad ogni modo, rimane un dubbio su quale sia il metodo più appropriato per calcolare l'abbagliamento molesto causato da sorgenti con superficie non uniforme, dato che in tutti i test si è verificata una discordanza tra le diverse formule. Dal confronto eseguito al variare delle dimensioni dell'apparecchio mantenendo fissati il diametro e la luminanza dei dischi luminosi nel §4.5.2, sembra che il metodo delle mappe di luminanza UGR_{px} non sia adatto a tale scopo, in quanto presenta un andamento pressoché costante in una situazione in cui gli altri metodi mostrano un andamento decrescente e in cui ragionevolmente l'abbagliamento dovrebbe calare. Per quanto riguarda invece le tre formule UGR_{ZJU} , le prime due danno esiti equivalenti entro i limiti della percezione, mentre UGR_{ZJU3} dà stime inferiori in tutti i test. Inoltre, dal confronto eseguito al variare dell'uniformità di luminanza nel §4.5.3, risulta che UGR_{ZJU3} non ha dato alcun peso alla disuniformità e ciò fa dubitare sulla sua capacità di stimare l'abbagliamento, almeno nei casi in cui le variazioni di luminanza non sono particolarmente repentine, sebbene non sia una prova della sua insufficienza.

In conclusione, non è qui possibile dire quale metodo dia stime esatte dell'abbagliamento molesto per sorgenti non uniformi, dato che per stabilirlo si dovrebbero eseguire dei test che coinvolgano degli osservatori reali, in modo da eseguire una sorta di studio comparativo tra tutti i diversi metodi mettendo in relazione il livello di abbagliamento predetto dalle formule e il livello di abbagliamento ricavato dalle osservazioni, a parità di sorgente luminosa, di condizioni geometriche e con gli stessi osservatori coinvolti. Tuttavia, è possibile stabilire che qualora la disuniformità sia contenuta ovvero qualora la variazione di luminanza non sia né troppo ampia né troppo brusca, i metodi validi per sorgenti convenzionale danno risultati sufficientemente esaustivi.

Bibliografia

- [1] G. Moncada Lo Giudice, A. de Lieto Vollaro (2007). *Illuminotecnica* (III ed.). Casa Editrice Ambrosiana, Milano (Italia), pp. 108-110.
- [2] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (1987). *International Lighting Vocabulary*.
- [3] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (1983). *Discomfort Glare in the Interior Working Environment*. Pubblicazione No 55-1983.
- [4] A. Wolska, D. Sawicki (2014). Evaluation of discomfort glare in the 50+ elderly: experimental study. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health.*, 27(3), 444-459.
- [5] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (1995). *Discomfort Glare in Interior Lighting*. Pubblicazione No 117-1995.
- [6] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (1975). *Guide on Interior Lighting*. Pubblicazione No 29-1975.
- [7] Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI). (2005). *Valutazione dell'abbagliamento molesto con il metodo UGR*. Pubblicazione No 11165.
- [8] H.D. Einhorn (1998). Unified glare rating (UGR): Merits and applications to multiple sources. *Lighting Res. Technol.*, 30(2), 89-93.
- [9] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (2002). *CIE equations for disability glare*. Pubblicazione No 146-2002.
- [10] B. M. Paul, H. D. Einhorn (1999). Discomfort glare from small light sources. *Lighting Res. Technol.*, 31(4), 139-144.
- [11] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). (2002). *Glare from small, large and complex sources*. Pubblicazione No 147-2002.
- [12] J. Y. Suk, M. Schiler, K. Kensek (2017). Investigation of existing discomfort glare indices using human subject study data. *Build. Environ.*, 113, 121-130.
- [13] G. H. Scheir, P. Hanselaer, P. Bracke, G. Deconinck, W. R. Ryckaert (2015). Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. *Build. Environ.*, 84, 60-67.
- [14] Y. Yang, M. R. Luo, S. N. Ma, X. Y. Liu (2017). Assessing glare. Part 1: Comparing uniform and non-uniform LED luminaires. *Lighting Res. Technol.*, 49(2), 195-210.
- [15] Y. Yang, M. R. Luo, S. N. Ma (2017). Assessing glare. Part 2: Modifying Unified Glare Rating for uniform and non-uniform LED luminaires. *Lighting Res. Technol.*, 49(6), 727-742.

Bibliografia

- [16] T. Tashiro, S. Kawanobe, T. Kimura-Minoda, S. Kohko, T. Ishigawa, M. Ayama (2015). Discomfort glare for white LED light sources with different spatial arrangements. *Lighting Res. Technol.*, 47, 316-337.