

INTENSITA' LUMINOSA DI UNA SUPERFICIE STRADALE PER UNITA' DI FLUSSO LUMINOSO INSTALLATO, AGLI ANGOLI GAMMA PER CUI RISULTA PIU' INQUINANTE.

Pierantonio Cinzano

ISTIL- Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso,
Via Roma 13, I-36016 Thiene, Italy
email:cinzano@inquinamentoluminoso.it

RIASSUNTO: Per limitare la luminosità artificiale del cielo in un territorio e minimizzare efficacemente la quantità di luce artificiale diffusa nell'atmosfera è necessario porre limiti all'intensità dell'emissione degli apparecchi sopra i 90 gradi in modo da renderla trascurabile rispetto quella delle superfici, in particolare a piccoli angoli sopra l'orizzonte. Per renderci conto dell'impatto e del significato dei limiti introdotti da alcuni testi di legge all'intensità totale della luce emessa dagli apparecchi di un impianto a 90 gradi ed oltre per unità di flusso emesso dall'impianto o per unità di flusso installato, abbiamo fatto alcune semplici valutazioni dell'ordine di grandezza dell'intensità della luce per unità di flusso installato emessa da una superficie stradale a piccoli angoli sopra l'orizzonte ($\gamma = 90^\circ$ - 120°).

1. Introduzione

Fino alla fine del secolo scorso si riteneva che per un adeguata limitazione dell'inquinamento luminoso fosse sufficiente limitare il cosiddetto rapporto di flusso superiore, cioè il rapporto tra il flusso luminoso inviato verso l'alto dagli apparecchi di un impianto ed il flusso totale emesso dall'impianto stesso. Questo veniva fatto nell'intento di limitare il rapporto tra il flusso luminoso emesso verso l'alto dagli apparecchi e il flusso riflesso verso l'alto dalle superfici illuminate, considerato quest'ultimo un inquinamento luminoso inevitabile quando le stesse non siano illuminate più del necessario o inutilmente.

E' stato però messo in evidenza (si veda ad es. Cinzano, Diaz Castro 2000) che l'effetto dell'inquinamento luminoso sul cielo notturno dipende dalla direzione di emissione della luce. In particolare la luminosità artificiale del cielo in prossimità dello zenith nel territorio è dovuta in gran parte alla somma degli effetti della luce emessa a piccoli angoli sopra l'orizzonte dalle sorgenti situate in una grande area circostante. A partire da qualche

chilometro di distanza dalle sorgenti (e l'inquinamento luminoso come è noto si propaga per centinaia di chilometri) l'effetto della luce emessa a piccoli angoli è preminente per elementari ragioni geometriche. A 20 km di distanza circa il 95% della luminanza del cielo allo zenith risulta prodotta a luce emessa tra $\gamma = 90^\circ$ e $\gamma = 135^\circ$, e più di metà di questa risulta prodotta da luce emessa sotto $\gamma = 110^\circ$ (γ è definito come l'angolo tra la direzione della luce e la verticale verso il basso, cosicché l'orizzonte è a $\gamma = 90^\circ$).

Il flusso totale emesso verso l'alto è un concetto integrale: esso è la somma dei flussi infinitesimi emessi nelle varie direzioni. Esso quindi non ci dà alcuna informazione sul rapporto tra l'intensità della luce emessa dagli apparecchi e di quella emessa dalle superfici in una data direzione. Ad esempio, un apparecchio con un rapporto superiore dell'1% potrebbe emettere tutto questo flusso a piccoli angoli, dove è molto efficace a produrre l'effetto inquinante e dove l'emissione delle superfici stradali, che hanno caratteristiche quasi-lambertiane, è molto

piccola. Se ne conclude che per limitare la luminosità artificiale del cielo in un territorio e minimizzare efficacemente la quantità di luce artificiale diffusa nell'atmosfera è necessario porre limiti all'intensità dell'emissione degli apparecchi sopra $\gamma=90$ gradi in modo da renderla trascurabile rispetto quella delle superfici, soprattutto a piccoli angoli sopra l'orizzonte.

