



VISIBILITÀ E PERCEZIONE VISIVA DEL TRACCIATO STRADALE IN GALLERIA

Marco Pasetto

Dipartimento di Costruzioni e Trasporti - Università degli Studi di Padova
Via Marzolo, 9 – 35131 Padova
Tel. +39 049 8275569 – Fax 049 8275577
pasetto@caronte.dic.unipd.it

Andrea Galiazzo

Ingegnere, libero professionista - Padova
galiazzo.andrea@libero.it

VISIBILITÀ E PERCEZIONE VISIVA DEL TRACCIATO STRADALE IN GALLERIA

MARCO PASETTO – Dipartimento di Costruzioni e Trasporti – Università di Padova

ANDREA GALIAZZO – Ingegnere, libero professionista

SOMMARIO

Il Decreto del Ministero LL.PP. 5.06.2001 relativo alla “sicurezza nelle gallerie stradali”, impone che tutti gli enti proprietari o concessionari di infrastrutture viarie con gallerie vi pongano in essere interventi di manutenzione finalizzati alla sicurezza di circolazione. In particolare si chiede che la segnaletica e gli impianti di illuminazione siano posti a norma e che siano eseguite tutte le verifiche tecniche necessarie per definire la distanza di visuale libera e la velocità limite consentita all’interno dei manufatti.

Ciò considerato, si è proceduto a studiarvi - per le diverse configurazioni plano-altimetriche dell’asse, le possibili geometrie della piattaforma stradale e le differenti tipologie veicolari - visibilità e percezione visiva del tracciato in tutte le strade classificate dal Codice.

Si sono inizialmente analizzati i modelli di visibilità utilizzabili in presenza di illuminazione artificiale, individuandone il campo di applicabilità e ponendo a confronto le distanze di visibilità per l’arresto e per il sorpasso nelle differenti condizioni di circolazione.

Si è quindi accertato come cambino le condizioni di sicurezza durante la guida all’aumentare dell’opacità dell’aria all’interno della galleria, a causa di inquinanti o fumi non evacuati dall’impianto di ventilazione.

ABSTRACT

The Ministry of Works Decree 5.06.01, regarding to “safety in road tunnels”, obliges all the Authorities which are proprietors or concessionaires of road tunnels to carry out maintenance interventions in order to guarantee a safe transit of vehicles. Particularly, traffic signing, road marking and lighting must be arranged in conformity with the regulations, and the necessary technical inspections have to be made in order to define the sight distance and the maximum vehicular speed in the tunnel.

To this purpose, visibility and sight perception of the Italian classified roads have been checked up, in relation to the cross and longitudinal road section, the geometry of the road platform and the traffic composition.

Driver-behaviour models have been preliminarily applied to roads with artificial lighting, with the aim to define their applicability limits and to compare stopping distance and overtaking sight distance in the different traffic conditions.

The alteration of the safety traffic conditions in the tunnels, after air opacity (because of pollution and smoke), has been finally ascertained.

1. SICUREZZA NELLE GALLERIE STRADALI. NORMATIVA VIGENTE

Il Decreto del Ministero LL.PP. 5.06.2001 relativo alla “sicurezza nelle gallerie stradali”, riprendendo i contenuti della Circolare n° 7938 del 6.12.1999 (particolarmente riferita a “veicoli che trasportano materiali pericolosi”), impone a tutti gli enti proprietari o concessionari di infrastrutture viarie comprendenti gallerie una

catalogazione delle strutture in esercizio, come premessa ad una manutenzione finalizzata alla loro messa in sicurezza. Nel termine perentorio di 12 mesi (19.09.2002) è richiesto che:

- a. la segnaletica orizzontale e verticale sia puntualmente verificata, in termini di efficienza e corretta apposizione;
- b. sia verificata la colorazione chiara delle pareti laterali della galleria, per un'altezza minima di 2 metri;
- c. siano completate tutte le "verifiche tecniche relative alla distanza di visuale libera" e alla definizione della velocità limite consentita.

Entro il 31.12.2002 deve essere predisposto un programma di adeguamento degli impianti di illuminazione.

Il D.M. 5.06.2001 (come la Circolare che lo ispira) fa seguito alla Circolare A.N.A.S. n. 7735 dell'8.09.1999, emanata dall'Ente a seguito dei tragici sinistri avvenuti in tempi recenti nel Traforo del Monte Bianco e nella galleria dei Tauri.

La Circolare fornisce alcune prescrizioni per aumentare la sicurezza di esercizio delle gallerie stradali, con particolare riguardo al rischio "incendio": il materiale segnaletico presente in galleria deve essere ignifugo, antifumo e non tossico; ventilatori ed armature dell'impianto di illuminazione devono resistere a forti shock termici (temperature di 400 °C per almeno 90 minuti). Per quanto concerne la geometria del tracciato e le condizioni di circolazione, la Circolare fornisce indicazioni sulla segnaletica orizzontale e verticale da apporre e precisa le modalità di demarcazione dei cantieri mobili.

Infine, per le infrastrutture presidiate (o dotate di centro di controllo) si richiede la redazione di un manuale di sicurezza, contenente l'individuazione, l'analisi e la valutazione di tutti i potenziali rischi correlati con l'esercizio della galleria, la frequenza degli eventi e i possibili danni; tutto ciò, al fine di predisporre un piano di intervento.

E' richiesto che anche tutte le gallerie lunghe (oltre 1000 metri) siano segnalate alla Protezione Civile per essere inserite in un Piano provinciale di interventi nell'emergenza.

