

LA SICUREZZA STRADALE DEI TRACCIATI IN GALLERIA CON PARTICOLARE RIGUARDO ALLE CONDIZIONI DI ILLUMINAZIONE: IL CASO DELLA GALLERIA S. NICOLA DI PIETRAGALLA

M. AGOSTINACCHIO, G. CUOMO, M. DIOMEDI

Università della Basilicata - DAPIT Viale dell'Ateneo Lucano 10

michele.agostinacchio@unibas.it, gianluca.cuomo@unibas.it, maurizio.diomedì@unibas.it

ABSTRACT

Le gallerie costituiscono un elemento di discontinuità del tracciato stradale che condiziona psicologicamente l'utente, per cui la loro corretta progettazione deve garantire adeguate condizioni di sicurezza attiva e passiva. Le normative europee, per far fronte a questa situazione, hanno introdotto specifiche disposizioni mirate a ridurre il tasso d'incidentalità nei tunnel, concentrando la loro attenzione sugli aspetti strutturali ed impiantistici (ventilazione, impianto antincendio, impianto d'illuminazione) e sulle raccomandazioni ai conducenti.

Nel presente studio, nel rispetto delle caratteristiche geometriche imposte dalla normativa stradale (*D.M. 5/11/2001 Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade*) e dell'aspetto della valutazione dell'impatto ambientale, si è posta attenzione sull'importanza della qualità delle attrezzature di sicurezza delle opere in sotterraneo, con particolare riferimento ad alcune tecnologie innovative per gli impianti d'illuminazione, capaci di fornire contributi significativi in termini di eliminazione delle condizioni di pericolosità. Nello specifico, partendo dal Decreto 14/9/2005 (*Norme sulla Illuminazione delle Gallerie Stradali*), dalla direttiva 2004/54/CE del parlamento europeo relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea e dalla norma UNI 11095 (*Illuminazione delle Gallerie*), si è sviluppato lo studio illuminotecnico della galleria S.Nicola di Pietragalla, ubicata sulla S.S 658 (Potenza-Melfi). Dopo aver verificato le reali condizioni di illuminazione di tale opera d'arte, si è simulato, con un moderno software, il livello di illuminamento minimo indispensabile per ogni tratto della galleria, al fine di garantire il più elevato livello di sicurezza. La verifica dell'attuale impianto esistente ha fornito risultati preoccupanti e scadenti sia in termini di livello, che di uniformità di luminanza. Pertanto, si sono simulate diverse soluzioni di impianti dotati di vari tipi di lampade e di differente tipologia ottica, prevedendo, nel contempo, l'utilizzo di materiali specifici per la pavimentazione e per il rivestimento delle pareti della galleria. L'analisi ed il confronto delle soluzioni ipotizzate hanno portato all'individuazione di quella ottimale sia dal punto di vista tecnico, che economico, con conseguente miglioramento delle caratteristiche illuminotecniche dell'opera d'arte e della sicurezza attiva degli utenti della strada.

KEYWORDS: galleria, sicurezza stradale, illuminazione, luminanza.

1 INTRODUZIONE

Nel presente studio, nel rispetto delle prescrizioni del *D.M. 5/11/2001*^[6] (*Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade*) si è sviluppato uno studio illuminotecnico della galleria S.Nicola di Pietragalla, ubicata sulla S.S 658 Potenza-Melfi, tenendo conto del Decreto 14/9/2005^[7] (*Norme sulla Illuminazione delle Gallerie Stradali*), della direttiva 2004/54/CE^[4] del parlamento europeo relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea (*Illuminazione delle Gallerie*) e della analisi di alcuni studi pregressi^{[1],[3],[8],[11]}, nonché di quanto prescritto dalla norma UNI 11095^[14]. L'infrastruttura viaria in esame, bidirezionale a scorrimento veloce, è caratterizzata da elevati flussi di traffico, in quanto è l'unico collegamento esistente tra la città di Potenza e lo stabilimento FIAT di Melfi ed il suo indotto. Per via di una progettazione oramai datata, tale arteria presenta numerose zone pericolose, tra cui quella relativa al superamento del valico di S.Nicola di Pietragalla a quota 850m/slm, ottenuto con la realizzazione di una galleria artificiale. Trattasi di una galleria ad unica carreggiata con due corsie, una per ogni senso di marcia, ubicata tra i Km 12+0,30m e Km 12+350m della S.S 658 (Figura 1). Planimetricamente, arrivando da Potenza, il tracciato della galleria si presenta con un primo tratto in curva, per una lunghezza pari a 130,00m, a cui fa seguito un secondo tratto in rettilineo per una lunghezza pari a 200,00m. L'intero fornace è lungo 330m.

A livello altimetrico, la galleria si sviluppa con pendenza costante, in lieve discesa verso Melfi, pari allo 0,37%.

Il percorso della galleria si presenta carente per quanto riguarda l'intera segnaletica sia orizzontale che verticale, gli apparecchi catarifrangenti sono deteriorati e l'illuminazione appare insufficiente a garantire la marcia degli utenti in sicurezza; per la qual cosa si è deciso di proporre alcune soluzioni progettuali, nel rispetto della richiamata Norma Uni 11095/2003 per sopperire a tali carenze.