Recentemente sono stati introdotte alcuni testi di legge che pongono vari limiti all'intensità totale della luce emessa dagli apparecchi di un impianto a 90 gradi ed oltre per unità di flusso emesso dall'impianto o dalla lampada. Per rendersi conto dell'impatto e del significato di tali limiti abbiamo fatto alcune semplici valutazioni dell'ordine di grandezza dell'intensità della luce emessa da una superficie stradale a piccoli angoli sopra l'orizzonte. Si tratta di valutazioni indicative perché in generale si tratta di risultati dipendenti dal progetto dell'impianto considerato ma tuttavia sufficienti a dare un ordine di grandezza e a fornire un quadro significativo. In caso di incertezza su qualche parametro abbiamo optato per valori conservativi, vale a dire per la situazione che produce l'intensità più grande (e che quindi giustifica i limiti più elevati). Inoltre i calcoli sono stati fatti per direzioni di emissione in un piano passante per l'asse della strada. L'intensità in altre direzioni è minore anche di molto, come si può verificare esaminando l'andamento del coefficiente di luminanza in funzione dell'angolo, usualmente chiamato beta, tra la luce incidente e quella riflessa. Perciò i nostri risultati vanno considerati un limite superiore all'intensità della luce emessa dalla strada per unità di flusso.

2. Calcolo approssimato

Consideriamo dapprima una superficie stradale perfettamente diffondente (Palladino, fig. 6.6). Per essa vale la legge di Lambert, ossia la sua luminanza B è costante.

La luminanza di una superficie infinitesima in una determinata direzione è definita come il rapporto tra l'intensità luminosa da essa emessa in tale direzione e la sua **area apparente** ossia la proiezione dell'area della

superficie infinitesima su un piano perpendicolare alla direzione stessa. (Palladino, sez.2.3.4, fig. 2.11).

Quindi l'intensità luminosa di una superficie lambertiana si trova moltiplicando la luminanza per l'area apparente della superficie e integrando su tutta la superficie.

$$I = \int B \cdot dA \cos(\theta) = \cos(\theta) \int B \cdot dA \quad [1]$$

dove $\theta=180-\gamma$ è l'angolo tra la direzione di osservazione e la verticale verso l'alto. Per le proprietà delle superfici lambertiane, la luminanza o emittanza luminosa L che esprime il flusso totale emesso nell'emisfero superiore per unità di area è pari a:

$$L = d\Phi/dA = \int B \cdot \cos(\theta) d\Omega = \pi B \quad [2]$$

da cui:

$$\int B dA = \int d\Phi / \pi = \Phi_T / \pi \quad [3]$$

dove l'integrale $\int d\Phi$ è esteso a tutta la superficie stradale e rappresenta il flusso totale emesso verso l'alto dalla superficie.

Possiamo quindi scrivere:

$$I = \cos(\theta) \Phi_T / \pi \quad [4]$$

Detto ρ_M il fattore di riflessione medio che esprime il rapporto tra flusso riflesso dalla superficie e flusso incidente, u il coefficiente di utilizzazione che esprime quale frazione del flusso luminoso Φ_L emesso dalla lampada arriva sulla superficie da illuminare e n il numero di apparecchi dell'impianto, il flusso totale emesso verso l'alto è:

$$\Phi_T = \rho_M u n \Phi_L \quad [5]$$

Quindi per una superficie perfettamente diffondente l'intensità della luce emessa dalla strada per unità di flusso emesso dalle lampade dell'impianto è:

$$\begin{aligned} I_F &= \cos(\theta) \rho_M u n \Phi_L / \pi n \Phi_L = \\ &= \cos(180-\gamma) \rho_M u / \pi \end{aligned} \quad [6]$$

Essendo $\rho_M = 0.1$ per superfici stradali come l'asfalto scuro, il più comune in Italia, e $u =$

0.5 per un impianto stradale tipico, si ottiene per $\gamma=100^\circ$:

$$I_F (\gamma=100^\circ) = 2.8 \text{ cd/klm}$$

Se la superficie non è perfettamente diffondente si può scrivere in prima approssimazione:

$$\int B \cdot dA = B_M A = q_M E_M A = q_M u n \Phi_L \quad [7]$$

dove q_M è il coefficiente medio di luminanza, cioè il rapporto tra la luminanza media B_M e l'illuminamento medio E_M , mentre il prodotto $E_M \cdot A$ è il flusso totale che arriva sulla strada.

