



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

**Dottorato di Ricerca in**  
**Fisica Tecnica**

**SISTEMI INTEGRATI LED-PV**  
**PER L'ILLUMINAZIONE SOSTENIBILE DI**  
**GALLERIE E PREGALLERIE STRADALI**

**Docente guida**

Prof. Franco Gugliemetti

**Tutor**

Ing. Fabio Bisegna

**Dottoranda**

Jonida Bundo

XXV Ciclo

# Indice

<b>Indice</b> .....	<b>2</b>
<b>Introduzione</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Stato dell'arte delle tecnologie e dei sistemi di illuminazione delle gallerie stradali</b> .....	<b>7</b>
<i>1.1 Illuminazione delle gallerie stradali</i> .....	7
1.1.1 Grandezze caratteristiche e normativa tecnica per l'illuminazione di una galleria lunga	9
1.1.2 Soluzioni illuminotecniche .....	14
1.1.3 L'effetto flicker .....	19
1.1.4 Criteri di installazione degli apparecchi illuminanti .....	20
1.1.5 Sorgenti luminose .....	22
1.1.6 Controllo degli impianti di illuminazione in galleria .....	22
1.1.7 Tecniche di illuminazione per le gallerie corte .....	23
<i>1.2 I LED come soluzione tecnologica per l'illuminazione delle gallerie stradali</i> .....	25
1.2.1 Struttura e funzionamento dei LED .....	26
1.2.2 Alimentazione dei sistemi di illuminazione a LED.....	28
1.2.3 Emissione luminosa .....	28
1.2.4 Tipologie di LED e loro caratteristiche.....	32
1.2.5 Ottiche.....	36
1.2.6 Proprietà ottiche dei LED e metodi per misurarle.....	39
1.2.7 Punti di forza e di debolezza della tecnologia a LED .....	41
1.2.8 Campi di applicazione della tecnologia LED.....	45
1.2.9 Illuminazione urbana.....	46
<i>1.3 Gli Impianti fotovoltaici come tecnologia per l'alimentazione dei sistemi di illuminazione stradale</i> .....	47
1.3.1 Cenni storici .....	47
1.3.2 La radiazione solare al suolo.....	48
1.3.3 Effetto fotovoltaico .....	52
1.3.4 Cella fotovoltaica .....	58
1.3.5 Innovazioni tecnologiche nel campo fotovoltaico.....	72
1.3.6 Impianti fotovoltaici.....	74
1.3.7 Tipologie di impianto fotovoltaico.....	77
1.3.8 Energia elettrica prodotta da un sistema fotovoltaico .....	81
1.3.9 Analisi economica – finanziaria.....	87

<b>2</b>	<b>La Pregalleria illuminotecnica come risoluzione alle problematiche visive ed energetiche</b>	<b>92</b>
2.1	<i>Problematiche visive ed energetiche delle gallerie stradali</i>	92
2.2	<i>La pregalleria illuminotecnica</i>	93
2.3	<i>Dimostrativi esistenti delle pregallerie</i>	95
<b>3</b>	<b>Il Modello sperimentale della pregalleria</b>	<b>97</b>
3.1	<i>Modello sperimentale in scala 1:20</i>	97
3.1.1	Realizzazione del modello	97
3.1.2	Rilievo delle principali grandezze fotometriche	100
3.1.3	Risultati ottenuti	104
3.2	<i>Modello sperimentale in scala 1:10</i>	108
3.2.1	Realizzazione del modello	108
3.2.2	Studio della foratura	109
3.2.3	Risultati dei rilievi delle principali grandezze fotometriche	114
<b>4</b>	<b>Il modello numerico della pregalleria</b>	<b>117</b>
4.1	<i>La simulazione illuminotecnica con Radiance mediante Ecotect</i>	117
4.1.1	Radiance	117
4.1.2	Ecotect	118
4.2	<i>Il modello numerico</i>	119
4.3	<i>Prove di foratura sul modello</i>	123
4.3.1	Diametro di foratura 400 mm	123
4.3.2	Diametro di foratura 100 mm	125
4.3.3	Diametro di foratura 70 mm	127
4.4	<i>Conclusioni</i>	128
<b>5</b>	<b>Integrazione dei LED alimentati da tecnologia fotovoltaica all'interno delle pregallerie</b>	<b>130</b>
5.1	<i>Integrazione dell'illuminamento artificiale all'interno delle pregallerie</i>	130
5.2	<i>Utilizzo di tecnologie innovative per un'illuminazione sostenibile</i>	132
5.3	<i>Analisi della sostenibilità energetica di un impianto fotovoltaico e delle lampade a LED</i>	133
5.4	<i>Producibilità di un impianto fotovoltaico</i>	135
	<b>Conclusioni</b>	<b>138</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>139</b>

## Introduzione

L'analisi degli incidenti, sviluppata con sempre maggior interesse negli ultimi anni, ha dimostrato che la frequenza degli incidenti in galleria si concentra nelle aree di transizione agli imbocchi, molto più rispetto alla parte centrale del tunnel.

La causa è dovuta all'effetto "buco nero" che si ha per differenza tra la quantità di luce all'esterno e quella presente all'interno della galleria, causando il fenomeno dell'abbagliamento.

La corretta illuminazione delle gallerie stradali, ed in particolare delle loro zone di imbocco durante le ore diurne, è un fattore di notevole importanza, sia ai fini della sicurezza della circolazione, sia per il mantenimento della fluidità del traffico e per l'offerta di un adeguato livello di servizio. Tale requisito è normalmente assicurato per mezzo di impianti di illuminazione artificiale, i quali consentono che l'emissione del flusso luminoso sia opportunamente differenziata tra le diverse zone di una galleria lunga [1].

Negli ultimi anni, gli studi e le ricerche per una razionale illuminazione delle gallerie stradali, e in particolare quelle autostradali, si sono moltiplicati nei vari paesi interessati allo scopo di pervenire a soluzioni soddisfacenti per la sicurezza del traffico e accettabili dal punto di vista economico [2].

Pertanto occorre individuare soluzioni che minimizzino l'uso dell'energia elettrica richiesta per tali impianti e che garantiscano un'elevata affidabilità, in modo da contenere al minimo gli interventi dovuti alla manutenzione [2].

Attualmente uno dei sistemi utilizzati per risolvere il problema dell'abbagliamento consiste nell'aumentare il numero dei corpi illuminanti dei circuiti permanenti nella parte iniziale della galleria. Questa soluzione nella maggior parte dei casi non risolve del tutto il problema e inoltre richiede ulteriori costi di manutenzione, di installazione, di consumo della corrente, etc.

Il presente lavoro ha come obiettivo la risoluzione della problematica descritta di natura illuminotecnica, mediante soluzioni che allo stesso tempo siano sostenibili dal punto di vista energetico.

La problematica illuminotecnica viene risolta tramite l'utilizzo della luce naturale come soluzione del problema dell'abbagliamento all'ingresso delle gallerie attraverso la realizzazione di una porzione aggiuntiva di galleria, denominata pregalleria illuminotecnica, antecedente la galleria principale, avente la sola funzione di favorire l'adattamento visivo.

La riduzione dei consumi energetici dovuti alle modalità convenzionali di illuminazione delle gallerie viene raggiunta sfruttando l'autoregolazione dell'illuminamento naturale, sostituendo alle sorgenti tradizionali dell'impianto di illuminazione della galleria sorgenti a LED e auto producendo l'energia necessaria attraverso l'installazione di un impianto fotovoltaico amorfo sulla copertura della pregalleria.

Il lavoro di tesi si suddivide in cinque capitoli.

Nel primo capitolo viene descritto lo stato dell'arte delle tecnologie e dei sistemi di illuminazione delle gallerie stradali, con particolare riferimento ai sistemi di illuminazione a LED e alla tecnologia fotovoltaica.

Nel secondo capitolo vengono descritte le principali peculiarità della pregalleria illuminotecnica come soluzione alle problematiche dovute ai contrasti di luminanza tenendo conto delle prescrizioni della norma UNI 11095.

Nel terzo capitolo viene descritta l'attività sperimentale compiuta su 2 modelli in scala di una pregalleria/galleria monodirezionale, analizzando i risultati ottenuti, e confrontandoli con le prescrizioni della Norma.

Nel quarto capitolo è stato sviluppato un modello numerico attraverso un software di simulazione illuminotecnica per fare in modo che il metodo utilizzato per il dimensionamento della pregalleria potesse essere verificabile e ripetibile

indipendentemente dalla localizzazione geografica e dalle dimensioni della galleria in esame.

Infine nel quinto capitolo le soluzioni adottate vengono studiate dal punto di vista energetico in maniera tale che siano sostenibili energeticamente mediante l'alimentazione dei led utilizzati tramite tecnologia fotovoltaica.

# 1 Stato dell'arte delle tecnologie e dei sistemi di illuminazione delle gallerie stradali

## 1.1 Illuminazione delle gallerie stradali

L'illuminazione delle gallerie presenta differenti problematiche (legate per lo più alla sicurezza e al comfort visivo) nelle diverse ore della giornata, a seconda della presenza o meno dell'illuminazione naturale. Durante le ore notturne, infatti, occorre soltanto garantire condizioni di visibilità non molto differenti da quelle dei tronchi a cielo aperto della strada. In realtà, si richiedono prestazioni leggermente superiori, poiché si assume una maggiore pericolosità intrinseca delle gallerie.

L'illuminazione di una galleria durante le ore diurne ha lo scopo di garantire al traffico che l'attraversa condizioni di sicurezza, intensità, velocità e comfort almeno pari a quelle che si hanno nei tratti di strada prima e dopo la galleria [2].

Poiché non è tecnicamente né economicamente possibile realizzare in galleria un'illuminazione pari a quella esistente all'esterno, occorre individuare i livelli di illuminazione minimi indispensabili di cui dotare ogni tratto di galleria per ottenere le condizioni di sicurezza e fluidità del traffico. Pertanto le difficoltà da superare si possono distinguere in:

- quale livello di luminanza occorre realizzare nel tratto iniziale della galleria (tratto di adattamento o di soglia) e per quale lunghezza di galleria, affinché il guidatore che si trova all'esterno possa percepire la presenza di eventuali ostacoli all'interno del manufatto ad una distanza utile per poter governare di conseguenza il suo veicolo;
- in che modo ridurre il livello iniziale di luminanza successivamente al primo tratto di galleria, in modo da consentire il graduale adattamento dell'occhio al passaggio dalle elevate luminanze all'esterno a quelle necessariamente più modeste all'interno;
- quale livello di luminanza adottare nel tratto finale della galleria, allorché si è ottenuto l'adattamento dell'occhio ai bassi livelli di luminanza dell'illuminamento artificiale.

Di queste difficoltà la più importante è la prima, quella riguardante l'illuminazione del tratto iniziale di galleria per potervi accedere in tutta sicurezza durante il giorno, in quanto dal momento in cui il guidatore di un veicolo si trova all'esterno della galleria fino a quando giunge in corrispondenza dell'imbocco egli ha bisogno di controllare un tratto di strada all'interno del traforo. Al fine di poter mettere in condizione il guidatore, i cui occhi sono "adattati" all'elevata luminosità esterna, di individuare all'interno del manufatto l'andamento della strada e la presenza (o l'assenza) di eventuali ostacoli occorre che l'interno della galleria sia sufficientemente luminoso in rapporto alla luminosità esterna. Se la luminosità interna è eccessivamente inferiore a quella esterna, il guidatore per un certo tempo sarà infastidito dal contrasto di luminanza [3]. Questo tempo, denominato "tempo di adattamento", è circa lungo a seconda della maggiore o minor differenza tra la quantità di luce all'esterno e quella presente all'interno della galleria. Ecco, dunque, i motivi per cui occorre assicurare elevati livelli di illuminazione diurni all'imbocco delle gallerie, e per un tratto sufficientemente lungo, a partire dalla sezione di ingresso.

Sono stati effettuati diversi esperimenti per individuare i valori minimi di luminanza da assicurare nel primo tratto della galleria e si sono ottenute diverse curve in funzione del tempo di esposizione dell'ostacolo, delle sue dimensioni, del suo contrasto con lo sfondo [3].

Altri parametri di fondamentale importanza sono quelli inerenti a problematiche di tipo economico. Occorre, pertanto, individuare soluzioni che minimizzino l'uso dell'energia elettrica richiesta per gli impianti di illuminazione e che garantiscano un'elevata affidabilità, in modo da contenere al minimo gli interventi del personale addetto alla manutenzione.

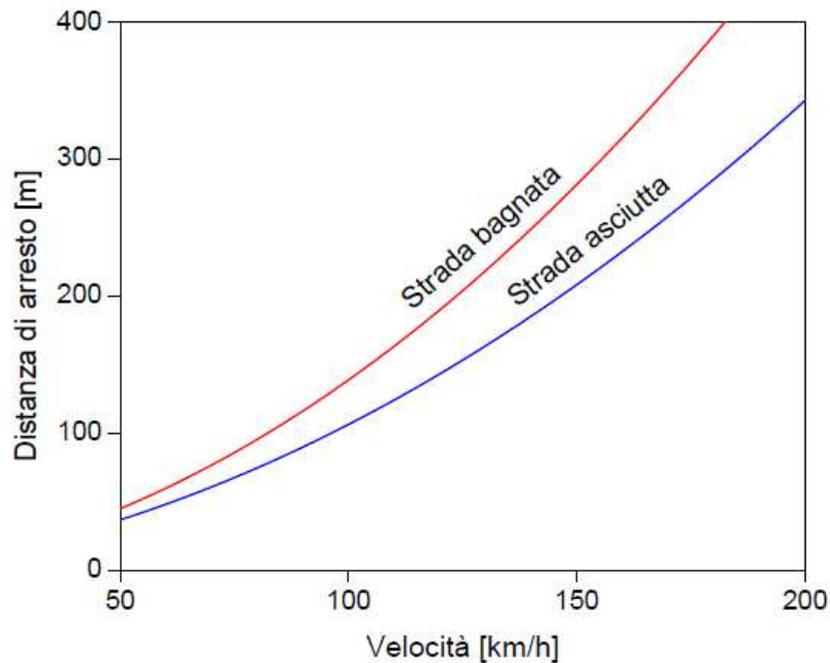
Ai fini della loro illuminazione, le gallerie si distinguono generalmente in "lunghe" e "corte" che si differiscono tra loro in quanto nelle gallerie lunghe un guidatore, posto ad una distanza pari alla distanza di arresto del veicolo, prima dell'imbocco ed in condizioni normali di traffico, non vede il portale d'uscita [3].

L'impianto di illuminazione delle gallerie lunghe consiste nel realizzare all'accesso della galleria una illuminazione di rinforzo il cui valore iniziale, l'andamento e l'estensione dipendono dalla luminanza esterna e dalla velocità d'accesso prevista per quel dato percorso affinché, procedendo verso l'interno della galleria si raggiunga l'illuminazione permanente.

### **1.1.1 Grandezze caratteristiche e normativa tecnica per l'illuminazione di una galleria lunga**

Le grandezze che fondamentalemente influenzano il dimensionamento del sistema di illuminazione, sono stabilite a livello nazionale dall'UNI (Ente Nazionale di Unificazione) con la Norma UNI 11095 "Illuminazione nelle gallerie" ed a livello internazionale dalla CIE (Commission Internationale Eclairage) con un ultimo aggiornamento della pubblicazione CIE 88:2004 "Guide for the lighting of road tunnels and underpasses". Sia la UNI che la CIE identificano le condizioni principali di sicurezza nella zona di entrata di una galleria, con la visibilità di un ostacolo tipo, costituito da un cubo con spigoli di 20 cm e facce diffondenti con fattore di riflessione pari a 0,10. Si tratta a tutti gli effetti, di un oggetto molto scuro che si ritiene rappresentativo del più piccolo ostacolo potenzialmente pericoloso che potrebbe trovarsi sul piano stradale. In particolare, se un ostacolo di questo tipo fosse presente nella sezione di entrata di una galleria, per evitare incidenti, esso dovrebbe essere visto da una distanza tale da detto punto, in modo da permettere il conducente di arrestare il proprio autoveicolo in tempo. Come visibile in Figura 1.1, la distanza di arresto effettiva è molto maggiore di quella riportata sulle riviste specializzate nel settore degli autoveicoli: infatti, non solo in realtà pneumatici e strade non sono quasi mai in condizioni ottime, ma bisogna tener conto di tempi di reazione del guidatore medio, normalizzato in 1,5 s.

Inoltre, le norme considerano cosa vede il conducente dalla distanza di arresto entro il campo di visione  $\pm 30^\circ$  orizzontalmente e  $\pm 20^\circ$  verticalmente. Risulta evidente che le luminanze del campo visivo sono completamente diverse per le varie velocità di approccio alla galleria.



**Figura 1.1 – Distanze di arresto in funzione della velocità per strade orizzontali**

L'effetto della luminanza ambientale è la formazione di una luminanza di velo (luminanza velante), che riduce il contrasto di un ostacolo e quindi anche la sua visibilità. Secondo le norme, la luminanza stradale che l'impianto di illuminazione deve fornire all'entrata della galleria, per rendere visibile un eventuale ostacolo, deve essere proporzionale alla luminanza di velo, secondo il tipo di impianto che si desidera realizzare. La luminanza stradale deve scendere avanzando verso l'interno della galleria in quanto l'occhio pian piano si adatta all'oscurità e deve raggiungere il valore minimo nella zona interna. Il valore della luminanza della zona interna della galleria è l'elemento di differenziazione tra la nuova CIE 88:2004 e la UNI 11095:2003. La prima prescrive valori molto ridotti rispetto all'impostazione della vecchia CIE 88:1990, senza però fissare un riferimento oggettivo, la norma italiana invece pone un riferimento inequivocabile al valore minimo consigliato. Prescrive una luminanza pari a 1,5 o 2 volte quella prevista per la strada di accesso, valutata secondo i dettami della norma UNI 10439. Di fatto pone in relazione la zona interna o di illuminazione permanente con i valori che sono riconosciuti validi per le zone all'aperto in situazione notturna in presenza di un adeguata illuminazione pubblica. Ciò consente peraltro di evitare, durante le ore notturne, il verificarsi dell'effetto

contrario che si ha di giorno, vale a dire uscendo dalla galleria si cade nel buio con i pericoli conseguenti. La luminanza interna, dovuta al solo impianto di illuminazione permanente, tipicamente vale  $3 \div 4 \text{ cd/m}^2$ .

Per passare dalla luminanza di entrata a quella interna, le norme prevedono una lunga zona di transizione in cui la luminanza scende secondo la curva normalizzata riportata in Figura 1.2. Come si vede, alla zona di entrata, con una luminanza prima costante e poi decrescente fino al 40% del valore massimo a una distanza dalla sezione di entrata pari alla distanza di arresto, segue una zona di adattamento, la cui lunghezza è valutata in secondi di percorrenza, e ciò perché l'occhio impiega sempre lo stesso tempo per adattarsi al buio. La scala in lunghezze deve essere valutata in base alla velocità massima, che nell'esempio riportato in Figura 1.2 è pari a 130 km/h.[4]

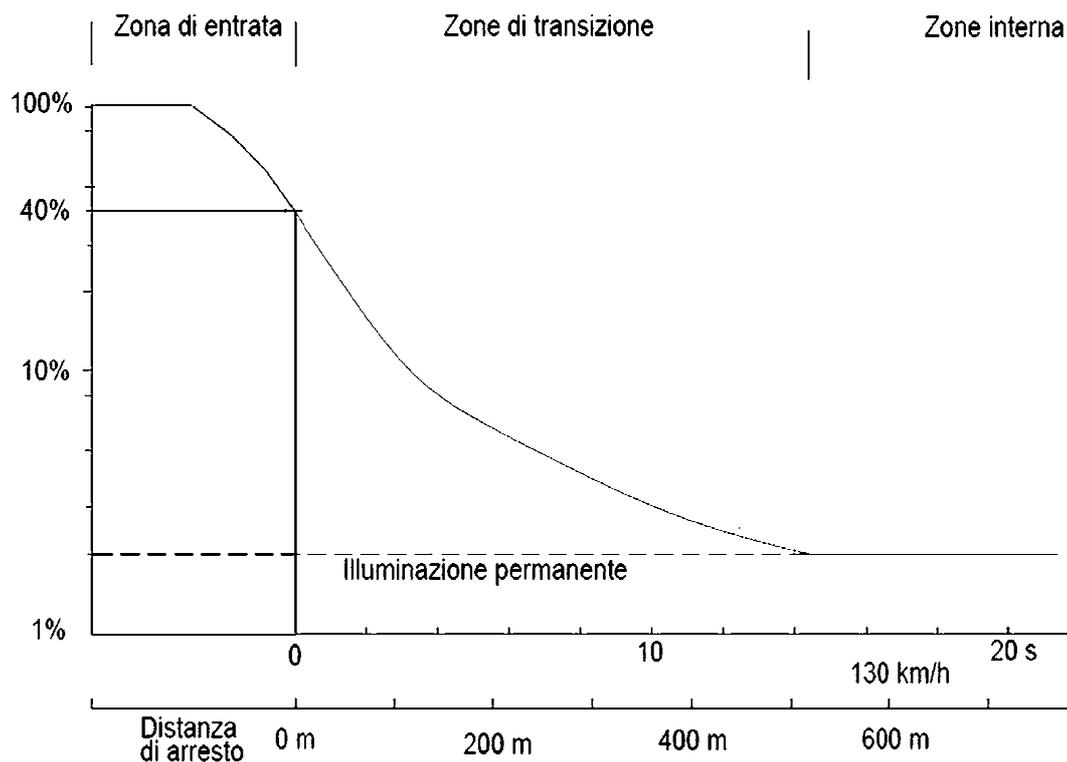


Figura 1.2 – Andamento delle luminanze stradali nella zona di transizione (fonte: UNI 11095)

La norma UNI 11095 richiede inoltre:

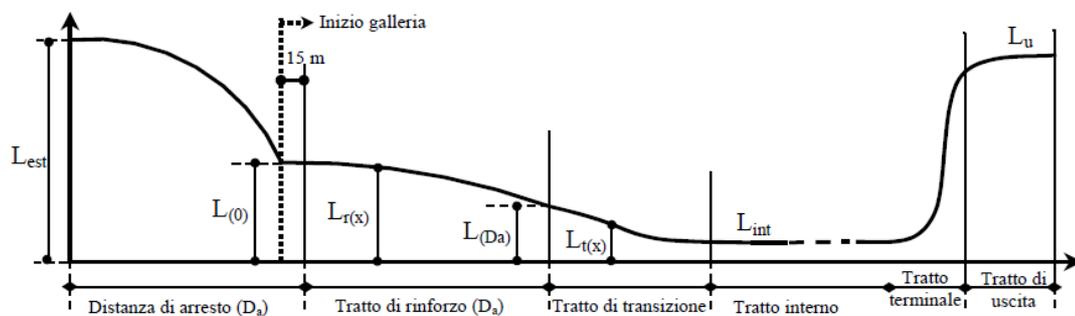
- luminanza pareti pari ad almeno il 60% della luminanza sulla strada,

- uniformità di luminanza (generale  $U_0 > 0,4$ ),
- indice di abbagliamento ( $TI < 15\%$ ),
- coefficiente di qualità del contrasto  $qC$  (rapporto tra luminanza del manto stradale e illuminamento verticale al centro di un ostacolo campione di dimensioni  $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ ),
- assenza di sfarfallamento.

Per realizzare le condizioni richieste dalle norme, il sistema di illuminazione è costituito da due o tre impianti:

- impianto di rinforzo, spento di notte, che fornisce i livelli adeguati nella zona dell'imbocco durante le ore diurne,
- impianto di illuminazione permanente, esteso su tutta la lunghezza della galleria, che fornisce di giorno i livelli di luminanza adeguati nella zona interna e di notte i livelli di illuminazione notturna per l'intero sviluppo della galleria,
- impianto di uscita eventualmente presente, nel tratto finale di gallerie percorse in modo unidirezionale.

Nella Figura 1.3 è rappresentato qualitativamente l'andamento di luminanza da realizzare. E' tenuto conto anche del tratto finale della galleria, nella quale si ha l'impianto di rinforzo di uscita. Tale impianto diventa superfluo nel caso di gallerie stradali percorse in modo bidirezionale, in tale caso si ha su entrambi gli imbocchi una luce di rinforzo in entrata.



**Figura 1.3 – Andamento della luminanza nei tratti caratteristici della galleria [3]**

La norma UNI 11095 suddivide la sezione longitudinale di un tunnel in 6 zone (Figura 1.3) caratterizzate da differenti requisiti di luminanza, che tengono conto dello stato progressivo di adattamento dell'occhio. Tali zone sono le seguenti:

- Zona di accesso: tratto di strada all'aperto immediatamente precedente la sezione di ingresso in galleria, di lunghezza pari alla distanza di arresto, lungo il quale il conducente di un veicolo deve essere in grado di riconoscere la presenza di un ostacolo all'interno della galleria. Il valore della luminanza nel tratto di accesso è di fondamentale importanza, poiché condiziona i livelli della curva di luminanza per tutta la sezione longitudinale della galleria;
- Zona di entrata: tratto di lunghezza almeno pari alla distanza di arresto, costituita da una prima parte, pari a 0,5 volte la distanza di arresto, a luminanza media costante e da un secondo tratto a luminanza media trasversale decrescente linearmente fino al 40% circa del valore del primo tratto;
- Zona di transizione: tratto interno della galleria successivo, lungo il quale i valori di luminanza media in una sezione trasversale della galleria vengono ridotti gradualmente, per consentire all'occhio del conducente di un veicolo di adattarsi ai livelli di luminanza più bassi della zona interna;
- Zona interna: tratto interno successivo della galleria, lungo il quale devono essere forniti valori di luminanza media, tali da consentire il percorso della galleria in sicurezza;
- Zona uscita: tratto interno della galleria dove, durante le ore diurne, e cioè quando la visibilità del conducente di un veicolo, che si accinge a uscire da una galleria, è influenzata dalla luce esterna, la luminanza della zona di uscita è uguale a quella della zona interna;
- Zona immediatamente esterna: la Norma Uni 11095 consiglia che in casi particolari (curve accentuate, restringimenti, biforcazioni, zone pericolose) anche la zona immediatamente esterna alla galleria sia illuminata fino ad una distanza, dalla sezione di uscita, pari a due volte la distanza di arresto, in modo che la luminanza media mantenuta della carreggiata non sia minore

di 1/3 della luminanza notturna dell'ultimo tratto di galleria. luminanza interna.

### **1.1.2 Soluzioni illuminotecniche**

I requisiti richiesti per l'illuminazione delle gallerie sono particolarmente gravosi per il tratto iniziale e per il tratto di transizione, dove occorre avere elevate luminanze sia della carreggiata che delle pareti.

Si dimostra di grande aiuto, e consente inoltre di conseguire significativi contenimenti dei consumi energetici, l'adozione di manti di copertura del fondo stradale e rivestimenti delle pareti di tonalità chiara.

È altresì evidente che tale caratteristica delle superfici male si concilia con il flusso dei veicoli, spesso di cospicua portata. L'aria impregnata di gas di scarico inquinanti, di particelle di carburante incombuste e di polveri di varia provenienza e natura, facilmente ristagna nell'invaso tubiforme della galleria, finendo per depositarsi sulle superfici, alterandone di conseguenza il fattore di riflessione. Una frequente pulizia ne rallenta il progressivo annerimento. L'alterazione cromatica della carreggiata è di norma ben maggiore di quella delle pareti. Tuttavia la manutenzione non può che essere dilatata nel tempo sia per ragioni di costi, sia per ridurre i disagi arrecati agli automobilisti: oltre tutto ogni intralcio alla circolazione per lavori in corso nelle gallerie costituisce un rischio di incidenti.

Dovendosi realizzare, lungo l'intero sviluppo delle gallerie, requisiti illuminotecnici molto diversi dal punto di vista fotometrico, è ragionevole pensare a delle soluzioni impiantistiche differenti per le varie zone, anche con l'adozione di apparecchi di tipo diverso. Le soluzioni possibili sono classificabili in tre gruppi, in funzione della distribuzione del flusso luminoso operata dalle fonti installate: [3]

- *soluzioni a flusso simmetrico* inviato prevalentemente nella direzione di marcia, vale a dire longitudinalmente rispetto all'asse di percorrenza nei due sensi;
- *soluzioni a flusso asimmetrico* inviato prevalentemente nella direzione longitudinale ma in senso contrario rispetto a quello di percorrenza: questa

soluzione denominata *a flusso contrario* è adottata solitamente nelle gallerie a unica corsia di marcia;

- *soluzioni a flusso simmetrico* inviato prevalentemente nelle direzioni perpendicolari all'asse di percorrenza, cioè verso le pareti oltre che sulla carreggiata.

Di ciascuna soluzione sono state indicate le direzioni prevalenti del flusso, ma ciò non significa che la luce non sia inviata, nell'ambito del singolo caso, in altre direzioni; questa prestazione anzi si rivela necessaria al fine di correggere i difetti tipici di ogni impianto. Il primo tipo di impianto deriva da quelli comunemente impiegati per l'illuminazione delle strade. Gli apparecchi diffondono la luce lateralmente rispetto all'asse passante per il loro centro ottico e perpendicolare a quello stradale; risultano scarsamente rischiarate le pareti e occorre controllare l'abbagliamento e le ombre portate dei veicoli.

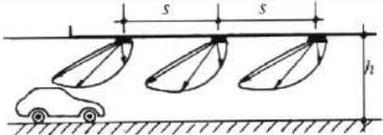
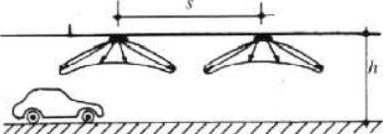
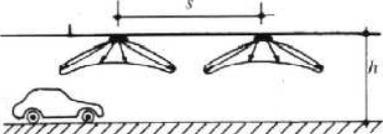
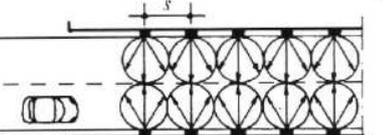
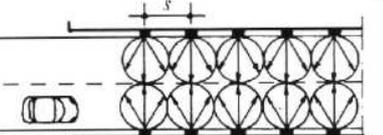
Si noti che nella guida in galleria la visione delle pareti ha una grande importanza: queste infatti fanno da sfondo agli ostacoli, al pari della carreggiata, delimitando il percorso. Esse stesse inoltre costituiscono un potenziale ostacolo. È necessario pertanto che il conducente possa vederle chiaramente e discriminare la linea impressa sulla superficie che indica il limite invalicabile della corsia di marcia.

L'impianto risulta economico in quanto consente di distanziare notevolmente gli apparecchi, come indicato nella Figura 1.4, ma è adottabile solo per i tratti interni dove la richiesta di luminanza sulle superfici è relativamente modesta.

Il flusso convogliato sulla carreggiata e sulle pareti non è infatti sufficiente per il tratto iniziale.

Il secondo caso, flusso asimmetrico contrario, è stato diffusamente adottato negli ultimi vent'anni raccogliendo consensi da parte sia dei progettisti che degli utenti. L'uso così frequente ha permesso di evidenziare i limiti e studiare i conseguenti rimedi alle lacune e ai difetti del sistema. Questo tipo di impianto è nato per rispondere all'esigenza di avere alti rendimenti fotometrici a costi contenuti

soprattutto nei tratti di soglia, dove servono luminanze tanto elevate da rendere gli altri impianti quasi sempre improponibili per l'onerosità economica.

Soluzioni illuminotecniche		Rapporto max interdistanza (s) ed altezza (h) di sospensione: s/h	Lampade impiegate	Efficienza: cd/W
Longitudinale a flusso contrario		2 - 2.5	Vapori di sodio ad alta pressione con bulbo trasparente	4.5
				
Longitudinale a flusso simmetrico		3.5	Vapori di sodio a bassa pressione	4.5
		4	Vapori di sodio ad alta pressione	3.5 - 4
Trasversale a flusso simmetrico		1.5	Tubi fluorescenti Vapori di sodio a bassa pressione	2 4
		2	Vapori di sodio ad alta pressione	2.8

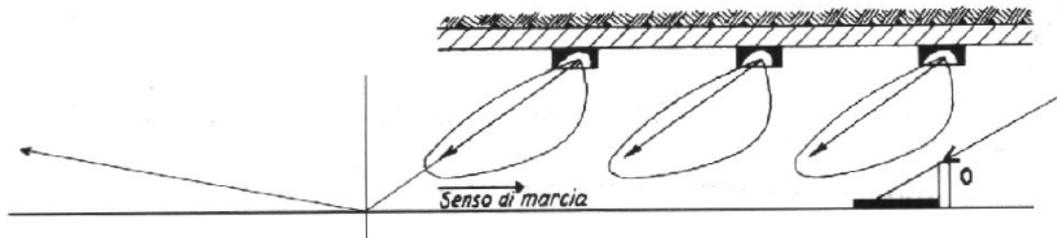
**Figura 1.4 – Principali soluzioni illuminotecniche da adottare nelle gallerie stradali**

È stato valutato che con manti di rivestimento chiari si può ottenere la luminanza di 1 cd/m<sup>2</sup> con soli 4 lux di illuminamento con gli impianti a flusso contrario. Con flusso simmetrico longitudinale i lux salgono a 7. Tenendo conto delle comuni superfici scure, gli illuminamenti necessari ammontano rispettivamente a 12 lx e a 24 lx, cioè più del triplo.

Gli impianti a flusso contrario prevedono solitamente l'impiego di proiettori equipaggiati con lampade di piccolo formato (in genere il tipo a vapori di sodio ad alta pressione), in grado di dirigere una quota del flusso luminoso verso la carreggiata secondo inclinazioni tali da produrre le elevate luminanze richieste.

I proiettori sono installati nella zona della galleria a quota altimetrica più elevata, in corrispondenza dell'asse di mezzzeria delle corsie di marcia. La direzione di mira dell'osservatore ha un'inclinazione, rispetto alla verticale, che non è molto diversa dall'inclinazione dei raggi riflessi provenienti dai proiettori (Figura 1.5): si ottiene in questo modo un alto rapporto tra la luminanza e l'illuminamento.

La superficie così rischiarata funge da sfondo luminoso per gli ostacoli, che sono percepiti per contrasto negativo, scuro su chiaro, con una visione per silhouette. I piani verticali affacciati verso il conducente non ricevono luce direttamente e perciò l'ostacolo appare come una sagoma scura scontornata in rilievo sullo sfondo.



**Figura 1.5 - Schema di impianto con apparecchi a flusso contrario**

Si noti che la sagoma dell'ostacolo proietta la propria ombra sulla superficie; il fatto è praticamente irrilevante per i comuni ostacoli di piccole dimensioni (corpi come pietre, pezzi di pneumatici, oggetti).

L'effetto è notevolmente diverso quando l'ostacolo è un automezzo pesante. L'ombra proiettata dalla parte retrostante di un autotreno è talmente estesa da poter inglobare un veicolo di piccole o medie dimensioni che viaggia dietro il mezzo pesante. La sua sagoma è scura ma viene a mancare lo sfondo chiaro: il veicolo infatti ha davanti a sé la mole dell'autotreno sul cui fronte non arrivano raggi luminosi.

Inoltre la particolare posizione dei proiettori e la presenza al loro interno di sorgenti puntiformi possono determinare riflessioni con effetto abbagliante provenienti dalle lamiere lucide o dai cristalli, variamente inclinati, delle carrozzerie.

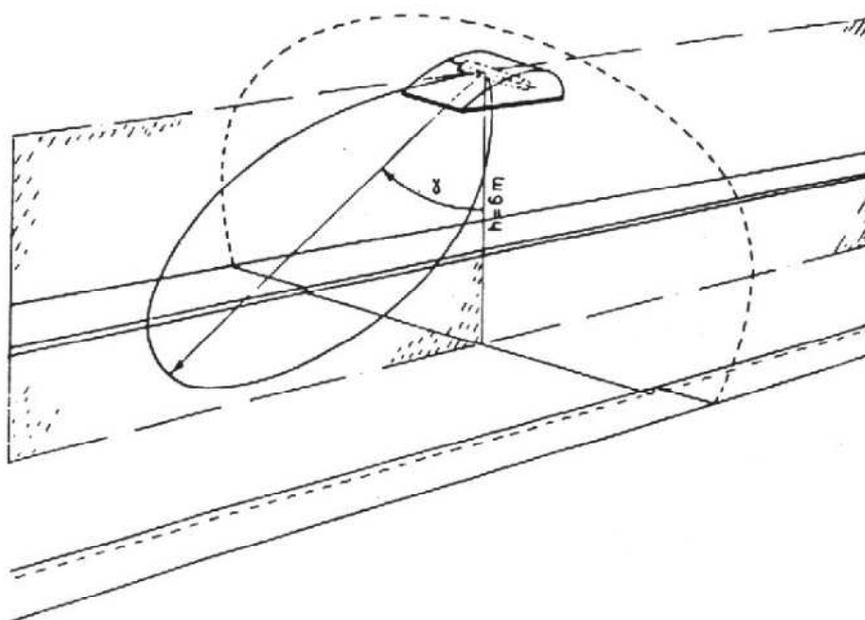
L'abbagliamento può ovviamente verificarsi anche per un errato orientamento della bocca di emissione degli apparecchi stessi. Tuttavia questo inconveniente è facilmente eliminabile.

Per ridurre almeno in parte gli effetti disturbanti esaminati è molto importante che una parte del flusso luminoso sia inviata verso le pareti in modo che la luce che vi si riflette stemperi le ombre e attenui le eventuali riflessioni indesiderate, oltre che

rischiare la fascia delle pareti e rendere nitidamente visibili i due confini laterali della galleria, anche nei tronchi che presentano un andamento curvilineo.

Il rischiaramento delle pareti è indispensabile per consentire il discernimento degli ostacoli nei tratti in curva e in tutte le situazioni in cui lo sfondo dell'ostacolo non sia più costituito dalla carreggiata.

I proiettori dunque dovranno essere selezionati per questo specifico utilizzo. Le prestazioni di un'ottica asimmetrica si discostano da quelle che caratterizzano i proiettori usati nelle grandi aree su sostegni a palo. I modelli per gallerie infatti sono progettati per inviare luce non solo lungo il piano longitudinale ma anche lungo i due piani trasversali (Figura 1.6).



**Figura 1.6 – Schematizzazione delle caratteristiche ottiche di un proiettore per gallerie**

A differenza degli impianti a flusso contrario, la terza soluzione indicata, adottabile anche per gallerie a due corsie di marcia, privilegia proprio l'illuminazione dei piani laterali verticali, cioè le superfici delle pareti. Come è stato notato, sicuramente è meno difficoltoso mantenere la tonalità chiara di questi piani piuttosto che del piano orizzontale della carreggiata. Essi possono svolgere la funzione ottica di piani riflettenti oltre che piani di sfondo per gli ostacoli. L'andamento curvilineo agevola

questa funzione in particolare quando tutta la galleria ha un rivestimento di tonalità chiara, non solo la fascia alta 2 metri. Una parte della luce è inviata direttamente sulla carreggiata e una seconda parte vi giunge per riflessione dalle pareti. Non occorre che le sorgenti luminose siano puntiformi giacché non serve compattare i fasci luminosi. Risultano adeguati all'impiego sia i tubi fluorescenti sia le lampade a vapori di sodio a bassa pressione, dai consumi molto contenuti. Entrambi i tipi di sorgenti presentano tubi di scarica estesi, quindi basse luminanze non abbaglianti. Gli apparecchi non contengono ottiche di complessa costruzione. La soluzione è adottabile sia per il tratto iniziale che per gli altri tratti. La posizione degli apparecchi può essere sia centrale, lungo l'asse di mezzieria della galleria, sia laterale in corrispondenza di ogni corsia di marcia. In quest'ultimo caso ogni intervento manutentivo sugli apparecchi comporterà l'interruzione di una sola corsia di marcia, totalmente o parzialmente.

In ciascuno dei tre tipi di impianti descritti gli apparecchi sono installati in file che corrono lungo direzioni parallele all'asse della galleria. Le interdistanze tra i centri cambiano da zona a zona. Nel tratto di accesso si hanno due o più file e le interdistanze sono minime o nulle (file luminose continue). Nel tratto interno le interdistanze crescono poiché sono più basse le luminanze volute sulla carreggiata e sulle pareti. Il conducente percepisce delle fluttuazioni della luce periodiche; la frequenza di queste fluttuazioni dipende sia dalla velocità di percorrenza sia dalle interdistanze. La luce che giunge ai suoi occhi proviene dagli apparecchi e, per riflessione, dalle superfici semi-speculari che sono nel suo campo visivo, in particolare le superfici delle carrozzerie (lamiere verniciate, cristalli, componenti di materiale plastico) dei veicoli che lo precedono. Se l'impianto è costituito da file continue di luce il problema evidentemente non si pone.

### **1.1.3 L'effetto flicker**

Le lampade montate sulla volta della galleria in file discontinue lungo la sua lunghezza generano un effetto di tremolio della luce (flicker) sul conducente. Esso è dovuto sia alla posizione relativa delle lampade, sia al riflesso delle stesse sul veicolo del conducente e su quelli che lo precedono.

Al fine di contenere tale effetto bisogna considerare i seguenti fattori:

- il numero di variazioni di luminanza in un secondo (frequenza di flicker);
- il tempo di percorrenza;
- la differenza di luminanza in un ciclo.

Mentre il secondo ed il terzo fattore dipendono dall'effetto combinato della velocità di percorrenza, dal passo delle lampade e dalla lunghezza del tunnel, il primo dipende dalle caratteristiche ottiche degli apparecchi di illuminazione.

La frequenza di flicker si può calcolare mediante la seguente relazione:

$$f_{\text{frequenza di flicker}} [\text{Hz}] = \frac{\text{velocità del traffico [m/s]}}{\text{distanza tra gli apparecchi [m]}}$$

Gli studi effettuati e le indagini sperimentali hanno comunque messo in evidenza che le conseguenze fastidiose provocate dall'effetto flicker sono trascurabili per frequenze inferiori a 2.5 Hz e superiori a 15 Hz.

#### **1.1.4 Criteri di installazione degli apparecchi illuminanti**

Il miglior utilizzo del flusso luminoso in galleria, e quindi dell'energia impiegata, si ottiene installando gli apparecchi illuminanti (sia a flusso simmetrico che a flusso contrario) al di sopra della sede stradale, in corrispondenza dell'asse di ciascuna corsia, o del confine tra due corsie (Figura 1.7: a), b), c)). In tali casi, occorre impiegare ottiche particolari che consentano di indirizzare il flusso luminoso sulla carreggiata e sulla parete opposta, in modo da garantire gli elevati fattori di utilizzazione necessari per un ottimo uso dell'energia.