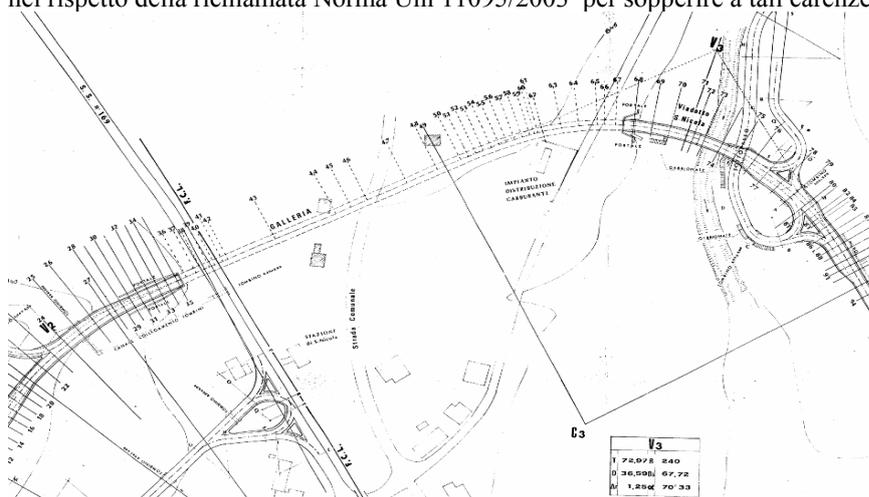


Figura 1- Planimetria della galleria analizzata

2 PROGETTAZIONE ILLUMINOTECNICA

2.1 Caratteristiche generali della Norma UNI 11095/2003

La Norma Uni 11095, in termini generali, suddivide la sezione longitudinale di un tunnel in 6 zone 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 L_{es} non sia minore di 1/3 della luminanza notturna dell'ultimo tratto di galleria.

2.2 Modello per il corretto dimensionamento dell'impianto

Per la corretta esecuzione dei calcoli illuminotecnici sono stati considerati i dati riportati in Tabella 1.

Denominazione	Dati
Nome della galleria	S.Nicola
Orientamento della direzione di marcia	Sud-Nord
Lunghezza	330m
Classificazione della pavimentazione	C2
Velocità di progetto illuminotecnico	70Km/h
Distanza di arresto	90m
Traffico giornaliero	8000 veic
Traffico notturno	4000 veic
Uniformità generale	0,4
Uniformità longitudinale	0,6
Coefficiente di qualità del contrasto	0,1; 0,2; 0,6
Pendenza della carreggiata (zona di accesso)	0,3714%
Fattore di manutenzione	60%
Incremento di soglia TI	10%-15%
Luminanza delle pareti (h=2m)	60%Lcarreggiata

Tabella 1 – Dati utilizzati come input per l’analisi illuminotecnica

Lo studio ha permesso di definire i circuiti di rinforzo nella zona di entrata ed in quella di transizione, i circuiti nella zona interna e quelli del tratto immediatamente successivo all’uscita dal tunnel.

I calcoli sono stati eseguiti con un programma automatico di illuminotecnica (LiteCalc[®]), che consente il calcolo per ambienti interni ed esterni con visualizzazione di tabelle, grafici ed immagini fotorealistiche dell’ambiente stesso da diversi punti di vista, mediante rendering a radiosità e ray-tracing.

Dopo una iniziale fase di sopralluogo e rilievo, si è proceduto alla definizione della luminanza di velo L_v e della curva di luminanza L_x , che hanno permesso il successivo sviluppo dei calcoli illuminotecnici.

La luminanza di velo rappresenta la somma delle luminanze che, dalla distanza di arresto, disturbano la visione dell’ostacolo di riferimento, largo 0.2 m, all’interno della galleria, posto sul piano stradale con una faccia perpendicolare alla direzione del traffico, a superficie diffondente e con un fattore di riflessione $r=0,1$. In questo calcolo l’occhio del conducente è posto all’altezza di 1,5m sopra l’asse della corsia di destra e alla distanza pari a quella di arresto dalla sezione di ingresso della galleria. Si è ricorso quindi, al calcolo di L_v determinando le componenti della Eq.1.

$$L_v = L_{seq} + L_{atm} + L_{par} \quad (Eq.1)$$

dove L_{seq} è la luminanza di velo equivalente, L_{atm} quella atmosferica e L_{par} quella del parabrezza.

Per la distanza di arresto si è considerato il valore prescritto dal D.M. 5/11/2001 che, nel caso in esame, è pari a 90 m.