Per quanto concerne le "verifiche tecniche relative alla distanza di visuale libera" e la definizione della velocità limite consentita in galleria, come da art. 2 co. 1.b del D.M. 5.06.2001, si deve far riferimento, sino ad oggi, alle Norme Tecniche del C.N.R. (B.U. n. 78 del 1980) ed al Codice della Strada (D. L.vo 30.04.1992 n. 285 e D.P.R. 16.12.1992 n. 495 con relative modifiche ed integrazioni), nelle more della pubblicazione del D.M. Infrastrutture e Trasporti del 5.11.2001 recante "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade".

Il D.M. 5.11.2001 definisce, per le strade in galleria, la composizione della piattaforma e la geometria degli elementi di margine e completamento, oltre che le altezze libere. Per gli apprestamenti di sicurezza attiva e passiva rinvia "ad apposita normativa specifica". La velocità limite è correlata con la categoria di strada, mentre si richiede una verifica di visibilità (secondo gli standard usuali) come strumento di verifica dei franchi laterali carreggiata-banchina-piedritto.

2. LA SINISTROSITA' DEI TRACCIATI STRADALI IN GALLERIA

Recenti statistiche relative alla rete stradale nazionale evidenziano una generale tendenza all'aumento della sinistrosità, senza distinzioni fra ambito urbano ed extraurbano. Si ha, altresì, una riduzione globale di mortalità, a fronte di un maggior numero di feriti, probabilmente per la maggior efficacia dei dispositivi di protezione attiva e passiva nei confronti degli utenti della strada, o forse anche per un progressivo

adeguamento funzionale delle infrastrutture viarie. Volendo restringere l'analisi alle sole strade statali si rileva un analogo trend.

Nonostante ciò, rispetto ad altri Paesi tecnologicamente avanzati, l'indice di mortalità si mantiene piuttosto elevato, inferiore a quello di Austria, Giappone, Francia, ma addirittura doppio rispetto al Regno Unito.

Entrando nel merito delle cause di incidentalità, si può rilevare come si ripartiscano lungo il tracciato stradale i sinistri (Tabella 1). Nelle strade statali appena lo 0,5% degli incidenti si localizza in galleria, principalmente quando questa è illuminata e le condizioni di guida sono ottimali. Anche i morti e i feriti sono più numerosi nelle gallerie senza illuminazione naturale.

ELEMENTO GEOMETRICO O STRUTTURALE DEL TRACCIATO	INCIDENTI	MORTI	FERITI
	[%]	[%]	[%]
Rettilineo	47.6	55.5	46.8
Curva	22.7	25.6	22.9
Incrocio	13.5	7.9	13.7
Intersezione segnalata	11.3	7.3	11.5
Intersezione con semaforo	1.7	0.6	1.9
Rotatoria	0.8	0.3	0.8
Intersezione non segnalata	0.8	0.6	0.7
Dosso o strettoia	0.6	0.8	0.7
Pendenza	0.4	0.5	0.4
Passaggio a livello	0.1	0.1	0.1
Galleria illuminata	0.4	0.7	0.4
Galleria non illuminata	0.1	0.1	0.1
<i>TOTALE</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>	<i>100.00</i>

Tabella 1 – Localizzazione statistica degli incidenti nelle strade statali.

Ulteriori analisi applicate ad ambiti autostradali, hanno evidenziato che, in tratte comprendenti almeno il 5% di gallerie, vi è una discreta correlazione fra incidentalità e sviluppo dei tunnels (o loro numero). I sinistri in galleria sono imputabili alle condizioni di guida, “vincolate” da fattori estrinseci (mancanza di banchine e corsie di emergenza, luminosità ridotta) ed intrinseci (sensazione di oppressione determinata dagli spazi chiusi [effetto caverna], affaticamento psico-fisico per guida in ambiente inquinato). Anche la frequenza dei tunnels può incidere negativamente sull'incidentalità, per l'alternanza delle condizioni di luminosità in ambiente aperto e chiuso; in effetti è proprio lo stress psico-fisico determinato dal mutare delle condizioni di guida che si rivela pericoloso (in sostanza, è peggio avere una successione di gallerie, anche brevi, che uno sviluppo notevole di pochi tunnels).

Piuttosto interessante il riscontro statistico costituito dalla invariabilità degli incidenti coinvolgenti veicoli commerciali con la presenza di gallerie lungo il tracciato stradale. Ad un esame dei dati, emerge che la maggior attitudine alla guida delle utenze di veicoli pesanti e i maggiori vincoli che questi hanno alla circolazione, influiscano positivamente, nonostante le apparenze contraddittorie, allo sviluppo di incidenti.

Per concludere, si può rilevare che i tassi di incidentalità riferiti a sinistri in ambito urbano sono sempre superiori a quelli relativi a tunnels extraurbani, per i quali, poi, lo sviluppo a singolo fornice non è garanzia specifica di sicurezza. La maggior parte degli incidenti si verifica nelle ore notturne e con volumi di traffico relativamente ridotti,

anche a causa delle maggiori velocità di deflusso (e probabilmente dell'affaticamento degli utenti).

3. L'ILLUMINAZIONE DEI TRACCIATI STRADALI

L'illuminazione delle strade ha la funzione di consentire condizioni di percorrenza il più possibile omogenee - in termini di visibilità - lungo il tracciato, prescindendo dalle condizioni ambientali, e di garantire sicurezza di circolazione e confort. L'utente, dunque, deve essere in grado di ricevere - di giorno come di notte - sufficienti informazioni visive sulla conformazione geometrica del tracciato e sulla presenza di ostacoli lungo di esso.