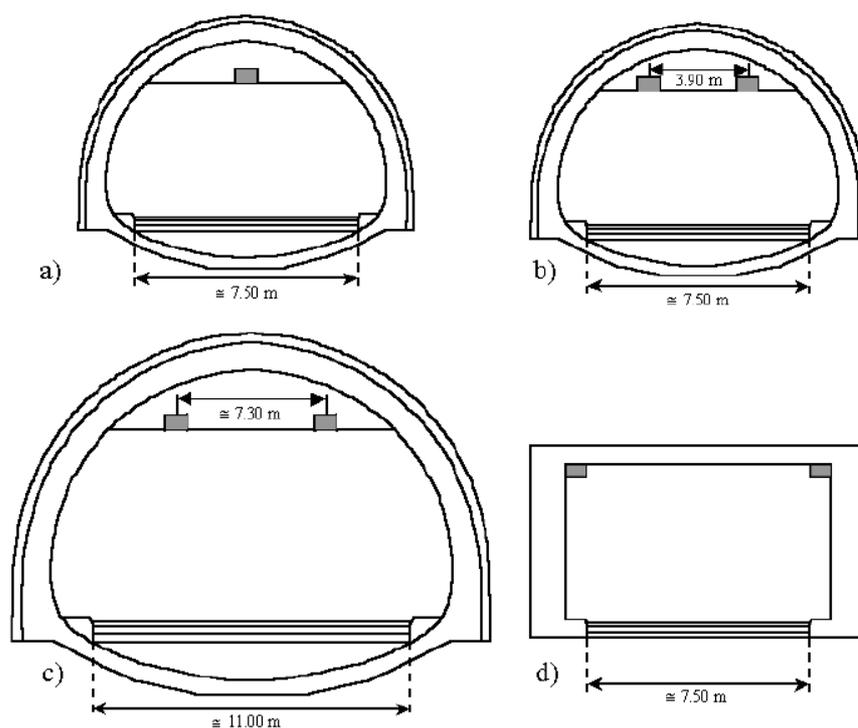
Anche nei casi di installazione laterale dei centri, è utile, allo scopo di contenere l'abbagliamento, che il piano d'emissione del flusso luminoso degli apparecchi, o quanto meno il suo asse trasversale alla galleria, sia disposto orizzontalmente (Figura 1.7: d)).

Nelle gallerie di lunghezza rilevante (oltre i 2 km circa) l'interdistanza fra i centri deve essere scelta in modo da minimizzare l'effetto flicker; poiché la frequenza di maggior disturbo risulta essere compresa fra i 5 e i 10 Hz, l'interdistanza dei centri, espressa in metri, dovrebbe essere al di sotto di  $v/10$  o al di sopra di  $v/5$ , dove  $v$  è la

velocità di marcia in m/s (cioè al di sotto di 1.50 m o al di sopra di 3.50 m, per velocità dell'ordine dei 60 km/h; al di sotto di 3.50 m o al di sopra di 7 m per velocità di 120 km/h e così via). Nei tratti di rinforzo e di transizione, data la loro brevità, non risulta necessario cautelarsi nei confronti del suddetto fenomeno.

Gli apparecchi a flusso contrario impongono in genere interdistanze non superiori a 2.5 volte l'altezza dei centri sulla strada; tali interdistanze sono inferiori a quelle possibili con gli apparecchi con distribuzione simmetrica, per i quali, ove si utilizzino le stesse lampade al sodio ad alta pressione normalmente usate nei tratti iniziali delle gallerie, possono prevedersi rapporti interdistanza/altezza dell'ordine di 4.

Per tale motivo appare opportuno limitare l'impiego degli apparecchi a flusso contrario al tratto iniziale delle gallerie (tronco di rinforzo e tronco di transizione).



**Figura 1.7 - Disposizione dei centri luminosi nelle gallerie: a) galleria a due corsie nella quale non è prevista l'interruzione di una corsia per poter effettuare la manutenzione dei centri; b) galleria a due corsie in cui è effettuabile l'interruzione di una corsia per la pratica di manutenzione degli apparecchi luminosi; c) galleria a tre corsie; d) galleria dove, per esigenze particolari, il posizionamento dei centri avviene alla sommità delle pareti.**

### **1.1.5 Sorgenti luminose**

Le lampade più adatte ad essere utilizzate negli impianti di illuminazione in galleria sono quelle che associano una lunga durata ad un'alta efficienza.

Le lampade a vapori di sodio a bassa pressione presentano le caratteristiche suddette ed inoltre consentono un più rapido adattamento dell'occhio alle condizioni di illuminazione artificiale rispetto alle sorgenti luminose a luce bianca. Queste lampade, inoltre, secondo esperimenti compiuti in Giappone, consentono una maggiore distanza di visibilità in presenza di fumi prodotti dai gas di scarico.

Per l'illuminazione dei tratti iniziali di galleria si prestano meglio le lampade al sodio ad alta pressione, che presentano, rispetto alle lampade a bassa pressione, più elevate concentrazioni di potenza, una maggiore durata, un decremento del flusso luminoso nel tempo più contenuto, anche se l'efficienza luminosa è un po' inferiore.

Anche i tubi fluorescenti sono abbastanza diffusamente impiegati, specialmente nell'illuminazione notturna delle gallerie, e per quella diurna nel tratto interno (cioè il tratto successivo ai due tratti iniziali di rinforzo e di transizione). I tubi fluorescenti si prestano, per la loro modesta potenza unitaria, ad essere disposti in fila continua ad interdistanze limitate, e assicurano i bassi livelli di luminanza richiesti nel tratto interno delle gallerie con buona uniformità.

È opportuno che ogni circuito di illuminazione sia dotato di un contatore, allo scopo di far conoscere lo stato d'invecchiamento delle lampade: ciò consente di stabilire il momento del ricambio delle lampade circuito per circuito.

L'esperienza indica come ottimale, per le lampade al sodio ad alta pressione di potenza uguale o superiore ai 100 W, un periodo di funzionamento, fra due successivi ricambi, pari a 8000 - 10000 ore, in assenza di dispositivo di regolazione della tensione.

### **1.1.6 Controllo degli impianti di illuminazione in galleria**

Osserviamo preliminarmente che il valore di progetto della luminanza ( $L(0)$ ) si manifesta realmente soltanto per poche centinaia di ore l'anno; per oltre il 50% delle ore diurne, la luminanza esterna è dell'ordine del 20-25% di quella massima e per il

30% è dell'ordine del 10% del valore massimo. Ai fini di un impiego razionale dell'energia, occorre molta attenzione alle condizioni di funzionamento maggiormente frequenti, che sono quelle in cui la luminanza esterna è inferiore al 25% di quella massima.

Risulterà pertanto necessario equipaggiare l'impianto di illuminazione con un sistema di fotocellule poste sia all'esterno che all'interno del tunnel. I valori rilevati da questi strumenti saranno elaborati da un sistema informatico il quale, al fine di realizzare le condizioni ottimali, agirà su appositi variatori di tensione. Questi ultimi, variando la tensione di alimentazione dell'impianto, modificheranno di conseguenza il valore del flusso luminoso delle lampade.

Una soluzione impiantistica soddisfacente e di frequente applicazione, prevede l'utilizzo di gruppi di tre lampade di ugual potenza, una delle quali è parzializzabile in modo da produrre un flusso luminoso variabile in continuo tra il 20% ed il 100% (oppure due flussi pari al 50% ed al 100%); la seconda e la terza lampada sono accese o spente. La potenza delle tre lampade di ogni gruppo e l'interdistanza massima fra due lampade successive poste sul medesimo allineamento non può superare un certo valore limite se si vuole garantire una soddisfacente uniformità di luminanza longitudinale.

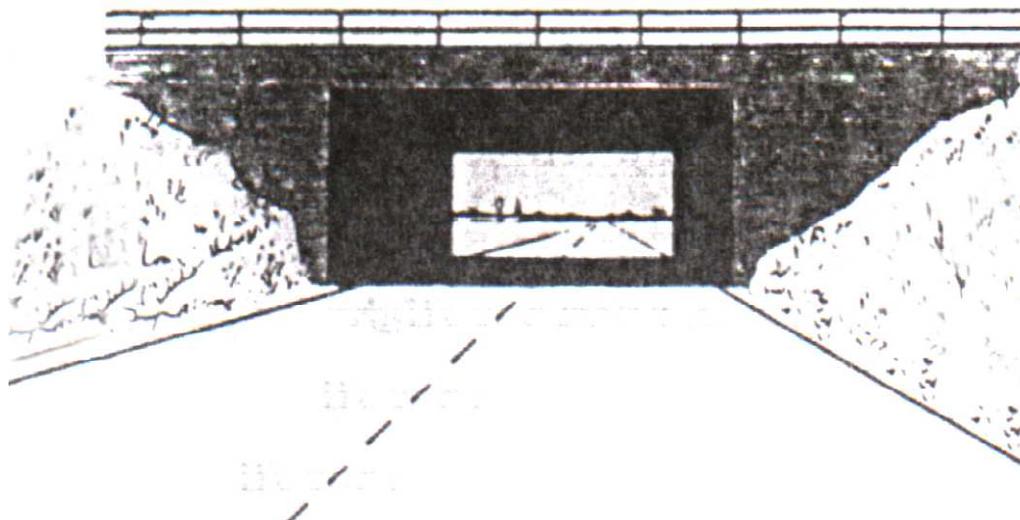
Si deve però rilevare come la parzializzazione dei centri luminosi origina forti penalizzazioni nell'efficienza: una lampada al sodio ad alta pressione, ad esempio, parzializzata al 50%, presenta un'efficienza inferiore del 20% rispetto a quella ad accensione piena. Nella pratica progettuale pertanto, la soluzione più conveniente appare quella in cui, in qualsiasi stadio di accensione, i centri luminosi parzializzati costituiscono una modesta percentuale del totale degli apparecchi luminosi installati.

[2] [3]

### **1.1.7 Tecniche di illuminazione per le gallerie corte**

Le gallerie corte sono state definite come quelle gallerie il cui portale d'uscita è visibile da una posizione situata una cinquantina di metri prima del portale d'imbocco.

Gli ostacoli che si trovano all'interno della galleria, specialmente nelle gallerie molto corte, risultano quasi tutti visibili al conducente come sagome scure sullo sfondo chiaro del portale (Figura 1.8). La galleria appare non come un “buco nero”, ma come una “cornice nera”.

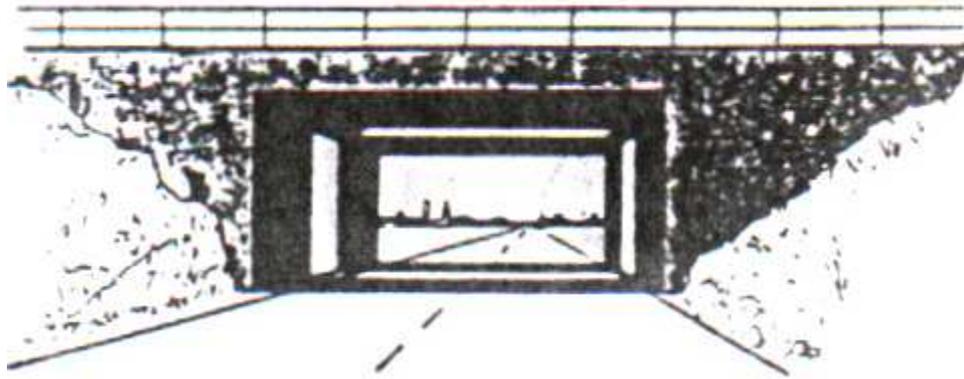


**Figura 1.8 – Effetto di “cornice nera” dovuto alla presenza di una “galleria corta” [3]**

Le gallerie “corte”, ma di lunghezza superiore ai 100 m, vengono illuminate come quelle lunghe: infatti in tali casi il portale d'uscita copre solo una porzione assai modesta del campo visivo del conducente: la sua influenza sul livello di luminanza cui sono adattati gli occhi del conducente risulterà pertanto assai scarsa.

Le gallerie rettilinee di lunghezza compresa fra 50 m e 100 m e le gallerie in curva di lunghezza superiore a 25 m vanno illuminate in modo che la luminanza all'interno sia costante per tutta l'estensione della galleria e di livello pari ad un decimo di quella esterna.

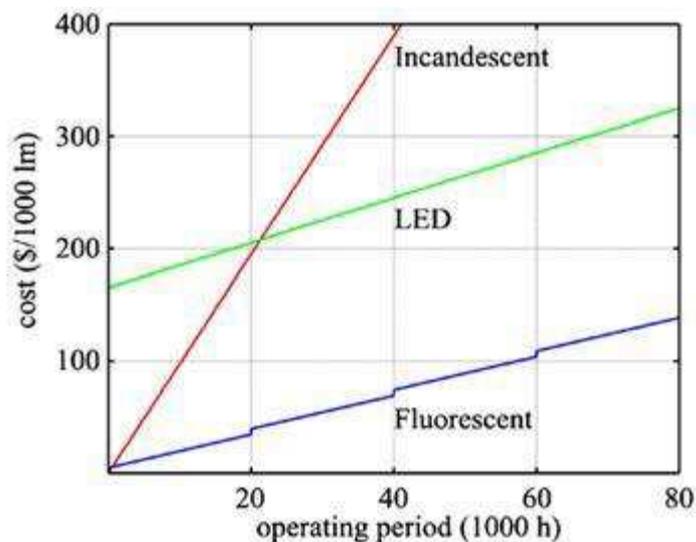
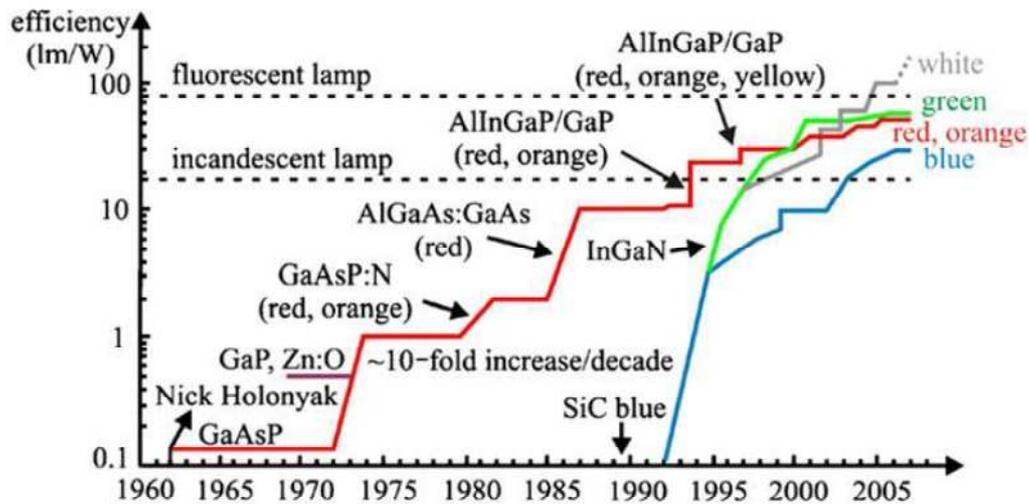
In gallerie molto corte (appena superiori a 50 m se rettilinee, o a 25 m se curvilinee) si può pure ricorrere alla creazione di una striscia luminosa trasversale, di luminanza uguale a quella esterna, sulle pareti e sulla pavimentazione (Figura 1.9). La striscia luminosa può essere attuata con luce artificiale o naturale; in questo secondo caso, con una fessura sul tetto di separazione fra le carreggiate o fra i binari del viadotto sovrastante. Con la striscia luminosa trasversale si fraziona lo sfondo buio su cui si proiettano gli eventuali ostacoli, consentendone la visibilità. [3]



**Figura 1.9 - Effetto di una striscia luminosa trasversale in un breve sottopassaggio [3]**

## **1.2 I LED come soluzione tecnologica per l'illuminazione delle gallerie stradali**

Dopo circa un secolo di rapido sviluppo, i LED (Light Emitting Diodes, “Diodi che emettono luce”) iniziano ad essere considerati pronti dalla comunità scientifica per sostituire le lampade a incandescenza e fluorescenti. La definizione dei fattori rilevanti che influiscono sulla qualità di queste nuove sorgenti rappresenta un aspetto chiave per la progettazione e la produzione di tali dispositivi elettronici. Le prospettive sono di grande interesse, soprattutto se si considera che il primo LED ad emissione luminosa fu introdotto solo nel 1962, ed era caratterizzato da un'emissione luminosa molto debole. Da quel momento, la costante implementazione della tecnologia LED ha prodotto miglioramenti incredibili in termini di efficienza luminosa, spettro di emissione, intensità, durata di vita, costo, affidabilità e potenzialità applicative (Figura 1.10). [5] [6]



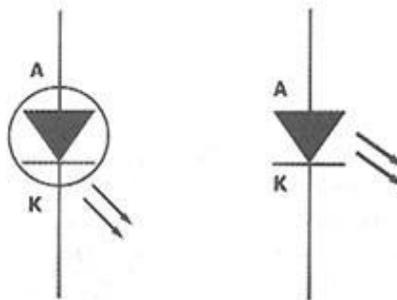
**Figura 1.10 – Sviluppo dei LED in termini di efficienza luminosa negli ultimi 40 anni (in alto, fig. a), e confronto tra i costi di funzionamento di sorgenti LED, ad incandescenza e fluorescenti (in basso, fig. b) [5]**

### 1.2.1 Struttura e funzionamento dei LED

Un LED è per definizione un diodo che emette luce. Un diodo è un dispositivo elettronico a due terminali che consente il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione, con l'entità della corrente che dipende dalla differenza di potenziale ai capi del dispositivo.

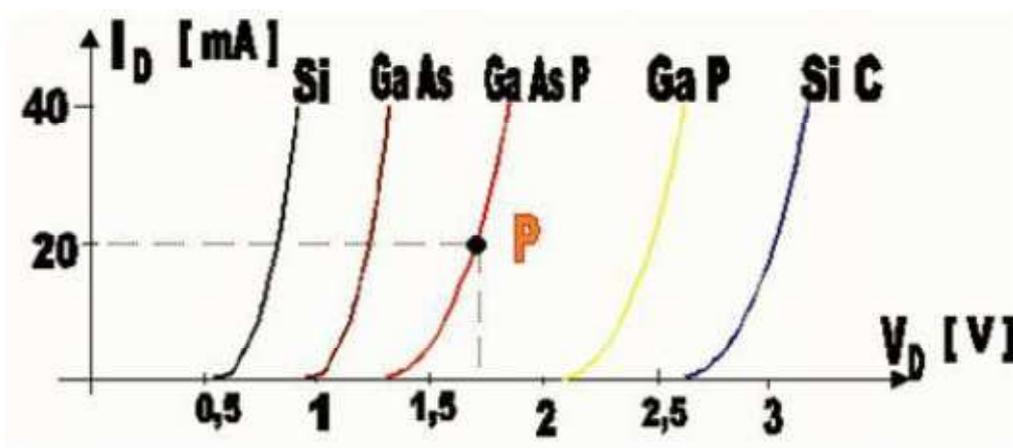
Dal punto di vista fisico, un LED è un chip di materiale semiconduttore impregnato o drogato con impurità per formare una giunzione positivo-negativo (P-N): il polo

positivo di tale giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo. La caratteristica principale di questi dispositivi è quella di lasciarsi attraversare dalla corrente in un solo verso, come un normale diodo, al quale si aggiunge la capacità di emettere luce. In Figura 1.11 è rappresentato il simbolo circuitale del diodo, che ne esprime la funzione. Avendo un terminale positivo ed uno negativo, il LED può essere inserito nel circuito elettrico in un solo senso.



**Figura 1.11 – Rappresentazione del funzionamento del LED**

Anche se il diodo LED è inserito all'interno del circuito nel giusto verso, vi è conduzione di corrente solo quando la tensione agli estremi supera una tensione di soglia, che coincide con la barriera di potenziale  $V_s$  (Figura 1.12). Nel caso in cui per errore esso venga inserito con le polarità invertite non vi è conduzione di corrente, salvo quella delle cariche minoritarie, che è una corrente molto piccola; per voltaggi relativamente bassi si verifica rottura istantanea. [5] [6]



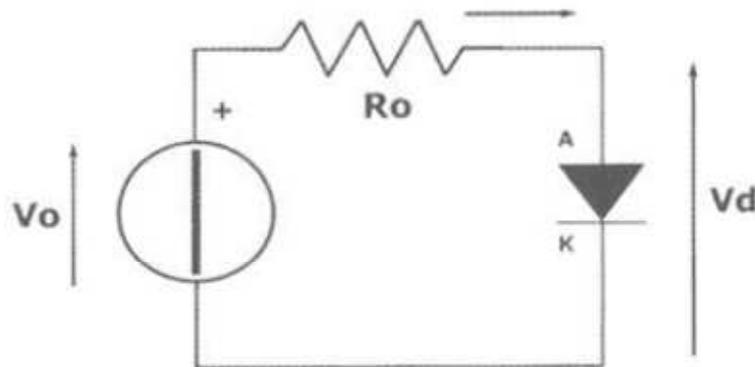
**Figura 1.12 – Barriera di potenziale  $V_s$  per alcuni semiconduttori drogati**

### 1.2.2 Alimentazione dei sistemi di illuminazione a LED

L'alimentazione del singolo LED avviene in corrente continua (CC), la quale è caratterizzata da un flusso di elettroni di intensità e direzione costante nel tempo e può essere prodotta a partire da una corrente alternata (CA) con un processo di raddrizzamento effettuato con diodi o ponti raddrizzatori. Questi dispositivi eliminano la componente negativa della CA, creando una corrente non continua, ma unidirezionale pulsante, ovvero composta idealmente da una corrente alternata sovrapposta ad una continua. Un condensatore provvede poi a livellare il segnale, fornendo una corrente quanto più possibile vicina ad un valore continuo. Poiché i LED hanno un voltaggio bassissimo, è quasi sempre necessario calcolare una resistenza da prevedere all'interno del circuito. Per calcolarla, dalla nota legge di Ohm:

$$I = \frac{V_0 - V_d}{R_0}$$

dove (Figura 1.13) I è la corrente (uguale o inferiore a quella della curva caratteristica),  $V_0$  è il voltaggio alla sorgente,  $V_d$  è la caduta di tensione al diodo,  $R_0$  è la resistenza del circuito. [5] [6]



**Figura 1.13 – Diodo in polarizzazione diretta inserito in un circuito con resistenza  $R_0$**

### 1.2.3 Emissione luminosa

L'emissione di luce nei LED è dovuta al fenomeno dell'elettroluminescenza, in cui i fotoni sono prodotti nella giunzione P-N dalla ricombinazione degli elettroni e delle

lacune: la luce di queste 15 sorgenti è detta anche Solid State Lighting (SSL), illuminazione allo stato solido, proprio perché è un corpo solido che emette luce.

Come accennato precedentemente, gli elettroni nei diversi orbitali possiedono differenti quantità di energia, con l'energia generalmente proporzionale alla distanza dell'orbita dal nucleo dell'atomo. Quando un elettrone salta da un livello energetico inferiore ad uno superiore assume quindi un livello di energia superiore. Questa energia assorbita dalla corrente elettrica viene poi riemessa sotto forma di fotoni nel momento in cui l'elettrone ridiscende a un livello energetico inferiore. Poiché i fotoni sono emessi a frequenze specifiche, un dislivello energetico alto produrrà un fotone ad alta frequenza e quindi con lunghezza d'onda corta. Anche se il rilascio di quanti di energia si verifica in tutti i diodi, essi sono visibili, cioè sono fotoni, solo quando il diodo consiste di materiali che rilasciano fotoni a lunghezze d'onda visibili.

La giunzione P-N della maggior parte dei LED è realizzata con Arseniuro di Gallio con Fosforo di Gallio, entrambi materiali in grado di emettere radiazioni luminose quando vengono attraversati da corrente elettrica: il valore di tale corrente è generalmente compreso tra 10 e 30mA. [5] [6]

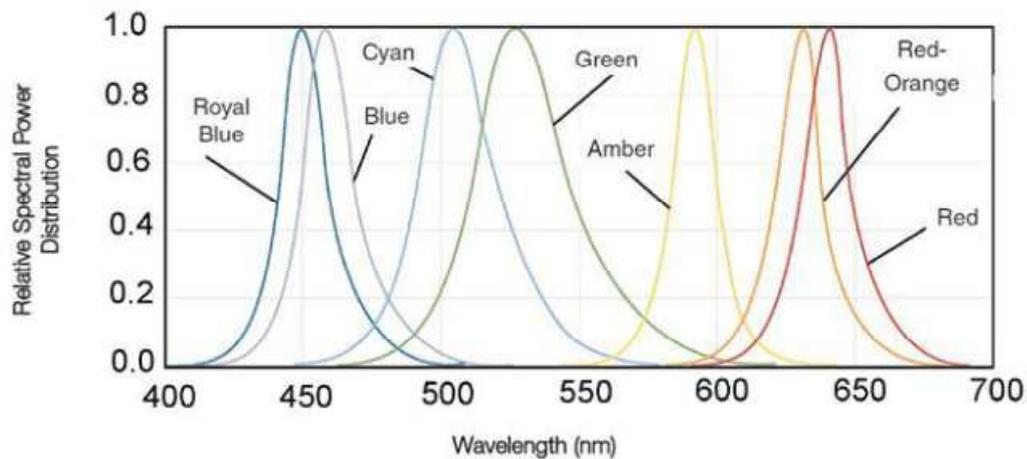
### **1.2.3.1 Colore della luce emessa**

A differenza delle lampade a incandescenza e fluorescenti, i LED emettono luce quasi monocromatica, cioè ad una specifica lunghezza d'onda. A determinare la lunghezza d'onda della luce emessa concorrono il materiale utilizzato per la creazione della giunzione P-N e il livello di drogaggio di tale materiale. In Figura 1.14 viene riportata la distribuzione di potenza spettrale relativa per vari LED. [5] [6]

### **1.2.3.2 Generazione della luce bianca**

Esistono diversi modi in cui i LED vengono utilizzati per produrre luce bianca, ma le tecnologie impiegate sono fondamentalmente due, come mostrato in Figura 1.15: si possono mescolare LED monocromatici oppure utilizzare dei fosfori che convertano lunghezze d'onda più corte (UV o blu) in blu, verde, giallo o rosso.

Esempi di spettri di LED a luce bianca sono presentati in Figura 1.16.



**Figura 1.14 – Intensità relativa e lunghezza d'onda per una temperatura di giunzione di 25°C**

I LED multichip sono LED che contengono 2, 3 o 4 LED monocromatici e possono produrre luce di colore variabile tramite software oppure luce bianca (Figura 1.17). Solitamente i LED bicromatici sono costituiti da un LED rosso e da uno blu; quelli tricromatici da LED rosso, verde e blu (RGB) oppure ambra, bianco e blu (AWB); quelli quadricromatici da rosso, verde, blu e ambra (RGBA).

I LED con fosfori, invece, contengono una colla che viene colata sul chip UV o a luce blu e che contiene cristalli, in grado di convertire tutte le parti dell'emissione dello spettro in luce visibile: questo sistema fa diminuire l'efficienza luminosa, perché parte dell'energia elettrica assorbita è dissipata durante la conversione. Nel caso di LED UV, sul chip vengono colati fosfori RGB, mentre 17 nel caso di LED blu vengono utilizzati solo fosfori gialli, oppure vengono utilizzati più fosfori, allo scopo fornire uno spettro di emissione globale più ampio e con maggiore qualità cromatiche. [5] [6]

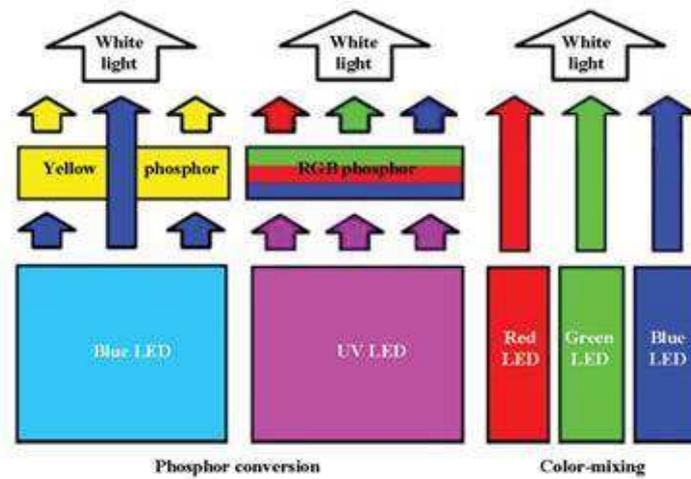


Figura 1.15 – Modalità di generazione di luce bianca con i LED

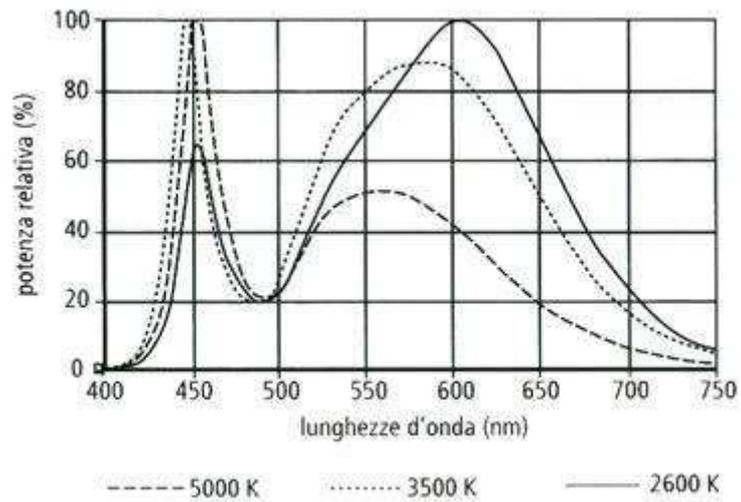
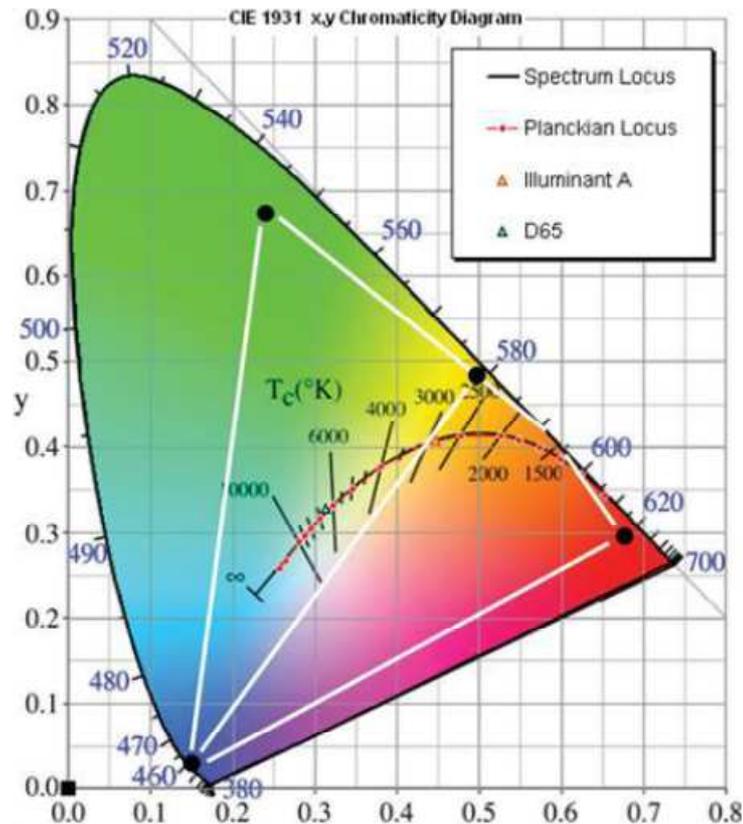


Figura 1.16 – Spettro di LED bianco a varie temperature correlate di colore (CCT)

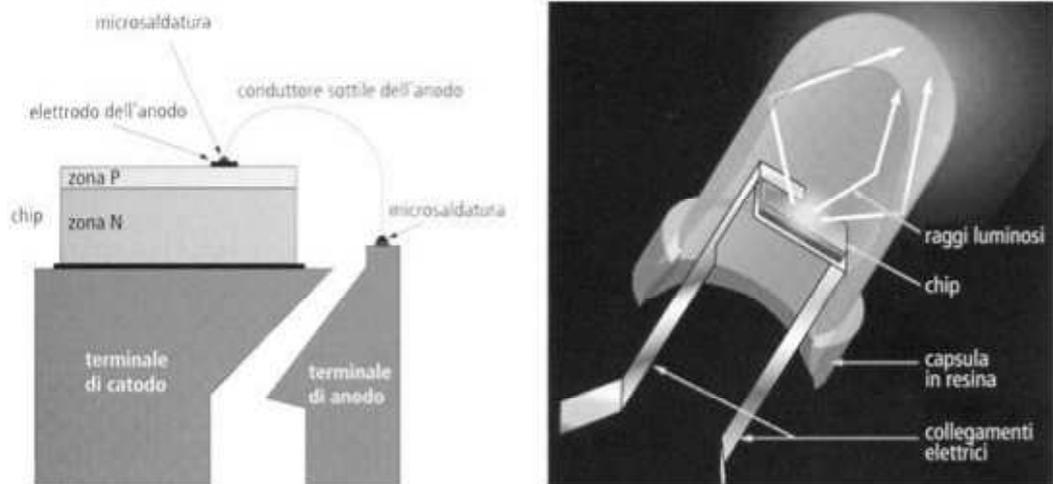


**Figura 1.17 – Colori ottenibili con LED multichip**

### 1.2.4 Tipologie di LED e loro caratteristiche

Sono molti i LED attualmente disponibili sul mercato, ma si possono facilmente classificare in tre categorie:

- *LED THT (Through Hole Technology)*: protetti da capsule tonde di materiale plastico di diametro 3 o 5 millimetri, sono i più piccoli esistenti, ed il loro uso principale è quello di spie luminose nei più svariati dispositivi elettronici (Figura 1.18). La sigla THT significa “tecnologia da foro”, proprio per indicare che si posizionano all’interno di buchi per svolgere la loro funzione di segnalazione. Un’altra applicazione molto diffusa è quella con diodo che emette nell’infrarosso (IR), utilizzato come telecomando a distanza, dalle comuni tv fino ad arrivare a sistemi molto più complessi di trasmissione dati.



**Figura 1.18 – Struttura del LED THT**

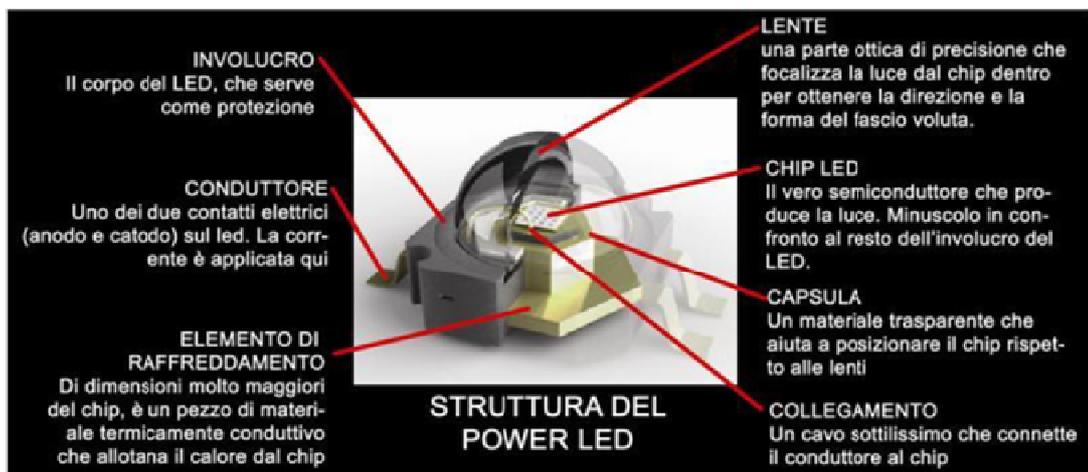
- *LED SMD (Surface Mounted Device) o SMT (Surface Mounted Technology):* si installano in circuiti montati su una base isolante. Questi circuiti sono forati per consentire il passaggio degli elettrodi, le cui saldature sono effettuate sulla faccia inferiore della base. Si tratta di componenti in cui gli elettrodi non sporgono verso il basso, ma escono dai lati del chip. Questo tipo di LED si presenta come un minuscolo box con una faccia da cui viene emessa la luce, la faccia opposta o laterale che funge da base d'appoggio, mentre le rimanenti facce laterali sono munite di anodo e catodo. Prevalentemente utilizzati in circuiti in miniatura, come ad esempio quelli dei cellulari, sono una categoria importante perché hanno un'efficienza luminosa molto elevata (1-6lm/W), ragion per cui si cominciano ad impiegare anche nella realizzazione di apparecchi LED per l'illuminazione generale.
- *LED HB (High Brightness) o Power LED o High Power LED:* sono sicuramente la tipologia di illuminazione allo stato solido che ha tutte le caratteristiche per l'applicazione nell'illuminazione generale di interni ed esterni. Le caratteristiche principali di questa categoria di LED sono quelle di avere una gamma di potenze di funzionamento nettamente superiore alle precedenti categorie e di essere, come dice il nome stesso, particolarmente brillanti.

Complessivamente, i Power LED si presentano come un minuscolo box con una faccia dalla quale viene emessa la luce, mentre la faccia opposta o

laterale funge da base d'appoggio; le facce laterali sono munite di anodo e catodo (Figura 1.19).

Il semiconduttore utilizzato è sempre quello sintetico tipico della colorazione da realizzare: per ottenere forti correnti si gioca sul drogaggio, ossia sulla densità di atomi droganti introdotti nel reticolo cristallino, oltre che sulla dimensione della giunzione (il chip di un LED high-power è più grande di quello di uno tradizionale destinato a funzionare da spia luminosa).

Esistono due tipi di Power LED: il primo è basato sull'uso di AllInGaP, cioè Alluminio Indio Gallio Fosforo, che produce luce arancio-rosso, arancio, giallo e verde; il secondo è basato sull'uso di InGaN (Nitrato di Indio e Gallio), utilizzato per produrre luce blu, blu-verde, verde e, in combinazione con fosfori, bianca.



**Figura 1.19 – Struttura del Power LED**

Dal punto di vista dei progressi nell'alimentazione delle sorgenti LED, nel 2008 sono stati commercializzati bulbi LED con convertitore miniaturizzato integrato, mentre nel 2007 in Corea sono state introdotte le prime sorgenti LED che utilizzano direttamente corrente alternata, senza conversione: questi LED, chiamati Acriche, mostrati in Figura 1.20, inizialmente erano di 10 tipi diversi con potenza di 2W, ognuno dei quali può essere considerato come una stringa di LED HB messi in serie; le stringhe sono fabbricate in modo da avere le giunzioni P-N in serie, per cui il voltaggio richiesto è relativamente alto, simile al voltaggio di rete.



**Figura 1.20 – Dispositivi con LED Acriche**

A questi, sono seguiti i LED di tipo Xylite™, Figura 1.21, che possono essere alimentati sia in corrente continua che alternata. La loro caratteristica principale è quella di essere assemblati in numero pari all'interno di un circuito parallelo in configurazioni opposte: in questo modo, vengono utilizzati entrambi gli emicicli della corrente alternata, in una fase viene alimentato un circuito, nella fase opposta l'altro circuito.



**Figura 1.21 – Xylite LED**

L'efficienza luminosa dipende dal tipo di alimentazione e dalla temperatura di colore: in linea generale si può dire che i LED a corrente continua sono più efficienti di quelli a corrente alternata o Acriche, e che quelli a temperature di colore più basse sono meno efficienti di quelli a temperature di colore superiori. L'efficienza luminosa media oscilla tra 80 e 100 lumen/W per i LED a corrente continua, mentre è circa di 40-60lm/W per LED alimentati a corrente alternata. I dati relativi al 2007 pubblicati dall'US Energy Department dichiaravano un'efficienza di 47-64 lm/W per

LED con una temperatura di colore a 5000K forniti già di driver e di 25-44 lm/W per LED con una temperatura di colore di 3300K, sempre provvisti di driver. Sono attualmente allo studio LED high-power con un'efficienza di 130-150lm/W, ma non sono stati ancora commercializzati. [5] [6]

### **1.2.5 Ottiche**

Normalmente i LED vengono prodotti già muniti di una capsula di protezione, che funge anche da lente: esistono diversi tipi di ottiche, a seconda dell'applicazione. È poi possibile che si abbia la necessità di modificare la forma del solido fotometrico uscente dal diodo, applicando ulteriori ottiche all'apparecchio che contiene i LED.

Le ottiche montate direttamente sul diodo vengono chiamate ottiche primarie, mentre le ottiche che vengono montate al di sopra di quelle primarie prendono il nome di ottiche secondarie.