La luminanza L_{seq} , a cui è soggetto l'occhio del guidatore a seguito della diffusione nel bulbo oculare delle luminanze perturbatrici di fonti luminose esterne, è stata calcolata tramite la Eq.2, che considera le luminanze medie, valutate in base ai valori della Tabella 2 e delle superfici emittenti che interessano ciascuno dei 108 settori del diagramma, nel quale è possibile suddividere il bulbo oculare medesimo, composto da 9 anelli concentrici suddivisi in 12 settori, angolarmente uguali e pari a 30° :

$$L_{seq} = 0,51 \times 10^{-3} \times \int_i \int_j L_{ij} \quad \text{con } i=1 \div 9 \text{ e } j=1 \div 12 \quad (\text{Eq. 2})$$

Direz. di marcia	Luminanza (Kcd/mq)					
	Cielo	Strada	Rocce	Edifici	Neve	Prati
Verso Nord	8	3	3	8	15	2
Est-Ovest	12	4	2	6	10(a) 15(b)	2
Verso sud	16	5	1	4	5(a) 15(b)	2

(a) Paesaggio montagnoso con superfici prevalentemente ripide, rivolte verso il conducente

(b) Paesaggio pianeggiante, più o meno orizzontale

Tabella 2- Luminanze medie utilizzate per il calcolo

Si sono, così, ottenuti due valori di L_{seq} , uno relativo alla direzione di marcia verso nord ($2,148 \text{cd/m}^2$) e uno riferito alla direzione di marcia verso sud ($2,368 \text{cd/m}^2$). Per il calcolo della luminanza atmosferica, e cioè della luminanza perturbatrice della visione dovuta alla diffusione della luce negli strati dell'atmosfera compresa nella distanza di arresto, si è utilizzata la Eq.3:

$$L_{atm} = 1,3 \times (d_a \times E_h / \pi \times V_m) \quad (\text{Eq. 3})$$

L'illuminamento orizzontale E_h e la distanza meteorologica V_m (ovvero la distanza alla quale, in conseguenza della luminanza dell'atmosfera, un oggetto nero osservato sullo sfondo del cielo all'orizzonte presenta un contrasto pari a 0,05), sono stati valutati sulla base dei suggerimenti normativi sintetizzati nelle Tabelle 3 e 4.

Latitudine	E_h (Klx)
36° N	64
38° N	62
40° N	60
42° N	58
44° N	57
46° N	55

Tabella 3- Valutazione illuminamento orizzontale

Condizioni atmosferiche	V_m (Km)
Molto limpide	50
Limpide	20
Leggera foschia	10
Foschia	5

Tabella 4- Valutazione distanza meteorologica

Essendo la latitudine locale pari a 41°N , si è considerato un illuminamento orizzontale di 59Klux e, a seconda della condizione atmosferica e della relativa distanza di visibilità meteorologica, sono stati ricavati i seguenti valori per L_{atm} :

$L_{atm} = 43,96$ in condizioni atmosferiche molto limpide;
 $L_{atm} = 109,92$ in condizioni atmosferiche limpide;
 $L_{atm} = 219,84$ in condizioni atmosferiche di leggera foschia;
 $L_{atm} = 439,68$ in condizioni atmosferiche di foschia.

La luminanza del parabrezza è stata stimata tramite la Eq.4:

$$L_{par} = 0,4 L_{seq} \quad (\text{Eq. 4})$$

Ottenuto L_{par} per la direzione di marcia verso nord ($0,859 \text{cd/m}^2$) ed uno verso sud ($0,947 \text{cd/m}^2$), sono stati successivamente calcolati i diversi valori di L_v a seconda delle varie combinazioni di calcolo e conseguentemente, tramite la Eq. 5, i diversi valori della luminanza di soglia L_s (luminanza minima della carreggiata, che permette la percezione dell'ostacolo da parte del conducente di un veicolo posto alla distanza di arresto da detto ostacolo):

$$L_s = L_v / (6 * |(\rho / \pi * q_c) - 1| - 1) \quad (\text{Eq. 5})$$

dove:

$$q_c = L_p / E_v \quad (\text{Eq. 6})$$

$E_v =$ 0,1 impianto tipo proflusso;
 0,2 impianto tipo simmetrico
 0,6 impianto tipo controflusso.

In particolare L_s è fortemente legato alla tipologia ottica degli apparecchi utilizzati, essendo funzione del fattore di qualità del contrasto q_c , della luminanza della carreggiata L_p in un suo punto P e dell'illuminamento verticale E_v al centro della faccia dell'ostacolo di riferimento, più prossima al conducente di un veicolo, quando un lato di questa faccia è centrato sullo stesso punto^[13].

Calcolato L_s , si sono determinati i valori medi della luminanza del tratto di carreggiata corrispondente alla zona di entrata L_e , che coincidono proprio con il valore di partenza della curva ideale di luminanza. Tra le diverse combinazioni di condizioni di direzione di marcia e di visibilità meteorologica, per ogni tipo di impianto si è presa in considerazione la condizione che ha dato luogo alla luminanza di entrata maggiore, in modo da porla a base del dimensionamento dell'impianto di illuminazione.