L'esigenza di adeguata illuminazione è maggiormente sentita in un ambiente confinato come quello delle gallerie, dove viene a mancare qualsiasi contributo esterno alla visione della traiettoria e degli eventuali ostacoli. Ciò considerato, ad un impianto di illuminazione in galleria si richiedono, di conseguenza:

- la possibilità di rendere percepibile uniformemente il piano stradale, con un adeguato livello di luminanza;
- l'illuminazione dei piedritti della galleria, in modo da fornire all'utente un'esatta visione del contesto in cui si sta muovendo;
- un angolo di incidenza, rispetto al piano visuale, compatibile con un'elevata visibilità del tracciato, senza creare problemi di abbagliamento;
- la riduzione dell'effetto di flickering (sfarfallamento o tremolio della luce).

Dal punto di vista della visibilità, nelle gallerie si definiscono 5 zone distinte, con requisiti progettuali diversificati:

1. la zona di *accesso*, che precede l'ingresso in galleria; la visione oltre la soglia della galleria è determinata dall'effetto "buco nero" del successivo ambiente chiuso, dall'illuminazione della soglia e dal velo abbagliante;
2. la zona di *soglia (o rinforzo)*, a valle del portale della galleria (in funzione della velocità di progetto e della distanza di arresto); ha un'illuminazione strettamente dipendente dalla luminosità della zona di accesso;
3. una zona di *transizione*;
4. la zona *interna*, costituente il corpo centrale della galleria; in essa si richiede un livello di illuminazione costante, con almeno la stessa luminanza che si può avere illuminando un tronco di strada all'aperto;
5. la zona di uscita, in cui termina il tunnel; in essa l'impianto di illuminazione deve essere potenziato, in modo da adeguare l'occhio del guidatore alla luminosità dell'ambiente esterno.

Il progetto illuminotecnico della galleria è disciplinato dalla norma CIE 88/1990, che definisce per ognuna delle 5 zone descritte i valori di luminanza¹ richiesti. In particolare, si fa riferimento, come parametro progettuale, a:

- a. L_{20} , "luminanza media del campo visivo delimitato da un cono di 20° di ampiezza, avente per vertice l'occhio dell'osservatore e come asse la retta orizzontale che ne congiunge gli occhi con l'asse del portale" (dipende da luminanza di cielo, strada, ambiente, soglia, dalla percentuale di campo visivo da essi occupata e dalla distanza di visibilità per l'arresto che è correlata con la velocità di marcia);

¹ Si definisce "luminanza" il rapporto tra l'intensità luminosa emessa (I), riflessa oppure trasmessa da una superficie (S) nella direzione assegnata e l'area apparente della superficie stessa (l'area apparente è la proiezione della superficie S sul piano normale alla direzione dell'intensità I).

- b. L_{th} , “luminanza della zona di soglia” (dipende da L_{20} e dal tipo di impianto di illuminazione: simmetrico, a controflusso...);
- c. L_{tr} , “luminanza della zona di transizione” (varia con legge esponenziale dal valore L_{th} al valore di luminanza interna L_{in} , e dipende dal tempo di adattamento alle mutate condizioni di visibilità);
- d. L_{in} , “luminanza interna” (dipende dal flusso veicolare e dalla distanza di visibilità); può influire sulla luminanza della zona di uscita.

Altri fattori che influiscono sulla visibilità in galleria sono:

1. Contrasto (C); è dato dal rapporto fra la minima variazione di luminanza soggettivamente percepibile ed il valore medio della luminanza del campo visivo osservato;
2. Uniformità della luminanza; influisce sul “contrasto” (minore uniformità, minore contrasto) e può essere valutata in termini globali (U_0) o longitudinali (U_1) (rapporto luminanza minima/media o minima/massima su strada/pareti e asse carreggiata);
3. Indice di abbagliamento debilitante (TI), che riduce la capacità visiva; dipende dal velo luminoso generato da tutte le luci presenti nel cono di vista del guidatore e dalla media tra luminanza della pavimentazione e delle pareti della galleria;
4. Indice di abbagliamento molesto (G), che riduce l’abilità del guidatore in termini di stress, affaticamento e distrazione; dipende dalla luminanza media del manto stradale, dalla posizione, dalla frequenza e dall’intensità delle sorgenti luminose, dall’ampiezza dell’area illuminata.

4. MODELLI PER LA DETERMINAZIONE DELLA VISIBILITA’

Il comportamento dell’utente durante la guida è determinato, in larga misura, da informazioni di natura visiva che egli trae dall’ambiente in cui si muove. Di conseguenza, dovendo progettare un’infrastruttura viaria sicura, diviene particolarmente utile poter prevedere e valutare le reazioni del conducente di fronte ai diversi input visivi cui egli può essere soggetto (visibilità del tracciato o degli eventuali ostacoli, visione in condizioni avverse per opacità dell’aria, abbagliamento).

La sicurezza di guida richiede, innanzitutto:

1. la percezione, ad una “sufficiente” distanza, dei limiti di corsia, carreggiata o piattaforma (i piedritti, nel caso di sezione in galleria), a prescindere dalla geometria del tracciato (andamento planimetrico, tortuosità, andamento altimetrico, ecc...) e dalle condizioni di esercizio (giorno o notte, pioggia o nebbia, forte livello di inquinamento, ecc...);
2. la visibilità e il riconoscimento, con sufficiente anticipo, di segnaletica orizzontale, verticale e luminosa presente lungo il tracciato;
3. la visibilità e il riconoscimento di reali o potenziali ostacoli lungo il tracciato stesso (altri veicoli, velocipedi, pedoni, animali, oggetti).