#### **1.2.5.1 Ottiche primarie**

Le ottiche primarie sono essenzialmente di tre tipi (Figura 1.22):

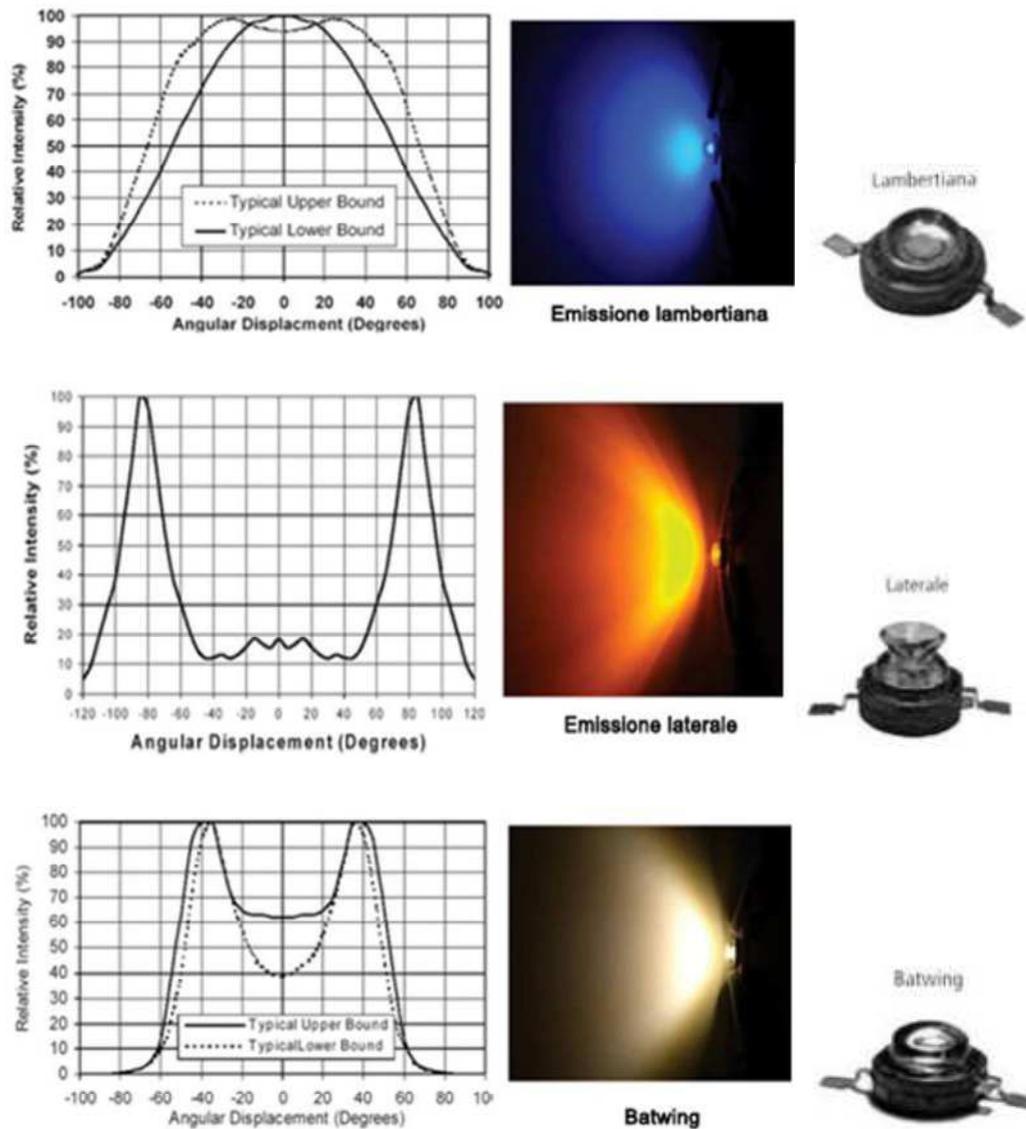
- lambertiana, in cui il fascio di emissione è distribuito secondo un angolo ampio;
- laterale, in cui il fascio è concentrato ai lati;
- *batwing*, in cui l'emissione è concentrata ad un angolo intermedio.

#### **1.2.5.2 Ottiche secondarie**

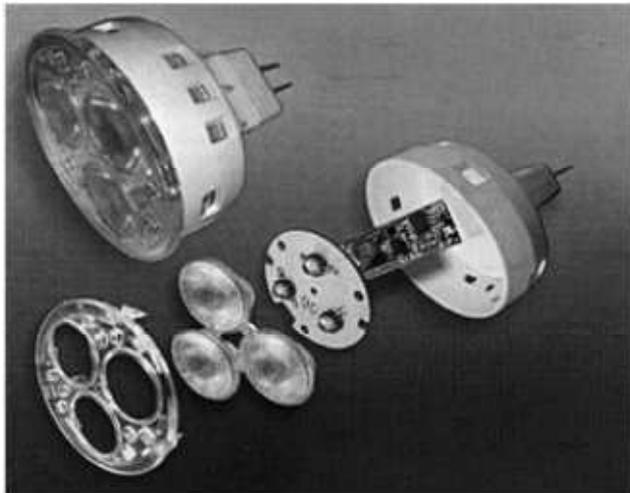
Le ottiche secondarie sono tutte quelle componenti aggiuntive che sono aggregate al LED e che integrano il funzionamento delle ottiche primarie (Figura 1.23). L'ottica secondaria deve essere progettata tenendo conto delle caratteristiche emissive dell'ottica primaria, in particolare si considera l'estensione apparente, cioè l'estensione effettivamente "vista" del chip o del multi chip.

Essa può essere diversa da quella reale, a causa dell'ingrandimento dovuto alla lente di ricopertura: più è piccolo il chip apparente e migliore è il rendimento dell'ottica secondaria, inteso come rapporto tra il flusso luminoso erogato dal LED completo di ottica secondaria e il flusso erogato dal chip con ottica primaria.

E' preferibile utilizzare LED privi di lenti quando si prevede l'abbinamento con un'ottica secondaria: in assenza di quest'ultima conviene sfruttare al massimo il flusso del chip con i modelli forniti di lenti.



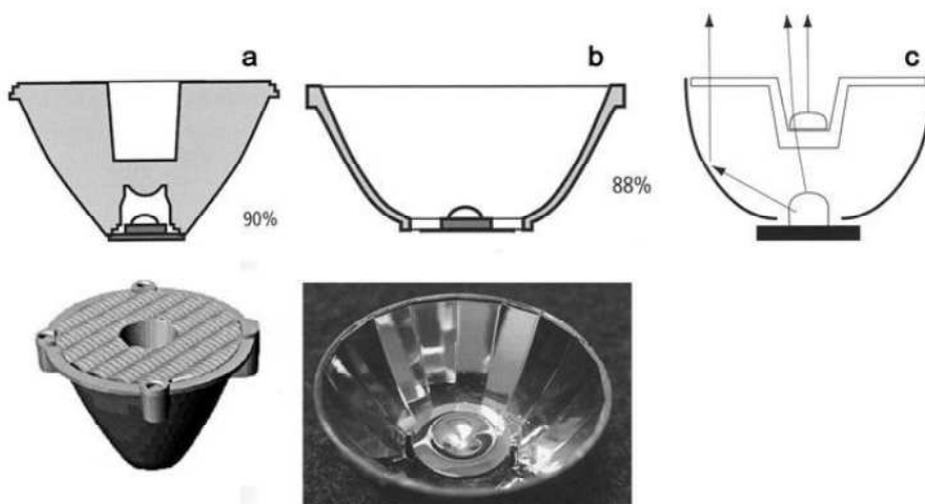
**Figura 1.22 – Principali conformazioni del fascio luminoso in seguito all'applicazione delle ottiche primarie dei power LED**



**Figura 1.23 – Ottiche secondarie a riflettore di piccolo formato adatte per Power LED su circuito stampato fornito di ottica primaria**

Esistono tre tipi di ottiche secondarie (Figura 1.24):

- ottiche piene, in materiale plastico, funzionanti principalmente in riflessione totale interna (da cui l'acronimo TIR – *Total Internal Reflection*);
- ottiche vuote, in materiale plastico funzionanti in riflessione speculare (ottiche Reflector) al pari di piccoli riflettori;
- ottiche ibride, costituite da un riflettore cavo e da un elemento trasparente integrato con funzione di lente. [5] [6]



**Figura 1.24 - Ottiche secondarie. (a) piene o TIR, (b) vuote, (c) ibride**

### 1.2.6 Proprietà ottiche dei LED e metodi per misurarle

I LED, intesi come sorgenti per l'illuminazione di ambienti interni ed esterni, sono definiti e classificati in base alle caratteristiche fotometriche, ottiche, elettriche ed energetiche:

- **flusso luminoso (lm)**: Il flusso luminoso (lumen) è la potenza emessa dalla sorgente, e viene generalmente definito come il prodotto tra la potenza emessa dalla sorgente luminosa e il coefficiente di visibilità per ciascuna lunghezza d'onda di emissione;
- **intensità luminosa (lm/sr o cd)**: I LED sono comunemente caratterizzati dall'intensità luminosa, che generalmente varia con l'angolo di vista, e dipende dalle dimensioni dello strumento di misura e dalla sua distanza dalla sorgente, per cui risulta necessario stabilire una direzione e una distanza per misurare l'intensità. Il TC 2-46 della CIE suggerisce tre assi di riferimento per le misurazioni (Figura 1.25): l'asse ottico cioè l'asse in direzione del centroide del tracciato della radiazione ottica, l'asse del picco di intensità, l'asse meccanico cioè l'asse in direzione dell'asse di simmetria del corpo emettente. Ognuno di questi tre assi può essere utilizzato come asse di riferimento per la misura dell'intensità, ma l'asse ottico e l'asse del picco di intensità possono essere determinati solo dopo aver misurato l'andamento della radiazione ottica.

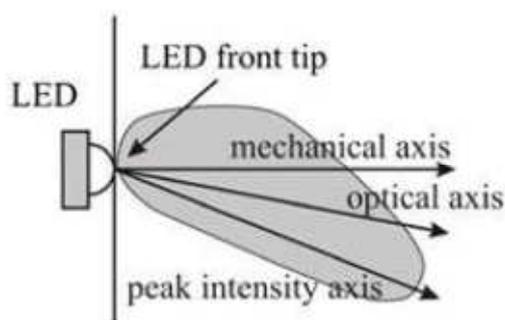
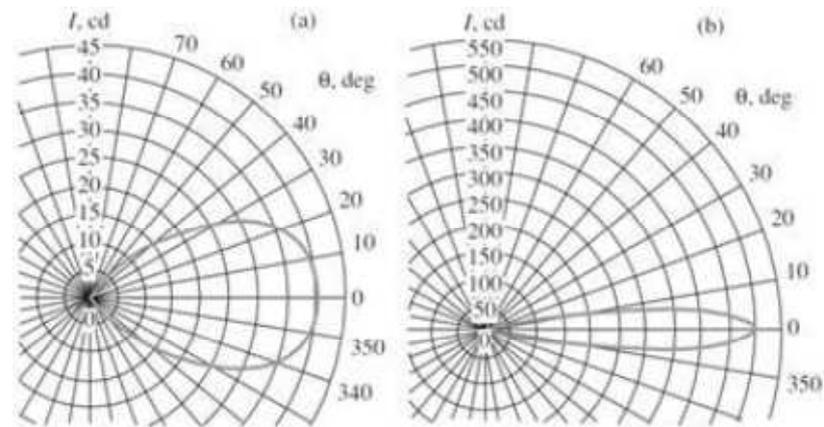


Figura 1.25 – I tre assi dei LED definiti dalla CIE

- **distribuzione dell'intensità luminosa**: Le tipiche specifiche dei LED includono informazioni sull'intensità luminosa in funzione di uno degli assi di riferimento sopracitati e dell'angolo  $\theta_{1/2}$ , definito come l'angolo per cui il

valore del profilo di intensità polare è metà del valore nella direzione dell'asse di riferimento (tipicamente varia da 9 a 120°). Le specifiche fornite si applicano al campo lontano dei LED, dove la distribuzione di intensità normalizzata non cambia con la distanza dalla sorgente, (Figura 1.26);



**Figura 1.26 – Esempi di curve fotometriche di LED**

- **colore della luce emessa:** Il colore dei LED è comunemente definito dalle due coordinate cromatiche (x,y) derivate dalle coordinate (X,Y,Z) dello spazio colore CIE. Il colore dei LED bianchi è inoltre spesso specificato sotto forma di temperatura correlata di colore (CCT), che è definita come la temperatura del corpo nero che emette luce dello stesso colore percepito. Più spesso, però, il colore dei LED è specificato attraverso la lunghezza d'onda di picco e la larghezza dello spettro (tutta la larghezza o metà della larghezza massima);
- **efficienza luminosa:** L'efficienza luminosa di una sorgente LED è il rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza assorbita: essa è considerevolmente diversa dall'efficienza luminosa di un apparecchio LED, perché questo può essere costituito da una o più sorgenti luminose, drive elettronici e altri componenti per la protezione e la distribuzione della luce, i quali fanno calare l'efficienza globale;
- **indice di resa cromatica:** altro parametro importante per la performance di una sorgente luminosa che valuta la capacità della sorgente di rendere i veri colori di un oggetto. Secondo quanto proposto dal CIE TC 1-62, l'Indice di

Resa Cromatica non è applicabile per prevedere la resa cromatica di un set di sorgenti luminose tra cui i LED, e per questo ha raccomandato lo sviluppo di un nuovo indice, attualmente in fase di studio e ricerca;

- **dipendenza dalla temperatura e la resistenza termica:** La resistenza termica dell'involucro influisce significativamente sulla temperatura di giunzione di un LED: essa è la somma della resistenza dell'involucro interno (dalla giunzione alla capsula) e di quella esterna (dalla capsula verso l'ambiente). Mentre la resistenza termica interna è determinata dalle caratteristiche di progetto dell'involucro e dai materiali, la resistenza esterna può essere ulteriormente ridotta attraverso l'uso di un dissipatore di calore, con temperatura minore di quella di giunzione;
- **tensione di alimentazione;**
- **caduta di potenziale agli estremi del diodo o del sistema;**
- **corrente di alimentazione.**

Tre fattori principali influenzano la qualità dei LED: l'iniziale variabilità delle caratteristiche ottiche ed elettriche, la dipendenza di tali caratteristiche dalla temperatura e dalla corrente elettrica, e la degradazione spettrale. [5] [6]

### **1.2.7 Punti di forza e di debolezza della tecnologia a LED**

La ricerca sui LED è in forte sviluppo, in quanto queste sorgenti presentano molti vantaggi rispetto alle tradizionali sorgenti per illuminazione. Esse presumibilmente saranno le sorgenti luminose del futuro, nonostante abbiano dei limiti, attualmente ancora oggetto di ricerca, che ne impediscono al momento l'impiego su larga scala.

I punti di forza dei LED possono essere così sintetizzati:

- *risparmio energetico:* a parità di potenza assorbita, il LED produce un flusso luminoso di circa cinque volte superiore a quello delle lampade ad incandescenza e alogene.
- *scarso calore sviluppato:* l'efficienza elevata è legata al fatto che solo un piccola parte dell'energia assorbita è dissipata sotto forma di calore, a differenza delle lampade a incandescenza e delle fluorescenti; i Power LED

hanno tuttavia bisogno di un cooler perché l'aumento della temperatura degrada le caratteristiche ottiche ed elettriche del sistema.

- *bassa potenza richiesta*: al contrario delle lampade tradizionali, i LED hanno bisogno di correnti talmente ridotte che è possibile tranquillamente autoalimentarli con energie rinnovabili (luce del sole o del vento). Questo concetto è già applicato alla segnaletica e ai lampioni per illuminazione urbana, perché molto conveniente dal punto di vista dei costi di gestione.
- *funzionamento in sicurezza*: rispetto alle lampade normali, che lavorano a tensione di rete, i comuni LED sono più sicuri, perché alimentati a bassa o a bassissima tensione. Questo discorso non è valido per i più recenti tipi di Power LED, che sono alimentati con la stessa tensione.
- *lunghissima durata di vita*: con le loro 50000 ore di vita per blu e bianco e 10000 ore per i monocromatici, i LED superano abbondantemente le 750 ore delle lampade a incandescenza e le 7500-10000 ore delle lampade fluorescenti, per cui risultano particolarmente adatti all'utilizzo in situazioni in cui è oneroso, difficoltoso o pericoloso sostituire la sorgente luminosa.
- *risparmio sui costi di manutenzione*: avendo elevata durata di vita, la manutenzione risulta diluita nel tempo.
- *resistenza agli urti e alle sollecitazioni*: i diodi sono meccanicamente robusti e anche se cadono a terra non si danneggiano, neppure a caldo, al contrario delle lampade ad incandescenza che, se urtate quando sono ancora calde, si fulminano con facilità; si prestano quindi anche ad applicazioni illuminotecniche in condizioni estreme, come nelle pavimentazioni e nelle piscine.
- *dimensioni e peso ridotti*: permettono di progettare apparecchi compatti e di ridotta profondità, e rappresentano quindi un'ottima soluzione per dispositivi portatili, come cellulari e torce: basti pensare che una lampada a LED completa di circuito di controllo, a parità di potenza, è poco più pesante di una lampadina a filamento.
- *insensibilità ad umidità e vibrazioni*: i diodi sono sensibili all'umidità e alla polvere, ma la capsula di rivestimento li protegge, rendendo possibile l'utilizzo anche in condizioni avverse.

- *accensione a freddo*: al contrario delle lampade fluorescenti, i LED hanno tempo di accensione pari a zero fino a temperature di  $-40^{\circ}\text{C}$ , per cui il flusso emesso è immediatamente pari al flusso di regime.
- *emissione spettrale molto ristretta e colori saturi*: l'emissione spettrale monocromatica propria dei diodi consente l'eliminazione dei filtri colorati che solitamente si applicano alle altre lampade per produrre luce colorata, e che ne riducono l'efficienza. Inoltre, la miscelazione di più LED monocromatici consente una progettazione accuratissima dello spettro di emissione globale, adattandolo alle diverse esigenze specifiche, come ad esempio la coltivazione indoor.
- *flessibilità di applicazione*: i LED sono molto più piccoli delle lampade tradizionali e per questo consentono disposizioni spaziali finora impensabili, come ad esempio l'integrazione all'interno di elementi architettonici (pavimenti, pareti, soffitti, scaffalature, superfici vetrate) grazie ad incassi poco profondi. Grazie alle loro caratteristiche spettrali, invece, permettono la creazione di scenari luminosi globali, consentendo al lighting design di andare oltre il semplice posizionamento di una serie di vistosi apparecchi.
- *assenza di componente ultravioletta*: l'assenza totale di emissione UV fa sì che i LED non alterino i colori e non attirino insetti, per cui risultano la sorgente luminosa ideale per illuminare tutti quegli oggetti soggetti a degradazione, come opere d'arte e alimenti.
- *Sostenibilità ambientale*: uno dei motivi principali del forte sviluppo di questa tecnologia è che queste sorgenti consentono forti risparmi energetici e quindi una minore produzione di anidride carbonica, in accordo con il Protocollo di Kyoto. Un secondo motivo, importante anche dal punto di vista ambientale, è che essendo caratterizzate da consumi ridotti, queste sorgenti possono essere autoalimentate attraverso l'uso di energie rinnovabili (micro fotovoltaico e microeolico).

Un terzo aspetto, fondamentale ma spesso ignorato, e che fa di queste sorgenti le più adatte dal punto di vista della salvaguardia del pianeta, è che diversamente dalle tradizionali lampade a scarica, se disperse in ambiente provocano un danno minimo perché non contengono né i fosfori contenuti nei

tubi fluorescenti, né gas pericolosi come i vapori di mercurio, elemento altamente tossico e in grado di provocare gravi forme di inquinamento del suolo e delle acque.

I minimi ingombri e i pesi di modesta entità, congiuntamente alla semplicità della struttura del prodotto, sono caratteristiche che tendono a ridurre l'impatto che l'oggetto lampada esercita sull'ambiente, sia costruito che naturale.

Se si considera che nelle lampade tradizionali sono sempre presenti metalli e leghe metalliche leggere finemente lavorati (filamenti in tungsteno, cavi, micro-saldature, placche, spine, lamierini), vetro in vari tipi e versioni (vetro sodico-calcico, al borosilicato, di silice), materiali isolanti (ceramiche, polimeri), elastomeri e collanti, si capisce come, in fase di smaltimento, i vari componenti debbano essere recuperati con una serie di onerose operazioni di selezione e separazione. Nel caso dei LED tutte le operazioni si semplificano: i materiali impiegati per il chip sono semiconduttori drogati, per gli elettrodi e il dissipatore termico materiali metallici per l'incapsulamento del chip il silicone i materiali plastici, per le ottiche secondarie i polimeri. Permane una certa complessità, ma il lavoro di disaggregazione è indubbiamente agevolato dalla semplicità dei collegamenti e dalle minime dimensioni.

I punti di debolezza dei LED possono essere così sintetizzati:

- *prezzo elevato*: a parità di flusso luminoso, il costo dei LED è molto elevato rispetto a quello delle sorgenti tradizionali a incandescenza e a scarica; i nuovi tipi di diodi commercializzati, inoltre, caratterizzati da flussi luminosi sempre crescenti, hanno prezzi che crescono in maniera non proporzionale perché aumentano molto i costi della tecnologia impiegata.
- *incompatibilità con l'alimentazione di rete*: la maggior parte dei LED funziona in corrente continua e a tensione minore rispetto all'alimentazione di rete, a corrente alternata; questa differenza comporta la necessità di trasformatori e/o resistenze, che fanno diminuire l'efficienza complessiva del sistema.

- *flusso luminoso limitato*: nei modelli più economici solo 20lm a paragone con una lampada ad incandescenza da 60W che emette un flusso luminoso di circa 550lm.
- *disomogeneità alla nascita nelle caratteristiche ottico-elettriche*: una medesima partita di LED presenta diodi con differenti intensità e colore della luce emessa (fino al 30% di variabilità), ragion per cui si rende necessaria una classificazione post-produzione, attraverso il binning.
- *generazione di calore nella giunzione P-N*: il riscaldamento della giunzione influisce sulle caratteristiche ottiche (flusso e colore) della luce emessa, per cui è necessario l'impiego di un COOLER per trasmettere il calore fuori dal diodo, evitandone oltretutto la morte prematura;
- *bassa resa cromatica*: i LED sono in grado di riprodurre i colori sovrasaturandoli: all'apparenza la resa cromatica è buona, ma con gli attuali metodi di valutazione essa viene fortemente penalizzata.
- *emissione in un angolo ristretto*: dipende dalle ottiche primarie e secondarie: sono allo studio ottiche in grado di uniformare il fascio (allargarlo) per applicazioni come retroilluminazione di tv e monitor.
- *spegnimento graduale*: a differenza della lampade tradizionali, il LED diminuisce il suo flusso a poco a poco, per cui tende a non essere sostituito anche quando l'intensità luminosa diventa molto bassa. Questo problema può essere risolto inserendo uno switch temporizzato, che spenga definitivamente il LED alla fine di un numero di ore di funzionamento prefissato. [6]

### **1.2.8 Campi di applicazione della tecnologia LED**

Se inizialmente i LED erano studiati e prodotti solo per la componentistica elettronica in sostituzione delle spie a filamento e a neon, oggi le direzioni di sviluppo sono essenzialmente due: le segnalazioni nelle apparecchiature elettroniche civili e industriali e il mercato dell'illuminazione, inteso nel senso più ampio del termine.

A muovere i progettisti illuminotecnici verso la scelta dei LED sono arrivati fattori per lungo tempo ignorati: il contenimento della spesa energetica, l'affidabilità legata

alla maggiore durata e al fatto che, essendo un apparecchio LED composto da più giunzioni, un guasto ad una giunzione non interrompe l'emissione di luce.

Nonostante i grandi pregi, l'applicazione dei LED all'illuminazione generale è ancora limitata, essenzialmente perché questa richiede flussi elevati, che i LED raggiungono solo se utilizzati in grande numero, quindi in apparecchi molto costosi.

Per quanto riguarda il settore dell'illuminazione, le applicazioni principali riguardano:

- l'illuminazione generale funzionale e decorativa;
- l'illuminazione per la coltivazione indoor;
- la retroilluminazione per schermi LCD, TV e monitor;
- altre applicazioni (illuminazione per sistemi di visione meccanizzata, sistemi di illuminazione portatile come torce, flash e illuminazione notturna a infrarossi). [5] [6]

### **1.2.9 Illuminazione urbana**

Nel futuro dei LED, uno degli ambiti applicativi di maggiore interesse è quello dell'illuminazione urbana, in quanto la continua estensione delle aree metropolitane fa aumentare in maniera vertiginosa la domanda di illuminazione pubblica. I LED si prestano in modo ottimo sia come sorgente per il sistema infrastrutturale dei percorsi destinati ai veicoli a motore per uso pubblico e privato, ma anche per le zone pedonali e ciclabili, per le aree verdi, per il patrimonio architettonico e monumentale, per le zone di attrazione turistica, di svago e intrattenimento serale e notturno: in questo vasto e multiforme ambito applicativo, la spesa energetica è ingente e in continua crescita, e la mancanza di illuminazione è associata direttamente a problemi di sicurezza. I LED forniscono risposta ad entrambi i problemi, grazie al forte risparmio energetico che consentono e alla grande affidabilità tecnico-funzionale, che dovrebbe assicurare un grande risparmio anche sui costi di manutenzione. Un ulteriore punto a favore dei LED nell'illuminazione urbana è il fatto che il loro minimo consumo energetico può essere facilmente supplito tramite l'utilizzo di mini elementi che sfruttano energie rinnovabili (micro fotovoltaico e microeolico) consentendo un forte risparmio anche sulla rete elettrica (Figura 1.27). [5] [6]



**Figura 1.27 – Elementi a LED per l'illuminazione stradale senza e con fotovoltaico integrato.**

### **1.3 Gli Impianti fotovoltaici come tecnologia per l'alimentazione dei sistemi di illuminazione stradale**

#### **1.3.1 Cenni storici**

L'effetto fotovoltaico, ovvero la capacità di certi materiali di convertire l'energia solare in corrente elettrica continua, è noto fin dal 1839, grazie agli studi realizzate dal fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891) che presentò alla Accademia delle Scienze di Parigi la sua "Memoria sugli effetti elettrici prodotti sotto l'influenza dei raggi solari", scoperta avvenuta casualmente esperienze grazie agli studi su una cella elettrolitica (quindi contenente una soluzione liquida) in cui erano immersi due elettrodi di platino. Si deve aspettare il 1876 (Smith, Adams e Day) per avere una simile esperienza ripetuta con dispositivi allo stato solido (selenio).

L'idea di sfruttare l'effetto fotovoltaico quale fonte energetica non ebbe modo di svilupparsi finché non si poté operare con materiali che avessero un miglior rendimento. Si deve aspettare fino al 1954 per avere la prima cella solare commerciale in silicio (Person, Fuller e Chapin) realizzata all'interno dei laboratori

Bell. I costi iniziali di questa nuova tecnologia erano ingenti e ne restrinsero il campo d'azione a casi particolari, come l'alimentazione di satelliti artificiali.

Negli anni seguenti la maggior parte degli studi fu dedicata a migliorare la resistenza delle celle alle condizioni ambientali che caratterizzano lo spazio interplanetario e solo verso la metà degli anni settanta s'iniziò a portare avanti anche le ricerche dedicate alle celle per utilizzazioni terrestri.

Dovendo passare dalle tecnologie spaziali sperimentali alla produzione di massa per pannelli terrestri si tentò subito di operare nel senso della riduzione dei costi di produzione. In questo senso si modificarono i processi di produzione, realizzando celle a sezione più ampia e sviluppando procedimenti per il taglio che causassero minori sprechi di materiale.

Un aspetto vantaggioso dei moduli fotovoltaici è legato alla natura della sua fonte di energia: il Sole. Essendo questa distribuita risulta poco efficace la realizzazione di grandi produzioni centralizzate tipiche degli impianti a combustibile, mentre appare come naturale l'adozione di piccoli centri di produzione distribuiti sulla rete sino a raggiungere una copertura puntuale del territorio.

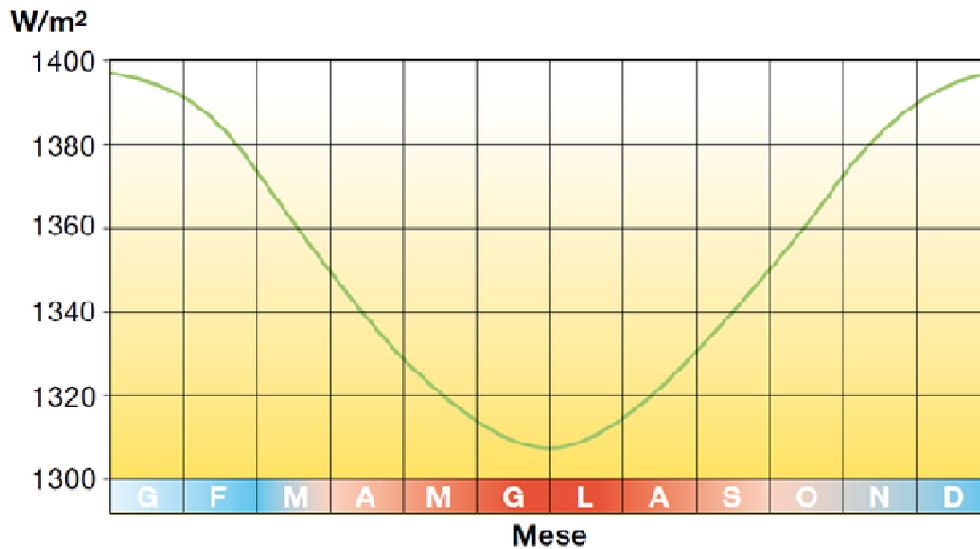
Un altro aspetto vantaggioso è legato al loro utilizzo per elettrificare utenze isolate, distanti dalla rete elettrica, difficili da alimentare perché situate in zone poco accessibili o caratterizzate da bassi consumi di energia che non rendono conveniente l'allaccio alla rete pubblica. [6]

### **1.3.2 La radiazione solare al suolo**

L'energia irradiata dal Sole deriva dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto al suo interno e si propaga poi in modo simmetrico nello spazio, fino a raggiungere la fascia esterna dell'atmosfera terrestre.

L'energia che giunge alla superficie viene poi trasferita allo spazio esterno per irraggiamento con una potenza complessiva pari a  $1367 \text{ W/m}^2$ , la quale è denominata costante solare. Poiché la distanza tra il Sole e la Terra varia periodicamente nel corso dell'anno, la costante solare rappresenta in realtà il valore medio della potenza specifica, la quale oscilla entro un intervallo del  $\pm 3\%$ , assumendo il valore massimo

nel periodo invernale e quello minimo durante la stagione estiva. Il grafico del suo andamento è riportato in Figura 1.28.

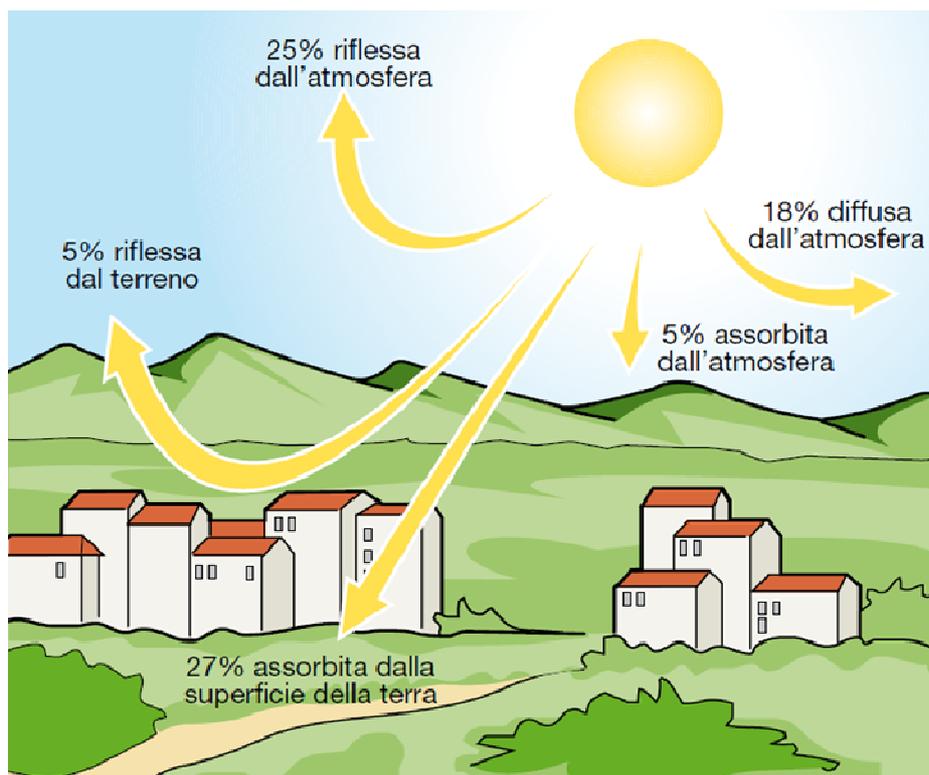


**Figura 1.28 – Variazione del valore della Costante Solare ( $W/m^2$ )**

A livello del suolo, si registra un'energia specifica minore della costante solare, a causa dei fenomeni di assorbimento e diffusione che hanno luogo nell'atmosfera, che modificano non solo il contenuto energetico della radiazione nel suo complesso, ma anche la sua composizione spettrale (Figura 1.29).

La radiazione che giunge su una superficie orizzontale è pertanto composta da una *radiazione diretta*, associata all'irraggiamento diretto sulla superficie, da una *radiazione diffusa* che arriva sulla superficie dal cielo in ogni direzione e da una *radiazione riflessa* dal terreno e dall'ambiente circostante una data superficie. D'inverno e con il cielo coperto la componente diffusa è molto maggiore di quella diretta.

La radiazione riflessa dipende dalla capacità di una superficie di riflettere la radiazione solare e viene misurata tramite il coefficiente di albedo calcolato per ciascun materiale (Tabella 1.1).

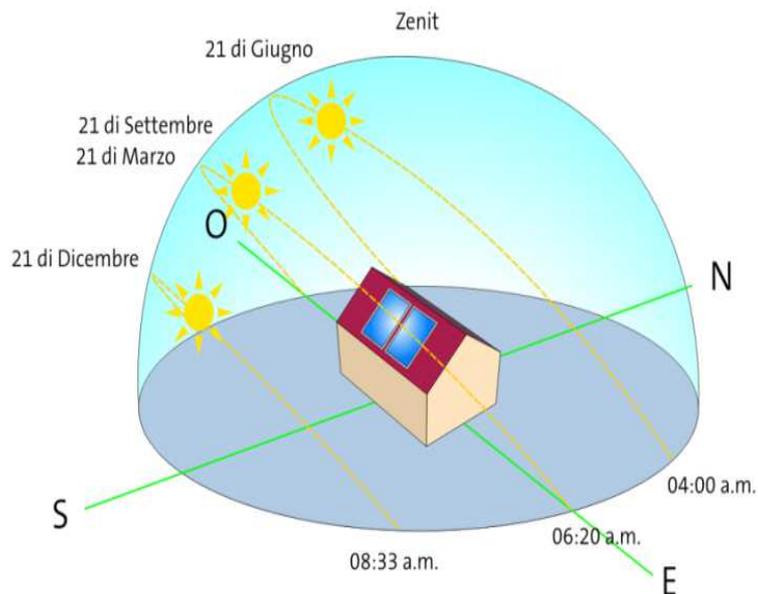


**Figura 1.29 – Flusso di energia tra il sole, l'atmosfera e la superficie terrestre**

**Tabella 1.1 – Coefficienti di albedo per diversi materiali**

Tipo di superficie	albedo
Strade sterrate	0,04
Superfici acquose	0,07
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Asfalto invecchiato	0,1
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Suolo (creta, marne)	0,14
Erba secca	0,2
Pietrisco	0,2
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Bosco in autunno/campi	0,26
Erba verde	0,26
Superfici scure di edifici	0,27
Foglie morte	0,3
Superfici chiare di edifici	0,6
Neve	0,75

Per tenere conto dei fenomeni di assorbimento è stata definita a livello internazionale la massa d'aria unitaria AM1 (air mass 1), intesa come lo spessore di atmosfera standard attraversato dai raggi solari in direzione perpendicolare alla superficie terrestre e misurato a livello del mare. Tale distanza è il minimo percorso, e si presenta nel caso in cui il Sole sia nella posizione di zenit (Figura 1.30).

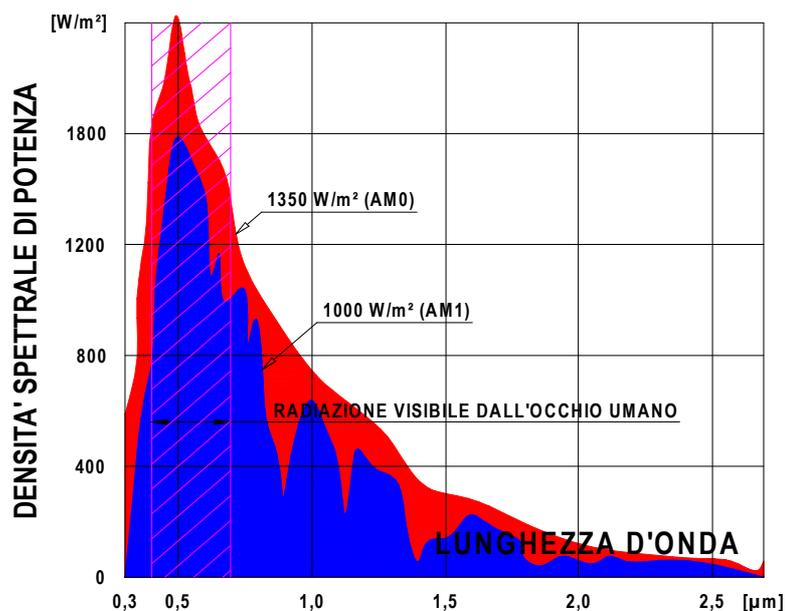


**Figura 1.30 – Traiettoria del Sole durante l'anno**

Alle latitudini europee è comunque spesso necessario far riferimento a spettri di radiazione ancora più attenuati rispetto all'AM 1: AM 1,5 (Figura 1.31), AM 2 o anche maggiori a seconda dei casi, per tener conto del percorso di attraversamento della radiazione nell'atmosfera dovuto alla più o meno pronunciata deviazione dei raggi solari rispetto allo zenit. Viceversa, se ci si trovasse in quota a latitudini tropicali lo spettro AM 1 potrebbe, in alcuni casi, risultare eccessivamente attenuato rispetto alla radiazione realmente incidente. La curva AM0, corrispondente alla radiazione solare misurata al di fuori dell'atmosfera terrestre, risulta invece essere molto simile allo spettro di emissione di un corpo nero alla temperatura di 5760 K. Tuttavia, al fine di stabilire delle condizioni di prova standard in laboratorio per i componenti fotovoltaici, la norma CEI EN 60904-3 (CEI 82-3) considera la curva AM 1,5 come radiazione solare standard di riferimento.

La misura della radiazione solare globale orizzontale si effettua mediante uno strumento, detto piranometro, o più comunemente solarimetro. Lo strumento misura l'energia associata alle componenti verticali della radiazione incidente nell'unità di tempo ed è sensibile alle lunghezze d'onda visibili della radiazione solare ed al vicino infrarosso. L'intensità della radiazione globale o potenza specifica è espressa in  $\text{W/m}^2$ ; tipicamente, i valori di potenza specifica su piano orizzontale possono arrivare in Italia, a livello del mare, durante una giornata estiva di sole, a  $900 \div 1100 \text{ W/m}^2$ .

Nella pratica impiantistica di progettazione, il valore di massima radiazione al suolo viene assunto pari a  $1000 \text{ W/m}^2$ , corrispondente al 75% circa della radiazione extra atmosferica. [6]



**Figura 1.31 – Composizione spettrale della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera terrestre (AM0) e con attenuazione AM 1,5.**

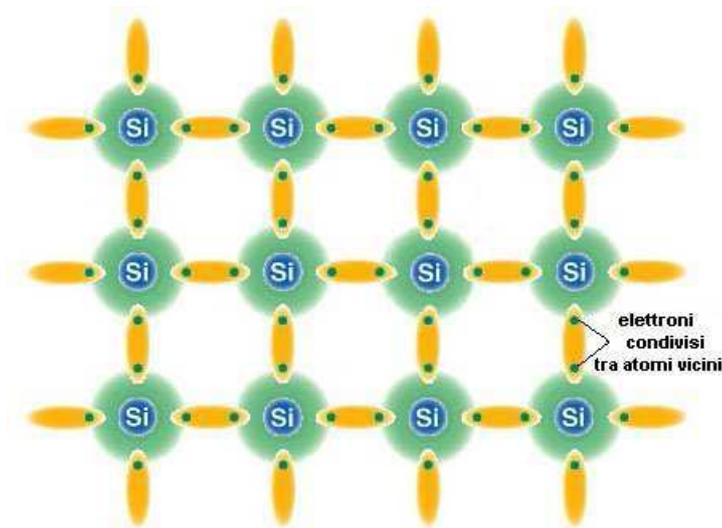
### 1.3.3 Effetto fotovoltaico

La conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni avviene nella cella fotovoltaica, un dispositivo costituito da una sottile fetta di materiale semiconduttore opportunamente trattata. Il materiale semiconduttore più frequentemente usato per la realizzazione dei dispositivi è il silicio monocristallino, policristallino o amorfo. [6]

### 1.3.3.1 Struttura del Silicio (Si)

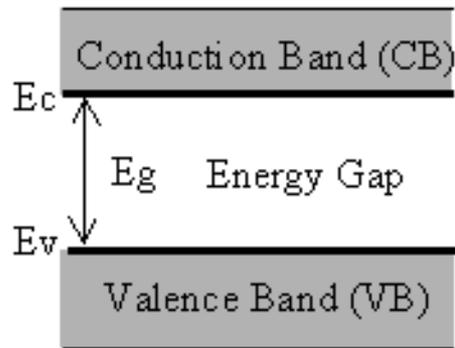
L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali occupano l'orbita più esterna e sono detti elettroni di valenza. Questi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi.

In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi che con i loro elettroni di valenza completano la sua orbita esterna: quindi, due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino, (Figura 1.32).



**Figura 1.32 – Reticolo cristallino del Silicio**

Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone ed i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Questo legame può essere spezzato con una quantità d'energia che permette a un elettrone di passare a un livello energetico superiore, in pratica dalla banda di valenza alla banda di conduzione, superando la banda proibita,  $E_g$  (Energy gap), Figura 1.33.



**Figura 1.33 – Rappresentazione delle bande di valenza e conduzione**

Per l'atomo di silicio, quest'energia è pari ad  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  (valore intermedio tra quello dei conduttori e quello degli isolanti).

Fornito tale valore d'energia, l'atomo passa a livello di conduzione, ed è libero di muoversi, contribuendo così al flusso d'elettricità; ma passando alla conduzione si lascia dietro una vacanza, ovvero una lacuna dove manca un elettrone. Un elettrone vicino può andare facilmente a riempire la lacuna, scambiandosi così di posto con essa.

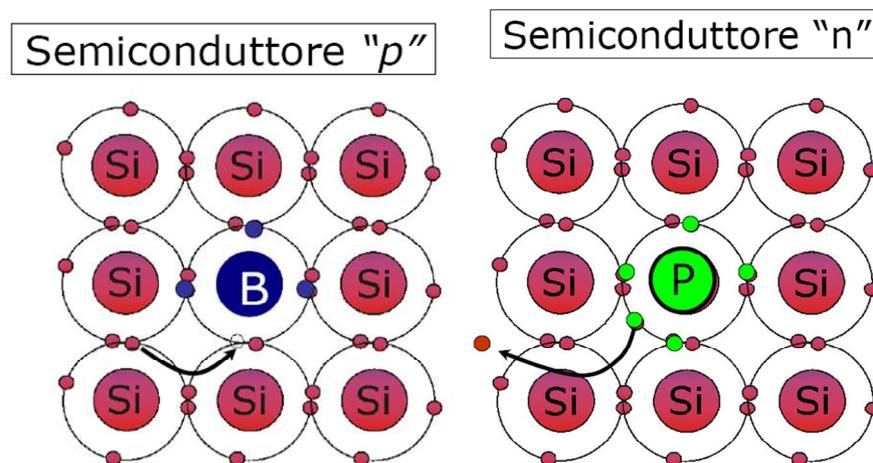
Nei semiconduttori però, il moto delle cariche non è dovuto solo al campo elettrico applicato, così come avviene nei metalli, ma anche ad una corrente cosiddetta di diffusione. La corrente di diffusione è determinata dal moto delle cariche elettriche generato da un gradiente di concentrazione degli elettroni e delle lacune.