Sostituendo la (8) nella eq. (1), si ottiene:

$$I_F = \cos(\theta) q_M u n \Phi_L / n \Phi_L =$$

$$= \cos(180-\gamma) q_M u \quad [8]$$

Essendo $q_M = 0.06$ (es. Forcolini, tab 7.2, ove $K_M = 1/q_M \geq 18$ per asfalto scuro e apparecchi semi-schermati.) si ottiene un valore maggiore che nel caso precedente, perché una strada non è un diffusore perfetto:

$$I_F (\gamma=100^\circ) = 5.2 \text{ cd/klm.}$$

Questa è l'intensità in direzione dell'asse della strada. In senso trasversale i valori sono molto minori perché q_M è più piccolo.

Nel caso che l'intensità sia rapportata al flusso emesso dagli apparecchi anziché a quello emesso dalle lampade, occorre dividere I_F per il rendimento medio η degli apparecchi:

$$I_\Phi = \cos(180-\gamma) \rho_M u / \pi \eta \quad \text{oppure}$$

$$I_\Phi = \cos(180-\gamma) q_M u / \eta \quad [9]$$

Per ottenere l'intensità "mantenuta" occorre moltiplicare per i fattori di decadimento e deprezzamento del flusso della lampada.

3. Calcolo su un campione di impianti

Abbiamo calcolato l'intensità della luce emessa dalla strada per unità di flusso emesso dalle lampade dell'impianto su un campione di 21 progetti di impianti stradali di tipo molto comune, ottenuti con diverse tipologie progettuali, diverse luminanze medie mantenute, apparecchi stradali per lo più

semi-cut-off di buona qualità ottica. I progetti prevedevano superfici stradali del tipo standard CIE CII (asfalto scuro), il più diffuso in Italia. Per ogni impianto abbiamo calcolato l'intensità mantenuta dell'emissione luminosa dell'intera strada a piccoli angoli ($\gamma = 95^\circ, 100^\circ, 110^\circ$) in base alla luminanza media mantenuta e agli altri parametri di progetto. Abbiamo assunto di valutare anche in questo caso l'intensità in senso longitudinale, dove è maggiore.

Sia B_M la luminanza media :

$$B_M = \int B \cdot dA / \int dA \quad [10]$$

ove $\int dA = L S$ è l'area della strada con L e S rispettivamente la lunghezza e la larghezza.

Dalla eq. (1) otteniamo:

$$I = \cos(\theta) B_M L S \quad [11]$$

da cui si ottiene che nella direzione individuata dall'angolo γ e dall'asse stradale, l'intensità luminosa della strada per unità di flusso emesso dalle lampade dell'impianto è:

$$I_\Phi = \cos(180-\gamma) B_M L S / n \Phi_L \quad [12]$$

La tabella 1 mostra i risultati per ogni singolo impianto per i tre angoli considerati ($\gamma = 95^\circ, 100^\circ, 110^\circ$ ossia $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ sopra l'orizzonte). La tabella 2 mostra i valori medi dell'intensità per unità di flusso nel nostro campione di impianti. Si tratta di un'intensità "mantenuta". Per minimizzare l'inquinamento prodotto dagli apparecchi i limiti da adottare dovrebbero essere almeno pari ad un decimo dei valori in tabella 2.

La figura 1 mostra l'intensità dell'emissione degli apparecchi consentita dai limiti introdotti in alcune leggi o proposte di legge e l'intensità dell'emissione delle superfici ad ogni angolo γ compreso fra 90° e 110° . La figura 2 mostra la frazione dell'intensità totale dovuta agli apparecchi e alle superfici. La figura 3 mostra la definizione di luminanza (vedi Palladino 2002). Si tenga sempre conto che le intensità della strada utilizzate nelle figure sono quelle in senso longitudinale mentre si dovrebbe fare il confronto col valore mediato in tutte le direzioni, molto più piccolo.