In questo contesto, i “modelli per la determinazione della visibilità” devono fornire indicazioni sulle distanze di avvistamento ostacoli, in relazione alle variegate situazioni che si possono presentare durante la conduzione del veicolo. Nella pratica, i modelli in questione dovrebbero “assicurare il legame tra il cammino ottico della luce nei dintorni del guidatore e le prestazioni visuali di quest’ultimo, in modo da determinare per ogni oggetto, pertinente alla condotta dei veicoli, dei criteri di visibilità, esprimibili tramite indici, livelli o distanze”.

Come evidenziato da vari ricercatori, i modelli in questione si fondano su dati fotometrici e studi fisiologici, aventi base teorica e riscontro sperimentale, principalmente impostati sulla “sensibilità al contrasto” dell’osservatore.

Esistono svariati modelli in letteratura, applicabili in situazioni diverse e con un molteplice livello di approfondimento del problema della percezione visiva. Questo, di fatto, presenta una poco agevole soluzione, poiché si basa su un processo sensoriale complesso, diverso per ogni guidatore, in quanto influenzato, oltre che da ciò che viene esternamente percepito, anche da ciò che è elaborato dal cervello.

I modelli di visibilità applicati in campo stradale, si pongono l’obiettivo di valutare se l’oggetto od ostacolo da percepire (che può eventualmente essere illuminato o luminoso per suo conto) sia “visibile” e in quale misura, tenuto conto delle caratteristiche del conducente del veicolo. Essi usualmente si basano sui seguenti parametri:

- luminanza del fondo e luminanza dell’ostacolo (ovvero contrasto);
- luminanza di velo o parassita;
- luminanza di adattamento (per fondo non omogeneo);
- trasmissione atmosferica;
- trasmissione del parabrezza dell’automobile;
- dimensioni dell’ostacolo;
- durata dell’osservazione.

Vengono di seguito citati i modelli di più comune impiego:

a. Modello CIE (1971/81)
$$VL = \frac{C_{ref}}{0.0923} \cdot RCS \cdot CRF \cdot DGF \cdot TAF$$

Fornisce un “livello di visibilità” VL , che misura come il contrasto di un ostacolo ecceda la soglia di visibilità di un osservatore per lo stesso tipo di ostacolo, a pari livello di luminanza del fondo. VL dipende da una funzione della visibilità di riferimento C_{ref} , dalla sensibilità relativa al contrasto (RCS), da un fattore di rendita del contrasto CRF , da un fattore di abbagliamento (DGF) e da un fattore di adattamento transitorio (TAF).

b. Modello di Blackwell (1976)
$$C = \frac{L_o - L_F}{L_F + L_V} = \frac{L_o - L_F}{L_A}$$

Fornisce, nella versione riveduta da Bhise, una misura del contrasto in funzione della luminanza dell’oggetto L_o , della luminanza del fondo L_F , della luminanza velante L_V e della luminanza di adattamento L_A .

c. Modello di Dubuisson (1987)
$$\log C = \log C_0 + \log \left(\frac{TL_{f0}}{L_f} \right) + \log RCS$$

$$\log C = a \cdot \frac{d}{h} + \log(1 + 0,68 \cdot \gamma) + 0,13$$

A partire dal modello del CETu (integrato sulla base delle leggi di Koschmieder e Fry), Dubuisson fornisce un metodo di calcolo teorico-sperimentale, basato sul raffronto fra due leggi che esprimono il contrasto C (cui è sensibile l’osservatore a livello degli occhi) in funzione di sensibilità relativa al contrasto (RCS), distanza di individuazione dell’oggetto (d), altezza dell’ostacolo (h), un fattore di trasmissione atmosferico (T), un coefficiente di estinzione (K), contrasto e luminanza del fondo (C_0 e L_{f0}) e a livello dell’occhio (C e L_f) e di una probabilità di individuazione dell’ostacolo (γ).

d. Modello di Koschmieder (1924) $L = L_o \cdot e^{-K \cdot d} + L_{veq} \cdot (1 - e^{-K \cdot d})$

Koschmieder fornisce una legge per l'interpretazione della visibilità di oggetti osservati su un fondo costituito dal cielo, all'orizzonte. La luminanza apparente L è correlata con la luminanza intrinseca dell'oggetto osservato (Lo), con la luminanza del velo atmosferico all'infinito, dovuto all'illuminazione ambientale omogenea (L_{veq}), ad un coefficiente di estinzione del mezzo (K), alla distanza alla quale l'oggetto deve essere visto (d).

e. Modello di Duntley (1948) $E = \frac{I}{d^2} \quad d = V_{met} = -\frac{1}{K} \cdot \ln \frac{C_{soglia}}{C_0} = -\frac{1}{K} \cdot \ln \frac{0.05}{1} \cong \frac{3}{K}$

Duntley fornisce lo strumento matematico per calcolare il livello di illuminamento (E) ricevuto dall'occhio del guidatore, dipendente dall'intensità della radiazione luminosa (I) e dalla distanza fra sorgente ed osservatore (d), la quale è definita sulla base di una "distanza di visibilità meteorologica" correlata con il contrasto minimo apparente a una distanza assegnata (C_{soglia}) e il contrasto intrinseco dell'oggetto rispetto al fondo (Co).

f. Legge di Allard (1876) $E = \frac{I}{d^2} \cdot e^{-K \cdot d}$

Rispetto al modello di Duntley, la legge di Allard introduce un fattore correttivo al valore dell'illuminamento E, che viene fatto variare con il coefficiente di estinzione.

g. Legge di Bodmann $RCS_{ref} = 100 \cdot \left[\left(\frac{1.675}{L_F} \right)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5}$

Esprime la sensibilità relativa al contrasto in funzione della luminanza di fondo (L_F), esplicitando analiticamente osservazioni sperimentali.