Quando un flusso luminoso investe il reticolo cristallino del silicio, si ha la liberazione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde la formazione di un egual numero di lacune. Nel processo di ricombinazione, ogni elettrone che capita in prossimità di una lacuna la può occupare, restituendo una parte dell'energia che possedeva sotto forma di calore.

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisico-chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore, ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro.

In pratica è necessario introdurre nel silicio una piccola quantità di atomi appartenenti o al V gruppo del sistema periodico, detti donatori, o al III, detti accettori. Nel primo caso si introduce nell'orbita più esterna del Silicio un elettrone in più di quelli necessari per chiudere l'orbita stessa. Questo elettrone è debolmente legato (frazione di elettronvolt) e quindi ha bisogno di una modesta energia per saltare in banda di conduzione. Materiali con questo tipo di conducibilità (dovuta prevalentemente a cariche negative) sono detti di tipo N. Nel secondo caso si aumenta invece la concentrazione di lacune. Materiali con questo tipo di conducibilità (dovuta prevalentemente a cariche positive) sono detti di tipo P.

Questo trattamento è detto drogaggio e la quantità delle impurità introdotte è nell'ordine di una parte per milione (ppm). Generalmente si utilizzano il Boro (B, terzo gruppo) ed il Fosforo (P, quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo P (con un eccesso di lacune) ed una di tipo N (con un eccesso d'elettroni), come mostrati in Figura 1.34. In entrambi i casi, il materiale risulta elettricamente neutro.

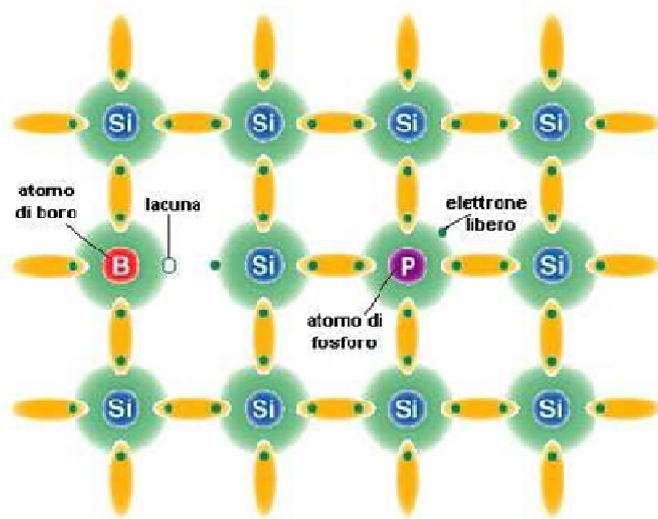


**Figura 1.34 – Semiconduttori di tipo P ed N**

### 1.3.3.2 La giunzione P-N

Una cella fotovoltaica è costituita dall'accoppiamento di un semiconduttore di tipo P e uno di tipo N (giunzione P-N). Attraverso la superficie di contatto dei due semiconduttori, alcuni elettroni passano dal materiale di tipo N a quello di tipo P, mentre alcune lacune si spostano in senso contrario. Il materiale di tipo N acquista

così una debole carica positiva, mentre quello di tipo P diventa leggermente negativo. Intorno alla zona di confine si genera pertanto un campo elettrico, diretto dal materiale di tipo N a quello di tipo P, cui è associato una differenza di potenziale  $V_e$ . Questo strato impedisce ogni ulteriore diffusione nei due versi dei portatori di carica.



**Figura 1.35 – La giunzione P-N**

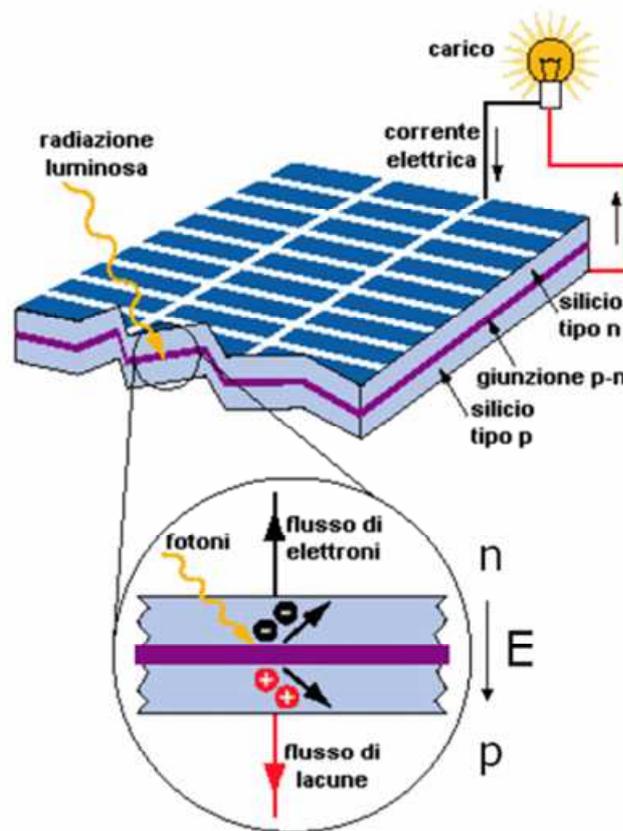
Connettendo il cristallo N al polo positivo di un generatore e il cristallo P a quello negativo, si rafforza il campo elettrico che si è instaurato in precedenza e che impedisce il passaggio di corrente elettrica. Invertendo le connessioni del generatore, la corrente fluisce nel circuito. La giunzione P-N (Figura 1.35) è quindi un dispositivo a senso unico, in quanto consente il passaggio della corrente in un solo senso, dal materiale di tipo P a quello di tipo N (diodo a semiconduttore).

Quando una cella fotovoltaica assorbe una radiazione luminosa i cui fotoni possiedono un valore di energia  $E = h\nu$  (dove  $h$  è la costante di Plank e  $\nu$  è la frequenza del fotone), se l'energia dei fotoni  $h\nu$  è inferiore a  $E_g$  essi non potranno essere catturati da elettroni poiché questi verrebbero portati ad un livello energetico della banda proibita ove nessun elettrone può portarsi. Se invece  $h\nu > E_g$ , l'elettrone che cattura il fotone viene portato nella banda di conduzione, lasciando ionizzato (lacuna) il suo atomo originario di appartenenza. Una volta nella banda di valenza l'elettrone dissipa termicamente la quantità di energia in eccesso:  $h\nu - E_g$ , ed è

libero di muoversi in tale banda. In questo caso si dice che si è verificato un processo di generazione di coppia elettrone-lacuna.

Se l'assorbimento avviene nella zona di giunzione, l'elettrone è sospinto a causa del campo elettrico ivi presente (si ricordi che il campo elettrico ha direzione da N a P e quindi favorisce il passaggio di lacune da N a P e quello di elettroni da P a N) verso il materiale di tipo N e la lacuna verso il materiale di tipo P.

Si genera così un accumulo di elettroni nella zona N e di lacune nella zona P che dà luogo ad una differenza di potenziale (d.d.p.). Se i due cristalli sono connessi da un filo conduttore, l'equilibrio si ristabilisce mediante un flusso di elettroni dal cristallo N a quello P, (Figura 1.36).



**Figura 1.36 – Schema di funzionamento di una cella fotovoltaica**

Se l'assorbimento avviene in prossimità della giunzione, la lacuna raggiunge per diffusione la zona di carica spaziale ed è immediatamente portata, dal campo di

giunzione, nel materiale P. Se infine, l'assorbimento avviene lontano dalla zona di giunzione, le cariche si ricombineranno dopo un certo tempo.

L'assorbimento della radiazione luminosa provoca così una corrente elettrica continua nel filo.

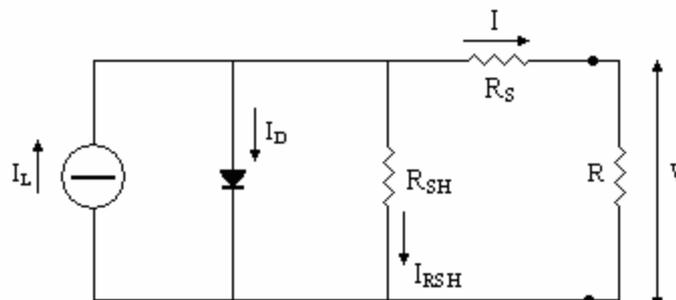
E' importante che lo spessore dello strato N sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Per il silicio questo spessore deve essere di  $0,5 \mu m$ , mentre lo spessore totale della cella non deve superare i  $250 \mu m$ .

Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. [6]

### 1.3.4 Cella fotovoltaica

#### 1.3.4.1 Curva caratteristica e circuito equivalente

Il circuito equivalente di una fotovoltaica cella è riportato in Figura 1.37.

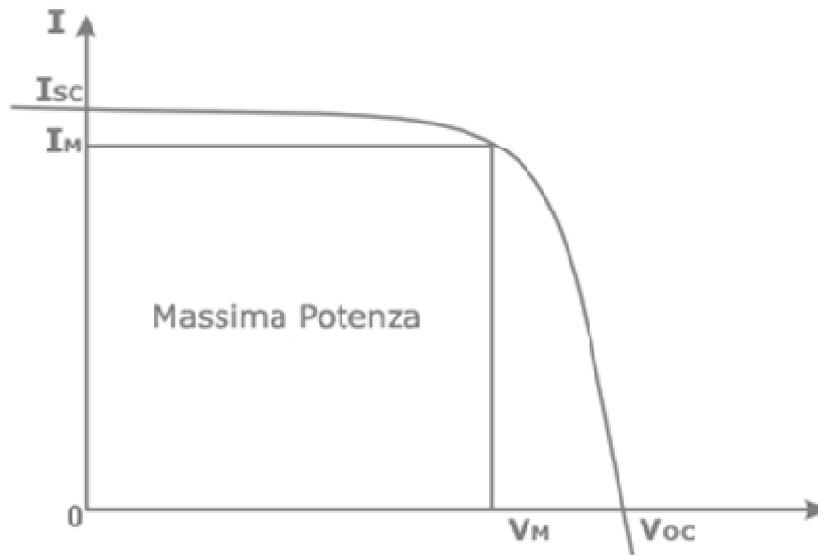


**Figura 1.37 – Circuito equivalente di una cella fotovoltaica**

- La corrente  $I_L$  è quella generata dalla luce, la sua intensità è proporzionale al numero dei fotoni con frequenza  $\nu > E_g/h$ .
- La corrente  $I_D$  è quella che attraversa la giunzione della cella.
- La corrente  $I$  è quella che fluisce nel carico ed è quella che ai fini pratici ci interessa conoscere.
- La  $R_S$  è la resistenza parassita della cella e comprende la resistenza dei due strati di materiale che costituiscono la cella e la resistenza ohmica dei contatti

stessi. La resistenza  $R_{SH}$ , detta resistenza di shunt, rappresenta tutte quelle perdite dovute alle correnti di dispersione che si verificano all'interno della cella.

La cella fotovoltaica, al buio, è sostanzialmente un diodo di gran superficie. Esponendola alla radiazione solare la cella si comporta come un generatore di corrente il cui funzionamento può essere descritto per mezzo della curva *caratteristica tensione-corrente*, come mostrato in Figura 1.38.



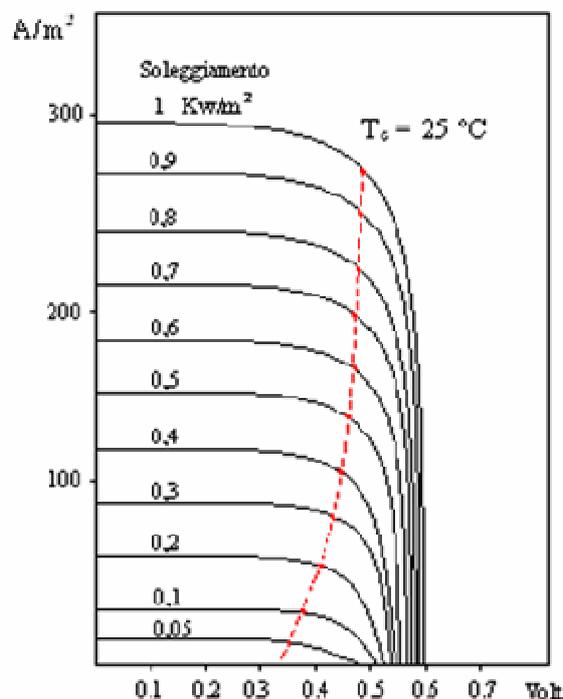
**Figura 1.38 – Curva caratteristica tensione-corrente di una cella fotovoltaica di silicio cristallino**

Dalla figura, si osserva che:

- La condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della caratteristica di generazione tensione – corrente in corrispondenza del quale il prodotto  $I \cdot V$ , che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo ( $I_M \cdot V_M$ ).
- La corrente di corto circuito  $I_{SC}$  è di poco superiore alla corrente di massima potenza  $I_{P_{max}}$  per cui non è necessario utilizzare un dispositivo elettromeccanico della corrente.

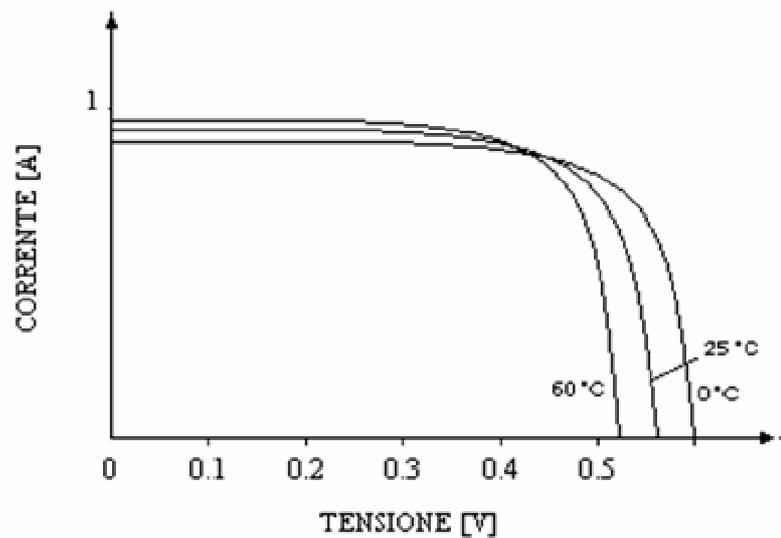
Le variabili fondamentali che influiscono sulla caratteristica di una cella fotovoltaica, sono tre: l'irraggiamento, la temperatura e l'area della cella.

Dalla Figura 1.39 si vede come l'intensità della corrente di corto circuito varia in modo proporzionale al variare dell'irraggiamento; al contrario, quest'ultimo non ha un effetto rilevante sul valore della tensione a vuoto. Come si nota dalla stessa figura la tensione a vuoto tra i casi di massimo e minimo valore di irraggiamento varia tra  $0,50 \div 0,60$  V. L'unico modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurarne totalmente la superficie captante.



**Figura 1.39 – Variazione della curva caratteristica in funzione dell'irraggiamento delle celle**

All'aumentare della temperatura della cella, la curva tensione – corrente della cella fotovoltaica si modifica (Figura 1.40) facendo registrare una diminuzione della tensione a vuoto  $V_{OC}$  di circa  $2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  e congiuntamente, un aumento della corrente di cortocircuito  $I_{CC}$  pari a circa  $0,2\% /^\circ\text{C}$ . Queste variazioni possono essere prese come riferimento nell'intervallo di temperatura  $0 \div 60^\circ\text{C}$ .

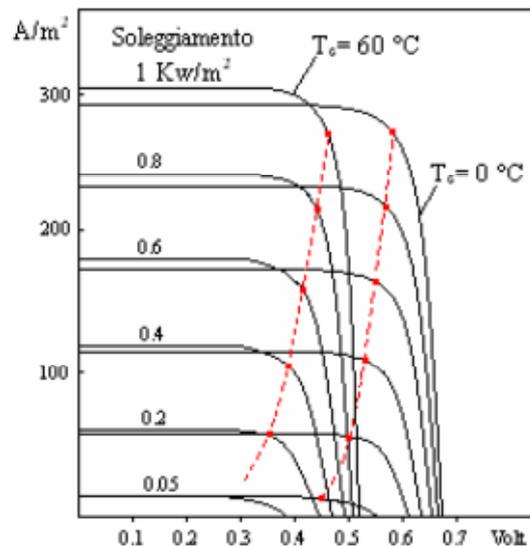


**Figura 1.40 – Variazione della curva caratteristica in funzione della temperatura della cella**

I due fenomeni, benché di segno opposto, si traducono in pratica in una diminuzione della potenza resa al punto di massima potenza valutabile intorno al 6÷7% per ogni aumento di 10°C della temperatura delle celle (Figura 1.41).

L'area della cella non ha effetto sul valore della tensione a vuoto, ma ovviamente all'aumentare della superficie maggior aumenta la corrente generata.

Poiché la potenza di una cella fotovoltaica varia al variare della sua temperatura e dell'irraggiamento, per poter fare dei confronti sono state definite delle condizioni standard di collaudo (STC) sotto le quali la cella eroga in Watt di picco ( $W_p$ ). Tali condizioni includono una temperatura della cella di 25°C, l'intensità di irraggiamento di 1 kW/m<sup>2</sup> e la distribuzione dello spettro solare pari a quello ottenibile con la condizione di air mass pari a 1,5 (AM 1,5).



**Figura 1.41 – Variazione della curva caratteristica in funzione dell'irraggiamento e della temperatura della cella**

### 1.3.4.2 Efficienza della cella fotovoltaica

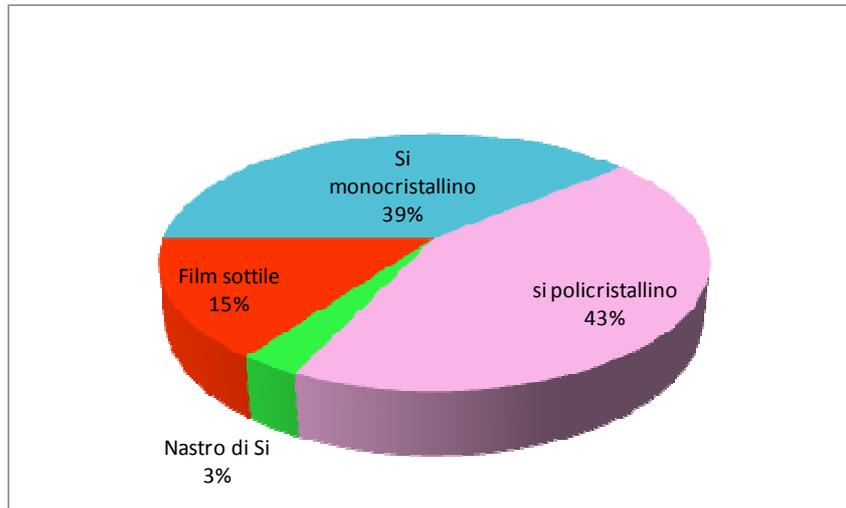
L'efficienza di conversione dei moduli fotovoltaici al *silicio monocristallino* è dell'ordine del 13-14%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 23% per i moduli e 25% per le singole celle. I valori di efficienza dei moduli al *silicio policristallino* si attestano tipicamente intorno al 12%. Anche in questo caso, esemplari realizzati in laboratorio raggiungono valori di efficienza pari al 20%. Per quanto riguarda i moduli al *silicio amorfo* i valori dell'efficienza sono pari al 7 - 8% su superfici che vanno da 0,5 a 1  $m^2$ . A livello di laboratorio e su superfici più piccole, vengono realizzate celle con efficienza superiori al 14%.

### 1.3.4.3 Tecnologie disponibili

Nella produzione di dispositivi fotovoltaici le ricerche sono tutte orientate allo studio di modelli che rispettano principalmente due esigenze: elevati valori di efficienza e costi di produzione contenuti.

Le tecnologie oggi disponibili sono essenzialmente di due tipi: da una parte, i moduli fotovoltaici più classici, composti di wafers di silicio cristallino, che rappresentano l'85% del mercato mondiale attuale, ripartito tra silicio monocristallino (39%) e

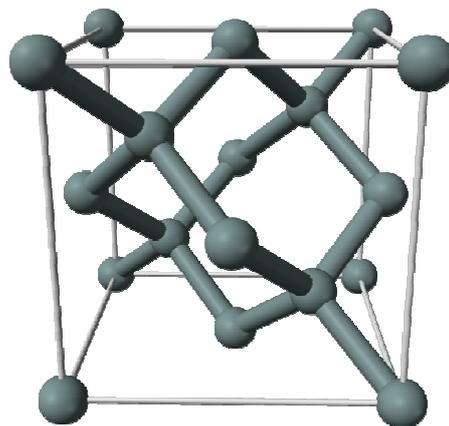
silicio policristallino (43%), più un piccolo spazio occupato dal silicio in nastro (3%); Il restante 15% del mercato è occupato dai film sottili (Figura 1.42).



**Figura 1.42 – Distribuzione del mercato dei moduli fotovoltaici**

#### ***1.3.4.3.1 Celle fotovoltaiche al silicio monocristallino***

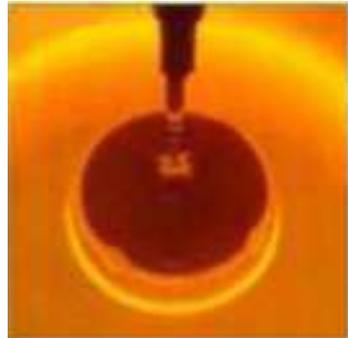
La maggior efficienza delle celle fotovoltaiche si ha con l'utilizzo del silicio monocristallino. La sua struttura cristallina ordinata si propaga per l'intero volume del solido senza soluzione di continuità, (Figura 1.43).



**Figura 1.43 – Cella elementare del silicio**

Per la produzione del silicio monocristallino, il processo più usato è la crescita cristallografica ottenuta attraverso il metodo Czochralsky, che consiste nell'immergere un seme di silicio cristallino, in lenta rotazione, in un crogiuolo

contenente silicio fuso. Controllando la velocità d'estrazione del seme si regola il diametro del lingotto, concentrando le impurità nella sua parte inferiore, (Figura 1.44).



**Figura 1.44 – Processo di cristallizzazione del silicio monocristallino**

Raffreddando lentamente, si ottiene un lingotto monocristallino con forma cilindrica di diametro compreso tra i 13,30 cm e di 200 cm di lunghezza. Successivamente, il lingotto viene tagliato con speciali seghe a filo in fettine, dette wafers, con spessore di  $250\div 350\ \mu m$ : il ridotto spessore del wafer ottenuto consente un buon sfruttamento del lingotto, ma causa un'estrema fragilità dell'elemento.

Durante questo stadio di lavorazione si spreca circa il 50% del materiale, che comporta un aumento di costo del prodotto finale. Esempio di cella fotovoltaica al silicio monocristallino è riportata nella seguente Figura 1.45.



**Figura 1.45 – Cella fotovoltaica in silicio monocristallino**

Il silicio ottenuto attraverso la procedura descritta precedentemente è puro; per sfruttare l'effetto fotovoltaico bisogna in ogni modo effettuare un opportuno drogaggio attraverso elementi chimici come il boro (B) ed il fosforo (F).

I componenti commerciali presentano attualmente rendimenti tipici intorno al 14-17% mentre per campioni di laboratorio, di piccola potenza, si raggiungono rendimenti nettamente superiori, fino ad arrivare al 24%.

#### ***1.3.4.3.2 Celle fotovoltaiche al silicio policristallino***

Grazie ai bassi costi di produzione, le celle al silicio policristallino sono le più diffuse sul mercato.

Invece di utilizzare un unico grande cristallo di silicio, questa tecnologia sfrutta un agglomerato di piccoli cristalli, la cui produzione è decisamente meno delicata e di conseguenza meno costosa di quella del silicio monocristallino.

La preparazione del lingotto avviene tramite il *Wacher ingot facturing process (WIFP)*, al posto del metodo Czochralsky. Il processo consiste nel fondere il Silicio, purificato in precedenza, in un crogiolo al quarzo, porre il Silicio fuso in uno stampo preriscaldato, costituito da elementi in grafite, e poi realizzare una solidificazione unidirezionale. Durante la fase di solidificazione, tra un grano e l'altro vengono a depositarsi delle impurità che ostacolano il flusso della corrente, diminuendo l'efficienza di conversione fotovoltaica. In seguito si procede al taglio dei wafer quadrati aventi uno spessore simile a quello delle celle monocristallino.

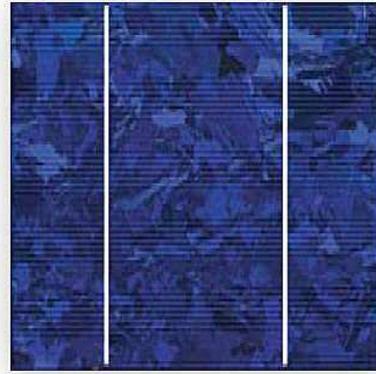
Questo tipo di cella è ben riconoscibile visivamente a causa dei vari cristalli non omogenei, (Figura 1.46).

Il minor costo delle celle al silicio policristallino rispetto a quelle monocristallino è giustificato dal loro minore rendimento, intorno al 14%. A livello sperimentale di laboratorio non si raggiungono per ora rendimenti superiori al 18%.

#### ***1.3.4.3.3 Celle fotovoltaiche al silicio amorfo***

Nel silicio amorfo, gli atomi non sono legati come nel silicio cristallino, ma si possono avere diverse configurazioni strutturali caratterizzate dalla presenza di legami liberi. Il processo di produzione risulta decisamente più economico, senza le

costose fasi di crescita cristallografica del lingotto, taglio e metallizzazione dei wafer.



**Figura 1.46 – Cella fotovoltaica in silicio policristallino**

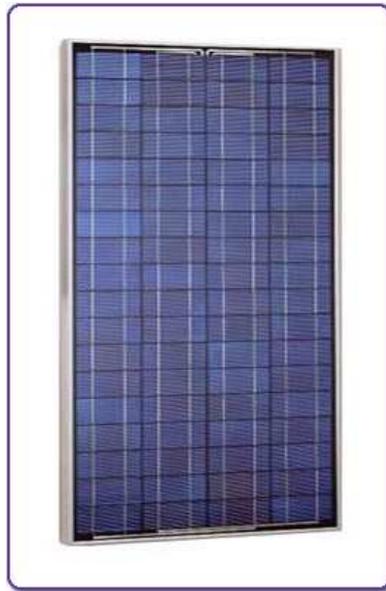
Uno degli aspetti che rendono interessante il silicio amorfo è quello di poterlo depositare su superfici di qualsiasi forma geometrica, anche curve e persino su strati flessibili. In questo caso non si presentano i problemi di fragilità riscontrati con il silicio cristallino.

Un inconveniente cui va incontro il silicio amorfo rispetto a quello cristallino, riguarda invece la stabilità delle prestazioni elettriche nel corso della vita utile. Durante i primi mesi di esposizione solare le celle in silicio amorfo subiscono un brusco decadimento dell'efficienza, noto come effetto Staebler-Wronski, per colpa del quale si riscontra una diminuzione sia della corrente che della tensione, che provoca un calo della potenza di picco dell'ordine del 10÷15 % già nelle prime cento ore di esposizione.

I moduli di silicio amorfo sono riconoscibili da un caratteristico colore scuro e dall'omogeneità della superficie, poiché non è costituita da singole celle ma da un unico strato senza soluzione di continuità (Figura 1.47).

Questo tipo di cella ha un rendimento che per soluzioni commerciali si attesta intorno al 7%, mentre campioni di laboratorio raggiungono il 12%. Tale soluzione si adatta anche al caso di irraggiamento diffuso, ovvero cielo coperto, in quanto il suo campo

di sensibilità è centrato nella gamma della radiazione visibile, con il massimo di sensibilità alla radiazione di lunghezza d'onda pari a  $\lambda = 0,522 \mu m$ .



**Figura 1.47 – Cella fotovoltaica in silicio amorfo**

Questa tecnologia è principalmente dedicata alle microapplicazioni del fotovoltaico, che spesso solo l'amorfo può coprire, quali calcolatrici, orologi, gadget solari.

#### ***1.3.4.3.4 Celle fotovoltaiche a film sottile***

Con la tecnologia a film sottile si possono produrre celle solari di spessore di pochi micrometri evitando così la dispendiosa produzione di wafer. Il materiale semiconduttore è fissato su grandi superfici di un altro materiale di supporto (di norma vetro), (Figura 1.48).

I vantaggi di questa tecnologia risiedono nel risparmio di materiale, nella semplicità del drogaggio e nella possibilità di produrre elementi di ampia superficie dall'aspetto omogeneo.

Il materiale attualmente più utilizzato per le celle a film sottile è il silicio amorfo (a-Si), che non ha alcuna struttura cristallina, ma è composto da atomi disordinati. Le celle di silicio amorfo prodotte industrialmente raggiungono un grado di efficienza intorno al 6-7%.

In Giappone, da qualche anno, esiste una produzione di celle solari a film sottile basate sul  $C_dT_e$  (Tellururo di Cadmio) usate per applicazioni in piccole apparecchiature.



**Figura 1.48 – Celle fotovoltaiche a film sottile**

#### ***1.3.4.3.5 Celle a film sottile in $C_dT_e$***

Celle a film sottile in materiale diverso dal silicio sono state sviluppate in uno sforzo di superare l'inefficienza e la degradazione delle celle a film sottile in silicio amorfo pur mantenendo un basso costo. Tra queste, la cella solare a film sottile in tellururo di cadmio ( $C_dT_e$ ) è al momento la più promettente, (Figura 1.49).

Il  $C_dT_e$  è un semiconduttore che ha un energy-gap ideale di 1,45 eV e coefficiente di assorbimento alto abbastanza da consentire ad uno strato di materiale spesso 1  $\mu m$  di assorbire il 99 % della luce visibile.

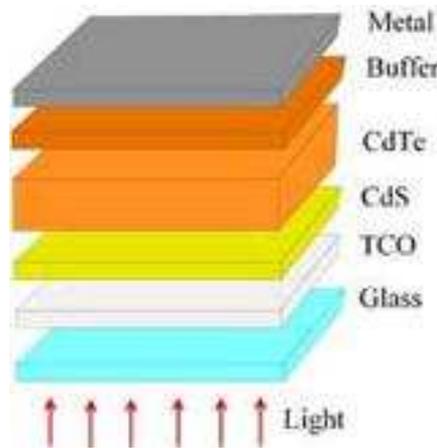
Uno svantaggio di questa tecnologia è dato dalla tossicità del cadmio ( $C_d$ ) allo stato gassoso. Per questo il dispositivo è incapsulato a protezione dell'ambiente e viceversa.

#### ***1.3.4.3.6 Celle a film sottile nano cristallino***

Alcune celle funzionano su un processo fisico molto diverso dalle comuni celle fotovoltaiche: ne sono un esempio le celle fotovoltaiche a film sottile nanocristallino.

Nella cella sono presenti dei *sensibilizzatori* (Osmio e Reutenio) che assorbono la luce incidente e sfruttano l'energia assorbita per eccitare gli elettroni, ed una

membrana ceramica di diossido di titanio ( $TiO_2$ ), che ha il ruolo di fare da supporto per il sensibilizzatore che deve essere applicato sulla sua superficie come uno strato monomolecolare.



**Figura 1.49 – Rappresentazione della cella  $CdTe$**

La banda di conduzione del  $TiO_2$  accetta gli elettroni eccitati elettronicamente nel sensibilizzatore, una volta nella banda di conduzione questi viaggiano rapidamente attraverso la membrana: la loro diffusione è almeno 10<sup>4</sup> volte più veloce di quella degli ioni in una soluzione.

Il tempo richiesto per attraversare una membrana di  $TiO_2$  spessa 5  $\mu m$  è di circa 2  $\mu s$ .

Durante la migrazione, gli elettroni mantengono il loro alto potenziale elettrochimico; in questo modo, la membrana oltre a supportare il sensibilizzatore, cattura le cariche e le conduce.

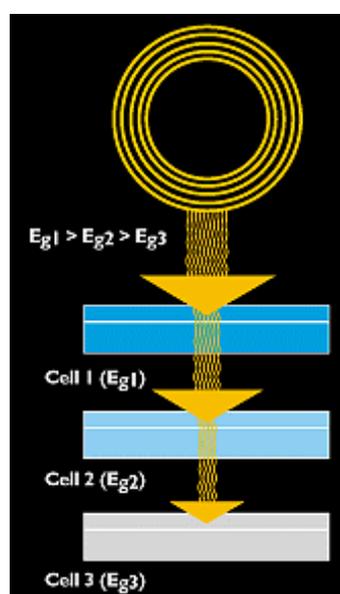
Il ciclo è quindi finito: sotto la luce diretta, un sensibilizzatore esegue questo ciclo circa 20 volte al secondo, mentre la macchina molecolare ruota a 1200 rpm. Dispositivi di questo genere hanno un'efficienza del 12,15%.

#### ***1.3.4.3.7 Celle fotovoltaiche multi giunzione***

Dagli anni '90 sono iniziate le esplorazioni di una nuova tecnologia per migliorare l'efficienza dei dispositivi fotovoltaici utilizzando celle composte costituite da differenti materiali semiconduttori disposti a strati, uno sull'altro, che permettono alle differenti porzioni di spettro solare di essere convertite in elettricità a differenti

profondità, aumentando così l'efficienza totale di conversione della radiazione incidente. Tale soluzione viene anche definita come *Split spectrum cell* o *VMJ cell* (Vertical Multijunction Cell).

Sono costituite da una pila di due o tre celle a giunzione singola accoppiate in un unico dispositivo. Ogni giunzione capta e converte in energia una determinata porzione dello spettro solare: in pratica, la cella superiore cattura i fotoni ad energia più elevata, e quindi la radiazione a lunghezza d'onda più piccola, mentre lascia passare i fotoni ad energia più bassa che sono catturati dalle celle seguenti (Figura 1.50).



**Figura 1.50 – Cella multi giunzione**

Questo tipo di cella impiega una tripla giunzione costituita da: Difosfuro d'Indio-Gallio (GaInP<sub>2</sub>), l'Arsenuro di gallio (GaAs) ed il Germanio (Ge). Sfruttando l'elevato rendimento di conversione dell'arsenuro di gallio, unitamente alla resistenza alle alte temperature, che permette l'adozione di sistemi di concentrazione della luce, si raggiunge un'efficienza del 35% che rappresenta l'attuale limite tecnico raggiunto.

#### ***1.3.4.3.8 Sistemi ottici di concentrazione***

La ricerca tecnologica nel campo del fotovoltaico è spesso indirizzata nel senso della riduzione del costo finale del prodotto. I sistemi ottici di concentrazione sono una

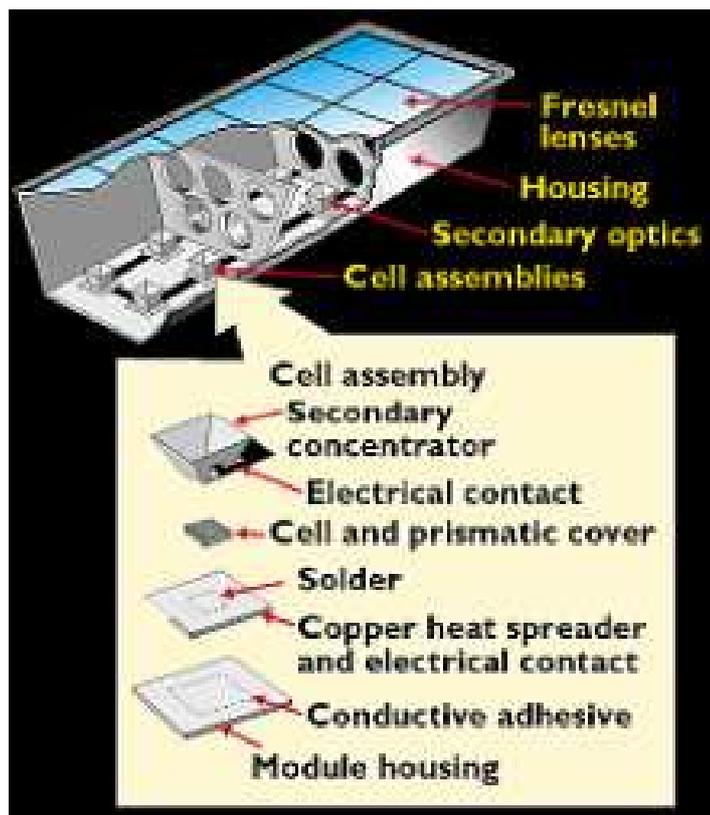
nuova tecnologia studiata per incrementare lo sfruttamento della superficie attiva della cella. In questo modo, a parità di potenza erogata, diminuisce la superficie della cella e quindi il suo costo.

I concentratori presentano un costo, per unità d'area, inferiore a quello delle celle. In questo modo, la struttura di supporto diviene più complessa, perché spesso si muove attorno ad uno o due assi di rotazione, ma consente di incrementare di alcune centinaia di volte la radiazione solare che incide sul modulo fotovoltaico.

Il sistema ottico consiste in piccoli concentratori che utilizzano lenti Fresnel o micro prismi, in grado di concentrare (moltiplicare) oltre i 500 soli (500 volte) la potenza. Il fattore di concentrazione viene espresso in "soli" anche se in realtà questa è una unità di misura di potenza: si assume che la luce diretta proveniente dal sole, nelle migliori condizioni atmosferiche possibili e per una superficie normale alla direzione dei raggi incidenti, sia caratterizzata da una potenza per unità di superficie di 1 sole  $\equiv 0,85 \text{ kW/m}^2$ .

Un'unità di base tipica del concentratore consiste in un sistema ottico che mette a fuoco la luce, un complesso di celle, un concentratore secondario per riflettere i raggi luminosi eccentrici sulla cella, un sistema per dissipare il calore eccedente dovuto alla concentrazione, i vari contatti e sistemi di fissaggio dei componenti, come mostrato in Figura 1.51. Le celle fotovoltaiche a concentrazione in Silicio oggi disponibili sono progettate per operare fino ed oltre 500 soli con efficienze che superano anche il 26%. La radiazione concentrata può inoltre essere filtrata rimuovendone una parte della componente termica con incrementi di efficienza sino al 30%.

Un problema che sorge con i sistemi a concentrazione è dato dall'elevata temperatura che si raggiunge sul modulo. Poiché il rendimento delle celle solari si riduce all'incrementarsi della temperatura è necessario prevedere un sistema di smaltimento del calore prodotto. Per questo, sono stati messi a punto sistemi ibridi fotovoltaico – fototermico con la possibilità di recupero del calore; in questo caso, il sistema che si ottiene è un impianto di cogenerazione con produzione di elettricità e calore con rendimenti elevati. [6]



**Figura 1.51 – Sistema ottico di concentrazione**

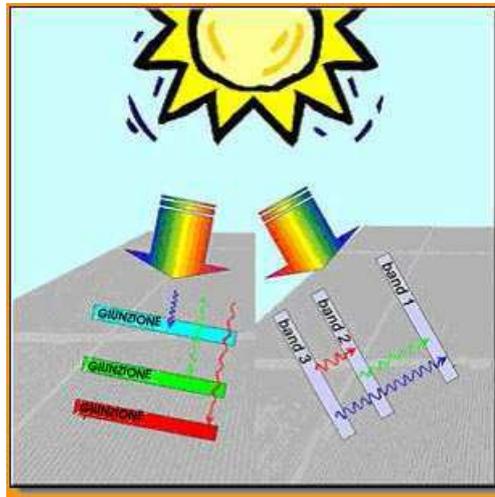
### **1.3.5 Innovazioni tecnologiche nel campo fotovoltaico**

#### **1.3.5.1 Celle fotovoltaiche “multi banda”**

Il 9 Aprile 2004, i due ricercatori Kin Man Yu e Wladek Walukiewicz della Berkeley University della California, hanno presentato un nuovo tipo di cella fotovoltaica realizzata con una giunzione di Zinco-Manganese-Tellurio, ad altissima efficienza. Nella loro scoperta i ricercatori hanno trattato la lega di ZnMnTe in modo che con una singola giunzione il materiale fosse virtualmente in grado di reagire all'intero spettro solare: non si tratta quindi di una cella multigiunzione, ma di un solo semiconduttore che ha diverse bande di reazione. L'importanza del progetto sta nel fatto di aver scoperto un fenomeno di “multibanda” (Figura 1.52).

E' stato dimostrato che aggiungendo impurità di ossigeno ai materiali chimici del II-VI gruppo, quali magnesio, zinco, tellurio, vengono prodotte bande ben definite di ampia larghezza. Si passa così da 1,1 eV del silicio a 2,6 eV delle suddette bande giungendo a rendimenti del 57% valore di efficienza estremamente elevato per di più

realizzato senza l'uso di tecnologie costose come i concentratori o le celle multigiunzione.



**Figura 1.52 – Sistema di funzionamento di celle fotovoltaiche multi banda**

### **1.3.5.2 Celle organiche**

Il fotovoltaico organico è una nuova tecnologia che usa pigmenti organici al posto dei semiconduttori inorganici, consentendo un abbattimento dei costi senza però un aumento di efficienza. Una cella fotovoltaica organica (Figura 1.53) utilizza un'elettronica organica, basata su polimeri organici conduttori o su piccole molecole organiche per l'assorbimento della luce e il trasporto della carica. Ciò permette di combinare la flessibilità delle molecole organiche con la plastica, che ha bassi costi di produzione e può esserne ricoperta con un "film". Il coefficiente di assorbimento di luce delle molecole organiche è elevato, perciò una grande quantità di luce può essere assorbita con una piccola quantità di materiale. I principali svantaggi delle celle organiche sono costituiti dalla bassa efficienza (circa il 3-6%), dalla bassa stabilità (per quanto riguarda ossidazione, riduzione, ricristallizzazione e variazioni di temperatura, che possono degradare il dispositivo nel tempo) e dalla bassa robustezza rispetto alle celle inorganiche.