Tabella 1

Campione bona fide di 21 impianti stradali di vario tipo				intensità in senso longitudinale			
Luminanza media	larghezza	interdistanza	flusso lampada	cd/klm a 5 gradi	cd/klm a 10 gradi	cd/klm a 20 gradi	
0,87	6	24	6,3	1,75	3,47	6,81	
0,80	6	24	5,8	1,75	3,46	6,80	
0,73	6	26	6,3	1,59	3,15	6,19	
1,18	7	30	13,5	1,61	3,20	6,29	
0,86	8	30	9,5	1,91	3,79	7,44	
0,73	6	25	6,3	1,53	3,03	5,95	
0,99	8	30	13,5	1,55	3,07	6,03	
0,93	8	35	10	2,29	4,54	8,92	
1,02	8	38	14,5	1,88	3,73	7,33	
1,24	14	50	29	2,63	5,22	10,25	
1,34	10	45	27	1,96	3,89	7,65	
1,09	10	40	19	2,02	4,00	7,86	
1,98	16	50	52	2,68	5,31	10,44	
1,34	12	45	27	2,36	4,67	9,18	
2,38	12	45	48	2,35	4,67	9,17	
1,90	11	40	31,5	2,33	4,63	9,09	
2,88	20	60	96	3,16	6,28	12,33	
2,97	9,5	52	48	2,69	5,33	10,47	
0,69	4	20	3,8	1,28	2,53	4,98	
0,95	5	20	5,8	1,44	2,86	5,61	
1,00	10	40	23	1,53	3,03	5,96	

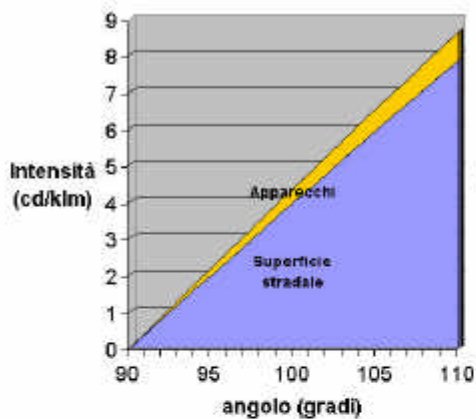
Tabella 2

Angolo	95 gradi	100 gradi	110 gradi
Intensità media in senso longitudinale di un campione di 21 strade	2.0 cd/klm	4.0 cd/klm	7.8 cd/klm
In senso trasversale l'intensità della luce emessa dalla strada è molto più piccola			

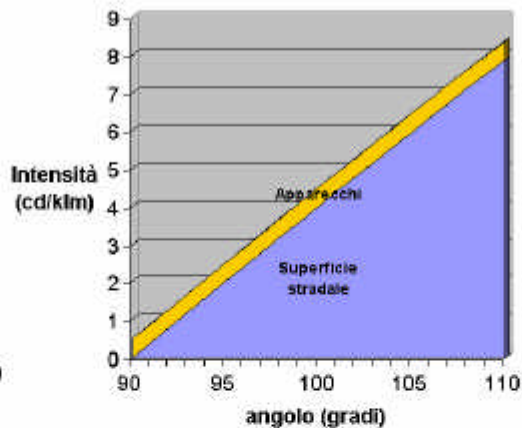
Figura 1
(pagina successiva, in alto)

Figura 2
(pagina successiva, in basso)