5. MODELLO DI ADRIAN

Il modello di Adrian (1988) porta a calcolare il livello di visibilità VL di un ostacolo, in funzione della differenza di luminanza di soglia (minima) tra oggetto e fondo, della luminanza propria dell'oggetto (Lo) e di quella di fondo (Lf). Il metodo, rispetto ad altri modelli, permette di analizzare sia i casi di contrasto positivo (oggetto a luminanza superiore al fondo) che quelli di contrasto negativo (luminanza dell'ostacolo minore del fondo: si distingue solo il profilo); inoltre, permette di tener conto della dimensione dell'ostacolo, utilizzando due leggi distinte per il calcolo di ΔLs (Ricco per oggetti di piccole dimensioni, Weber per ostacoli più grandi), parametro che dipende da: durata di percezione dell'oggetto, angolo sotteso dall'ostacolo, tipo di contrasto (positivo o negativo), tipo di osservazione (mono/binoculare), età dell'osservatore, luminanza del fondo e luminanza velante.

$$VL = \frac{\Delta L_{reale}}{\Delta L_{soglia}} = \frac{|L_o - L_f|}{\Delta L_{soglia}} \quad \Delta L_{soglia} = 2,6 \cdot \left(\frac{\phi^{1/2}}{\alpha} + L^{1/2} \right)^2 \cdot F_{cp} \left\{ \frac{[a(\alpha, Lf) + t]}{t} \right\} \cdot AF$$

L'applicazione del modello di Adrian alla guida in corrispondenza di una galleria, richiede alcune considerazioni preliminari.

1. Durante la guida al di fuori del tunnel non esistono problemi di visibilità riconducibili a livelli di opacità tali da condizionare la trasmissione della luce; nelle ore diurne i termini che rappresentano la luminanza velante e il fondo stradale sono trascurabili, in quanto costanti; nelle ore notturne, gli eventuali impianti di illuminazione artificiale devono soddisfare i valori richiesti dalla normativa vigente (norma UNI 10439 “Requisiti illuminotecnica delle strade con traffico motorizzato: Tabella 2).

Gruppo	Tipo di strada e ambito territoriale	Classe	Zone laterali	Luminanza media mantenuta L_m [cd/m ²]	Rapporti di uniformità		Limitazione abbagliamento	
					U_0	U_1	G	TI
1	Autostrade extraurb.	A	qualsiasi	2	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 6	≤ 10
2	Autostrade urbane	A	illuminare	2	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 5	≤ 10
			non illuminate	2	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 6	≤ 10
	Strade principali extraurbane	B	illuminare	2	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 5	≤ 10
			non illuminate	2	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 6	≤ 10
3	Strade secondarie extraurbane	C	illuminare	2	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 5	≤ 20
			non illuminate	1	≥ 0.4	≥ 0.7	≥ 5	≤ 10
	Strade di servizio principali extraurb.	B	illuminare	2	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 5	≤ 20
			non illuminate	1	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 6	≤ 10
4	Strade scorrim.to principali urbane	D	illuminare	2	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 4	≤ 20
5	Strade scorrim.to di servizio urbane	D	illuminare	1	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 4	≤ 20
			non illuminate	0.5	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 5	≤ 20
	Strade di quartiere urbane	E	illuminare	1	≥ 0.4	≥ 0.4	≥ 4	≤ 20
			non illuminate	0.5	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 5	≤ 20
	Strade locali urb./extraurbane	F	illuminare	1	≥ 0.4	≥ 0.4	≥ 4	≤ 20
non illuminate			0.5	≥ 0.4	≥ 0.5	≥ 5	≤ 20	

Tabella 2 – Requisiti illuminotecnici delle strade.

2. Se il veicolo si trova ad una distanza, dall'imbocco della galleria, inferiore alla distanza di arresto, il guidatore deve riuscire a vedere un eventuale ostacolo all'interno del tunnel; si tratta della situazione più critica per le ore diurne, perché i valori delle luminanze velanti, che disturbano il guidatore, sono ancora elevati, specialmente se la giornata è soleggiata. Per migliorare la visibilità si deve aumentare la luminanza del fondo stradale, potenziando l'impianto di illuminazione all'ingresso della galleria (vd. norme CIE 88/90). Durante le ore notturne non si hanno problemi di questa natura, a condizione che all'ingresso della galleria il livello di luminanza della carreggiata sia almeno uguale a quello del tratto di strada antecedente. L'opacità dell'aria non rileva, in quanto le correnti d'aria naturali e il moto dei veicoli limitano le concentrazioni di sostanze inquinanti in tali sezioni.
3. Se il veicolo si trova all'interno della galleria, dopo una prima riduzione di visibilità, dovuta all'adattamento dell'occhio, non si hanno condizioni di particolare criticità. L'impianto di illuminazione deve essere dimensionato in modo tale da garantire i livelli minimi di luminanza del fondo stradale, limitando i fenomeni di abbagliamento e le luminanze velanti (vd. norme CIE 88/90). Un elemento di disturbo può essere l'opacità dell'aria causata dalla combinazione dei gas di scarico dei veicoli, dalle polveri che si alzano dalla carreggiata al transito dei mezzi, dall'umidità.