**Figura 1.53 – Cella fotovoltaica organica**

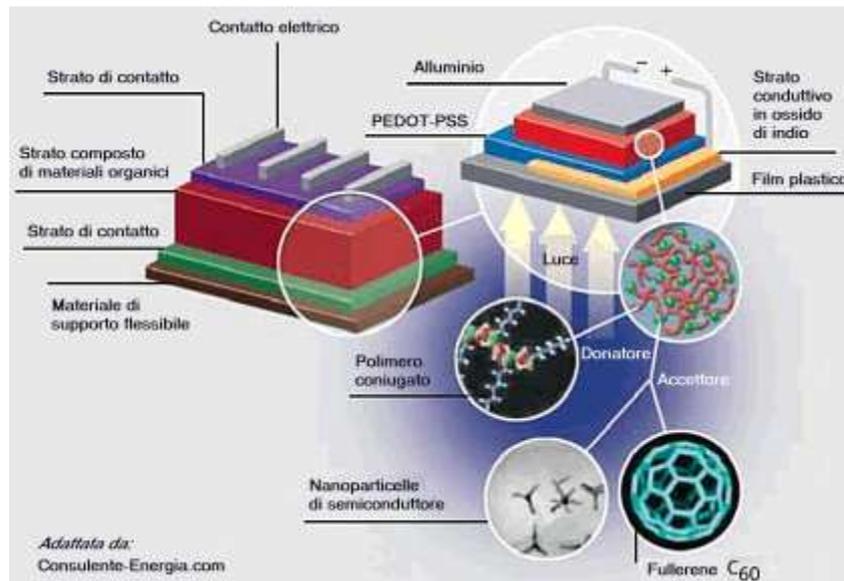
Le celle organiche possono essere realizzate in vari modi, ad es. utilizzando una catena polimerica come donatore di elettroni e molecole di fullerene (una macromolecola di carbonio a forma di pallone di calcio) quali accettori di elettroni dal polimero illuminato dalla luce, come quelle realizzate nel 2008 da un'azienda americana spin-off del famoso Massachusetts Institute of Technology (MIT), che hanno il 3-5% di efficienza e durano solo un paio di anni, per cui sono adatte solo in applicazioni di nicchia: borse di laptop, finestre, ombrelli, ecc. La più semplice architettura che può essere usata per una cella organica è la cosiddetta eterogiunzione planare (Figura 1.54), che è una sorta di sandwich, le cui fette sono strati planari detti "di contatto" e la cui "imbottitura" è costituita da un film di polimero fisicamente "coniugato" - con una complessa geometria a livello molecolare - al film dell'accettore di elettroni, che in questo caso è il fullerene, mentre nelle celle ibride sono nanoparticelle di semiconduttore inorganico.

## **1.3.6 Impianti fotovoltaici**

### **1.3.6.1 Il modulo fotovoltaico**

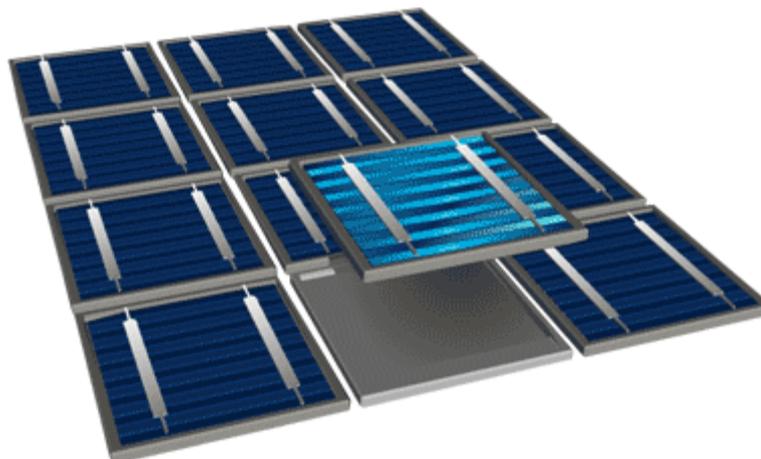
La conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni avviene nella cella fotovoltaica, un dispositivo costituito da una sottile fetta di materiale semiconduttore, generalmente Silicio. Tale fetta è generalmente di forma quadrata e di superficie pari a circa  $100 \text{ cm}^2$ , e produce nelle condizioni di soleggiamento standard ( $1000 \text{ W/m}^2$  di

intensità luminosa a 25°C), una corrente di 3 A con una tensione di 0,5 V, e quindi una potenza di 1.5 W.



**Figura 1.54 – Struttura “etero giunzione planare” di una cella organica**

Per ottenere i valori di tensione e corrente necessari al carico applicato, più celle vengono collegate in serie fino a raggiungere il livello di tensione adeguato e poi eventualmente collegate più serie in parallelo tra loro per raggiungere il valore di corrente richiesto. In questo modo si creano i cosiddetti moduli (Figura 1.55).

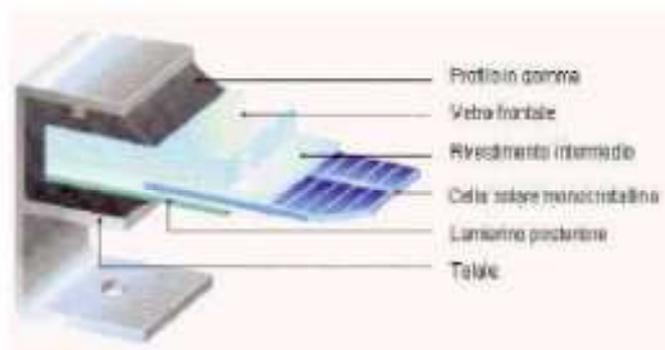


**Figura 1.55 – Modulo fotovoltaico**

Le celle sono ricoperte anteriormente con vetro temprato di circa 4 mm di spessore, che assolve la funzione di permettere il passaggio della luce e di proteggere la parte attiva. Le caratteristiche meccaniche del vetro superiore devono essere tali da assicurarne la calpestatibilità reggendo il peso di una persona senza deformazioni apprezzabili. Devono inoltre essere tali da resistere a condizioni meteorologiche particolarmente severe rappresentate anche dagli urti in seguito alla caduta di grandine di grosse dimensioni. La capacità del vetro utilizzato di essere attraversato dalla luce solare è molto superiore a quella dei normali vetri in commercio, in modo da non pregiudicare il rendimento complessivo del modulo: per raggiungere tale risultato i costruttori ricorrono a particolari composizioni con basso contenuto di ferro.

Tra il vetro e le celle fotovoltaiche è interposto un sottile strato di vinil-acetato di etilene (EVA) trasparente, al triplice scopo di evitare un contatto diretto tra celle e vetro, eliminare gli interstizi che si formerebbero a causa della superficie non perfettamente liscia delle celle, ed isolare elettricamente la parte attiva dal resto del laminato.

Con funzioni analoghe viene posto un ulteriore foglio di EVA sul retro delle celle. A chiusura del sandwich realizzato, viene in genere utilizzato un foglio di Tedlar (in genere di color bianco), eventualmente rinforzato con fogli metallici e polimerici, e da ultimo un lamierino. Nel caso in cui a chiusura posteriore non ci sia il lamierino, ma un altro vetro con caratteristiche meccaniche e trasmissive inferiori a quelle previste per il vetro anteriore, il modulo è chiamato a *doppio vetro*, (Figura 1.56).



**Figura 1.56 – Modulo fotovoltaico con lamierino posteriore**

La soluzione a doppio vetro offre maggiore protezione e consente una trasparenza che, per l'uso architettonico, è spesso essenziale; per contro, ne raddoppia quasi il peso (sconsigliandone l'uso in impianti mobili) e ne aumenta il prezzo di mercato.

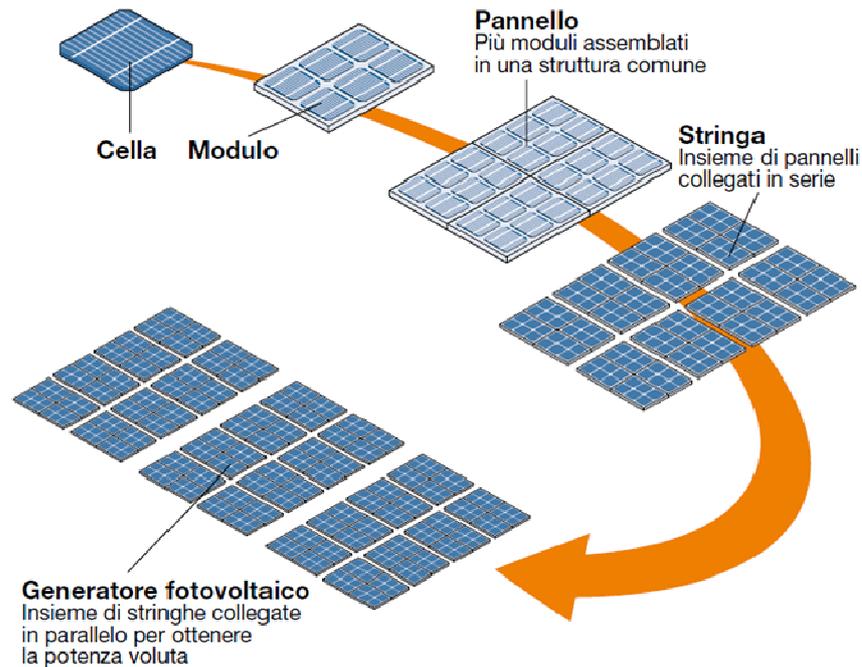
Una variante architettonica del doppio vetro è adoperata quando i moduli fotovoltaici sostituiscono in modo anche parziale i tamponamenti esterni degli edifici; in questo caso si deve ricorrere a moduli con bassa trasmittanza termica. Questa caratteristica si ottiene ricorrendo a costruzioni con vetro camera, applicando cioè un altro strato di vetro al retro del modulo, lasciando una adeguata intercapedine di aria che funge da isolante termico. Sul bordo dei moduli può poi essere presente o meno una cornice generalmente realizzata in alluminio anodizzato e incollata al sandwich con gomma siliconica. La cornice contribuisce a proteggere il bordo del modulo nella fase di installazione.

I collegamenti elettrici con l'esterno avvengono nella maggior parte dei casi all'interno delle cassette di terminazione stagne dotate di passacavi ed applicate con gomma siliconata sul retro dei moduli. Nelle cassette sono disponibili la polarità positiva e negativa ed i diodi di by-pass, il cui scopo è di impedire, qualora la potenza dei singoli moduli della stringa non siano bilanciati, gli squilibri di tensione tra i moduli stessi che possono provocare seri danni al modulo.

### **1.3.7 Tipologie di impianto fotovoltaico**

Gli impianti fotovoltaici sono costituiti da uno o più moduli fotovoltaici collegati tra loro (Figura 1.57), in cui avviene la vera e propria trasformazione dell'energia solare in energia elettrica, e da altri dispositivi che servono a rendere fruibile tale energia prodotta presso l'utenza. L'insieme di questi ulteriori dispositivi è detto Balance Of System (BOS).

Là dove è necessario far assumere alla tensione disponibile verso l'utenza un valore costante si utilizzano opportuni regolatori di tensione o circuiti di tipo chopper. L'impiego di questi circuiti presenta inoltre il vantaggio di poter massimizzare le prestazioni del campo fotovoltaico facendolo lavorare con valori di tensione e corrente ottimali. Dispositivi di questo genere si chiamano *maximun power point tracker* o *MPPT*, in altre parole inseguitori del punto di massima potenza.



**Figura 1.57 – Generatore fotovoltaico**

Se è necessario disporre di energia elettrica sotto forma di corrente alternata monofase o trifase è necessario l'utilizzo di inverter. I moderni inverter uniscono alla conversione da corrente continua in alternata altre importanti funzioni quali la protezione dei carichi della rete a valle, ed integrano sistemi di gestione MPPT.

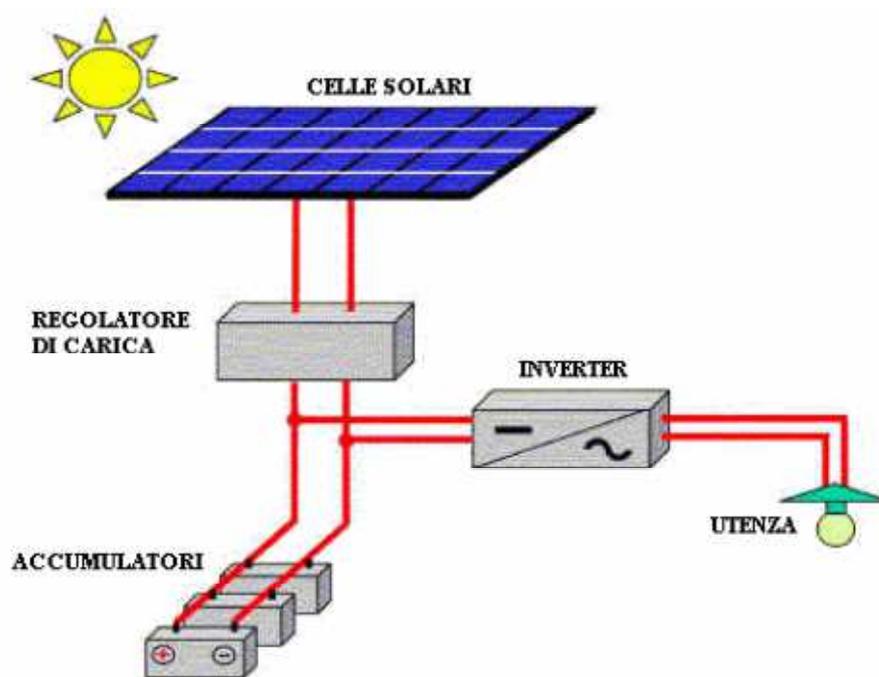
Gli impianti fotovoltaici sono classificati in due categorie:

- Impianti isolati (*stand-alone*)
- Impianti connessi alla rete (*grid connected*)

### **1.3.7.1 Impianti stand-alone**

Gli impianti stand-alone sono i sistemi non collegati alla rete elettrica perciò con funzione di coprire la totalità della domanda energetica dell'utenza. Per garantire la continuità d'alimentazione al carico, questi impianti prevedono un sistema di accumulo a batterie. L'energia fornita dal modulo, ma non utilizzata dal carico o in eccedenza, viene usata per caricare le batterie; quando poi il fabbisogno aumenta, o quando il modulo non eroga sufficiente potenza, l'energia immagazzinata viene utilizzata.

La corrente generata dal sistema fotovoltaico è una corrente continua e può direttamente essere utilizzata per l'alimentazione di carichi predisposti per tale tipo di corrente. Se l'utenza è invece costituita da apparecchiature che prevedono una alimentazione in corrente alternata, è necessario anche un convertitore statico detto inverter. Questi sistemi sono quindi costituiti da: pannelli fotovoltaici, regolatore di carica, batteria e inverter (Figura 1.58).



**Figura 1.58 – Schema di un impianto fotovoltaico stand-alone**

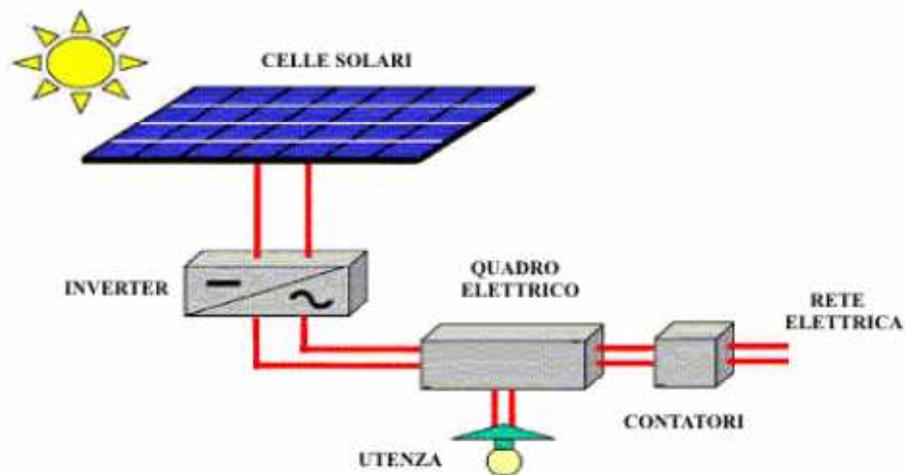
Gli impianti stand-alone sono impiegati principalmente per dare alimentazione ai carichi in casi di zone isolate quali ad esempio baite di montagna, zone dei paesi in via di sviluppo e tutte quelle zone non facilmente elettrificabili.

Questo sistema trova la sua applicazione anche nell'illuminazione, con tecnologia a LED alimentata da pannello fotovoltaico, di parcheggi, strade, giardini pubblici, parchi, piste ciclabili e in tutti quei luoghi in cui non vi è convenienza economica ad installare impianti da rete di tipo tradizionale

### 1.3.7.2 Impianti grid-connected

Gli impianti grid-connected sono impianti fotovoltaici connessi alla rete elettrica locale o nazionale, che produce energia elettrica per l'utenza e immette in rete la quantità prodotta in eccesso creando un vero e proprio scambio bidirezionale con la rete pubblica (Figura 1.59).

Se la produzione del campo fotovoltaico è in eccesso per un certo periodo rispetto ai consumi, l'eccesso viene inviato in rete, mentre nelle ore in cui il generatore non fornisce energia elettrica sufficiente a soddisfare il carico, l'energia elettrica viene acquistata dalla rete pubblica. Questo processo viene contabilizzato generalmente mediante l'ausilio di due o tre contatori che misurano l'energia scambiata nelle due direzioni.



**Figura 1.59 – Schema di un impianto fotovoltaico grid-connected**

In questi tipi d'impianti, la rete elettrica è vista come un sistema di accumulo, che assorbe energia nei periodi di maggior irraggiamento solare e la restituisce in quelli meno favorevoli.

Non è necessario che l'impianto sia dimensionato per far fronte al fabbisogno energetico di tutti i carichi alimentati, perché la rete svolge la funzione di polmone, facendo fronte alla parte d'energia non fornita dall'impianto. In questo modo, si può focalizzare le scelte in base ad altri vincoli, come l'ampiezza delle aree disponibili per i pannelli.

Questa tipologia d'impianti, definita "generazione distribuita", è la più idonea ad una diffusione in larga scala del fotovoltaico, trovando applicazione in edifici urbani esistenti o di nuova realizzazione, sfruttando tutte quelle superfici che ai nostri occhi sembrano marginali (pensiline, frangisole).

### **1.3.8 Energia elettrica prodotta da un sistema fotovoltaico**

#### **1.3.8.1 Dalla potenza all'energia elettrica**

Il generatore fotovoltaico fornisce una potenza che varia in modo sostanziale in relazione al sito in cui si trova il generatore e all'istante in cui viene misurata (giorno dell'anno, ora del giorno e condizioni meteorologiche). La potenza nominale (potenza massima) di un impianto fotovoltaico non è significativa dell'energia elettrica che può produrre.

L'energia solare rappresenta il "carburante" dell'impianto PV e non è sempre disponibile, ma soprattutto varia da un luogo all'altro. Al fine di valutare quanta energia può produrre un impianto di una data potenza nominale in un determinato luogo, cioè per passare dai kilowatt ai kilowattora, occorre conoscere la disponibilità di carburante solare in quel luogo. Bisogna cioè stimare le "ore equivalenti a piena potenza" per cui l'impianto può funzionare ogni anno, in base al carburante disponibile; sono ovviamente ore "fittizie" perché si riferiscono alla potenza nominale. La convenienza del fotovoltaico aumenta quindi con il numero di ore equivalenti a piena potenza: prima di progettare un impianto PV occorre valutare attentamente le risorse solari disponibili sul posto.

L'energia elettrica che un impianto PV può produrre in un anno, o il numero di ore equivalenti a piena potenza, dipende principalmente da:

- radiazione solare disponibile;
- orientamento e inclinazione dei moduli;
- rendimenti dell'impianto PV.

#### **1.3.8.2 Radiazione solare**

L'energia che l'unità di superficie riceve dal Sole, in un determinato intervallo di tempo, prende il nome di *radiazione solare*. In genere, ci si riferisce a una superficie

orizzontale di un metro quadrato, per cui la radiazione solare si esprime in kilowattora al metro quadrato ( $\text{kWh/m}^2$ ).

Per stimare la produzione di energia elettrica si utilizza generalmente la radiazione solare riferita ad un intero anno, come valore medio su più anni (radiazione media annua). Sono tuttavia disponibili anche dati con radiazione solare giornaliera media, ogni mese dell'anno.

I valori della radiazione solare media annua in Italia si possono ricavare in svariati modi (Norma UNI 10349, Atlante solare Europeo, banca dati ENEA, ASHRAE, ecc), e varia dai  $3.6 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$  della Pianura Padana ai  $4.7 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$  del centro sud e ai  $5.4 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno}$  della Sicilia.

In località favorevoli del Sud e delle Isole è possibile pertanto raccogliere annualmente circa  $2000 \text{ kWh/m}^2$ , l'equivalente energetico di 1.5 barili di petrolio per metro quadrato, mentre il resto dell'Italia si trova fra i  $1750 \text{ kWh/m}^2$  della fascia tirrenica e  $1300 \text{ kWh/m}^2$  della zona padana (Figura 1.60). [7]

La radiazione solare annua per una stessa località può variare da una fonte all'altra anche del 10%, poiché deriva da elaborazioni statistiche di dati relativi a periodi di osservazione diversi; tali valori sono inoltre soggetti alla variabilità meteorologica da un anno all'altro.

### **1.3.8.3 Orientamento e inclinazione dei moduli**

Le banche dati forniscono il valore della radiazione solare, riferita alla superficie orizzontale di un metro quadrato.

Spesso i moduli vengono però inclinati per aumentare la radiazione diretta sul modulo, ad esempio negli impianti a terra, oppure è inclinata la superficie sulla quale sono montati (falda del tetto o superficie laterale dell'edificio o anche superficie di appoggio su palo stradale); l'inclinazione ha peraltro il vantaggio di ridurre l'accumulo di sporcizia sul pannello, favorendone la pulitura naturale mediante la pioggia.

Per inclinazione si intende l'angolo che il modulo forma con l'orizzontale, come mostrato in Figura 1.61.

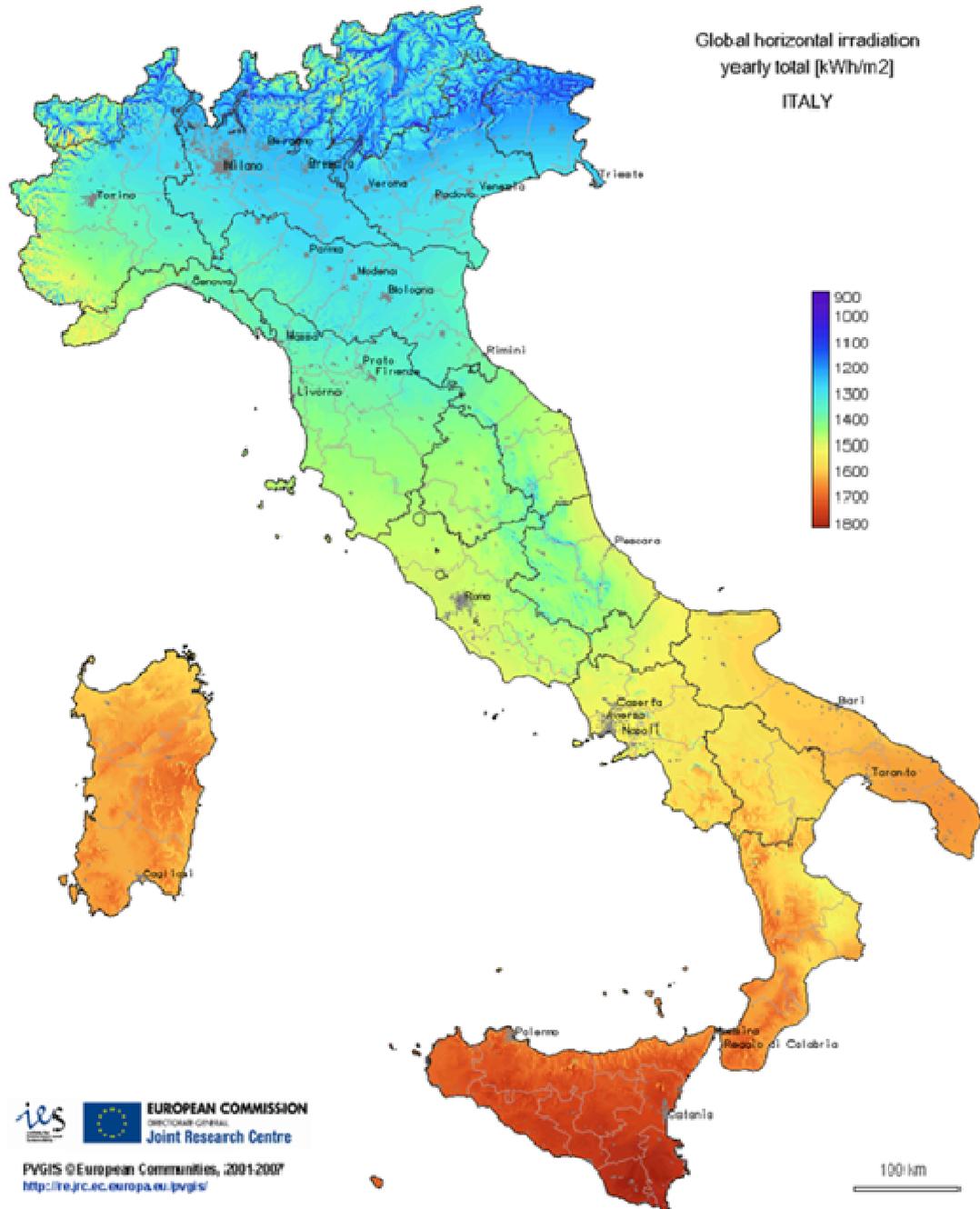
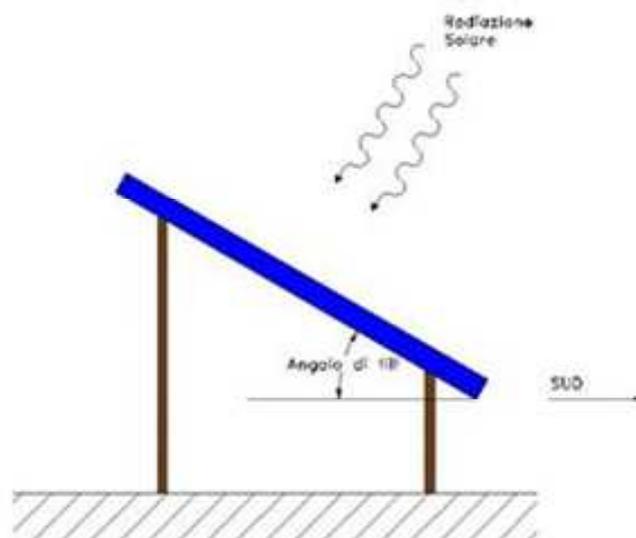


Figura 1.60 – Radiazione solare orizzontale annua (kWh/m<sup>2</sup>) sul territorio italiano (fonte JRC)



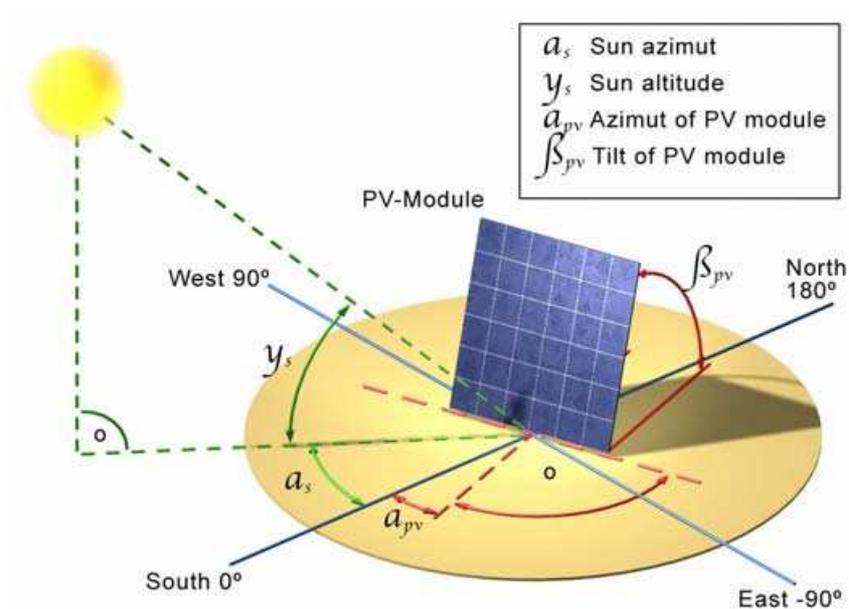
**Figura 1.61 – Schema di inclinazione del modulo PV**

I moduli orizzontali hanno inclinazione pari a zero, i moduli disposti verticalmente hanno inclinazione  $90^\circ$ .

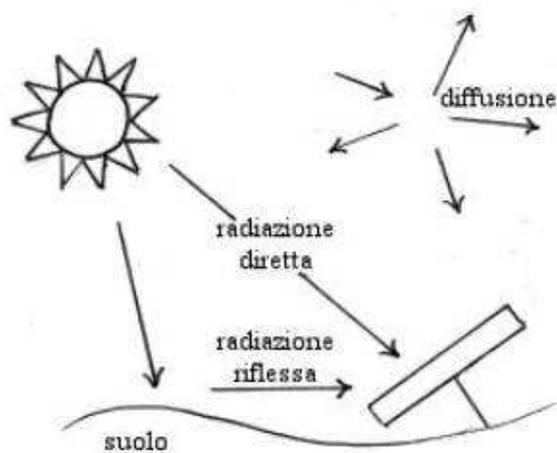
La radiazione diretta ricevuta da una superficie inclinata cambia con l'orientamento della superficie stessa rispetto ai punti cardinali (Nord, Sud, Est, Ovest). L'orientamento può essere inclinato con l'angolo di deviazione rispetto alla direzione ideale sud: con il segno  $-$  quelli verso est e con il segno  $+$  quelli verso ovest. La combinazione dell'inclinazione e dell'orientamento determina l'*esposizione* del modulo (Figura 1.62). La ricerca della migliore esposizione, per massimizzare la radiazione solare ricevuta dai moduli, è tra le prime occupazioni del progettista di un impianto PV. Tale scelta è limitata sui tetti o sulle pareti di un edificio, ma non lo è per il posizionamento dei moduli su palo stradale. [7]

L'orientamento ottimale è  $0^\circ$  (Sud). L'effetto dell'inclinazione cambia con la latitudine, poiché aumentando la latitudine si riduce l'altezza del Sole sull'orizzonte: in Italia l'inclinazione ottimale del modulo è pari all'angolo che esprime la latitudine (circa  $40^\circ$ ) diminuito di  $10^\circ$  (approssimativamente  $30^\circ$ ). [7]

A parità di radiazione globale (diretta più diffusa), il vantaggio di una buona esposizione del modulo è tanto maggiore quanto più è elevata la componente diretta (Figura 1.63).



**Figura 1.62 – Schema di orientamento del pannello PV**



**Figura 1.63 – Modulo non orizzontale che riceve anche la radiazione riflessa dalla superficie su cui è installato**

Per una prima valutazione delle potenzialità di produzione di energia elettrica di un impianto PV è in genere sufficiente applicare alla radiazione media annuale sul piano orizzontale i coefficienti correttivi in relazione alla inclinazione ed orientamento dei moduli, (Tabella 1.2).

**Tabella 1.2 – Coefficienti correttivi da applicare a superfici diversamente orientate e inclinate [7]**

<b>Orientamento (gradi)</b>	<b>Inclinazione °(gradi)</b>				
	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>90</b>
<b>0 (Sud)</b>	1,11	1,13	1,11	1,03	0,75
<b>± 15</b>	1,10	1,12	1,11	1,03	0,76
<b>± 30</b>	1,09	1,11	1,10	1,03	0,78
<b>± 45</b>	1,07	1,09	1,08	1,02	0,79
<b>± 60</b>	1,05	1,06	1,04	0,99	0,78
<b>± 90 (Est-Ovest)</b>	0,99	0,97	0,94	0,88	0,70

Dall'esame della tabella risulta che la perdita di potenzialità associato ad un orientamento dei moduli diverso dal sud (ideale) aumenta con l'inclinazione dei moduli stessi, ma è:

- trascurabile fino a  $\pm 15^\circ$
- penalizzante oltre  $\pm 30^\circ$

L'aumento di potenzialità con l'inclinazione può essere al massimo del 13% (Nord e Centro Italia), passando da moduli orizzontali a moduli inclinati di  $30^\circ$ .

#### **1.3.8.4 Rendimento dell'impianto fotovoltaico**

La produzione di energia elettrica fino ad ora considerata, viene valutata al lordo delle perdite del campo PV (lato c.c) e del resto dell'impianto (parte c.a).

Le perdite nel campo PV sono dovute principalmente a:

- aumento della temperatura delle celle;
- eventuali ombreggiamenti;
- riflessioni della luce sulla superficie dei moduli;
- accumulo di sporcizia sulla superficie dei moduli;
- non linearità tra irraggiamento e prestazioni dei moduli;
- dissimmetrie (mismatch);
- effetto Joule nei cavi e nelle apparecchiature elettriche.

In un impianto ben progettato ed installato, l'entità delle perdite nel campo PV varia dal 10% al 15% dell'energia elettrica prodotta. Almeno la metà di tali perdite è dovuta all'aumento della temperatura delle celle.

A queste perdite nel campo PV vanno poi sommate quelle sul lato c.a (perdite nel resto dell'impianto) valutabili intorno al  $5\% \pm 10\%$  e dovute:

- all'inverter ed eventuale trasformatore;
- ai cavi e agli altri componenti elettrici.

Complessivamente, l'energia elettrica che può produrre un impianto PV, in base alla radiazione solare disponibile sui moduli, va ridotta moltiplicandola per un fattore 0,75 o nel migliore dei casi 0,85, sempre che l'impianto sia attentamente progettato e correttamente installato. [7]

### **1.3.9 Analisi economica – finanziaria**

#### **1.3.9.1 Convenienza economica**

Per lo sviluppo di un piano di fattibilità che porti alla valutazione della effettiva convenienza economica dell'impianto, è necessario valutare attentamente i costi e prevedere i potenziali ricavi associati alla produzione di energia elettrica.

La convenienza di un impianto PV può essere valutata attraverso una specifica analisi economica e finanziaria, in base ai dati peculiari di ogni situazione; essa dipende soprattutto da:

- *costo dell'impianto e dell'esercizio*: come per tutti gli impianti a fonte rinnovabile, richiede un elevato investimento iniziale, mentre i costi di

esercizio sono ridotti al minimo in quanto il “combustibile” è gratis gratuito. Anche i costi di manutenzione sono limitati poiché il sistema, nella maggior parte dei casi, è privo di parti in movimento. Attualmente, in Italia il costo di un impianto varia da 3000 a 3500 € per kWp di potenza installata; negli impianti di grandi dimensioni (centrali fotovoltaiche), il costo può scendere fino a 2500 €/kWp grazie agli sconti sulla quantità. Il costo di manutenzione medio annuo, considerandolo distribuito sull'intero periodo di vita dell'impianto, è stimato intorno a l'1% ÷ 2% del costo dell'impianto, ed è fondamentalmente legato alla sostituzione dell'inverter.

- *ricavi*: derivano dalla tariffa incentivante (compresi eventuali premi aggiuntivi) applicata a tutta l'energia prodotta dall'impianto PV, dal risparmio di energia consumata dall'utente e non prelevata dalla rete, e/o dal ricavo dell'energia venduta;
- *costo capitale investito*: Le modalità di finanziamento del costo dell'impianto influenzano il ritorno dell'investimento. Se l'impianto viene realizzato con finanziamento da parte di terzi, occorre tenere conto dell'incidenza degli interessi pagati. Se viene autofinanziato, va messo in conto il mancato interesse che sarebbe derivato dall'impiego alternativo del capitale.
- *regime fiscale*: Il regime fiscale, cui è soggetto il committente, sui ricavi di vendita di energia (contratto vendita di energia) o sugli stessi incentivi può modificare in modo sostanziale il quadro economico. Inoltre, l'IVA rappresenta un costo per il privato, non per un'impresa.

Limitatamente ad impianti di piccola taglia (1 kW ÷ 3 kW), realizzati sulle pertinenze di edifici e destinati ad operare in regime di scambio sul posto, è possibile effettuare valutazioni approssimate, di validità generale, che portano alle seguenti stime del *tempo di ritorno del capitale investito* (tempo entro il quale il ricavo netto uguaglia il capitale investito e da quel momento in poi il ricavo diventa guadagno, a meno delle spese di manutenzione) per un impianto progettato e realizzato in modo ottimale:

- Italia settentrionale: 7 ÷ 9 anni
- Italia centrale: 6 ÷ 7 anni
- Italia meridionale: 4 ÷ 5 anni [7]

### 1.3.9.2 Analisi finanziaria

Per una valutazione economica dei sistemi per poter riassumere e valutare l'investimento, si deve far ricorso a degli indici di valutazione economica, che riassumono la situazione finanziaria del progetto ed al conto economico costituito da vari fattori.

Il processo per il loro calcolo è basato su un modello economico che dati gli input di progetto fornisce istantaneamente il valore degli indici di valutazione economica del progetto.

Gli indici di valutazione economica sono:

- *Valore attuale netto (VAN)*: consiste nella somma algebrica dei flussi di cassa netti associati all'investimento, attualizzati con un certo tasso di sconto ( $k_E$ ). In pratica VAN misura l'aumento di valore economico dell'impresa associato all'investimento. Per la società rappresenta il valore monetario che l'investimento genera in contanti. È per questo motivo che la scelta di investire su un progetto avviene unicamente se:

$$VAN \geq 0$$

- *Tasso Interno di Rendimento (TIR)*: rappresenta in termini economici il rendimento percentuale del capitale “ancora immagazzinato” nell'investimento. In altri termini se si assume che ogni anno, l'eventuale rendimento eccedente TIR rappresenti una sorta di “rimborso”, vada cioè a ridurre il capitale impegnato nell'investimento, l'insieme dei flussi di cassa netti dell'investimento consentirà una remunerazione pari a TIR sul capitale immagazzinato. Il TIR si presenta quindi come un rendimento percentuale “intrinseco” dell'investimento e come tale è facilmente comprensibile dai potenziali investitori, che non sono in grado di comparare tale tasso con quello che caratterizza investimenti alternativi. Contrariamente al VAN è un criterio di tipo relativo, non tiene cioè conto della dimensione assoluta dell'investimento. Per valutare la remuneratività dell'investimento la condizione da rispettare è:

$$TIR \geq k_E$$

Il tasso di sconto viene scelto come obiettivo aziendale. Come sopra citato, esso rappresenta il rendimento che si vuole ottenere per il capitale proprio investito ed è differente al costo del capitale medio che tiene conto del costo del capitale di debito e di quello proprio.

La conferma della positività di questo indice è una condizione necessaria per una valutazione positiva dell'investimento che, unita alla valutazione data dal calcolo del VAN crea una condizione necessaria e sufficiente per intraprendere l'investimento. [8]

Quindi le condizioni da rispettare per la valutazione dell'investimento sono:

$$\begin{cases} VAN \geq 0 \\ TIR \geq k_E \end{cases}$$

### 1.3.9.3 Il Payback Time (PT)

Un ulteriore metodo che può essere utilizzato per la valutazione degli investimenti consiste nel cosiddetto payback time (tempo di recupero) che indica quanto tempo è richiesto per rientrare dei capitali investiti.

La formula per la determinazione del *PT*, nella sua formula più semplice, è data dalla seguente equazione:

$$PT = \frac{I}{F_t}$$

dove:

- $I$  = valore dell'investimento;
- $F_t$  = flusso di cassa netto (costante nel tempo) generato da  $I$  periodo  $t$ .

Quindi, ad esempio, se si sta valutando un investimento di 100 milioni di euro per un nuovo impianto che genera un cash flow positivo di 10 milioni di euro annui, il *PT* sarà pari a 10 anni; in altre parole ci vorranno 10 anni per rientrare del capitale investito.

Il metodo appena visto è però troppo semplice per essere utilizzato in pratica, dal momento che la maggior parte degli investimenti genera entrate e uscite che variano nel tempo. Una versione leggermente più “raffinata” del metodo prevede di sommare i flussi di cassa netti prodotti nel tempo dell’investimento, finché il risultante flusso di cassa netto cumulato non sia in grado di coprire l’investimento iniziale.

Il metodo del *PT* è piuttosto grezzo, ma molto usato, soprattutto come primo approccio, per la sua semplicità. Soffre, comunque, di numerosi problemi che lo rendono utile solamente in prima approssimazione:

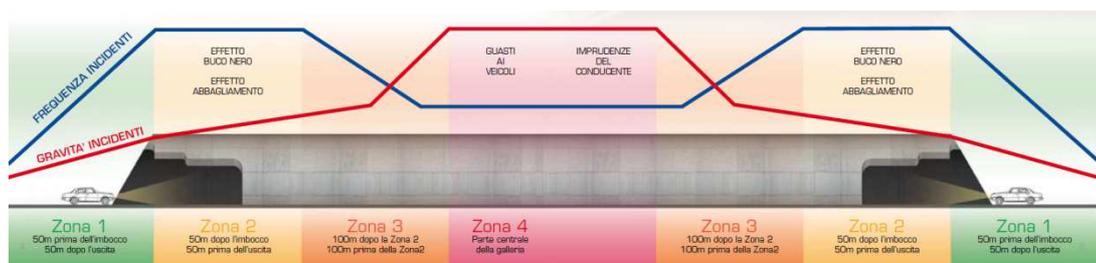
- richiede la definizione di una soglia temporale arbitraria di accettabilità;
- non considera in alcun modo la redditività dell’investimento; potrebbe quindi privilegiare investimenti dalla redditività minore se il *PT* è più rapido. Per questo si può dire che il *PT* sia più un indice di rischiosità che di valutazione della performance degli investimenti, associando ad un maggiore tempo di recupero un maggiore rischio;
- tende ad escludere investimenti che presentano flussi netti positivi più lontani nel tempo (tra cui, ad esempio, rientrano molti investimenti di natura ambientale);
- non tiene in alcun modo conto del fatto che flussi di cassa ottenuti in momenti diversi non sono tra loro equivalenti; d’altra parte, i tentativi di correzione del sistema per considerare i flussi di cassa in valore attuale, pur rendendo lo schema più accettabile in teoria, non ne incrementano di molto l’utilità rispetto, ad esempio, al *VAN*.