Noti i valori di L_e , tramite la Eq.7 si è calcolato L_t (valore medio della luminanza trasversale della carreggiata in un punto qualsiasi della zona di transizione) e, tramite la Eq.8, la lunghezza dei tratti di transizione relativi ai diversi valori di L_e . Infine, il valore di L_i , desunto dalla media della luminanza di un tratto di carreggiata della zona interna della galleria, è stato calcolato tramite la Eq. 9, considerato che la galleria in esame è a doppio senso di marcia:

$$L_t = L_e / [1,9 + (x/v)]^{1,4} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$x_t = vx [(L_e/L_i)^{5/7} - 1,9] \quad (\text{Eq. 8})$$

$$L_i \geq 2L \quad (\text{Eq. 9})$$

dove: x = distanza lungo la galleria misurata dall'inizio della zona di transizione;
 v = velocità di progetto illuminotecnico;
 L_i = luminanza interna;
 L = minimo della luminanza media, indicato nella UNI 10439 per la classe relativa al tipo di strada (4cd/m^2).

Calcolati i valori di luminanza delle sei zone della galleria, si è determinato l'andamento complessivo del valore di luminanza media $L(x)$, da garantire lungo l'intero percorso della galleria e che rappresenta uno dei principali obiettivi del progetto illuminotecnico. L'impianto di illuminazione è stato progettato in modo da garantire i valori rappresentati dalla curva ideale di luminanza, sia sulla strada che sulle pareti, nel rispetto dei vincoli di qualità imposti dalla norma, ovvero:

- Luminanza delle pareti $\geq 60\%$ della luminanza della strada;
- Uniformità generale $U_0 > 4$ e longitudinale $U_l > 6$;
- Indice di abbagliamento $TI\% < 10\%$;
- Assenza di sfarfallamento.

Sono state, quindi, calcolate le varie curve di luminanza ideali, relative alle diverse combinazioni di direzione di marcia, distanza di visibilità meteorologica e tipo di impianto, riferite sia al caso di corpi illuminanti simmetrici con lampade al sodio ad alta pressione per la zona di rinforzo e per la zona permanente, che al caso di corpi illuminanti controflusso con lampade al sodio ad alta pressione per la zona di rinforzo e corpi illuminanti simmetrici con lampade al sodio ad alta pressione per la zona dove è previsto l'impianto permanente^[12].

Per brevità di trattazione, si riporta in questa sede solamente la curva ideale di luminanza di Figura 2, utilizzata per la verifica ed il corretto dimensionamento dell'impianto, essendo quella che, tra le diverse condizioni atmosferiche in esame, presenta il valore di L_e maggiore, sia per la direzione di marcia verso nord, che per quella verso sud.

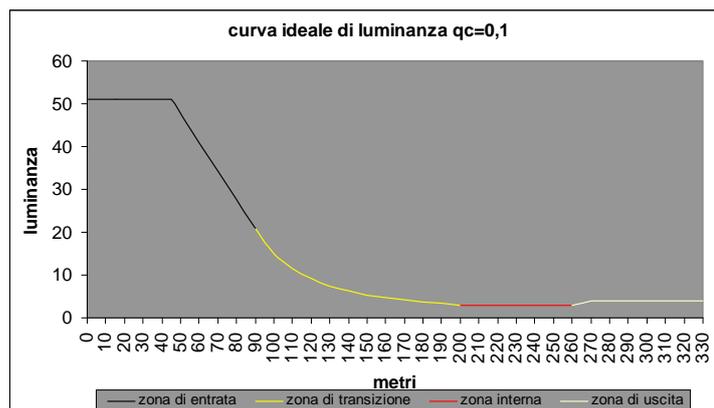


Figura 2- Curva ideale di luminanza utilizzata nel dimensionamento

2.3 Verifica dello stato attuale dell'impianto di illuminazione

In prima analisi, si è proceduto alla verifica dello stato attuale della galleria in termini di luminanza richiesta dalla norma UNI11095. Essa è dotata di un solo impianto permanente, funzionante sia di giorno che di notte, costituito da 64 lampade al sodio ad alta pressione da 70W, poste ad un'altezza dal manto stradale di 6m. Nel primo tratto, esse sono poste ad una interdistanza di 6m, mentre nel tratto più interno tale valore cresce fino ad 11m.

Considerato che l'impianto versa in uno stato di manutenzione degradato e presenta un'ottica simmetrica stradale con installazione dei corpi illuminanti in volta, ed assumendo un indice di riflessione di tipo C2 per il conglomerato bituminoso (UNI 10439) e di tipo diffondente lambertiano con fattore di riflessione $r=0,3$ per le pareti non totalmente chiare, sono stati ricavate numerose rappresentazioni grafiche, tra cui gli output delle Figure 3 e 4, i quali rappresentano, rispettivamente, il diagramma a spot ed i valori delle luminanze sulla pavimentazione, in funzione della distanza.