4. Se il veicolo è prossimo all'uscita dalla galleria, le luminanze velanti e i valori di opacità dell'aria sono contenuti, mentre la luminanza del fondo stradale, sul quale distinguere un eventuale ostacolo è elevatissima, con conseguente incremento del contrasto. Nel caso di guida notturna, alla fine della galleria, se la strada non è illuminata, dovrà comunque essere garantito un livello di illuminazione minimo (pari ad 1/3 di quello del tratto finale della galleria) per una distanza pari a quella percorsa in 5 secondi alla velocità di progetto.
5. Se il veicolo è fuori della galleria, si ripristinano le condizioni precedenti l'attraversamento del tunnel, con la differenza che si deve avere l'adattamento dell'occhio al passaggio da condizioni di poca luce a condizioni di maggior illuminazione.

Il modello di Adrian permette di ricavare il livello di visibilità VL di un ostacolo in predeterminate situazioni. Se non ci sono altre sorgenti luminose, oltre all'ostacolo osservato e al fondo su cui esso deve distinguersi, la luminanza di adattamento è funzione della sola luminanza del fondo L_f . In presenza di inquinanti (fumi diesel, polveri, umidità, ecc...), che aumentano l'opacità dell'aria, diminuendone il potere di trasmissione della luce, la luminanza di adattamento (e, di conseguenza, anche la soglia differenziale) diminuisce, ma questa diminuzione è più debole rispetto a quella subita dalla differenza di luminanza reale e, quindi, il livello di visibilità diminuisce:

$$VL_{K=0} = \frac{\Delta L_{reale}}{\Delta L_{soglia}} = \frac{(L_o - L_f)_{reale}}{\Delta L f(\theta, L_a)} \quad \text{con } L_a = f(L_f)$$

$$VL_{K \neq 0} = \frac{\Delta L_{reale}}{\Delta L_{soglia}} = \frac{(L_o - L_f) \cdot e^{-K \cdot d}}{\Delta L f(\theta, L_a)} \quad \text{con } L_a = f(L_f \cdot e^{-Kd})$$

dove:

K = Coefficiente di opacità [m^{-1}];

d = Distanza tra il guidatore e l'ostacolo [m];

$VL_{K=0} > VL_{K \neq 0}$

In letteratura vengono riportati i valori minimi del livello di visibilità ricavati da prove sperimentali: un VL pari a 7 è necessario per distinguere un oggetto, osservato per un tempo di circa 0,5 secondi; $VL=15 \div 20$ è necessario per la guida sicura di un'automobile.

Se, come nel caso delle gallerie, è presente un impianto di illuminazione, questo causa in modo più o meno elevato dei fenomeni di abbagliamento, i quali generano una luminanza addizionale, detta luminanza velante (L_{veq}). In questo caso la luminanza di adattamento è funzione sia di L_f che di L_{veq} .

Koschmieder ha proposto una legge che lega la luminanza intrinseca di un oggetto (L_o) con la luminanza velante (L_{veq}) che può essere dovuta a condizioni ambientali particolari, alla presenza di altre sorgenti luminose ecc. La luminanza apparente dell'oggetto è fornita dall'espressione riportata al precedente paragrafo. Ragionando negli stessi termini per la determinazione della luminanza del fondo, si ottiene:

$$L'_f = L_f \cdot e^{-K \cdot d} + L_{veq} \cdot (1 - e^{-K \cdot d})$$

In questo modo si ha un aumento della differenza di luminanza di soglia ed una diminuzione della differenza reale della luminanza tra l'oggetto e il fondo, con conseguente sensibile diminuzione del livello di visibilità.

Un'applicazione della soluzione numerica indicata evidenzia l'importanza di limitare al massimo i fenomeni di abbagliamento dovuti alle sorgenti luminose artificiali, al fine di contenere gli effetti della luminanza velante sulla visibilità durante la guida.

L'opacità dell'aria causa, poi, una diminuzione del livello di visibilità, se si mantengono costanti tutti gli altri fattori che concorrono a determinarlo.

6. DISTANZA DI VISIBILITA' PER L'ARRESTO IN GALLERIA

L'unico modo per ottenere, anche nel caso di condizioni di luminanza ridotta, un livello di visibilità buono per consentire la guida in sicurezza, è quello di agire sulla distanza alla quale si riesce a distinguere un eventuale ostacolo.

A tal fine, si considerano le distanze di visibilità necessarie per l'arresto del veicolo, così come indicato dalla vigente normativa C.N.R.

Per calcolare come varia la distanza di visibilità per l'arresto, con diversi valori della luminanza del fondo, diverse condizioni di abbagliamento (TI) generate dall'impianto di illuminazione e vari livelli di opacità dell'aria, si sono seguite due diverse procedure.

Nella prima si è analizzato come varia il livello di visibilità, alle diverse distanze, partendo da condizioni predefinite: si è ipotizzato di mantenere costante l'angolo visivo sotto il quale è visto l'ipotetico ostacolo (essendo questo l'unico fattore non direttamente riconducibile alle caratteristiche dell'impianto di illuminazione). In seguito a questo ragionamento le dimensioni dell'ostacolo devono aumentare con la distanza e quindi con la velocità. D'altra parte, un ostacolo di limitate dimensioni risulterebbe difficilmente visibile anche in condizioni ottimali (fuori galleria), se posto a grandi distanze. Si sono, dunque, determinati i coefficienti moltiplicativi delle distanze di visibilità (Tabella 3) e le relative velocità (Tabella 4) che il guidatore dovrebbe mantenere per potere arrestare il veicolo in piena sicurezza.