Per queste problematiche si preferisce utilizzare il *VAN* e il *TIR* per la valutazione dell’investimento. [8]

## 2 La Pregalleria illuminotecnica come risoluzione alle problematiche visive ed energetiche

### 2.1 Problematiche visive ed energetiche delle gallerie stradali

L'analisi degli incidenti, sviluppata con sempre maggior interesse negli ultimi anni, ha dimostrato che la frequenza degli incidenti in galleria si concentrano nelle aree di transizione agli imbocchi, molto più rispetto alla parte centrale del tunnel. Dal punto di vista della severità delle conseguenze, e quindi di quello che comunemente può intendersi come pericolosità, invece accade il contrario. La Figura 2.1 mette in evidenza i vari livelli di pericolosità a seconda della zona che si prende in considerazione. [9]



**Figura 2.1 – Suddivisione longitudinale della galleria per livelli di pericolosità**

La causa principale degli incidenti agli imbocchi della galleria è dovuta all'effetto di "buco nero" che si ha per differenza tra la quantità di luce all'esterno e quella presente all'interno della galleria causando il fenomeno dell'abbagliamento.

Negli ultimi anni, gli studi e le ricerche per una razionale illuminazione delle gallerie stradali, ed in particolare quelle autostradali, si sono moltiplicati nei vari paesi interessati allo scopo di pervenire a soluzioni soddisfacenti per la sicurezza del traffico ed accettabili dal punto di vista economico.

Occorre quindi individuare soluzioni che minimizzino l'uso dell'energia elettrica richiesta per tali impianti e che garantiscano un'elevata affidabilità, in modo da contenere al minimo gli interventi dovuti alla manutenzione.

Attualmente uno dei sistemi utilizzati per risolvere il problema dell'abbagliamento consiste nell'aumentare il numero e la potenza dei corpi illuminanti dei circuiti permanenti nella parte iniziale della galleria. Questa soluzione nella maggior parte dei casi non risolve del tutto il problema e inoltre richiede ulteriori costi di manutenzione, di installazione, di consumo della corrente, etc.

## **2.2 La pregalleria illuminotecnica**

Un'alternativa valida è quella di fare ricorso alla luce naturale, che oltre ad avere notevoli vantaggi economici dovuti al non utilizzo di energia elettrica, alla maggiore predilezione dell'occhio umano e alla minimizzazione dei costi di manutenzione ed esercizio, ha anche la possibilità di sfruttare l'autoregolazione dell'illuminamento naturale.

In alcuni casi particolari, è possibile utilizzare la luce esterna senza modificare neanche la lunghezza della galleria, ad esempio, realizzando delle aperture laterali nelle gallerie parietali. In generale la soluzione compatibile con la maggior parte delle gallerie pre-esistenti risulta la costruzione di una porzione aggiuntiva di galleria, antecedente alla galleria principale, avente la sola funzione di favorire l'adattamento visivo. [10]

Si tratta di ciò che viene denominata pregalleria illuminotecnica, cioè un manufatto situato a monte del fornice di ingresso, di lunghezza adeguata per consentire di realizzare in esso, interamente o in parte, la zona di adattamento, previste per le condizioni date. E' evidente che la realizzazione di un'apposita pregalleria, oltre a porre significativi problemi costruttivi, incrementa in misura significativa i costi iniziali dell'opera. Tuttavia, in varie circostanze, una tale soluzione può risultare l'unica possibilità praticabile per soddisfare le richieste di luminanza che discendono dall'esame delle condizioni esterne e dal tipo di strada. Inoltre, l'ipotesi di costruzione della pregalleria, anche in casi meno critici, deve essere sempre valutata attentamente e senza alcun pregiudizio, perché può consentire un'ottimizzazione progettuale. Infatti, l'indubbia validità tecnica della struttura, la richiamata capacità di autoregolazione, e l'abbattimento certo dei consumi energetici, può portare ad una valutazione economica complessiva (estesa alla vita utile dell'opera) comparabile, o

addirittura più vantaggiosa, rispetto alle soluzioni convenzionali, che si basano soltanto sull'impianto di luce artificiale.

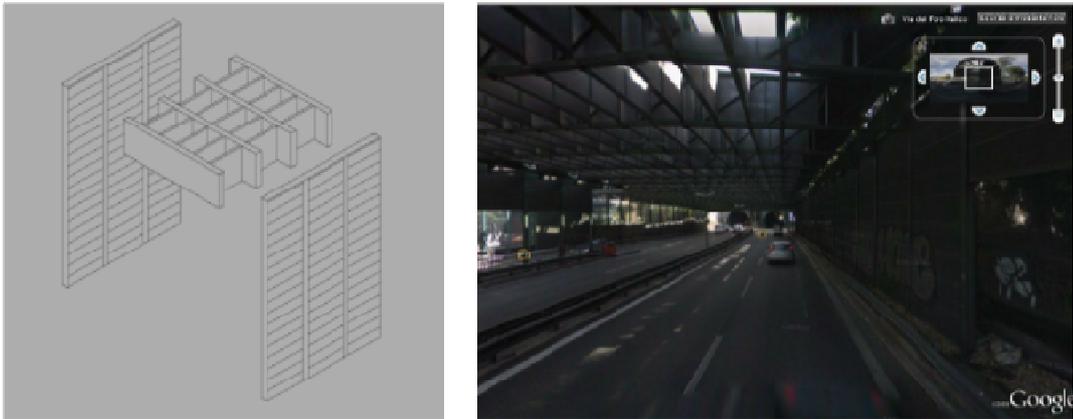
La finalità di una pregalleria illuminotecnica, è quella di riuscire a realizzare una progressiva schermatura della visione all'esterno, ed una riduzione graduale della luminanza della superficie stradale nel tratto antistante l'imbocco. Per tali scopi, ed in considerazione delle possibilità offerte dalle tecniche costruttive, una pregalleria è costituita generalmente da una struttura portante, assimilabile ad un'ossatura spaziale, e da ampie aperture (schermate o ricoperte da varie pannellature), situate in sommità e/o sulle superfici laterali. La struttura può essere costituita, ad esempio, da una serie di archi o telai in successione, disposti a forma di centine, indipendenti o collegati tra loro per mezzo di correnti longitudinali. Le luci poste tra gli archi possono essere coperte, anche in maniera progressiva ed incrementale (in funzione dell'adattamento oculare), mediante elementi che impediscano la visione diretta del sole da ciascun punto della carreggiata stradale.

Può accadere, specialmente nei casi più critici a causa del particolare orientamento degli imbocchi, che non si raggiungano nella pregalleria i livelli minimi di luminanza prescritti in alcune delle condizioni di progetto ipotizzate. Una tale circostanza può richiedere il ricorso ad un modesto impianto artificiale di rinforzo, che entri in funzione, soltanto quando lo squilibrio tra luminanza esterna percepita (rilevabile per mezzo di un luminanzometro installato a distanza opportuna dalla fornice) e luminanza interna superi un certo valore di soglia. L'impianto di rinforzo, eventualmente parzializzato nelle accensioni, potrà realizzare anche l'illuminazione permanente notturna, comunque necessaria nella pregalleria. In questo modo, attribuendo cioè all'illuminazione artificiale soltanto una funzione di integrazione della luce naturale, che risulterà necessaria in un numero limitato di ore di esercizio e per una durata relativamente breve, la gran parte del beneficio economico e ambientale (per i ridotti consumi di energia) correlato alla pregalleria viene comunque preservato, e pertanto tale soluzione progettuale rimane potenzialmente valida e competitiva rispetto alle soluzioni convenzionali.

## 2.3 Dimostrativi esistenti delle pregallerie

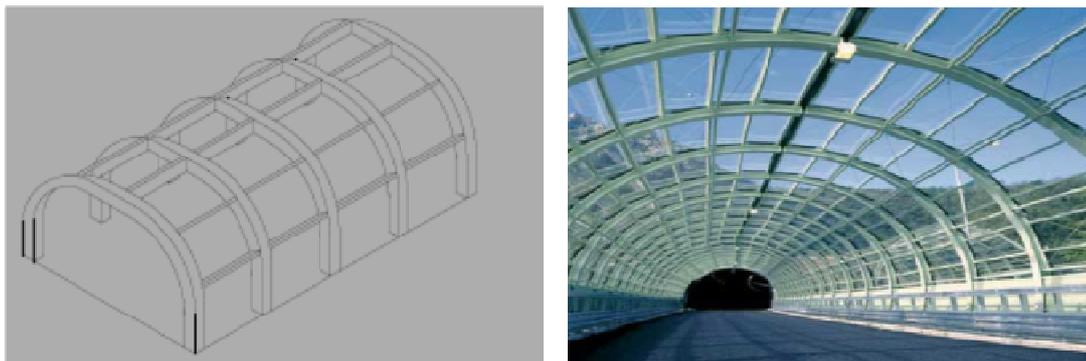
La schermatura di una pregalleria, fino ad oggi, presenta questi schemi:

- Schema a griglia: uno dei primissimi esempi di pregalleria, la tettoia è formata da travi principali e secondarie con ai lati delle barriere acustiche. Questa struttura risulta essere inadeguata perché in alcune ore della giornata si ha scarsa presenza di luce naturale e quindi un maggior tempo di adattamento dell'occhio aumentando così il rischio d'incidente.



**Figura 2.2 – Struttura a griglia, Roma – Via del Foro Italo**

- Struttura ad arcate coperta da materiale trasparente. Presenta un'ottima illuminazione di rinforzo ma non risolve il problema dell'abbagliamento.



**Figura 2.3 – Struttura ad arcate coperta con materiale trasparente, Lecco – Strada Valvassina**

- Struttura ad arcate tubolari di acciaio tagliata trasversalmente da una lamiera. Le tegole grecate, messe nella parte interna, sono in parte trasparenti in modo

da fare filtrare la luce anche sulla corsia di sorpasso. È un sistema innovativo studiato per avere solo un risparmio energetico e non da un punto di vista illuminotecnico.



**Figura 2.4 – Struttura ad arcate in tubolari di acciaio con coperture e tegole metalliche, Trento – Martignano**

### 3 Il Modello sperimentale della pregalleria

Al fine di verificare in prima analisi la fattibilità e l'efficacia della pregalleria illuminotecnica, come risoluzione alle problematiche dovute ai contrasti di luminanza e per determinare la configurazione più idonea, secondo i criteri descritti nel capitolo 1, sono stati realizzati due modelli in scala 1:20 e 1:10 di galleria e pregalleria all'interno dei quali sono state effettuate le misurazioni delle principali grandezze fotometriche fondamentali per la sua realizzazione, ossia l'illuminamento e la luminanza, per verificare il loro andamento in funzione dello spazio e delle tipologie di intervento.

Anche se per le pregallerie esiste al momento un vuoto normativo di riferimento si tengono come riferimento le prescrizioni della normativa UNI 11095.

#### 3.1 Modello sperimentale in scala 1:20

##### 3.1.1 Realizzazione del modello

Per la costruzione del modello in scala 1:20 è stato scelto di riprodurre una galleria monodirezionale a due corsie. La sezione è stata supposta circolare con dimensioni 53,5 cm di larghezza, 31,5 cm di altezza massima e 80 cm di profondità con struttura in compensato (Figura 3.1 e Figura 3.2).



**Figura 3.1 – Modello di galleria in costruzione.**



**Figura 3.2 – Modello di galleria in scala 1:20.**

La sezione della pregalleria invece è stata supposta rettangolare di larghezza 53,5 cm, di altezza 31,5 cm e di profondità 50 cm, con struttura in legno (Figura 3.3).

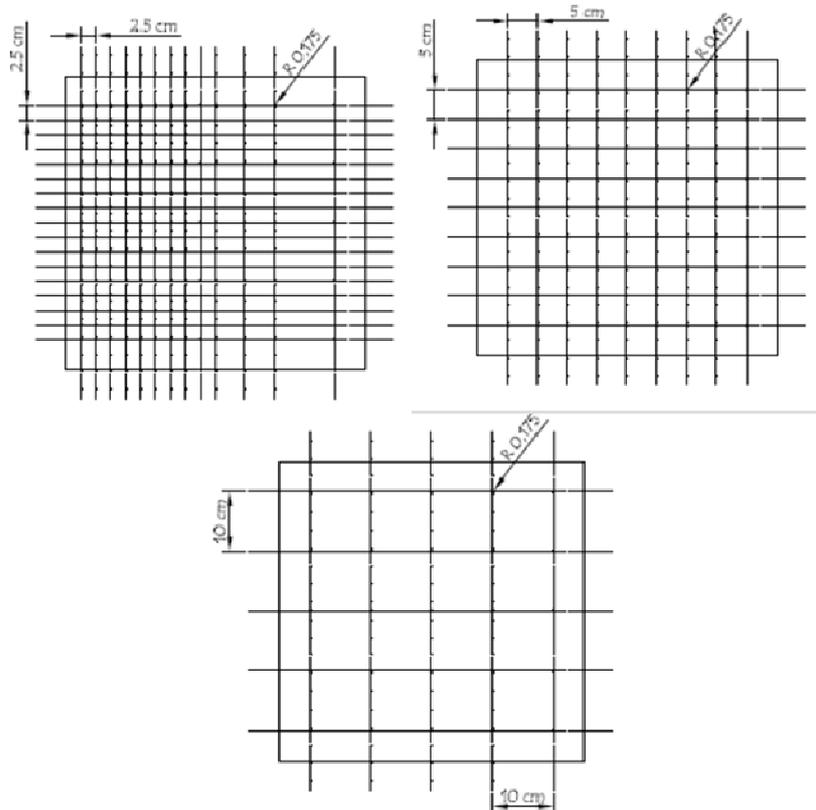


**Figura 3.3 – Modello di galleria e pregalleria in scala 1:20.**

Per il dimensionamento della copertura forata è importante considerare che essa debba illuminare la carreggiata con la luce naturale, proveniente sia direttamente dal cielo, sia dalle riflessioni della radiazione luminosa. Allo stesso tempo, la copertura forata deve impedire la visione del sole e l'entrata dei raggi, per evitare riflessioni fastidiose, abbagliamento, o forti contrasti di illuminamento e luminanza sulla carreggiata.

Pertanto è stato supposto di realizzare un sistema di foratura che varia nella lunghezza della pregalleria in maniera tale di rendere graduale l'adattamento dell'occhio. Perciò si è ipotizzato di effettuare uno schema progettuale della foratura partendo dal minor diametro di foratura realizzabile individuato in 0,175 cm e mantenerlo costante facendo variare l'interdistanza tra essi. Lo schema progettuale della foratura è illustrato nella Figura 3.4 nella quale è stato mantenuto costante il diametro dei fori a 0,175 cm variando la loro interdistanza da 2,5 cm, 5 cm e 10 cm.

L'interno del modello è stato foderato con cartoncino nero per eliminare i contributi all'illuminamento interno dovuto alle riflessioni che si avrebbe all'interno della galleria e pregalleria.



**Figura 3.4 – Schema progettuale di foratura con diametro dei fori costante e interdistanza tra i fori variabile di 2,5 cm (in alto a sinistra), 5 cm (in alto a destra) e 10 cm (in basso).**

### 3.1.2 Rilievo delle principali grandezze fotometriche

Contestualmente alla realizzazione del modello sperimentale sono state compiute le misurazioni delle principali grandezze fotometriche, l'illuminamento e luminanza, all'interno della galleria e pregalleria.

Per il rilievo dell'illuminamento è stato utilizzato un data logger multicanale modello Babuc ABC che acquisisce segnali da diversi sensori, adattando automaticamente i propri circuiti elettronici alle necessità del tipo fisico del segnale proveniente dal sensore connesso. Gli ingressi sono singolarmente configurati per il tipo di segnale, per il significato e l'ingegnerizzazione da attribuire alla grandezza. Nel caso specifico sono stati utilizzati sensori di misura dell'illuminamento, costituiti da una parte fissa (corpo strumento) e una mobile che contiene il sensore vero e proprio costituito generalmente da un trasduttore che sotto l'effetto dell'energia luminosa reagisce provocando una corrente elettrica che è rilevata da un galvanometro la cui scala è tarata in lux (Figura 3.5).



**Figura 3.5 – Strumentazione di misura dell'illuminamento: Babuc ABC (a sinistra) e sonda luxmetrica (a destra).**

Per quanto riguarda il rilevamento della luminanza è stato utilizzato un Luminanzometro modello LS 100 Konica Minolta, che misura la luminanza con sistema ottico SLR (single lens reflex) e assicura una focalizzazione precisa e garantisce che il visore mostri esattamente l'area da misurare anche a distanze molto brevi (Figura 3.6).



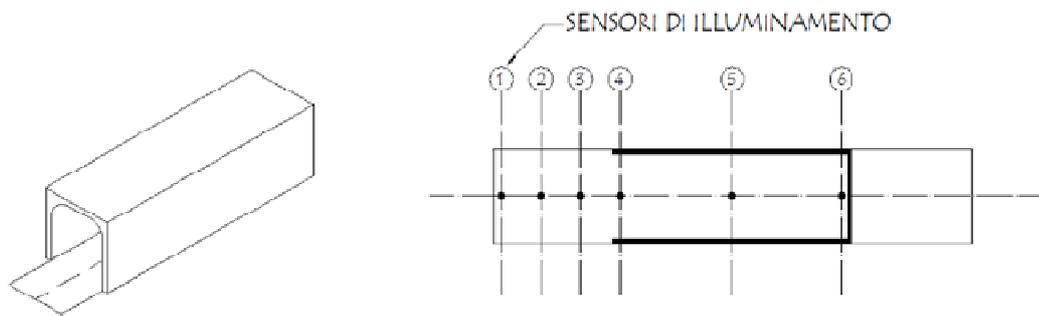
**Figura 3.6 – strumento di misura della luminanza: Luminanzometro LS 100 Konica Minolta.**

La campagna di misure è stata svolta sul terrazzo della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "La Sapienza", con orientamento del modello a Sud. Per rendere il rilievo il più realistico possibile è stato applicato alla galleria un tappo di chiusura all'estremità opposta dei punti di misura in maniera tale da avere le stesse condizioni reali di quando si entra in una galleria lunga (Figura 3.7).

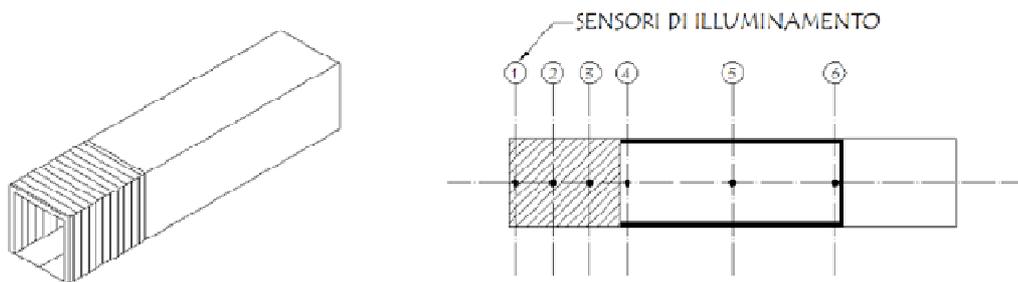


**Figura 3.7 – Il modello di galleria durante la fase di rilievo.**

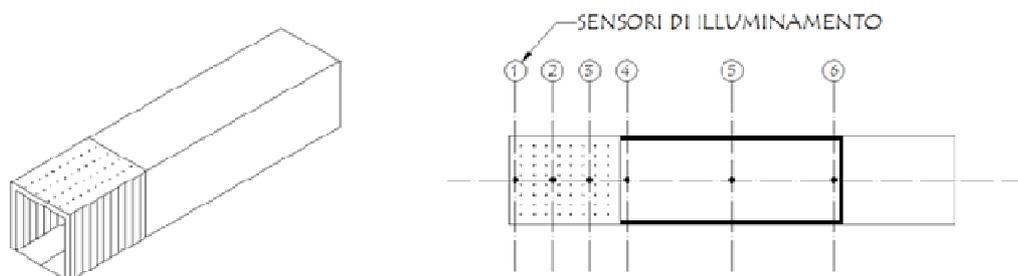
Il rilievo è stato effettuato sul modello di galleria semplice, sul modello di galleria e pregalleria senza foratura e sul modello galleria e pregalleria con foratura, mantenendo costante la distribuzione dei sensori di illuminamento, in maniera tale da poter confrontare i risultati ottenuti e vedere l'effetto che si otterrebbe con la pregalleria illuminotecnica forata (Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10).



**Figura 3.8 – Schema progettuale di rilievo sulla galleria semplice.**



**Figura 3.9 - Schema progettuale di rilievo sulla galleria con pregalleria senza foratura.**



**Figura 3.10 - Schema progettuale di rilievo sulla galleria con pregalleria e foratura.**

I valori dell'illuminamento misurati all'interno della galleria e pregalleria sono descritti nella Tabella 3.1.

**Tabella 3.1 – Valori dell'illuminamento misurati il 15 aprile con esposizione del modello a Sud**

ORA	CIELO	PUNTI	Illuminamento senza pregalleria [lux]	Illuminamento con pregalleria senza fori [lux]	Illuminamento con pregalleria con fori [lux]
12:30	sereno	1	88.380	76.300	79.100
		2	87.130	10.470	11.320
		3	87.080	2.520	2.850
		4	80.170	1.040	3.480
		5	3.320	890	910
		6	1.110	440	450
13:00	sereno	1	90.110	82.310	83.860
		2	88.820	51.500	51.660
		3	86.730	2.750	3.530
		4	7.710	1.630	1.720
		5	3.370	850	910
		6	1.000	430	460
14:00	sereno	1	89.430	82.480	84.310
		2	88.870	12.280	14.460
		3	87.430	3.620	3.610
		4	81.440	1.410	1.600
		5	2.800	850	890
		6	888	430	450

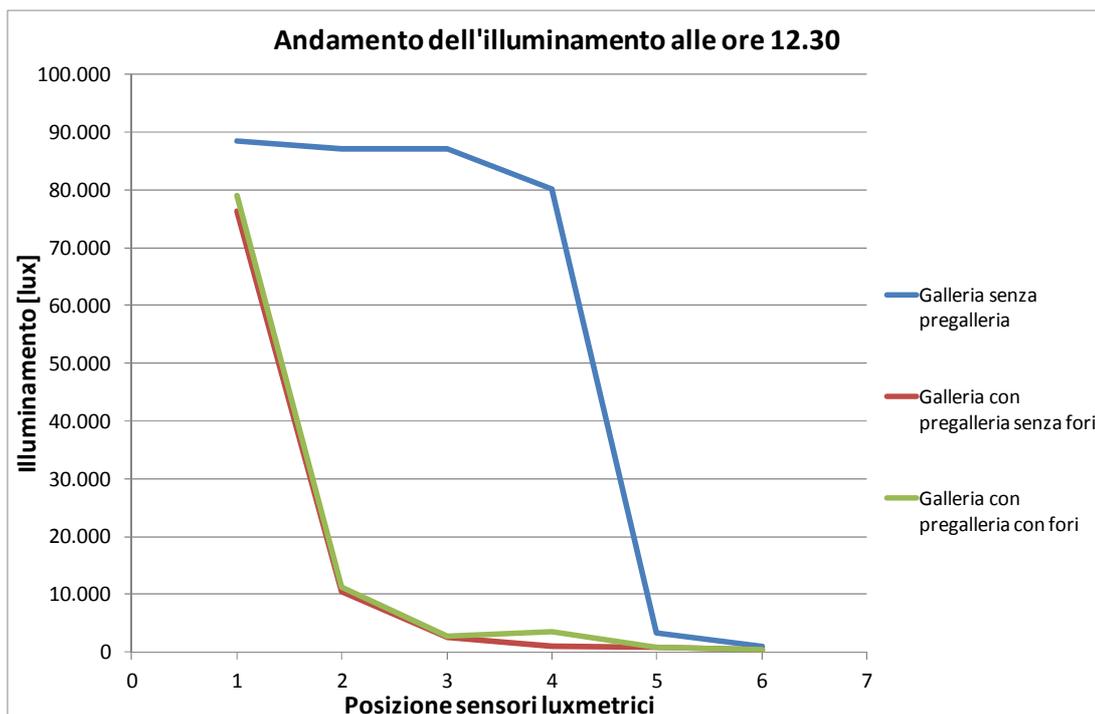
I valori delle luminanze misurati all'interno della galleria e pregalleria, nelle stesse posizioni dei sensori, sono descritti nella Tabella 3.2.

**Tabella 3.2 – Valori della luminanza misurati il 15 aprile con esposizione del modello a Sud**

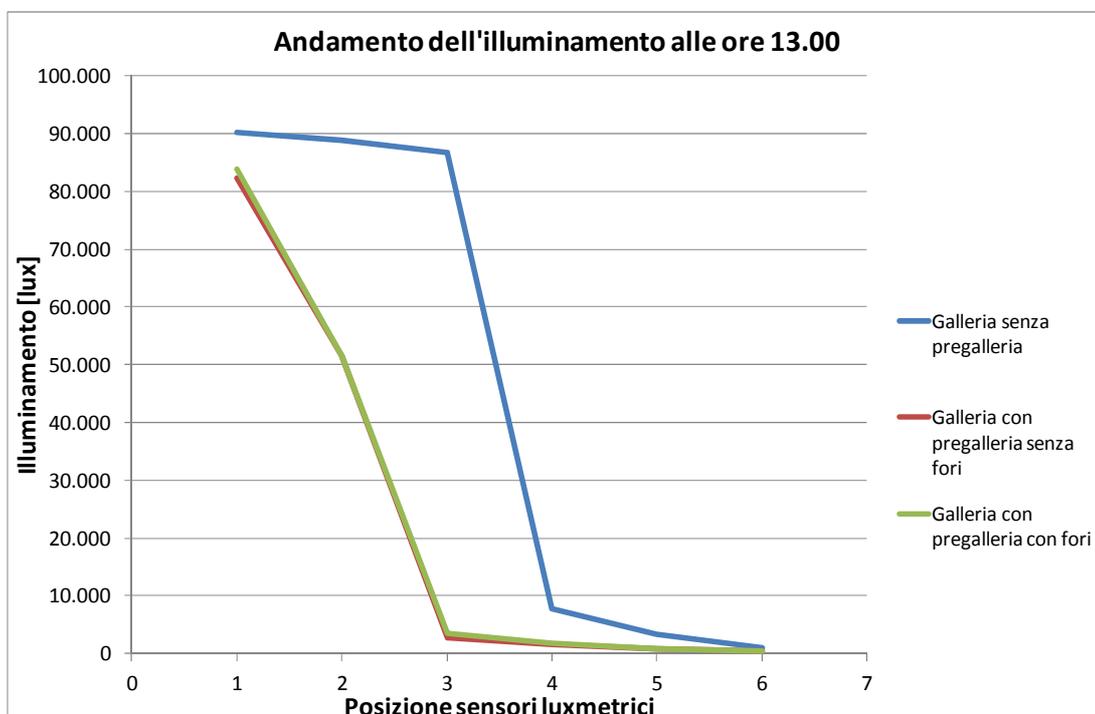
ORA	CIELO	PUNTI	Luminanza senza pregalleria [cd/m <sup>2</sup> ]	Luminanza con pregalleria senza fori [cd/m <sup>2</sup> ]	Luminanza con pregalleria con fori [cd/m <sup>2</sup> ]
12:30	sereno	1	3.695	2.855	2.874
		2	3.044	319,50	268,60
		3	2.819	184,10	213,10
		4	2.285	65,68	66,18
		5	65,97	30,53	31,27
		6	46,12	29,51	25,55
13:00	sereno	1	3.695	2.837	2.674
		2	3.044	236,70	268,60
		3	2.819	125	213,10
		4	2.285	40,60	66,18
		5	65,97	25,37	31,27
		6	46,12	24,98	25,55
14:00	sereno	1	3.840	3.110	3.226
		2	3.620	445,60	454,40
		3	3.147	161,30	273,30
		4	1.106	67,68	75,82
		5	52,55	27,14	33,03
		6	50,68	21,03	26,04

### 3.1.3 Risultati ottenuti

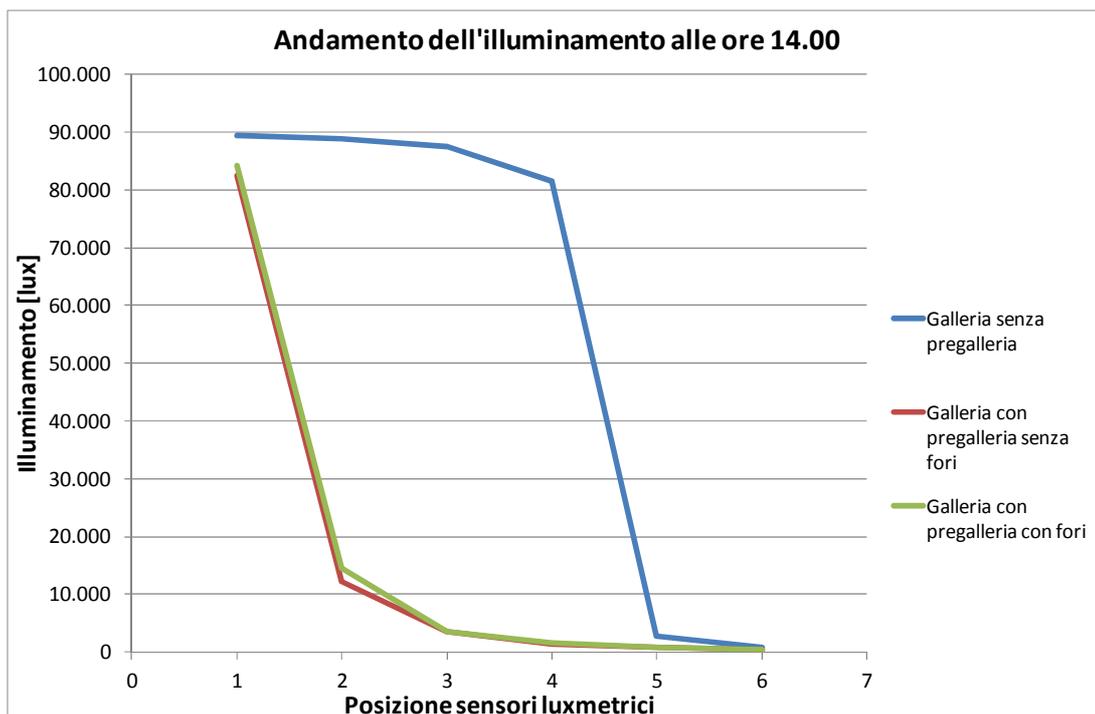
Dai primi rilievi effettuati si è notato come l'andamento dell'illuminamento e della luminanza fossero simili a quello prescritto dalla norma UNI 11095 per le gallerie (si fa riferimento a questa norma perché a oggi non esiste una normativa sulle pregallerie).



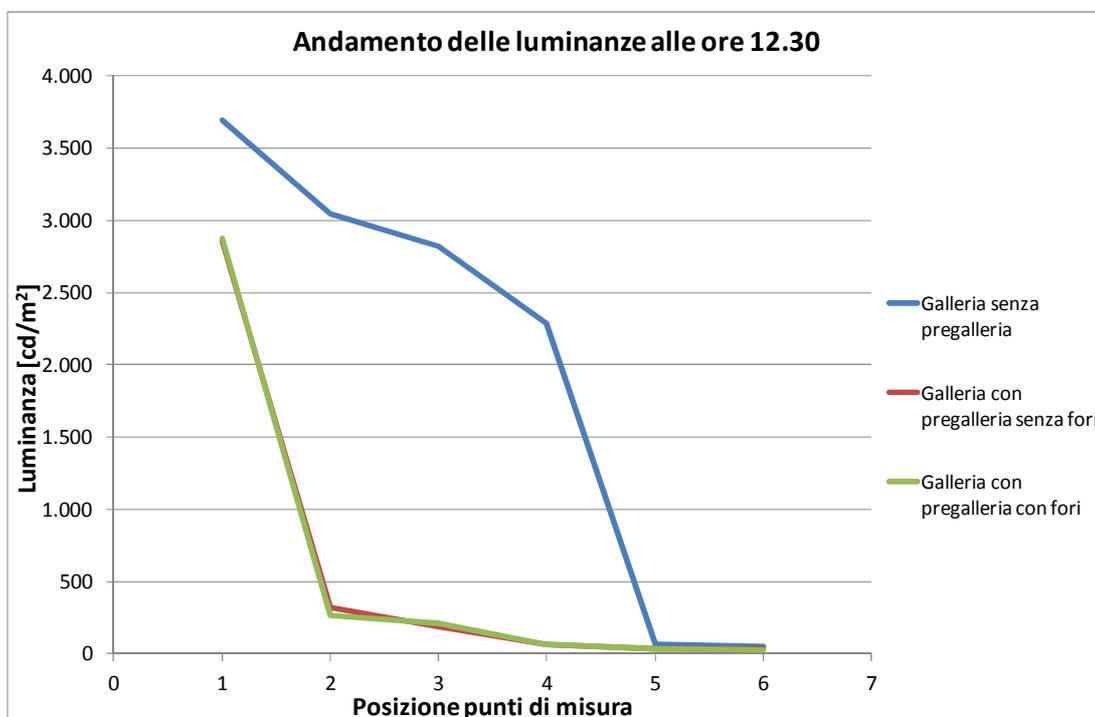
**Figura 3.11 – Grafico dell'andamento dell'illuminamento alle ore 12.30 nella galleria e pregalleria.**



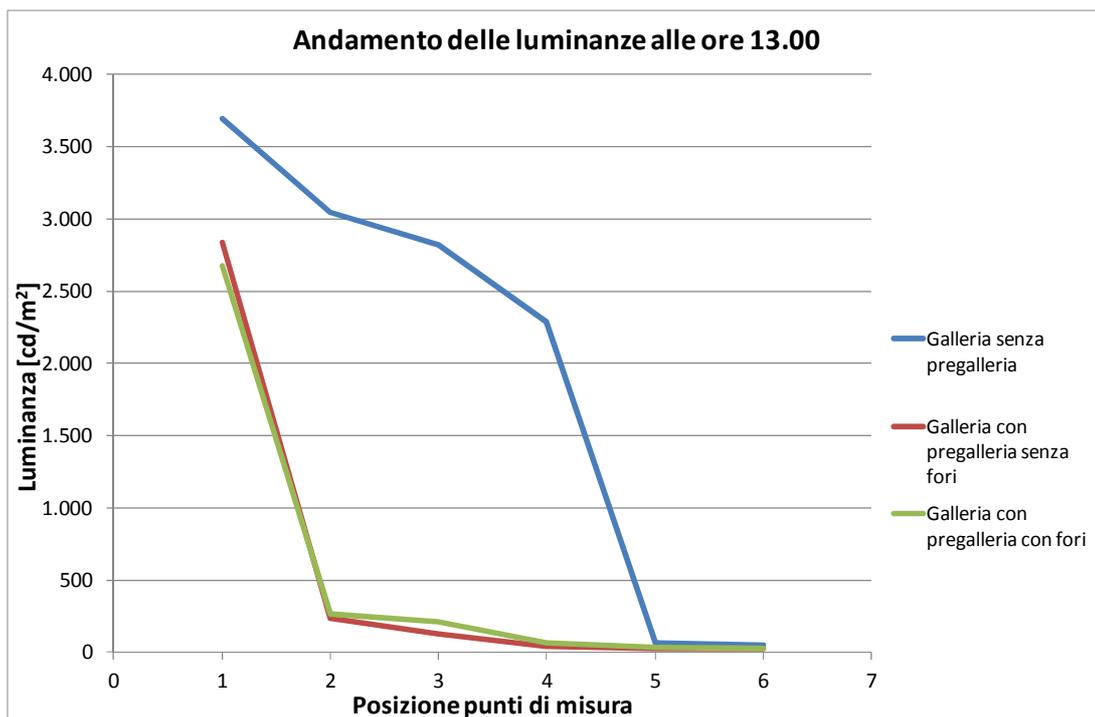
**Figura 3.12 – Grafico dell'andamento dell'illuminamento alle ore 13.00 nella galleria e pregalleria.**



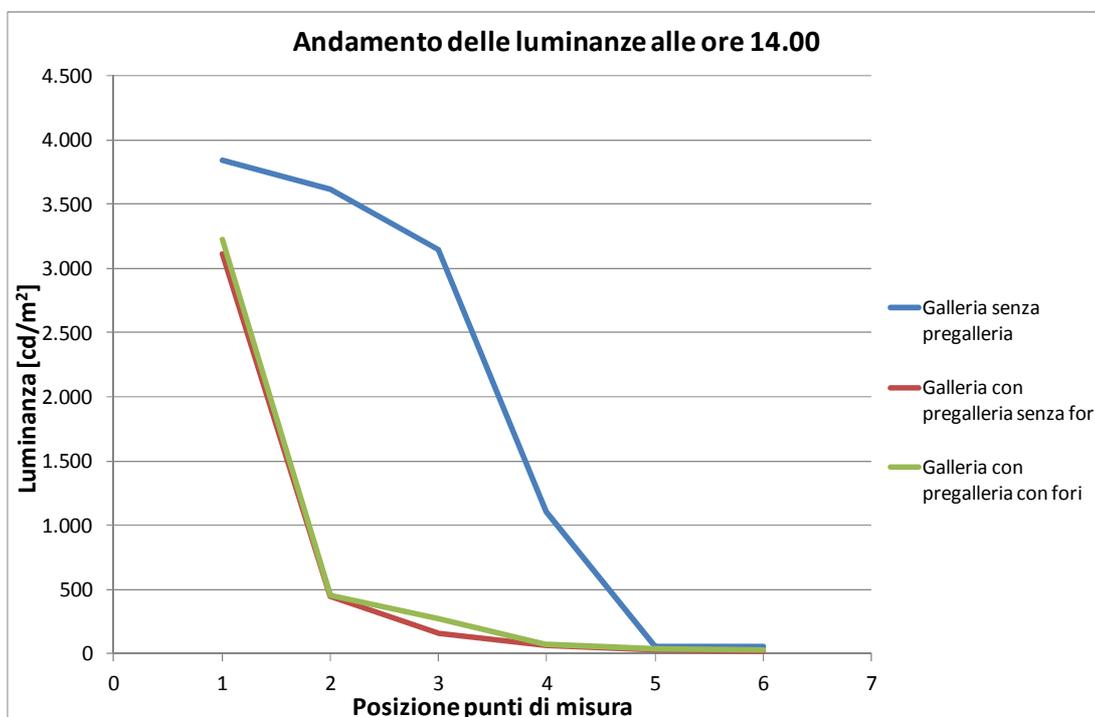
**Figura 3.13 – Grafico dell'andamento dell'illuminamento alle ore 14.00 nella galleria e pregalleria.**



**Figura 3.14 – Grafico dell'andamento delle luminanze alle ore 12.30 nella galleria e pregalleria.**



**Figura 3.15 – Grafico dell’andamento delle luminanze alle ore 13.00 nella galleria e pregalleria.**



**Figura 3.16 - Grafico dell’andamento delle luminanze alle ore 14.00 nella galleria e pregalleria.**

## 3.2 Modello sperimentale in scala 1:10

Verificata la fattibilità e l'effettiva efficacia della soluzione, partendo dai risultati ottenuti del modello in scala 1:20 si è dunque deciso di realizzarne un secondo in scala 1:10 per approfondire al meglio lo studio.

### 3.2.1 Realizzazione del modello

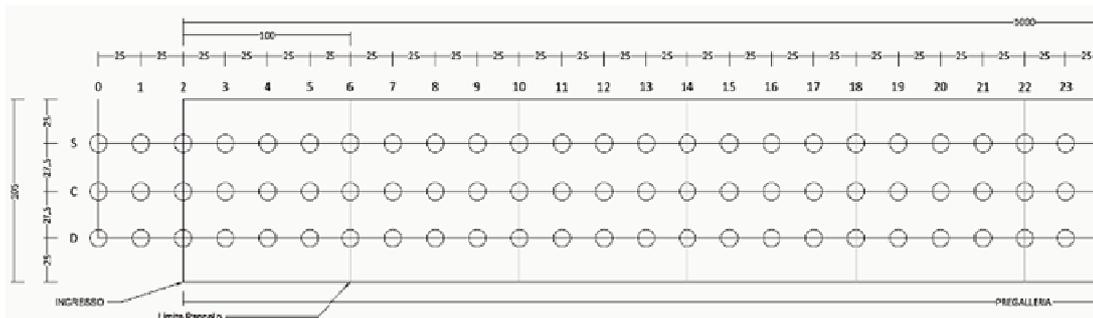
Per la costruzione del modello in scala 1:10 è stato scelto, come nel modello in scala 1:20, di riprodurre una galleria monodirezionale a due corsie. La sezione è stata supposta rettangolare con una larghezza di 107 cm, un'altezza di 63 cm e una profondità di 1000 cm. La struttura è costituita da telai di ferro coperta lateralmente da materiale plastico impermeabile. La copertura invece è costituita da una serie di lamiere di ferro di dimensioni 107x100 cm in maniera tale che risulti una struttura modulare (Figura 3.17).

Il modello è stato realizzato nel parcheggio di un'azienda in partnership con il DIAEE sita a Pomezia con esposizione Sud Sud-Ovest.



**Figura 3.17 – Modello in scala 1:10 di una galleria e di una pregalleria.**

Per il rilievo delle grandezze fotometriche è stato definito una griglia di misure dell'illuminamento e della luminanza lungo tutta la pregalleria, descritta in Figura 3.18.



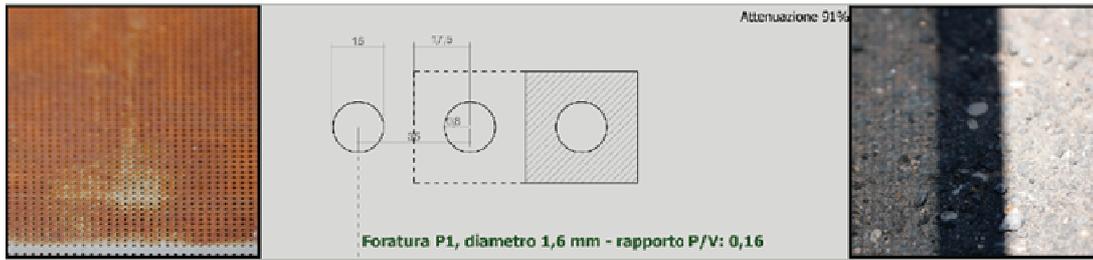
**Figura 3.18 – Schema della sequenza di posizionamento delle sonde dei valori di Luminanza (L) e Illuminamento (E) lungo tutta la pregalleria**

### **3.2.2 Studio della foratura**

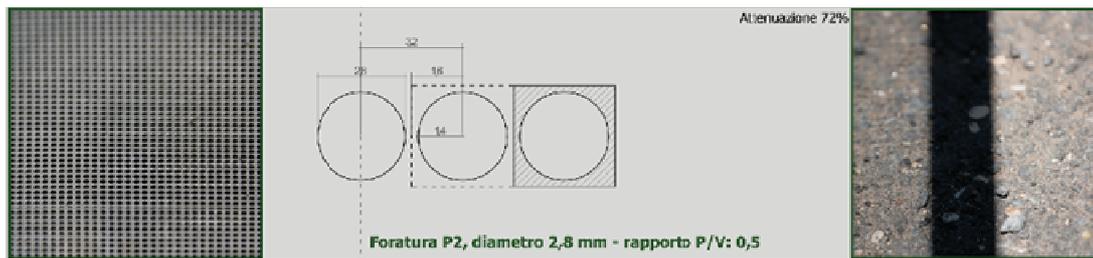
Per il dimensionamento della copertura forata sono state fatte le stesse considerazioni del modello 1:20, e quindi è necessario considerare che essa debba illuminare la carreggiata con la luce naturale, proveniente sia direttamente dal cielo, sia dalle riflessioni della radiazione luminosa. Allo stesso tempo, la copertura forata deve impedire la visione del sole e l'entrata dei raggi, per evitare riflessioni fastidiose, abbagliamento, o forti contrasti di illuminamento e luminanza sulla carreggiata.