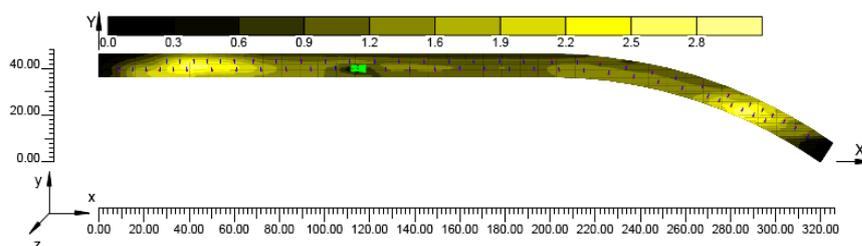


Figura 3- Diagramma a spot della luminanza sulla pavimentazione

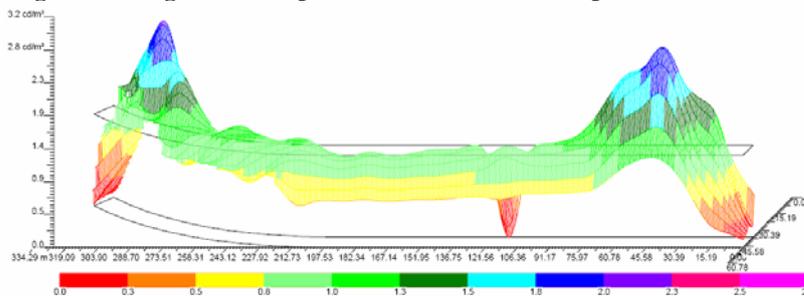


Figura 4- Valori della luminanza sulla pavimentazione

Lo studio ha mostrato che l'impianto attuale non rispetta i requisiti minimi imposti dalla norma UNI 11095, fissati in 1cd/m^2 , soprattutto ai due imbocchi della galleria, dove risulta evidente la presenza dell'effetto buco nero a causa della mancanza dell'impianto di rinforzo. In aggiunta, neppure i valori di uniformità sono tali da garantire la marcia in sicurezza degli utenti della strada. Per queste ragioni si è pensato di proporre alcune soluzioni progettuali alternative e di confrontare tra loro i risultati, in maniera da scegliere quella più

appropriata. Gli output grafici di questa analisi sono riportati nel seguito, in modo da facilitarne la lettura tramite confronto visivo.

2.4 Le ipotesi progettuali proposte

Nella prima ipotesi progettuale sono stati impiegati apparecchi con ottica e lampade al sodio ad alta pressione da 100W e da 150W, con l'aggiunta di alcuni apparecchi in una delle zone di imbocco. Si sono assunti un coefficiente di manutenzione pari a 0,8, essendo l'impianto nuovo ed in condizioni ottimali e degli indici di riflessione di tipo C2 per la superficie stradale e di tipo diffondente lambertiano, con fattore di riflessione $r = 0,4$, per le pareti, ipotizzate di colore bianco. Le Figure 5 e 11 mostrano i risultati ottenuti.

La seconda soluzione ha previsto sia l'adeguamento dell'impianto permanente, che l'installazione di un impianto di rinforzo ai due ingressi della galleria, acceso solo di giorno e regolato da un sensore di luminanza che permette di correlare l'illuminazione delle zone di entrata e di transizione della galleria con la luminanza di velo esterna. Per il rinforzo si sono utilizzate lampade al sodio ad alta pressione da 600w, 400w e 250w. Come per l'impianto permanente, anche per il rinforzo sono stati previsti apparecchi con ottica simmetrica, utilizzando i medesimi coefficienti ed indici di riflessione del caso precedente. Gli output di questa soluzione progettuale sono esibiti nelle Figure 6 ed 12.

La terza ipotesi progettuale, i cui risultati sono rappresentati nelle Figure 7 e 13, ha previsto l'adeguamento dell'impianto permanente e l'installazione dell'impianto di rinforzo, utilizzando apparecchi con ottica-simmetrica e lampade JM (joduri metallici).

Nella successiva ipotesi (quarta) sono stati previsti sia l'adeguamento dell'impianto permanente mediante apparecchi con ottica simmetrica con lampade al sodio ad alta pressione, che l'installazione dell'impianto di rinforzo con apparecchi con ottica controflusso e lampade al sodio ad alta pressione, lasciando invariati i coefficienti e gli indici di riflessione rispetto alle ipotesi precedenti.

Le risultanze di questo caso sono indicate nelle Figure 8 e 14.

La quinta soluzione progettuale ha riguardato l'adeguamento dell'impianto permanente e l'installazione dell'impianto di rinforzo mediante apparecchi con ottica simmetrica e lampade al sodio ad alta pressione. In questo caso si è previsto anche il rifacimento del manto stradale, utilizzando un conglomerato bituminoso di tipo C1 (pavimentazione chiara, con inerti bianchi)^{[2],[9]}.

Le figure 9 e 15 mostrano i risultati del caso analizzato.

L'ultima proposta (sesta) ha previsto l'adeguamento dell'impianto di illuminazione permanente e l'installazione dell'impianto di rinforzo, utilizzando, per entrambi, apparecchi con ottica simmetrica e lampade al vapore di sodio ad alta pressione. Si è supposto di lasciare inalterato il conglomerato bituminoso, di tipo C2, e si è assunto, per le pareti, un fattore di riflessione $r = 0,5$ in virtù della posa in opera di pannelli di rivestimento in acciaio^{[5],[10]}. Le Figure 10 e 16 sono rappresentative di questo ultimo caso.