<i>Distanza $D_a=312$ m ($V=140$ Km/h)</i>								
L_f/TI	1	2	3	4	5	6	10	15
5	0.93÷0.63	1÷0.70	1÷0.74	1÷0.78	1÷0.80	1÷0.83	1÷0.89	1÷0.94
8	0.85÷0.58	0.99÷0.65	1÷0.69	1÷0.73	1÷0.75	1÷0.78	1÷0.84	1÷0.89
10		0.94÷0.62	1÷0.66	1÷0.70	1÷0.72	1÷0.75	1÷0.81	1÷0.86
12		0.89÷0.59	0.96÷0.64	1÷0.67	1÷0.70	1÷0.72	1÷0.78	1÷0.83
15			0.89÷0.60	0.94÷0.64	0.98÷0.66	1÷0.68	1÷0.74	1÷0.79

Tabella 3 – Esempio di coefficienti correttivi delle distanze di visibilità, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'indice di abbagliamento debilitante TI .

<i>Velocità $V=140$ Km/h ($D_a=312$m)</i>								
L_f/TI	1	2	3	4	5	6	10	15
5	135÷111	140÷117	140÷120	140÷124	140÷125	140÷128	140÷132	140÷136
8	129÷107	139÷113	140÷116	140÷119	140÷121	140÷124	140÷128	140÷132
10		136÷110	140÷113	140÷117	140÷119	140÷121	140÷126	140÷130
12		132÷107	137÷112	140÷115	140÷117	140÷119	140÷124	140÷128
15			132÷108	136÷112	139÷114	140÷115	140÷120	140÷124

Tabella 4 – Esempio di variazione della velocità necessaria per garantire la visibilità, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'indice di abbagliamento debilitante.

Quindi, si sono valutate le velocità massime consentite, nel caso di elevata opacità, al variare dell'abbagliamento debilitante. Si noti che, per velocità inferiori ai 60 Km/h, sono sufficienti livelli di luminanza del fondo stradale pari a 1÷3 cd/m^2 per garantire buone condizioni di visibilità. Per velocità che vanno dai 60 ai 90 Km/h sono necessari valori della luminanza più elevati, fino a 6÷8 cd/m^2 (Figura 1).

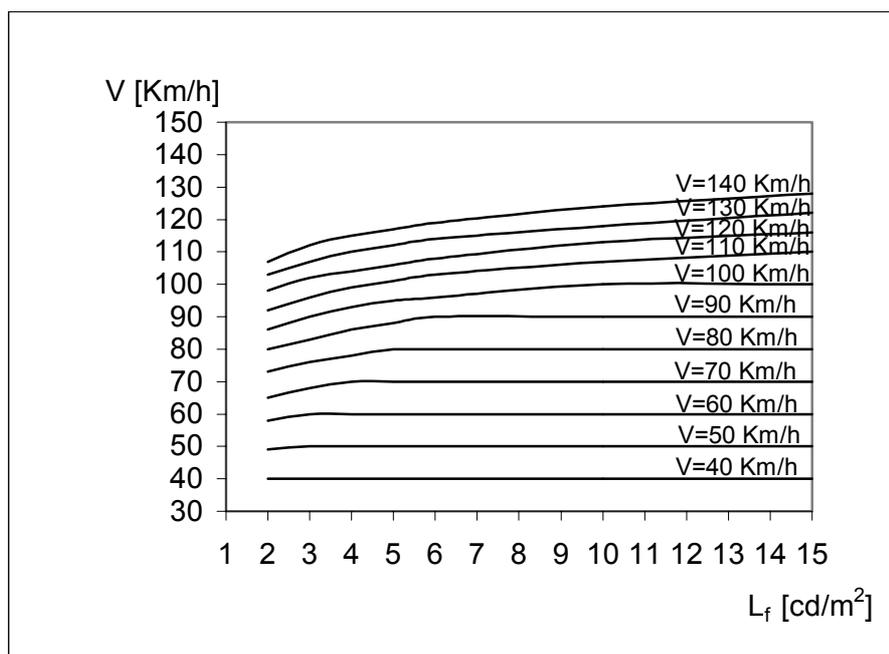


Figura 1 – Esempio di variazione della velocità massima consentita , nel caso di elevata opacità, al variare della luminanza di fondo, per assegnati valori dell'indice di abbagliamento debilitante TI.

Se, poi, si vogliono mantenere condizioni di sicurezza anche per velocità superiori ai 100 Km/h, i livelli di luminanza non dovrebbero scendere sotto le 6 cd/m²; in determinate condizioni, inoltre, risulterebbero insufficienti anche luminanze di 15 cd/m², soprattutto per velocità vicine al limite di 130 Km/h, fissato attualmente dal Codice della Strada per le autostrade.

Nel secondo approccio, si è scelto di mantenere costante la dimensione dell'ostacolo, variando di conseguenza l'angolo visivo α , al variare della distanza. Si sono considerati ostacoli rispettivamente di 20, 40 e 60 cm. Nel caso di abbagliamento medio, un ostacolo di 20 cm è ben visibile, anche con i valori più bassi della luminanza del fondo stradale, fino a distanze di una sessantina di metri (distanza che consente di arrestarsi se si procede a velocità non superiori ai 60 Km/h) (Tabelle 5, 6). Per velocità di 70÷80 Km/h sono richiesti, rispettivamente, livelli di luminanza superiori a 5 e 10 cd/m² (da considerare che un ostacolo di dimensioni così ridotte, risulta difficilmente distinguibile a distanze superiori ai 100 m, anche in condizioni di buona visibilità, cioè scarsa opacità dell'aria ed elevata luminanza della carreggiata). Un ostacolo di 40 cm è visibile a distanze più elevate, ma comunque non superiori ai 160 m, il che corrisponde alla distanza di arresto per una velocità di 100 km/h (Tabella 7). Un ostacolo di 60 cm è ben visibile, nelle condizioni di luminanza minima, fino a 130 m, mentre si può arrivare a distinguerlo a circa 250 m per i valori di luminanza di 15 cd/m².