I pannelli della copertura sono stati forati attraverso una macchina punzonatrice partendo da una dimensione minima di 1,6 mm, la minima consentita dalla macchina stessa (Figura 3.19), per poi aumentare gradualmente il diametro (Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22) fino ad arrivare ad un diametro massimo di 5,5 mm poiché per diametri superiori cominciano a distinguersi gli aloni dei singoli fori (Figura 3.23).

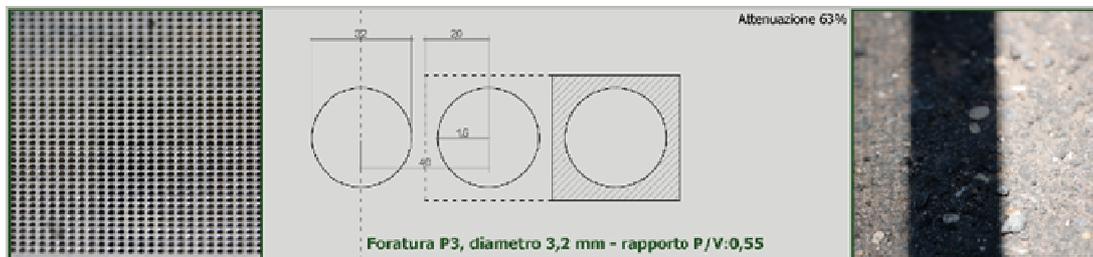
In questa maniera si riesce ad attenuare l'illuminamento e la luminanza gradualmente favorendo il fenomeno dello scattering ed individuando una diffusione della luce all'interno della pregalleria. Pertanto si è cercato di realizzare un sistema di foratura tale per cui il diametro dei fori e la loro interdistanza diminuisca in funzione della lunghezza della pregalleria.



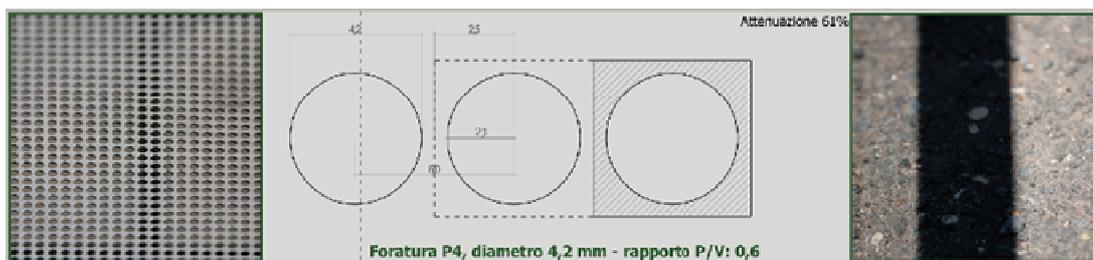
**Figura 3.19 - Pannello P1 - diametro di foratura 1,6 mm (dimensione minima dei fori consentita dalla macchina punzonatrice).**



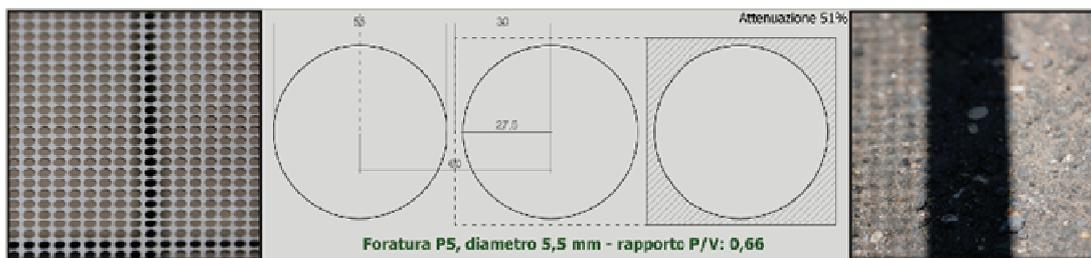
**Figura 3.20 - Pannello P2 - diametro di foratura 2,8 mm.**



**Figura 3.21 - Pannello P3 - diametro di foratura 3,2 mm.**

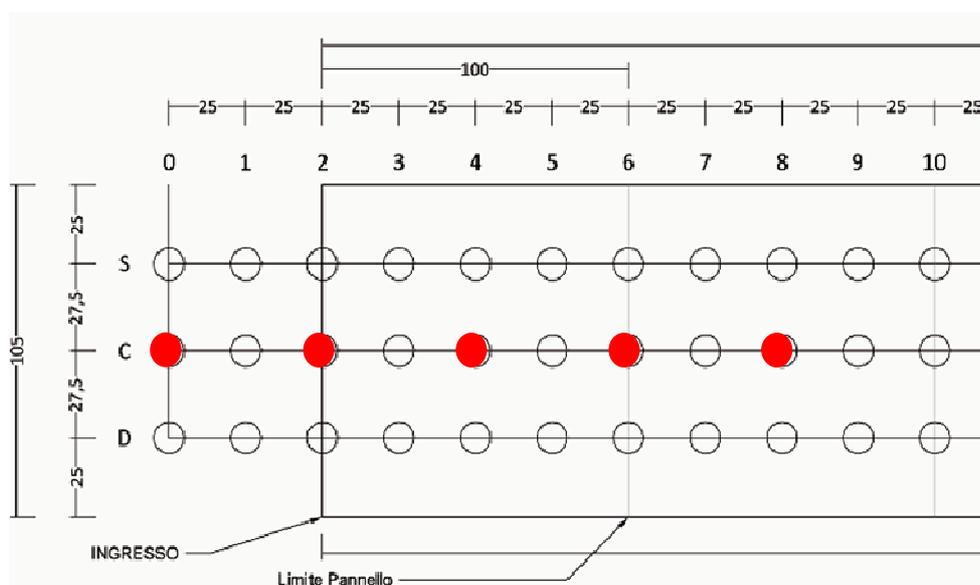


**Figura 3.22 - Pannello P4 - diametro di foratura 4,2 mm.**



**Figura 3.23 - Pannello P5 - diametro di foratura 5,5 mm (dimensione massima foratura, per diametri superiori cominciano a distinguersi gli aloni dei singoli fori)**

È stato compiuta un'analisi della foratura per ogni singolo pannello rilevando per ognuno di essi i valori di luminanza e di illuminamento che si avrebbero prima, all'interno della e dopo la pregalleria, nelle posizioni indicate in Figura 3.24.



**Figura 3.24 - Disposizione dei punti di rilievo**

Inoltre è stato definito:

- Il parametro  $S_v/S_p$ , pari al rapporto tra la superficie forata e la superficie non forata,
- un parametro attenuativo, rapporto tra la grandezza misurata all'interno e all'esterno della pregalleria ( $L_{int}/L_{est}$ ).

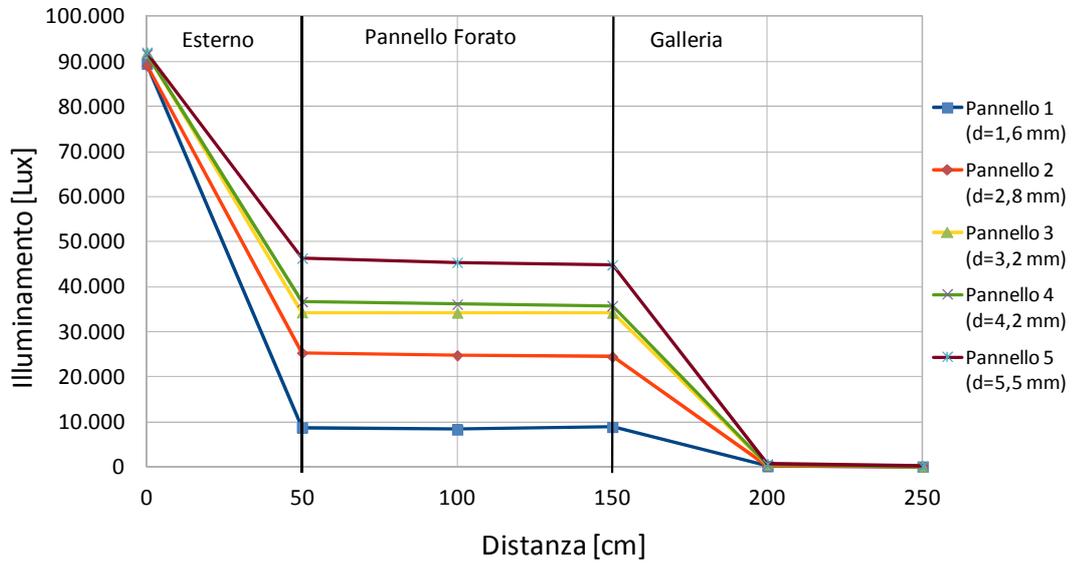
Nella Tabella 3.3 vengono riportati i rilievi effettuati nel giorno 14 giugno 2011.

**Tabella 3.3 – Valori di illuminamento e della luminanza rilevati all'esterno e all'interno della pregalleria.**

Sv/Sp	ATTENUAZIONE		ESTERNO	PANNELLO				GALLERIA		Sup. vuoto [mm <sup>2</sup> ]	Sup. pieno [mm <sup>2</sup> ]
		Distanza [cm]	0	50	100	150	200	250			
0,16	91%	P1	E [lux]	89.480	8.780	8.340	8.900	187	66	2,01	12,25
			E%	100,00	9,81	9,32	9,95	0,21	0,07		
			L [cd/m <sup>2</sup> ]	3.107	294	290	240	40	36		
			L%	100,00	9,46	9,32	7,72	1,29	1,16		
0,44	72%	P2	E [lux]	89.130	25.340	24.770	24.480	358	122	4,52	10,24
			E%	100,00	28,43	27,79	27,47	0,40	0,14		
			L [cd/m <sup>2</sup> ]	3.286	922	913	908	38	29		
			L%	100,00	28,07	27,79	27,62	1,16	0,88		
0,50	63%	P3	E [lux]	91.990	34.302	34.240	34.221	555	152	8,04	16,00
			E%	100,00	37,29	37,22	37,20	0,60	0,17		
			L [cd/m <sup>2</sup> ]	3.354	1.258	1.248	1.244	45	36		
			L%	100,00	37,49	37,22	37,10	1,34	1,07		
0,55	61%	P4	E [lux]	91.660	36.710	36.150	35.780	480	128	13,85	25,00
			E%	100,00	40,05	39,44	39,04	0,52	0,14		
			L [cd/m <sup>2</sup> ]	3.326	1.319	1.312	1.307	43	34		
			L%	100,00	39,64	39,44	39,29	1,30	1,03		
0,66	51%	P5	E [lux]	92.010	46.340	45.400	44.860	677	186	23,76	36,00
			E%	100,00	50,36	49,34	48,76	0,74	0,20		
			L [cd/m <sup>2</sup> ]	3.396	1.694	1.676	1.664	44	33		
			L%	100,00	49,89	49,34	49,00	1,30	0,97		

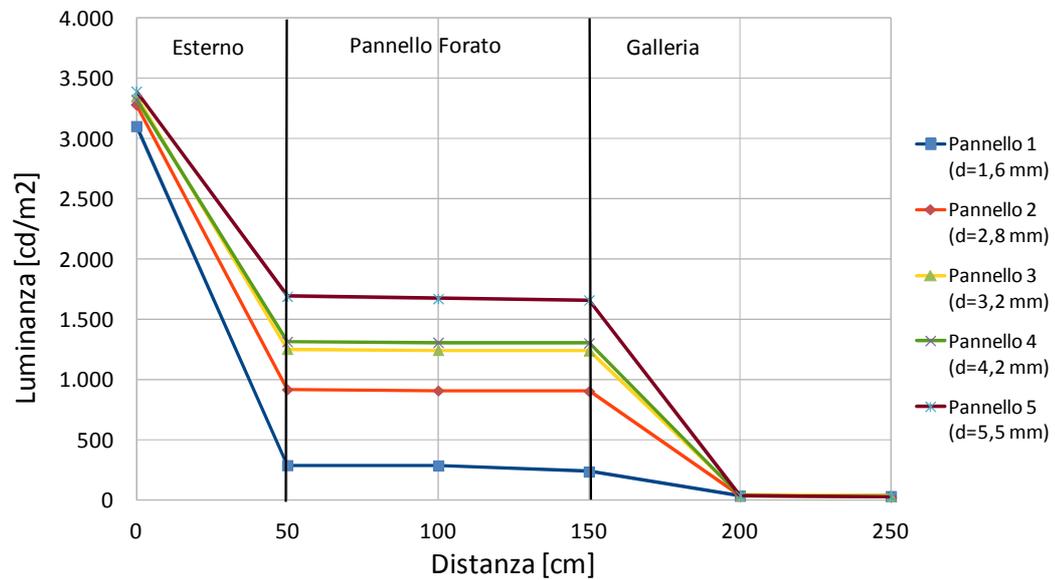
Nella Figura 3.25 e Figura 3.26 sono riportati gli andamenti dell'illuminamento e delle luminanze sotto i singoli pannelli forati, coerenti con gli andamenti riportati nella normativa UNI 11095.

### Andamento dell'illuminamento sotto il singolo pannello



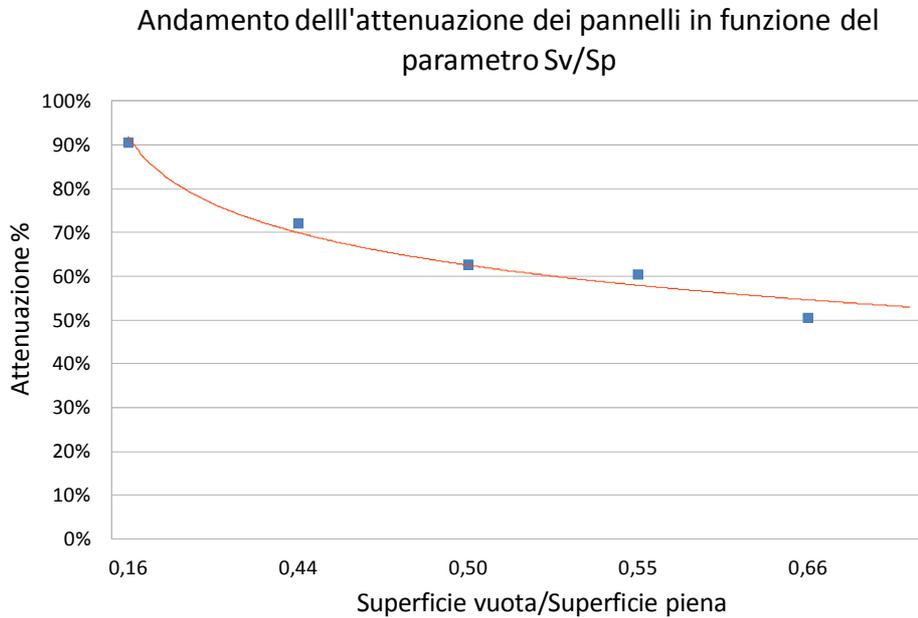
**Figura 3.25 – Andamento dell'illuminamento sotto i singoli pannelli.**

### Andamento della Luminanza sotto il singolo pannello



**Figura 3.26 – Andamento della luminanza sotto i singoli pannelli.**

Graficando l'attenuazione, in funzione della distanza dal suo ingresso, si evidenzia come al crescere del rapporto Sv/Sp diminuisca l'attenuazione dovuta al pannello (Figura 3.27).

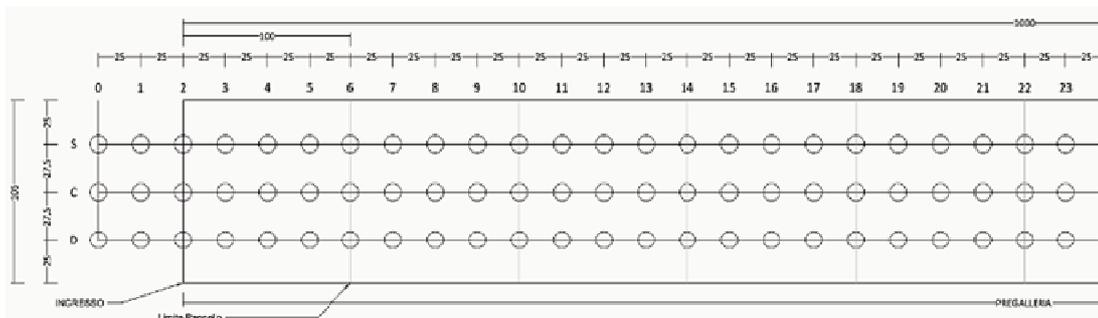


**Figura 3.27 - Attenuazioni offerte dai pannelli al variare del rapporto Sv/Sp**

### 3.2.3 Risultati dei rilievi delle principali grandezze fotometriche

Tutti i rilievi effettuati sono stati compiuti tenendo conto di tutte le condizioni esterne possibili, considerando quindi gli effetti dovuti alla stagione, all'ora del giorno e alle condizioni meteorologiche (cielo sereno, coperto e intermedio).

In Figura 3.28 si riporta lo schema della sequenza delle misure effettuate.

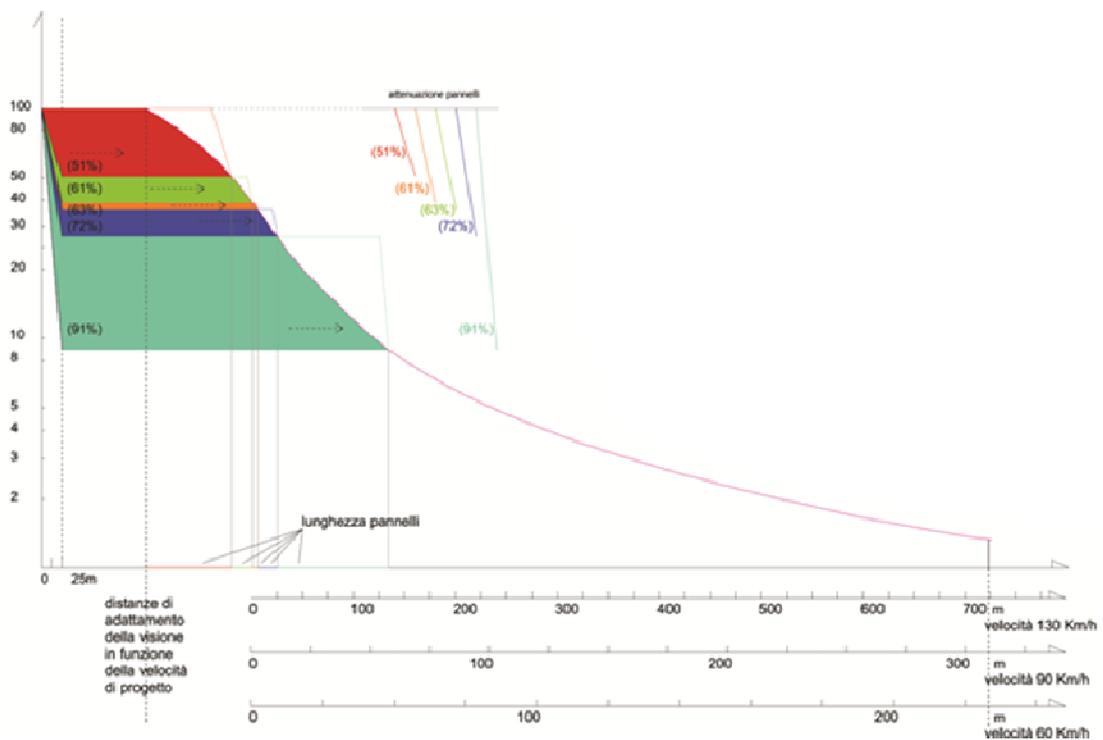


**Figura 3.28 – Schema della sequenza di posizionamento delle sonde dei valori di Luminanza (L) e Illuminamento (E) lungo tutta la pregalleria**

Inizialmente le misurazioni sono state effettuate all'interno della galleria in scala, senza la copertura forata, in modo tale da simulare fedelmente la situazione preesistente (e per avere quindi un termine di confronto con le modifiche migliorative apportate)

Come descritto in precedenza per il modello 1:10, i pannelli sono stati forati attraverso una macchina punzonatrice partendo da una dimensione minima di 16 mm, la più piccola consentita dalla macchina stessa. In questa maniera si riesce ad attenuare l'illuminamento e la luminanza gradualmente.

Accoppiando una serie di pannelli con attenuazione crescente (quindi con parametro  $S_v/S_p$  decrescente) nel grafico riportato in Figura 3.29 si riesce ad approssimare il profilo di attenuazione dell'illuminamento al variare della distanza percorsa.

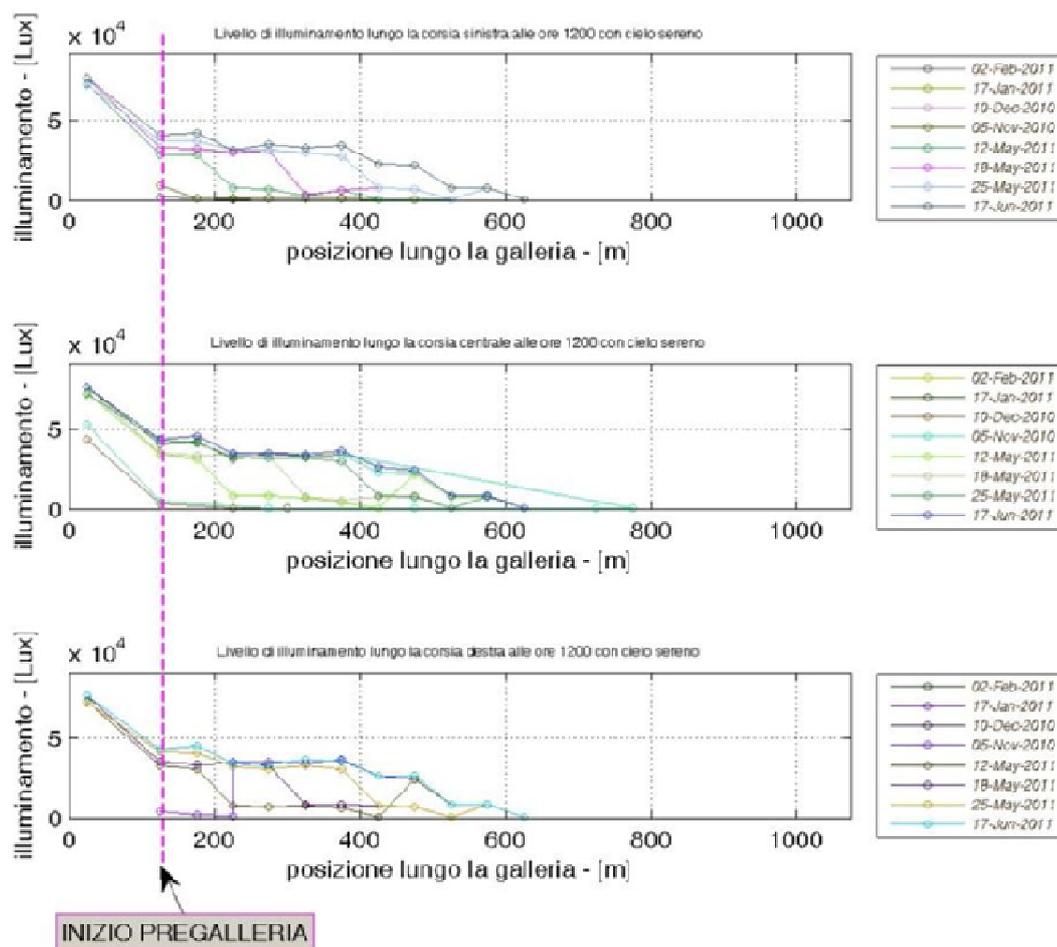


**Figura 3.29 – Profilo di attenuazione della grandezza incidente al variare della distanza percorsa**

In Figura 3.30 vengono mostrati, a titolo di esempio, i risultati della sperimentazione compiuta in diversi giorni alla stessa ora (12.00) in condizione di cielo sereno. Dai

grafici si evidenzia come all'aumentare della distanza, e quindi al diminuire del rapporto Sv/Sp, l'attenuazione diminuisca con l'andamento mostrato.

Disponendo quindi i pannelli forati in sequenza di foratura a diametro decrescente e variando la lunghezza dei singoli tratti si può approssimare la curva richiesta dalla Norma UNI 11095.



**Figura 3.30 - Variazione del livello di illuminamento alle ore 12 con cielo sereno in varie giornate**

## **4 Il modello numerico della pregalleria**

Parallelamente alla realizzazione del modello sperimentale è stato sviluppato un modello numerico attraverso un software di simulazione illuminotecnica per fare in modo che il metodo utilizzato per il dimensionamento della pregalleria potesse essere verificabile e ripetibile indipendentemente dalla localizzazione geografica e dalle dimensioni della galleria in esame.

### **4.1 La simulazione illuminotecnica con Radiance mediante Ecotect**

Sul mercato sono disponibili diversi software di simulazione per la valutazione delle principali grandezze fotometriche.

#### **4.1.1 Radiance**

Radiance è considerato dalla comunità scientifica il software più accurato ed affidabile per la simulazione illuminotecnica, ma anche quello di più difficile utilizzo da parte dell'utente.

È costituito da un insieme di programmi sviluppati dal Group del Lawrence Berkeley Laboratory insieme ad altri gruppi di ricerca, ed è progettato per essere uno strumento di ricerca in grado di fornire calcoli accurati e previsioni affidabili degli effetti della luce, utilizzando principalmente tecniche di backward ray-tracing. Piuttosto che fornire semplicemente un motore di rendering foto realistico, Radiance incorpora una serie di strumenti capaci di restituire risultati numerici, in modo da mettere il ricercatore o il progettista nelle condizioni di misurare, simulare e progettare reali configurazioni di illuminazione.

Il risultato finale non è fuorviante, come può ad esempio accadere con immagini fotorealistiche visivamente accattivanti, ma fisicamente accettabile, ed è infatti stato oggetto di varie ricerche e verifiche in modo da assicurare che i livelli di luminanza e di illuminamento calcolati dal programma siano accurati in relazione all'ambiente reale per condizioni di illuminazione sia naturale che artificiale.

Radiance è basato su di un algoritmo di backward ray-tracing, in base al quale i raggi luminosi sono tracciati nella direzione opposta rispetto a quella che seguono solitamente: a partire dall'occhio dell'osservatore, ossia il punto di vista, i raggi vengono quindi tracciati sino alle sorgenti luminose rimbalzando tra le superfici presenti nell'ambiente e tenendo conto delle interazioni fisiche e dei fenomeni di riflessione, trasmissione e rifrazione.

La descrizione geometrica dell'ambiente è basata sui limiti esterni degli oggetti, per cui i volumi inclusi all'interno delle superfici sono sempre vuoti e le superfici hanno un orientamento definito dal vettore normale alle superfici stesse. Il sistema di riferimento tridimensionale corrisponde al sistema di coordinate cartesiane, in cui l'asse x punta verso nord ed in fine l'asse z punta verso lo zenith.

Radiance fornisce un programma di generazione delle distribuzioni fotometriche di cieli standard, gensky, capace di creare sia cieli sereni, sia cieli uniformemente coperti, così come situazioni intermedie. Sebbene le prime due siano facili da comprendere, rappresentano solo una piccola percentuale delle condizioni in cui può essere considerato il cielo reale.

Una soluzione non troppo complessa si ottiene utilizzando Ecotect come interfaccia per Desktop Radiance. In tal caso si superano le difficoltà legate alla costruzione del modello 3D, che può essere realizzato con programmi di ampia diffusione come 3D Studio. [11]

#### **4.1.2 Ecotect**

Ecotect è uno strumento di analisi completo orientato alla valutazione delle prestazioni energetiche, luminose e acustiche dell'edificio che lavora in ambiente Windows.

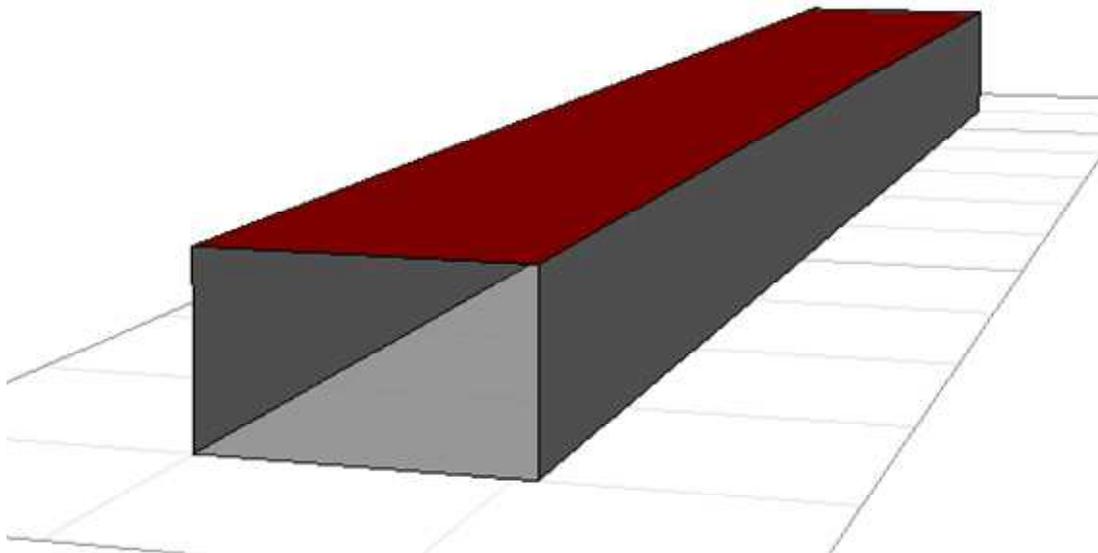
L'immissione dei dati è semplice così come la creazione e importazione dei modelli in 3D. Tra le caratteristiche del software vi è quella di creare file di input per altri strumenti di calcolo più specifici al fine di effettuare analisi accurate.

Per effettuare un'analisi illuminotecnica molto accurata è possibile esportare il modello generato in 3D in formato compatibile con Radiance per analisi sull'illuminamento sia naturale che artificiale. [11]

## 4.2 Il modello numerico

Il modello numerico è stato realizzato considerando le stesse dimensioni (1070x630x10000 mm), le stesse condizioni (sito Pomezia e orientamento Sud Sud-Ovest) e la stessa tipologia di struttura (struttura rettangolare con copertura in ferro e parte laterale in plastica) del modello sperimentale.

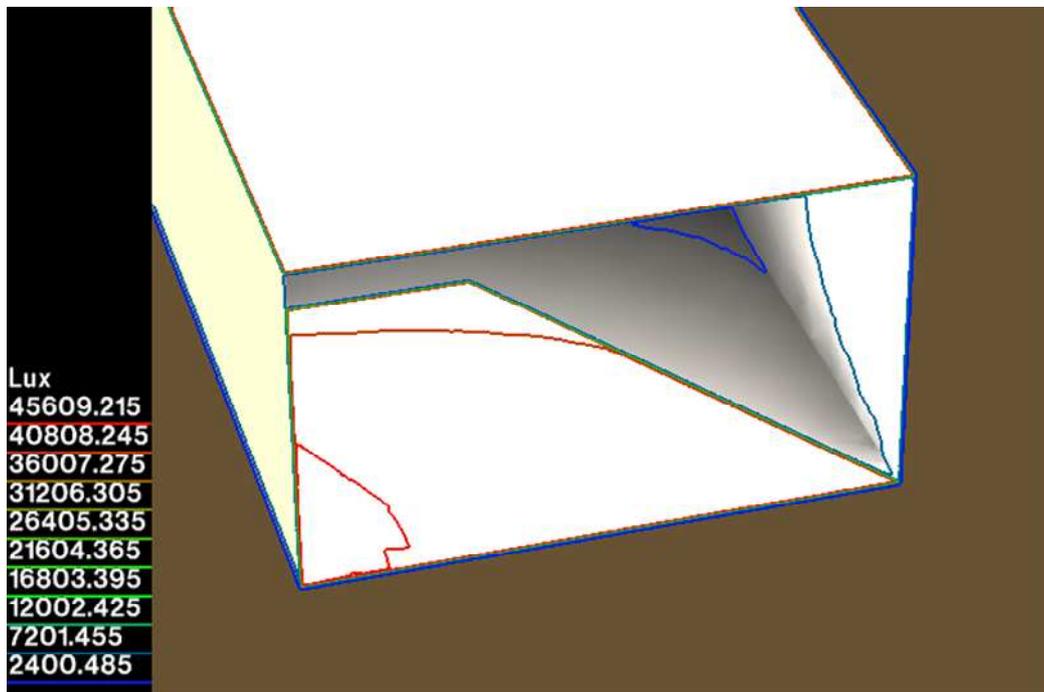
In una prima fase è stato sviluppato un modello della pregalleria non forata in maniera tale da confrontare i valori della luminanza e dell'illuminamento con i valori misurati sul campo (Figura 4.1).



**Figura 4.1 – Il modello numerico della pregalleria senza foratura.**

Il giorno scelto per la simulazione è lo stesso di quello delle misure cioè il 5 Novembre alle ore 11.30, con cielo sereno.

L'output della simulazione dell'illuminamento è un rendering con isolinee numeriche come mostrato in Figura 4.2.



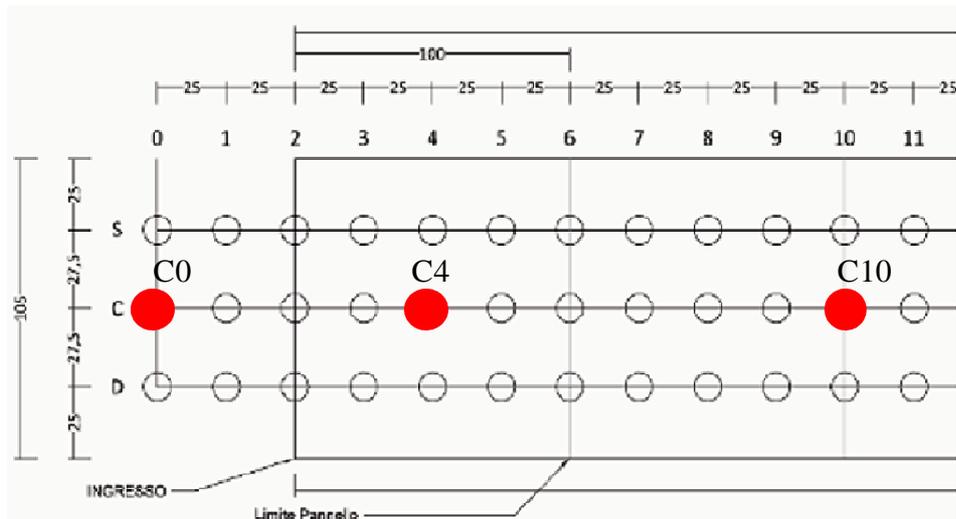
**Figura 4.2 – Output della simulazione nel giorno 5 novembre alle 11.30.**

I valori dell'illuminamento misurati sul modello sperimentale sono descritti nella Tabella 4.1.

**Tabella 4.1 – Valori di illuminamento misurati sul modello sperimentale il 5 novembre alle 11.30.**

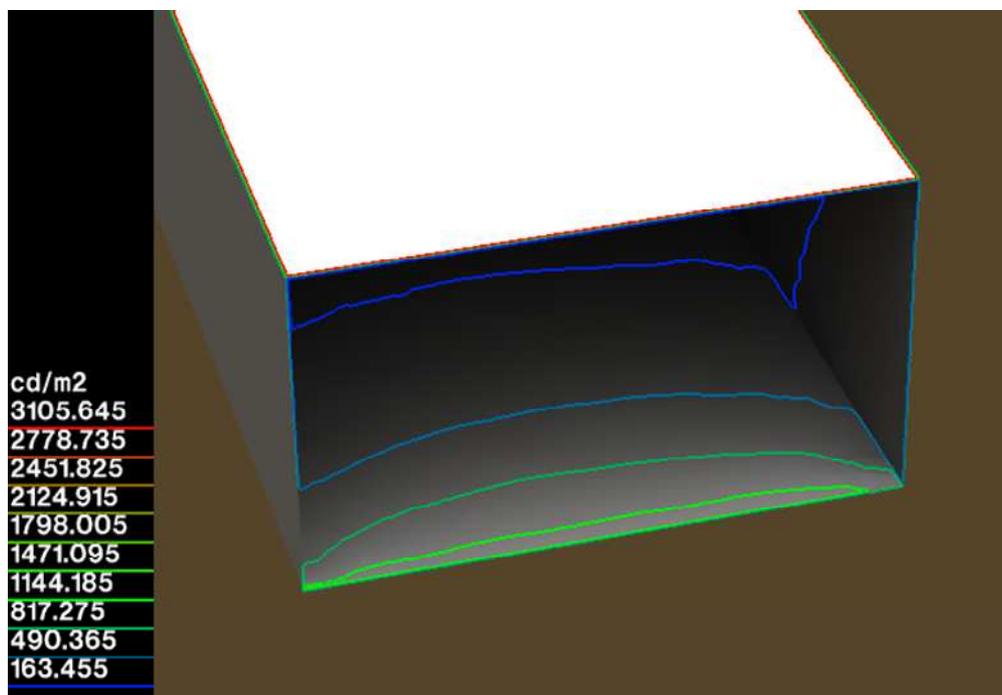
Giorno/Ore	Cielo	Illuminamento [lux]		
		Posizione sonda C0	Posizione sonda C4	Posizione sonda C10
5 novembre 11:30	S	44.520	2.540	86

Dove le posizioni delle sonde C0, C4 e C10 sono illustrate in Figura 4.3.



**Figura 4.3 – Disposizione sonde di illuminamento all’ingresso e dentro la pregalleria.**

L’output della simulazione dell’illuminamento è illustrata in Figura 4.4.



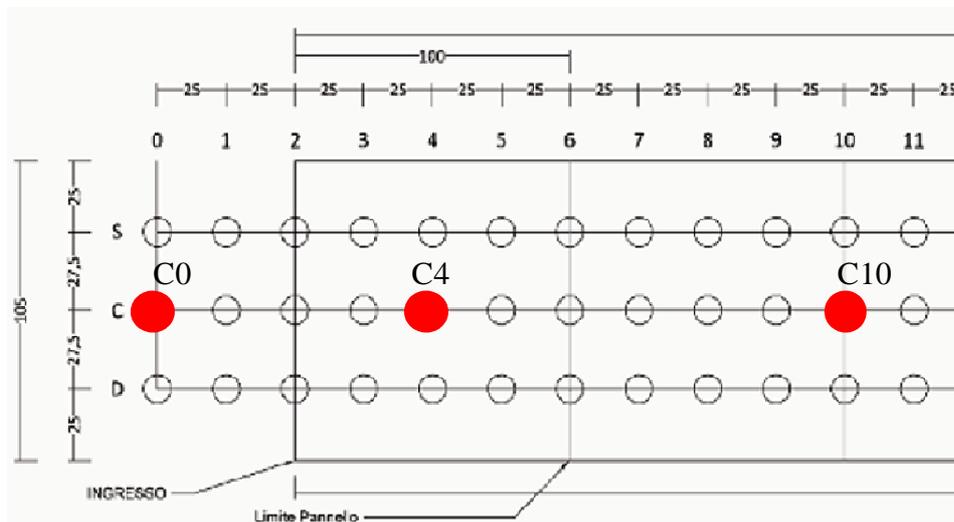
**Figura 4.4 – Output simulazione della Luminanza del modello numerico nel giorno 5 novembre alle 11.30.**

I valori della luminanza misurati sul modello sperimentale è descritto nella Tabella 4.2.

**Tabella 4.2 – Valori di luminanza misurati sul modello sperimentale il 5 novembre alle 11.30.**

Giorno/Ore	Cielo	Luminanza [cd/m <sup>2</sup> ]		
		Punto di presa della misura C0	Punto di presa della misura C4	Punto di presa della misura C10
5 Novembre 11:30	S	1.637	33,15	0,27

Dove i punti di presa della misura del luminanzometro C0, C4 e C10 sono illustrati in Figura 4.3.



**Figura 4.5 – Disposizione punti presa della misura del luminanzometro all'ingresso e dentro la pregalleria.**

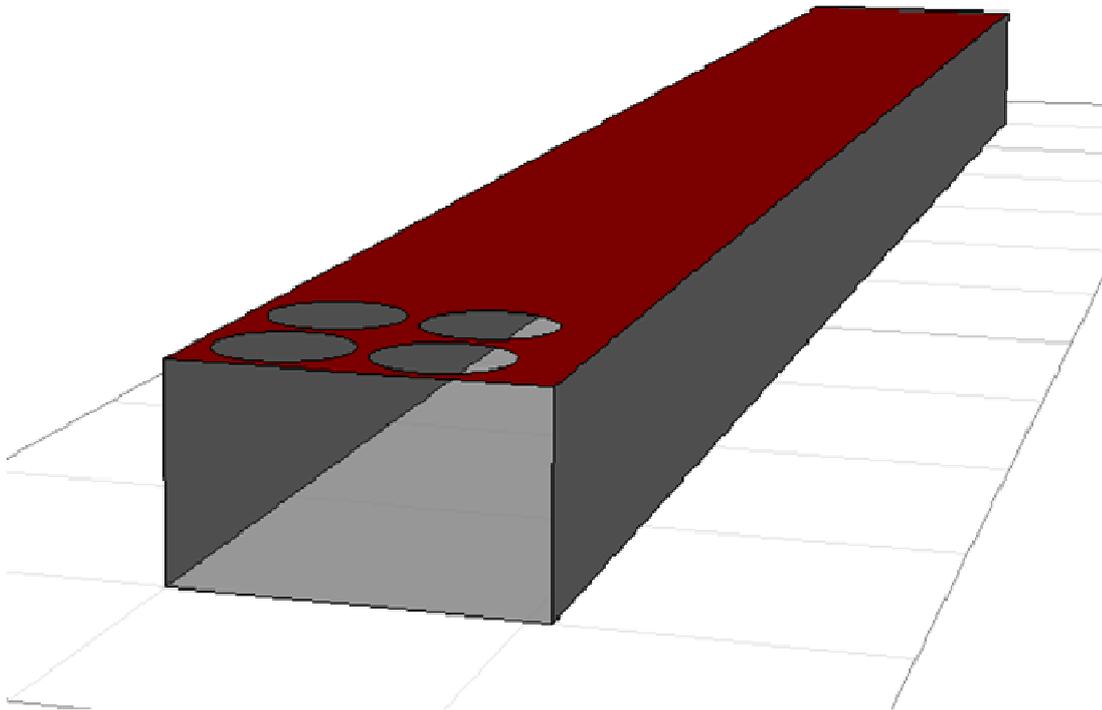
### 4.3 Prove di foratura sul modello

Non conoscendo quale fosse l'output del software conseguentemente alla foratura della struttura si è partiti da diametri di foratura più grandi (40 cm) diminuendone gradualmente le dimensioni.