Diagramma a spot delle luminanze sulla pavimentazione

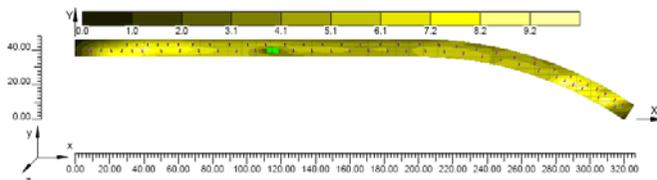


Figura 5 – Prima proposta progettuale

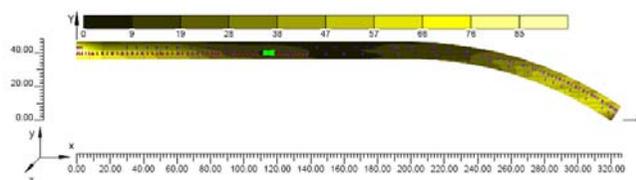


Figura 6 – Seconda proposta progettuale

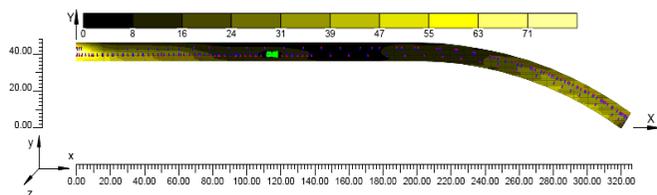


Figura 7 – Terza proposta progettuale

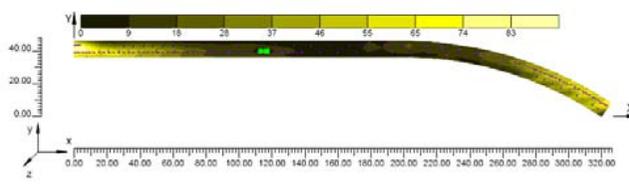


Figura 8 – Quarta proposta progettuale

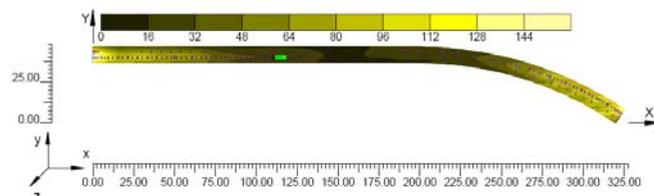


Figura 9 – Quinta proposta progettuale

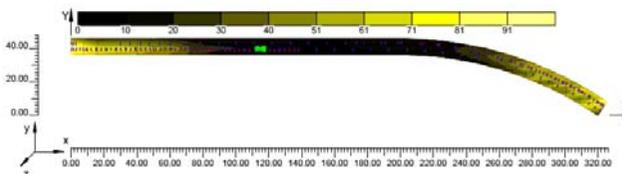


Figura 10 – Sesta proposta progettuale

Valori delle luminanze sulla pavimentazione

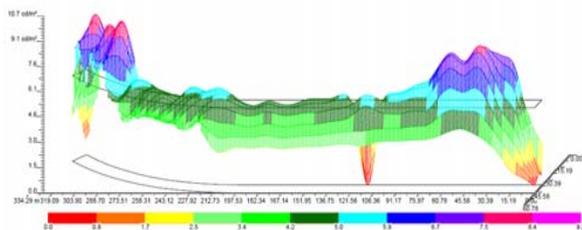


Figura 11 – Prima proposta progettuale

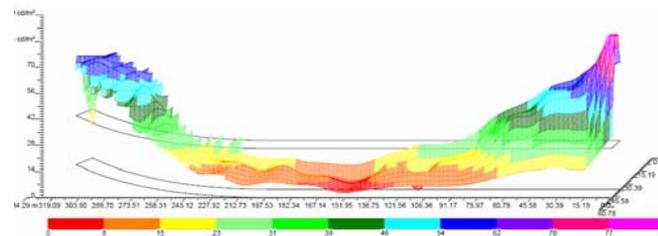


Figura 12 – Seconda proposta progettuale

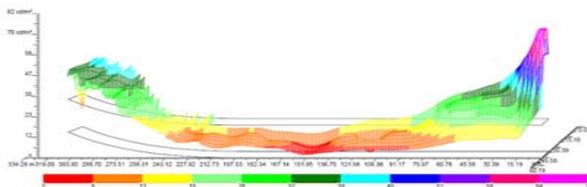


Figura 13– Terza proposta progettuale

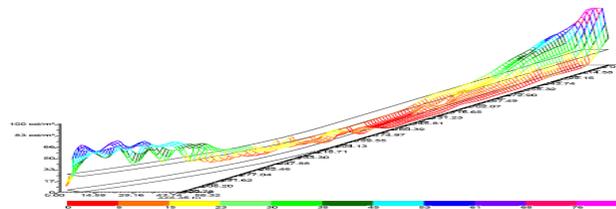


Figura 14 – Quarta proposta progettuale

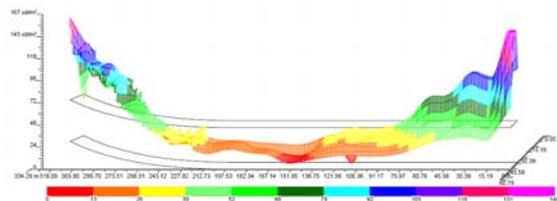


Figura 15 – Quinta proposta progettuale

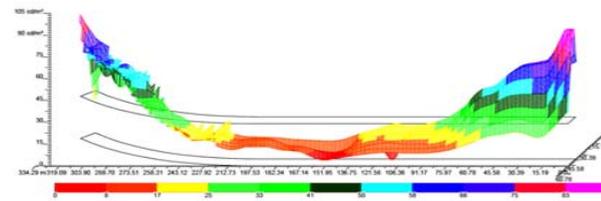


Figura 16 – Sesta proposta progettuale

2.5 Analisi dei risultati

Dai calcoli effettuati e dalle figure riportate, si nota che l'impianto di illuminazione attuale della galleria San Nicola di Pietragalla (PZ) versa in uno stato di conservazione precario, tanto da risultare del tutto inadatto a garantire la marcia in sicurezza degli utenti della strada.