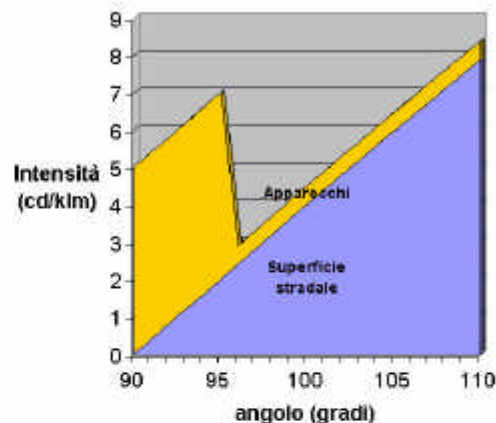
Limite del 10%



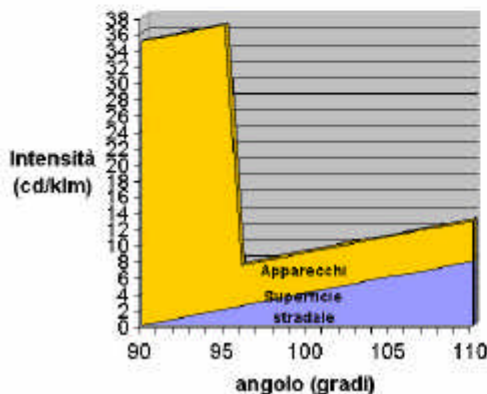
Legge Lombardia LR 17 / 2000



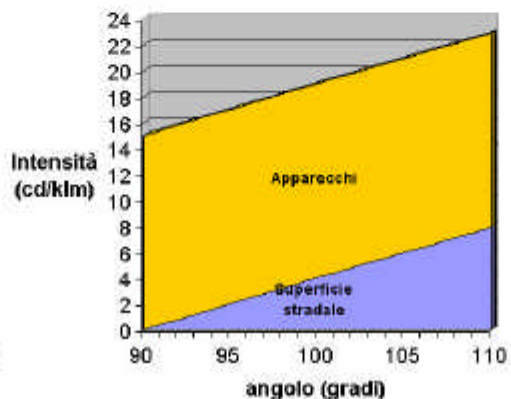
Legge Lazio LR 23 / 2000 - PDL 2403
stradale - lanterne



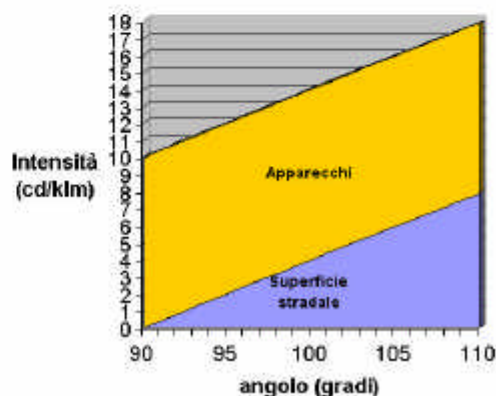
Legge Lazio LR 23 / 2000 - PDL 2403
arredo urbano