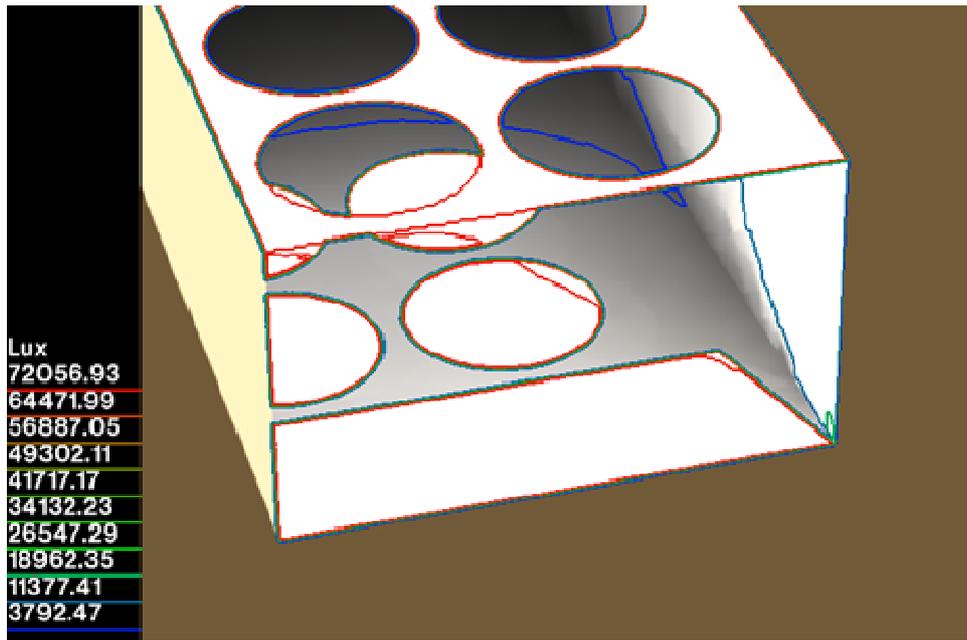
Si è cercato di arrivare il più vicino possibile ai diametri di foratura reale. A diametri più piccoli corrispondono capacità di calcolo molto elevate motivo per il quale il modello è stato definito per diametri di foratura fino a 7 cm.

#### 4.3.1 Diametro di foratura 400 mm

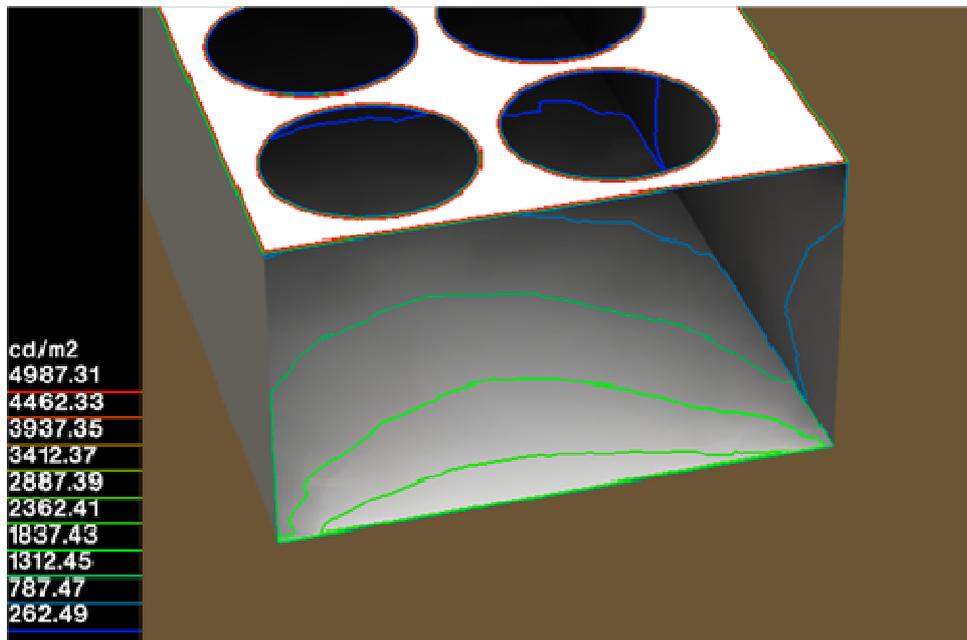
Si è partiti da diametri di foratura di 400 mm e le simulazioni sono state effettuate il giorno 20 aprile alle ore 12.30 (Figura 4.6).



**Figura 4.6 – Modello numerico della pregalleria con diametro dei fori di 400 mm.**



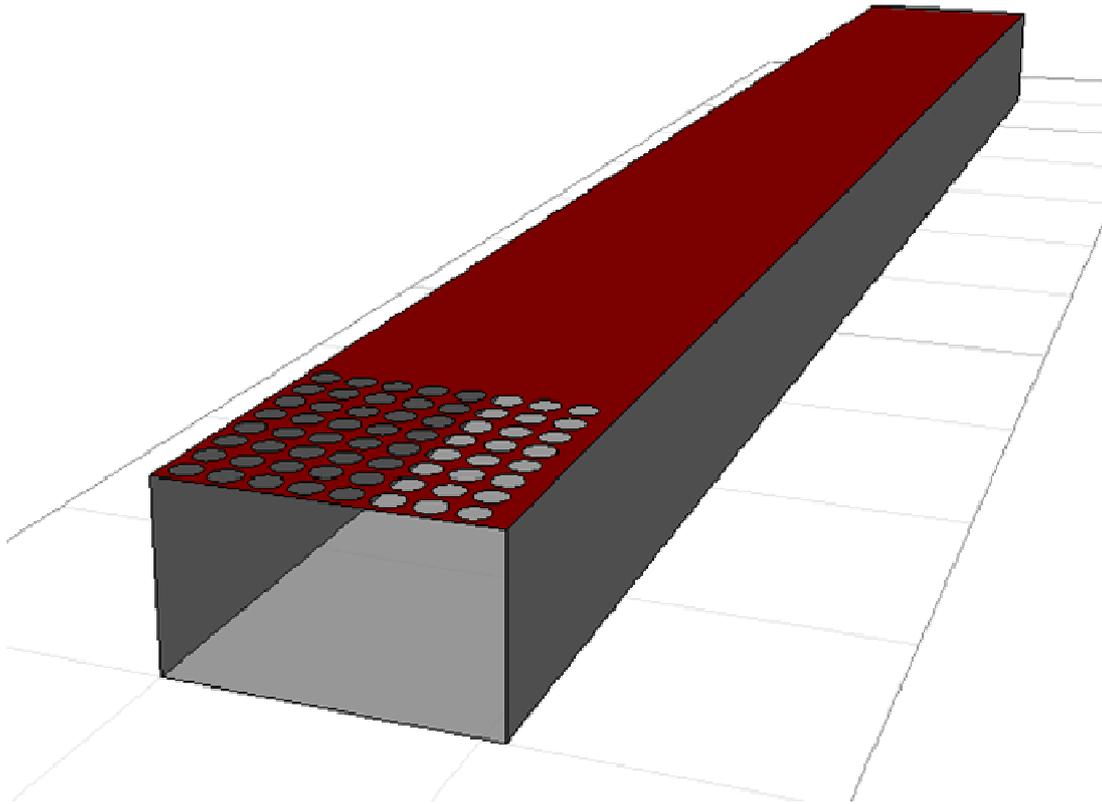
**Figura 4.7 – Output della simulazione dell’illuminamento del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.**



**Figura 4.8 - Output della simulazione della luminanza del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.**

### 4.3.2 Diametro di foratura 100 mm

In Figura 4.9 è riportata la simulazione del modello numerico della galleria e pregalleria con diametro della foratura di 100 mm che sono state effettuate il giorno 20 aprile alle ore 12.30.



**Figura 4.9 – Modello numerico della pregalleria con diametro dei fori di 100 mm.**

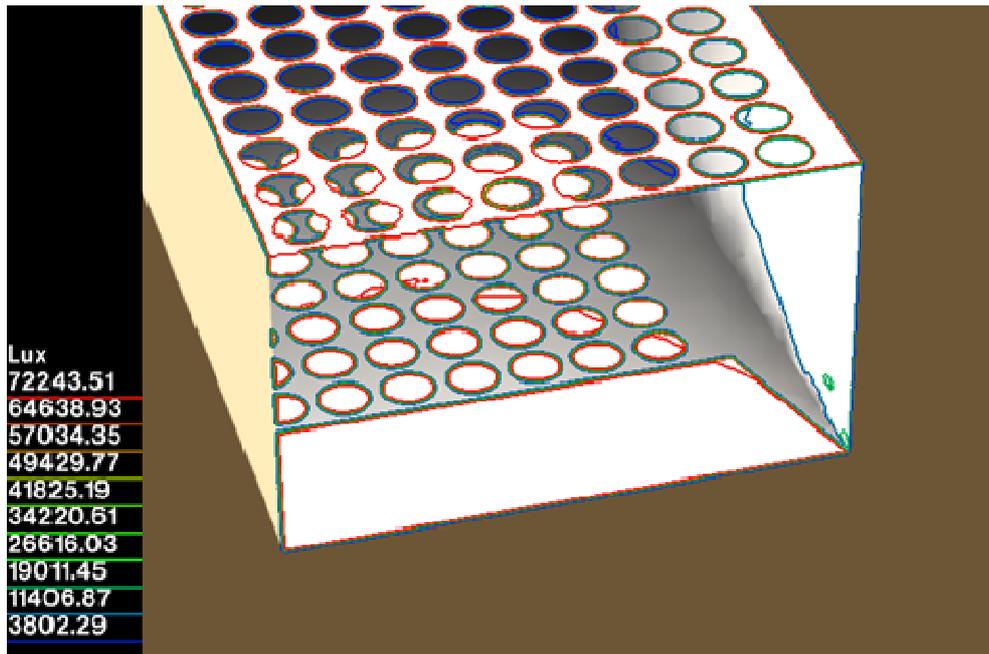


Figura 4.10 – Output della simulazione dell’illuminamento del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.

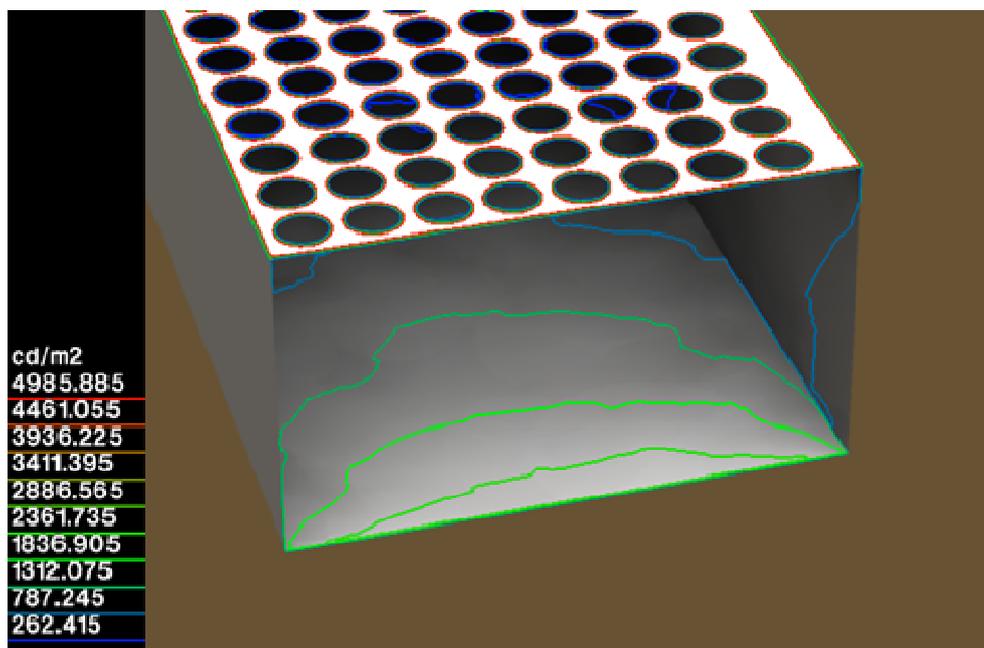
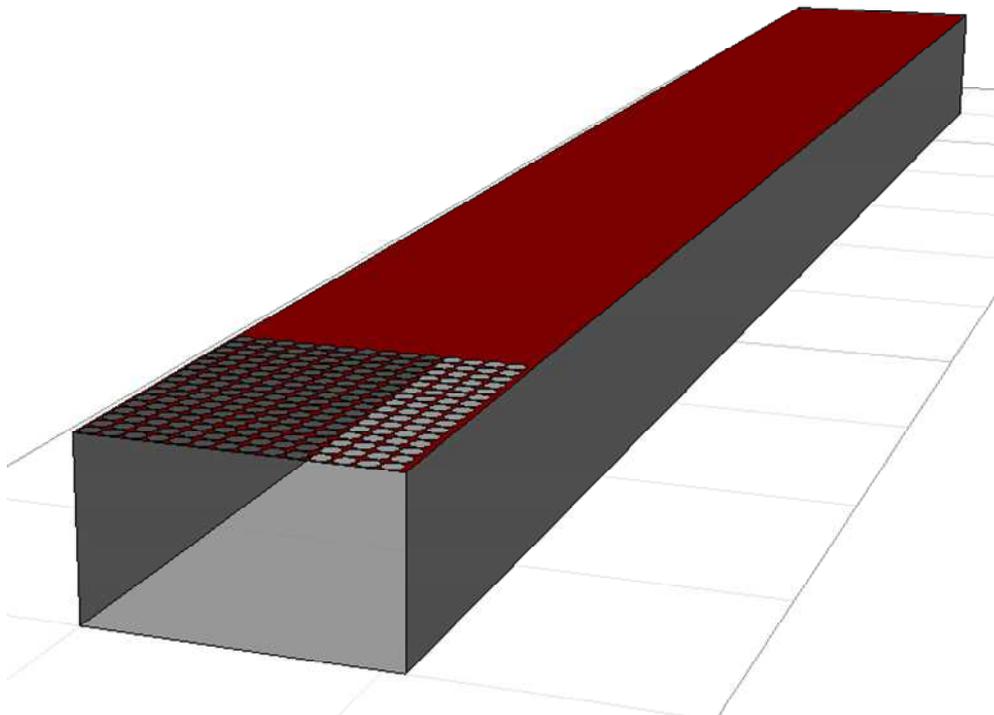


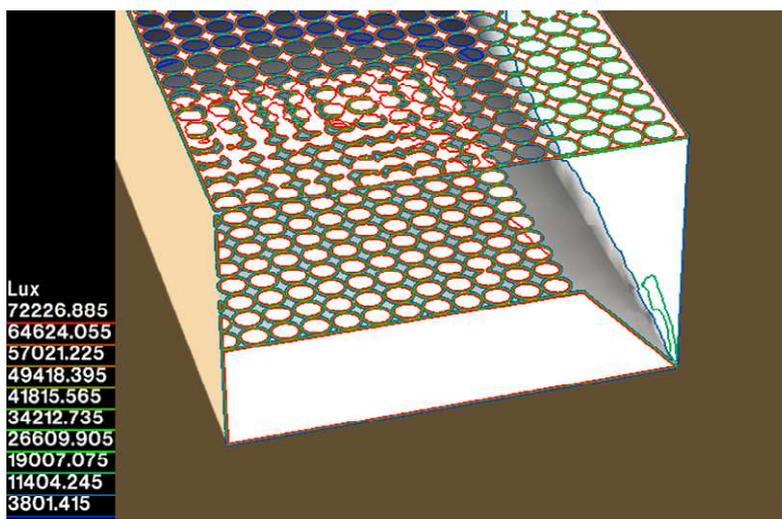
Figura 4.11 - Output della simulazione della luminanza del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.

### 4.3.3 Diametro di foratura 70 mm

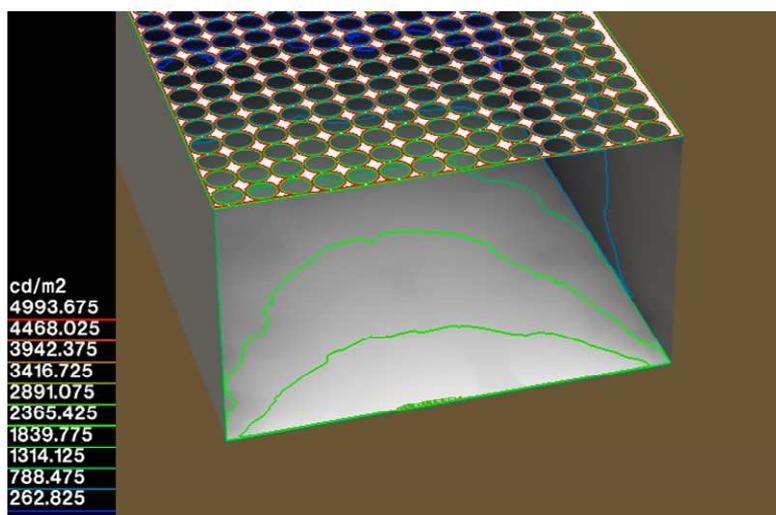
In Figura 4.12 è riportata la simulazione del modello numerico della galleria e pregalleria con diametro della foratura di 70 mm che sono state effettuate il giorno 20 aprile alle ore 12.30.



**Figura 4.12 - Modello numerico della pregalleria con diametro dei fori di 70 mm.**



**Figura 4.13 – Output della simulazione dell’illuminamento del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.**



**Figura 4.14 – Output simulazione della luminanza del modello numerico nel giorno 20 aprile alle ore 12.30.**

#### **4.4 Conclusioni**

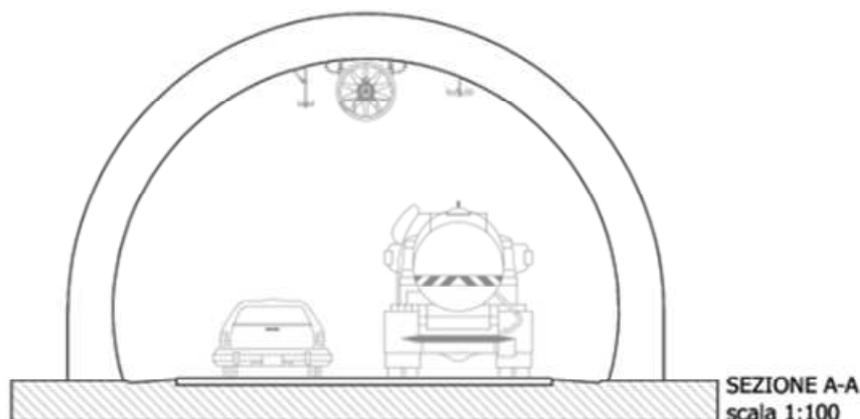
Da queste prime simulazioni è stato rilevato come i valori dell’illuminamento e della luminanza variassero di un errore percentuale del 2-5% rispetto al modello sperimentale (Tabella 4.1 e Tabella 4.2), il che verifica e dimostra la ripetibilità del

metodo utilizzato per il dimensionamento della pregalleria indipendentemente dalla localizzazione geografica e dalle dimensioni della galleria in esame.

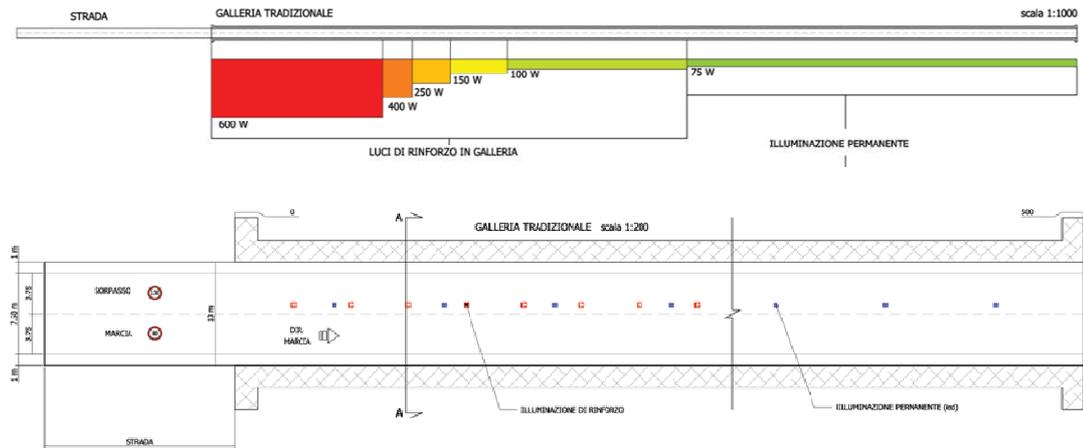
## 5 Integrazione dei LED alimentati da tecnologia fotovoltaica all'interno delle pregallerie

### 5.1 Integrazione dell'illuminamento artificiale all'interno delle pregallerie

Un aspetto molto importante per l'illuminazione di una galleria è il numero e la potenza delle sorgenti luminose da impiegare. Essi determinano carichi elettrici spesso significativi, in quanto il sistema è costituito da un circuito permanente e da un circuito di rinforzo (Figura 5.1 e Figura 5.2). Il primo è esteso lungo tutta la galleria in funzione 24 ore su 24 tutti i giorni dell'anno, ed ha il compito di garantire la luminanza stradale al livello minimo di sicurezza lungo tutta la galleria quando i circuiti di rinforzo sono spenti (di notte, all'alba o al tramonto, oppure di giorno con cielo coperto). Il secondo è esteso solo all'accesso della galleria il cui valore iniziale, l'andamento iniziale e l'estensione dipendono dalla luminanza esterna e dalla velocità d'accesso prevista per quella data arteria, ed ha il compito di rinforzare l'impianto di illuminamento durante le ore diurne. In questo modo si ha un consumo energetico notevole.

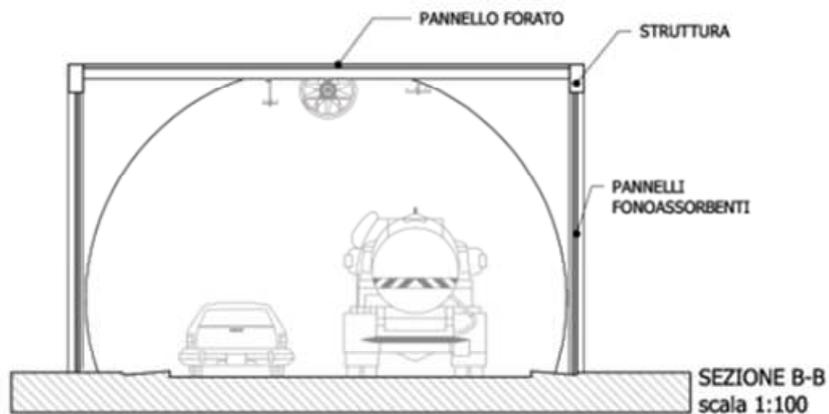


**Figura 5.1 – Sezione di una galleria monodirezionale a due corsie.**

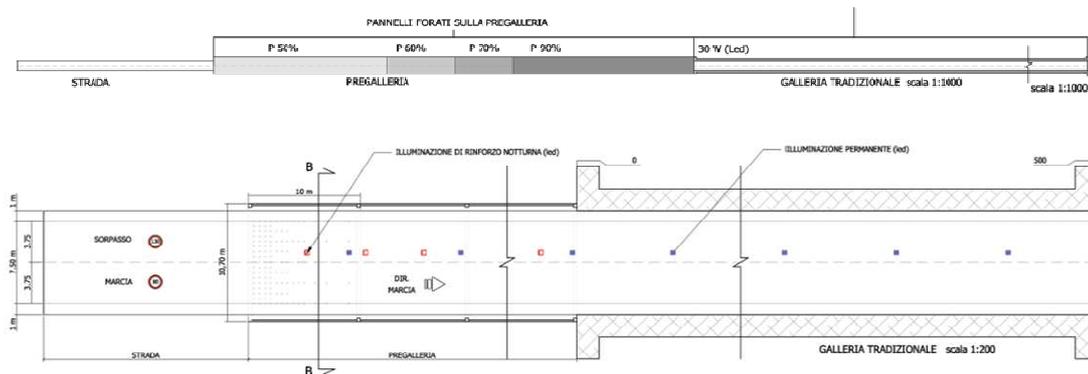


**Figura 5.2 - Sistema di illuminazione in una galleria monodirezionale a due corsie.**

Nel caso in cui la galleria fosse predisposta di una pregalleria, può accadere, specialmente nei casi più critici a causa del particolare orientamento degli imbocchi, che non si raggiungano nella pregalleria i livelli minimi di luminanza prescritti in alcune delle condizioni di progetto ipotizzate. Una tale circostanza può richiedere il ricorso ad un modesto impianto artificiale di rinforzo, che entri in funzione, soltanto quando lo squilibrio tra luminanza esterna percepita (rilevabile per mezzo di un luminanzometro installato a distanza opportuna dalla fornice) e luminanza interna superi un certo valore di soglia. L'impianto di rinforzo, eventualmente parzializzato nelle accensioni, potrà essere utilizzato anche per l'illuminazione permanente notturna, comunque necessaria nella pregalleria. [4]



**Figura 5.3 – Sezione di una pregalleria monodirezionale a due corsie.**



**Figura 5.4 – Sistema di illuminazione in una pregalleria monodirezionale a due corsie.**

## **5.2 Utilizzo di tecnologie innovative per un'illuminazione sostenibile**

I costi dovuti ai consumi di energia possono essere ridotti impiegando metodi e tecnologie all'avanguardia, quali sistemi di regolazione del flusso delle lampade e utilizzando sorgenti luminose ad alta efficienza come ad esempio quelle a LED che non solo prevedono un consumo molto ridotto e una vita molto maggiore rispetto alle sorgenti tradizionali, ma possono anche emettere luce di tonalità bianca che, secondo recenti studi, migliora molto la visione assicurando il massimo comfort visivo al guidatore.

Inoltre è possibile, al fine di contenere i consumi energetici della pregalleria, installare un impianto fotovoltaico in copertura della pregalleria. I pannelli fotovoltaici più adatti a questo scopo sono quelli a silicio amorfo che grazie alla loro flessibilità si adattano alla conformazione della copertura della galleria e pregalleria ed hanno un maggior rendimento grazie al loro funzionamento con luce diffusa piuttosto che con irraggiamento diretto. L'utilizzo dei pannelli fotovoltaici mono e poli cristallini non è fattibile poiché essi hanno maggiori rendimenti se sono colpiti da radiazione diretta e quindi richiedono un'inclinazione e orientamento del pannello in base alla latitudine del sito di intervento, e questo comporterebbe un

ombreggiamento dei pannelli sopra la pregalleria forata non lasciando filtrare l'illuminazione all'interno di essa.



**Figura 5.5 – Pannelli fotovoltaici a film sottile.**

L'integrazione architettonica di un impianto fotovoltaico sulla superficie della pregalleria rende il sistema di illuminazione sostenibile dal punto di vista energetico.

### **5.3 Analisi della sostenibilità energetica di un impianto fotovoltaico e delle lampade a LED**

Prendendo in considerazione le dimensioni e la progettazione della pregalleria del modello sperimentale e numerico, si effettua un'analisi della sostenibilità energetica della pregalleria sia sostituendo le lampade a LED a quelle tradizionali a Sodio a bassa pressione (Tabella 5.1), che installando un impianto fotovoltaico sulla copertura della pregalleria.

**Tabella 5.1 – Confronto lampade a LED e lampade a Sodio bassa pressione.**

Tecnologia	Caratteristiche					
	Immagine	Efficienza luminosa [lm/W]	Temperatura di colore [K]	Resa cromatica [%]	Vita media [h]	Applicazione
Sodio a bassa pressione		200	2.000-2.500	0	18.000	Strade urbane, gallerie
LED		80-100	3200-5500	80	100.000	Strade urbane, gallerie, monumenti ecc

Per la stima dei consumi energetici delle lampade tradizionali all'interno della pregalleria, si è ipotizzato che il circuito di illuminazione fosse costituito da 20 lampade a sodio a bassa pressione di potenza 150 W, 8 lampade a sodio a bassa pressione di potenza 250 W e 4 lampade a sodio a bassa pressione di potenza 400 W. La potenza totale richiesta dai centri luminosi tradizionali è di 6,6 kW e supponendo che queste lampade funzionino solo per 5.840 h all'anno, avremo un energia consumata pari a 38.544 kWh/anno (Tabella 5.2).

**Tabella 5.2 – Stima dei consumi energetici delle lampade tradizionali (Sodio a bassa pressione) in una pregalleria di lunghezza 100 m.**

Stima consumi energetici delle lampade tradizionali in PREGALLERIA di lunghezza 100 m			
<b>Potenza singolo apparecchio [W]</b>	150	250	400
<b>N.</b>	20	8	4
<b>POTENZA TOTALE [kW]</b>	6,6		
<b>h di funzionamento annuali</b>	5.840		
<b>ENERGIA CONSUMATA [kWh/anno]</b>	38.544		

Per la stima dei consumi energetici delle lampade a led all'interno della pregalleria, si è ipotizzato che il circuito di illuminazione fosse costituito da 20 lampade a LED

di potenza 40 W, 8 lampade a LED di potenza 60 W e 4 lampade a LED di potenza 160 W. La potenza totale richiesta dai centri luminosi è di 1,92 kW e supponendo che queste lampade funzionino per le stesse ore dell'impianto tradizionale 5.840 h all'anno, avremo un'energia consumata pari a 11.212 kWh/anno.

**Tabella 5.3 – Stima dei consumi energetici delle lampade a LED in una pregalleria di lunghezza 100 m.**

<b>Stima consumi energetici delle lampade a LED in PREGALLERIA di lunghezza 100 m</b>			
P singolo apparecchio [W]	40	60	160
N.	20	8	4
<b>POTENZA TOTALE [kW]</b>	<b>1,92</b>		
h di funzionamento	5840		
<b>ENERGIA CONSUMATA [kWh]</b>	<b>11.212,80</b>		

Comparando la tecnologia LED con i sistemi tradizionali, come lampade a sodio a bassa pressione si ottengono una serie di vantaggi:

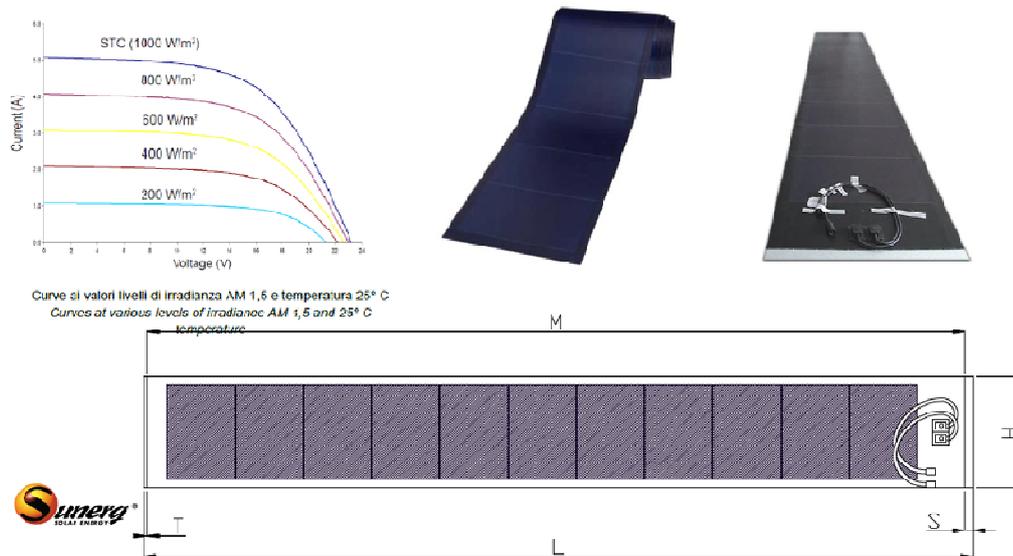
- risparmio energetico fino al 50 %;
- efficienza luminosa elevata;
- potenze minori, di conseguenza sezione cavi minori;
- riduzione notevole nella manutenzione;
- aumento notevole della vita utile.

#### **5.4 Producibilità di un impianto fotovoltaico**

Per quanto riguarda la stima della potenza installabile dell'impianto fotovoltaico sopra la pregalleria, lunga 100 m e larga 10,7 m, si consideri una superficie utile del 30% (peggior scenario) della superficie totale della copertura della pregalleria, pari a 321 m<sup>2</sup>.

Il pannello fotovoltaico scelto è quello a silicio amorfo di tipo Unisolar Integral Plate (Figura 5.6) di potenza nominale del singolo pannello del 68W, efficienza 6,7% e superficie del singolo pannello pari a 1,1484 m<sup>2</sup>.

Modello	PVL68T-PLATE-INT
Wp	68+/- 5%
Dimensione (mm)	2900x396x3,5
Peso (kg/m2)	9,84



**Figura 5.6 – Pannello fotovoltaico a silicio amorfo Uni – Solar Integral Plate (fonte: Uni-Solar)**

La potenza nominale dell'impianto fotovoltaico installabile sulla superficie della copertura della pregalleria risulta:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{\text{Superficie disponibile}}{\text{superficie singolo pannello}} \cdot \text{Potenza di picco del singolo pannello} \\
 &= \frac{321 \text{ m}^2}{1,1484 \text{ m}^2} \cdot 68 \text{ Wp} = 19,04 \text{ kWp}
 \end{aligned}$$

Considerando un rendimento dell'impianto fotovoltaico dell'85%, un rendimento dell'inverter del 96,5% ed il numero medio di ore di sole equivalenti all'anno pari a 1612 h (considerando un sito nel Centro Italia), avremo che l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico sulla superficie della pregalleria, è pari a:

$$E_{prodotta} = I_{stc} \cdot \eta_{cella\ FV} \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{imp} \cdot h \cdot A_{impFV} = 28.486,38\ kWh$$

dove:

- $I_{stc}$  è l'irraggiamento standard pari a 1000 W/m<sup>2</sup>;
- $\eta_{cella\ FV}$  è il rendimento del modulo fotovoltaico;
- $\eta_{inv}$  è il rendimento dell'inverter;
- $\eta_{imp}$  è rendimento dell'impianto FV;
- $h$  è il numero medio di ore di sole equivalenti all'anno;
- $A_{imp}$  è la superficie dell'impianto FV.

Dai calcoli effettuati risulta che l'impianto FV soddisfa il 100% del fabbisogno energetico della pregalleria con una plusvalenza di energia elettrica. I risultati sono riportati in Tabella 5.5.

**Tabella 5.4 – Confronto tra energia consumata delle lampade a LED nella pregalleria e l'energia prodotta dall'impianto FV.**

Energia consumata lampade a LED [kWh]	Energia prodotta dall'impianto FV [kWh]
11.212,80	28.486,38

**Tabella 5.5 – Risultati dell'analisi di producibilità**

Efficienza modulo UNISOLAR ( $\eta_{cella\ FV}$ )	0,067
Rendimento inverter ( $\eta_{inv}$ )	0,965
Rendimento impianto FV ( $\eta_{imp}$ )	0,85
Area utile di pregalleria (si considera la situazione peggiore il 30% della superficie reale) [m <sup>2</sup> ]	321
Area singolo pannello UNISOLAR [m <sup>2</sup> ]	1,1484
Numero pannelli	280
Potenza Impianto FV [kWp]	19,04
Irraggiamento standard $I_{stc}$ [kW/m <sup>2</sup> ]	1
Numero medio di ore di sole equivalenti all'anno in centro Italia [h]	1612
Energia prodotta dall'impianto [kWh]	28.486,38

## Conclusioni

Dai risultati ottenuti è stato dimostrato come l'utilizzo della pregalleria illuminotecnica come soluzione al problema dei contrasti di luminanza comporta notevoli vantaggi dal punto di vista del comfort con conseguenze notevoli sull'incremento della sicurezza all'interno delle gallerie.

La possibilità di replicare la soluzione proposta, attraverso il modello numerico elaborato, presuppone la diminuzione dei costi e dei tempi di progettazione rendendo meno determinante la realizzazione di un modello in scala.

L'utilizzo di sistemi di illuminazione innovativa quali i LED, inoltre, diminuisce il fabbisogno di energia primaria rendendo la soluzione adottata più sostenibile. È stato anche dimostrato come l'integrazione architettonica di un impianto fotovoltaico amorfo sulla copertura della pregalleria sia in grado di soddisfare interamente il fabbisogno di energia dovuta all'illuminazione.

Attribuendo, quindi, all'illuminazione artificiale soltanto una funzione di integrazione della luce naturale, che risulterà necessaria in un numero limitato di ore di esercizio e per una durata relativamente breve, la gran parte del beneficio economico e ambientale (per i ridotti consumi di energia) correlato alla pregalleria viene comunque preservato, e pertanto tale soluzione progettuale rimane potenzialmente valida e competitiva rispetto alle soluzioni convenzionali.

È importante considerare, come sviluppo futuro di questo lavoro, alcuni aspetti legati principalmente a problematiche di carattere civile ed edile, come ad esempio la verifica strutturale dei manufatti, la resistenza alla corrosione della struttura e la resistenza agli urti in caso di incidente stradale.

## Riferimenti bibliografici

- [1] D'Andrea, A., & Cantisani, G. (2002). L'illuminazione naturale negli imbocchi delle gallerie stradali. *Atti del XII Convegno Internazionale SIIV: "Riqualificazione funzionale e sicurezza del sistema viario". Parma, 1*, 280-299.
- [2] Bonomo, M. (2006). Guida alla progettazione dell'illuminazione stradale e urbana. Mancosu.
- [3] Fellin, L., Forcolini, G., & Palladino, P. (1999). Manuale di illuminotecnica-AIDI Associazione italiana di illuminazione.
- [4] Von Lutz, A. Ottimizzazione dei consumi di energia elettrica nelle gallerie stradali
- [5] Bisegna, F., Gugliermetti, F., Barbalace, M., & Monti, L. (2010). Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes). Dipartimento di Fisica Tecnica—Università di Roma "La Sapienza", Roma, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico-ENEA.
- [6] Gugliermetti, F., Bisegna, F., & Bundo, J. (2011). Analisi dei sistemi integrati LED–Fotovoltaico per applicazioni stradali, approccio energetico e valutazione quantitativa.
- [7] GSE, “Le Guide Blu, Impianti a norme CEI Fotovoltaico”, 2008
- [8] Caffarelli, A. (2009). Sistemi solari fotovoltaici: progettazione e valutazione economica in conto energia. Maggioli.
- [9] Panzavolta, D, (2009). L'analisi di rischio nella progettazione delle gallerie stradali
- [10] D'Andrea, A., Cantisani, G., & Rampini, M. (2002). Modelli sperimentali ed algoritmi per il calcolo illuminotecnico delle pregallerie stradali. Atti del XII

Convegno Internazionale SIIV:" Riqualificazione funzionale e sicurezza del sistema viario". Parma, 1, 300-319.

- [11] Bellia, L., Di Martino, C., Spada G., la simulazione illuminotecnica con radianze mediante ecotect
- [12] C. Wencheng, H. Zheng, G. Liping, L. Yandan, C. Dahua; Performance of induction lamps and HPS lamps in road tunnel lighting; *Tunnelling and underground space technology*, 2008, 23.2: 139-144.
- [13] S. Onaygil, Ö. Güler, E. Erkin; Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey. *Tunnelling and underground space technology*, 2003, 18.1: 85-91.
- [14] G. Held, "Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications", CRC Press, Broken Sound Parkway (NW), 2009
- [15] E. F. Schubert, "Light Emitting Diodes", II Edition, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2006
- [16] G. Forcolini, "Illuminazione LED", Hoepli, Milano 2008
- [17] D. Scullino, "Il LED e l'illuminazione", Sandit, Albino (BG) 2009
- [18] M. Burmen, F. Pernuš, B. Likar, "LED light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their assessment", *Meas. Sci. Technol.* 19 (2008) 122002 (15pp)
- [19] CIE publication No. 15 1971 Colourimetry (Vienna: CIE Central Bureau)
- [20] CIE 177-2007 2007 "Colour Rendering of White LED Light Sources" (Vienna: CIE Central Bureau)
- [21] CIE 13.3:1995, "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources"

- [22] Y.-C. Chang, C.-J. O, Y.-S. Tsai, F.-S. Juang, “Nonspherical LED Packaging Lens for Uniformity Improvement”, *Optical Review* Vol. 16, No. 3 (2009) 323–325
- [23] C.T. Pan, M.F. Chen, P.J. Cheng, Y.M. Hwang, S.D. Tseng, J.C. Huang, “Fabrication of gapless dual-curvature microlens as a diffuser for a LED package”, *Sensors and Actuators A* 150 (2009) 156–167
- [24] G. Forcolini, “Lighting”, Milano, Ed. Hoepli, Milano 2004
- [25] G. Moncada Lo Giudice, A. de Lieto Vollaro, “Illuminotecnica”, Ed. ESA, Seconda edizione, Milano 1996
- [26] GSE, “Le Guide Blu, Impianti a norme CEI Fotovoltaico”, 2008
- [27] Groppi, Zuccaro, “Impianti Solari Fotovoltaici a norme CEI”, 2008
- [28] Andrea Bartolazzi, “Le Energie Rinnovabili”, Milano, 2006
- [29] LEGAMBIENTE, 12 Mesi per salvare il pianeta, Dicembre 2008
- [30] B.J. Huang, P.C. Hsu, M.S. Wu, P.Y. Ho, “System dynamic model and charging control of lead-acid battery for stand-alone solar PV system”, *Solar Energy* 84 (2010) 822–830
- [31] E. Adkins, S. Eapen, F. Kaluwile, G. Nair, V. Modi, “Off-grid energy services for the poor: Introducing LED lighting in the Millennium Villages Project in Malawi”, *Energy Policy*
- [32] S. Giua, Regolazione del flusso luminoso, risparmio energetico, manutenzione e la norma UNI 11095