Nella prima soluzione progettuale proposta, l'adeguamento del solo impianto permanente non è sufficiente a rispettare i livelli di luminanza richiesti dalla norma per l'illuminazione diurna. Ciò è particolarmente evidente nelle zone di ingresso, dove i valori di luminanza sono molto bassi e dove è da prevedere un impianto di rinforzo.

Nella seconda soluzione, invece, i valori di luminanza risultano superiori alle prescrizioni, grazie alla presenza dell'impianto di rinforzo, che elimina l'effetto buco nero. Con questa soluzione vengono garantiti non solo l'uniformità di luminanza sia longitudinale che generale e la limitazione dell'abbagliamento, ma anche ottimi valori di luminanza sulle pareti, grazie al rinforzo con apparecchi simmetrici. Sono state successivamente studiate altre quattro soluzioni alternative per verificare se tale positivo risultato illuminotecnico potesse essere raggiunto impiegando o altri tipi di lampade, o altre combinazioni di interventi, in maniera da minimizzare i costi in fase di messa in opera e di gestione.

In particolare, la terza soluzione, basata sull'utilizzo di lampade a ioduri metallici in numero e disposizione invariata, in luogo di quelle al sodio ad alta pressione, ha fornito in output dei valori inferiori al minimo previsto dalla norma, soprattutto in corrispondenza di uno degli ingressi del fornice. Anche variando la posizione dei proiettori lungo la galleria, i valori conseguiti risultano meno uniformi del caso precedente e per la qual cosa tale ipotesi è stata scartata.

Risultati poco soddisfacenti sono stati ottenuti anche con la soluzione dell'ottica controflusso (quarta soluzione), per via del fatto che la luminanza decresce in modo non lineare nella zona di ingresso e, in alcuni tratti, è addirittura inferiore al minimo della norma. Per questo motivo, anche la soluzione a flusso contrario ha fornito risultati inferiori rispetto quelli della seconda proposta progettuale.

La quinta soluzione, che prevede l'utilizzo di aggregati lapidei chiari nel conglomerato bituminoso della pavimentazione, permette di raggiungere elevati valori di luminanza, consentendo di ridurre la potenza delle lampade, pur nel rispetto della uniformità dei risultati, con tutti i vantaggi economici e di riduzione dell'abbagliamento che ne derivano.

Nell'ultima proposta progettuale (sesta soluzione) si riscontra che, utilizzando pannelli in acciaio in luogo di pareti in calcestruzzo imbiancate, è possibile ridurre la potenza delle lampade, ottenendo così un risparmio economico. Infatti, a parità di apparecchi, di tipo di ottica e di tipo di lampade, sugli elementi in acciaio si è ottenuta una luminanza due volte superiore, mentre sulla carreggiata l'aumento è risultato pari al 40%, con valori di uniformità superiori al valore minimo richiesto dalla norma UNI11095, senza che si verificano fenomeni di abbagliamento lungo tutta la galleria.

Tale soluzione, in definitiva, è risultata la migliore in un'ottica costi-benefici: infatti, l'analisi economica che, per brevità di trattazione non viene riportata in tale sede, ha mostrato che il consumo annuo che si avrebbe senza pannelli

riflettenti è pari a 242360KW contro i 175937KW relativi all'intervento di adeguamento, con un economia di 10627 €/anno per il solo consumo elettrico. Per comprendere meglio la validità dei risultati raggiunti è certamente utile far riferimento alla Figura 17, che rende possibile il confronto tridimensionale di tutti i risultati ottenuti.