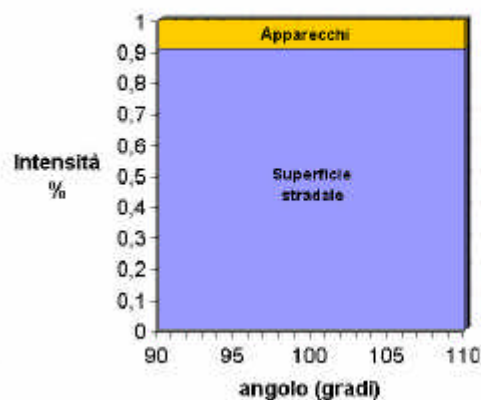
PDL 696
globi - lanterne



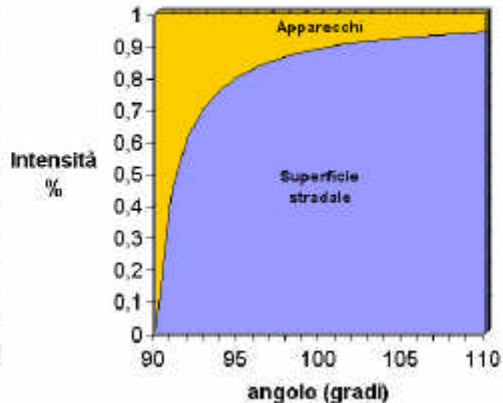
PDL 696
torri faro



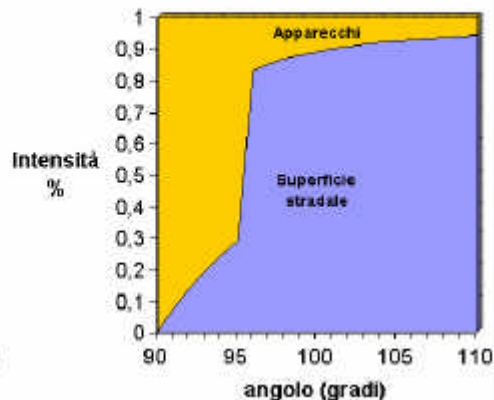
Limite del 10%



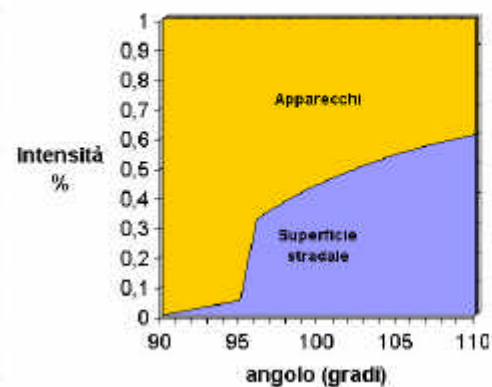
Legge Lombardia LR 17 / 2000



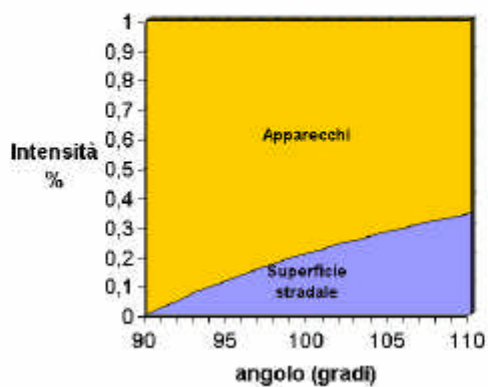
Legge Lazio LR 23 / 2000 - PDL 2403
stradale - lanterne



Legge Lazio LR 23 / 2000 - PDL 2403
arredo urbano



PDL 696
globi - lanterne



PDL 696
torri faro

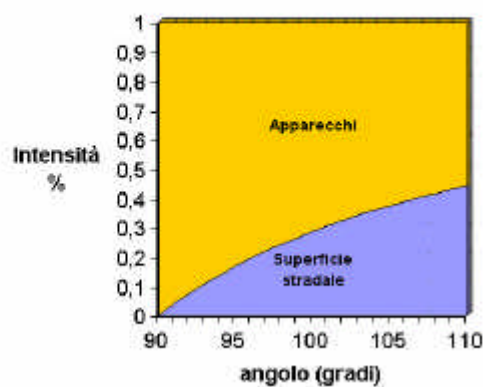
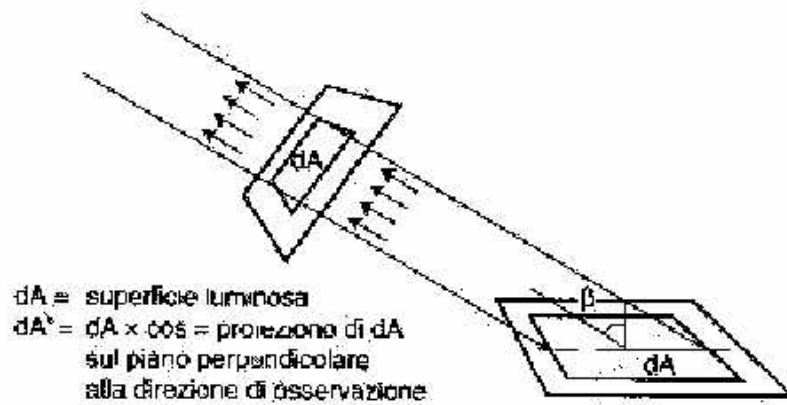


Figura 3



Bibliografia

- Cinzano P., Diaz Castro F.J. 2000, The artificial sky luminance and the emission angles of the upward light flux, in *Measuring and Modelling Light Pollution*, ed. P. Cinzano, Mem. Soc. Astron. Ita., 71, 1, 251-256
- Palladino P., Manuale di illuminotecnica, Tecniche Nuove, 2002.
- Forcolini G., Illuminazione di esterni, Hoepli, 1997