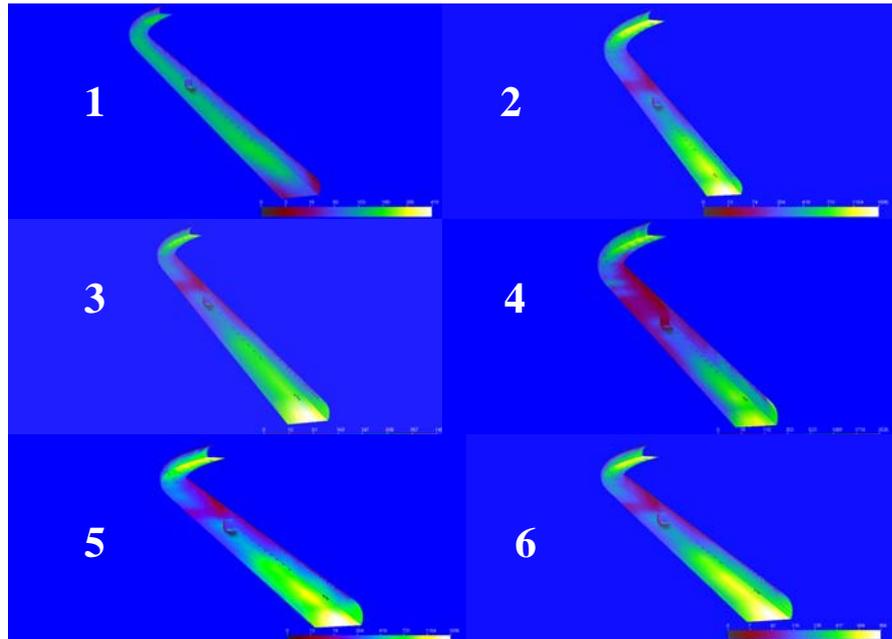


Figura 17 – Confronto tridimensionale dei risultati delle sei proposte

3 CONCLUSIONI

La ricerca in esame ha evidenziato che, grazie all'utilizzo di strumenti sofisticati messi a disposizione del Tecnico stradale, è possibile pervenire a soluzioni progettuali che possono incrementare il livello di sicurezza attiva degli utenti e, nel contempo, ridurre i costi di gestione delle opere d'arte stradali.

In particolare, con riferimento agli impianti di illuminazione interna delle gallerie, il trend futuro si basa su un giusto compromesso tra una sempre maggiore efficienza degli impianti di illuminazione utilizzati, capaci di garantire adeguati livelli di illuminamento, ed il costo e l'entità dei consumi.

Tale obiettivo può essere raggiunto solo grazie a simulazioni numeriche e sperimentazioni di laboratorio e/o in scala reale, coniugando conoscenze tecniche e sviluppo delle tecnologie moderne, per così raggiungere soluzioni mirate sia ad aumentare la sicurezza attiva degli utenti della strada, che ad ottimizzare i costi di gestione e manutenzione delle infrastrutture viarie.

In tale contesto si inserisce il presente studio, in cui gli Autori hanno inteso fornire un contributo alla validazione dell'assunto precedente.

4 BIBLIOGRAFIA

1. AIPCR Comitato Tecnico sui Tunnel Stradali (1995), *The First Road Tunnel*, Rapporto 05.01 B, Atti del XX Congresso mondiale della Strada, Montreal, Canada;
2. AIPCR Comitato Tecnico sui Tunnel Stradali (1998), *Le Gallerie Stradali*, Quaderni AIPCR, Atti del XXIII Congresso Mondiale della Strada, Verona, Italia;
3. Canale S., Leopardi S (2003), *Sicurezza delle gallerie stradali: definizione di un indicatore sintetico per la caratterizzazione delle prestazioni offerte dagli impianti di illuminazione artificiale*, XII Convegno Nazionale SIIV – Padova, Italy;
4. Commissione delle Comunità Europee (2004), *Direttive del Parlamento europeo e del Consiglio relativa ai requisiti minimi di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea- 2004/54/CE*;
5. D’Andrea A., Cantisani G. (2002), *L’Illuminazione naturale degli imbocchi delle gallerie stradali – SIIV 2002*, Parma;
6. D.M. 5 Novembre 2001 (2001), *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*, supplemento ordinario alla “Gazzetta Ufficiale” n.3 del 4 gennaio 2002.
7. D. M. 14 settembre 2005 (2005), *Norme di illuminazione delle gallerie stradali*, Gazzetta Ufficiale n.295 del 20 dicembre 2005;
8. Di Volo N., Domenichini L., Giaccherini A. (2004), *Identification of Safety Indicators for Road Traffic Management in Tunnels Using Microsimulation Techniques*, II SIIV International Congress – New technologies and Modelling Tools for Roads Applications to Design and Management, Firenze, Italy;
9. Domenichini L., La Torre F., Rossi L. (2004), *Construction Issues of Insuring Sight Distances in Tunnels*, II SIIV International Congress – New technologies and Modelling Tools for Roads Applications to Design and Management, Firenze, Italy;
10. Fusari S., Venturino D, Iuliani M. (1999), *Un Nuovo Sistema di Illuminazione delle Gallerie Autostradali per l’Ottimizzazione del Rapporto Costi-Benefici*, Rivista Autostrade 2/99, Milano, Italia;
11. Lamberti R., De Guglielmo M.L. (2005), *Probabilistic Risk Analysis in Road Tunnel Safety*, 3rd International SIIV Congress – People, Land, Environment and Transport Infrastructures Reliability and Development, Bari, Italy;
12. Rocca C. (1994), *L’Illuminazione delle Gallerie. Problemi e Soluzioni Pratiche*, Rivista Le Strade 1/94, Milano, Italia;
13. Sacchi A., Cagliaris G. (1996) *Fisica Tecnica. Illuminotecnica e Acustica*-UTET, Torino, Italia;
14. UNI 11095 (2003), *Luce e illuminazione. Illuminazione delle gallerie*, Dicembre 2003, Milano, Italia.