Questi risultati possono variare in funzione dell'indice di abbagliamento TI , funzione della luminanza del fondo stradale e della luminanza velante generata dalle sorgenti artificiali, cioè dai punti luce dell'impianto di illuminazione entro la galleria (Figura 2).

h=0.20 m				
$L_f[cd/m^2] / Da[m]$	1	5	10	15
28	1	1	1	1
42	1	1	1	1
59	1	1	1	1
79	0.95÷0.82	1	1	1
103	∥	1÷0.87	1÷0.98	1
130	∥	∥	∥	0.96÷0.83

Tabella 5 – Esempio di variazione dei coefficienti correttivi delle distanze di visibilità, al variare della luminanza di fondo, con ostacolo di 20 cm.

h=0.20 m				
$L_f[cd/m^2] / V[Km/h]$	1	5	10	15
40	40	40	40	40
50	50	50	50	50
60	60	60	60	60
70	68÷63	70	70	70
80	∥	80÷74	80÷79	80
90	∥	∥	∥	88÷82

Tabella 6 – Esempio di variazione della velocità necessaria per garantire la visibilità, al variare della luminanza di fondo L_f , con ostacolo di 20 cm.

h=0.40 m				
$L_f[cd/m^2] / Da[m]$	1	5	10	15
28	1	1	1	1
42	1	1	1	1
59	1	1	1	1
79	1	1	1	1
103	1	1	1	1
130	1÷0.86	1	1	1
160	0.89÷0.70	1÷0.94	1	1
193	∥	1÷0.78	1÷0.88	1÷0.94
230	∥	∥	0.97÷0.74	1÷0.79

Tabella 7 – Esempio di variazione dei coefficienti correttivi delle distanze di visibilità, al variare della luminanza di fondo, con ostacolo di 40 cm.

Il parametro TI è limitato superiormente dalla normativa CIE, ma può assumere valori diversi al variare della disposizione degli apparecchi illuminanti e del tipo di lampade utilizzate (vapori di sodio a bassa o alta pressione, tubolari fluorescenti). A parità di luminanza del fondo (L_f), minore è l'indice di abbagliamento debilitante (TI), minore sarà la luminanza velante (L_{veq}), che è causa di un aumento della differenza di luminanza di soglia e quindi di una diminuzione di VL . L'effetto negativo della luminanza di velo è tanto più accentuato quanto più elevato è il valore dell'opacità dell'aria. Per limitare al massimo i disagi legati alla luminanza di velo e quindi all'opacità dell'aria, è di fondamentale importanza che il parabrezza dell'auto venga mantenuto quanto più pulito possibile.

A titolo indicativo, si riporta l'andamento della distanza di visibilità al variare del livello di opacità dell'aria, nel caso di un ostacolo di 40 cm e luminanza del fondo stradale rispettivamente di 1 cd/m^2 e 10 cd/m^2 (Figura 3).

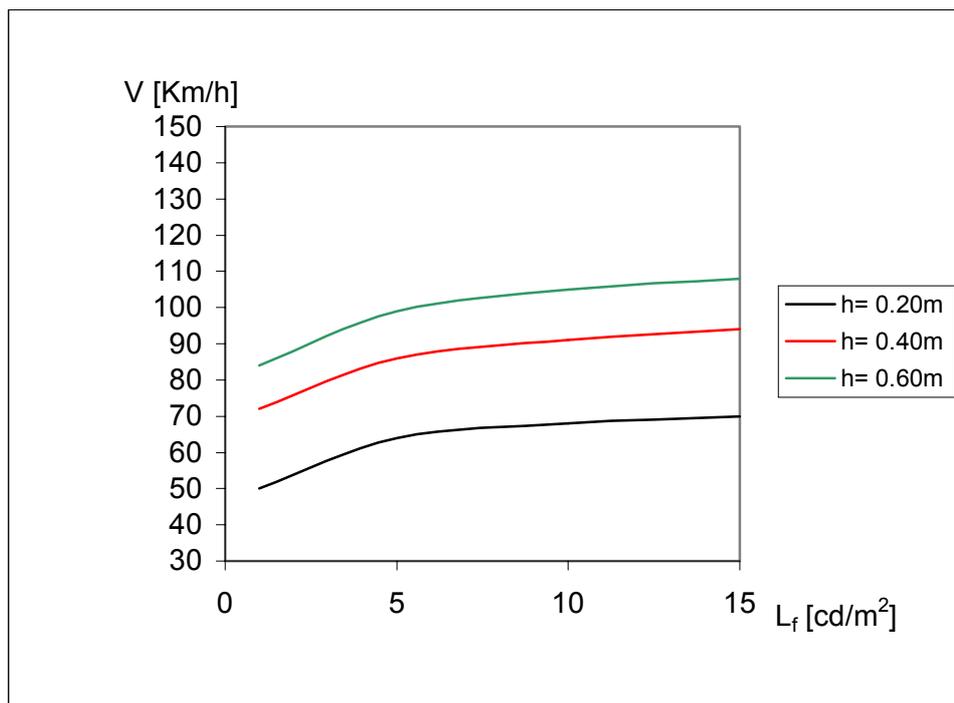


Figura 2 – Esempificazione dell’effetto della luminanza di fondo sulla velocità per l’arresto in sicurezza, al variare della dimensione dell’ostacolo.

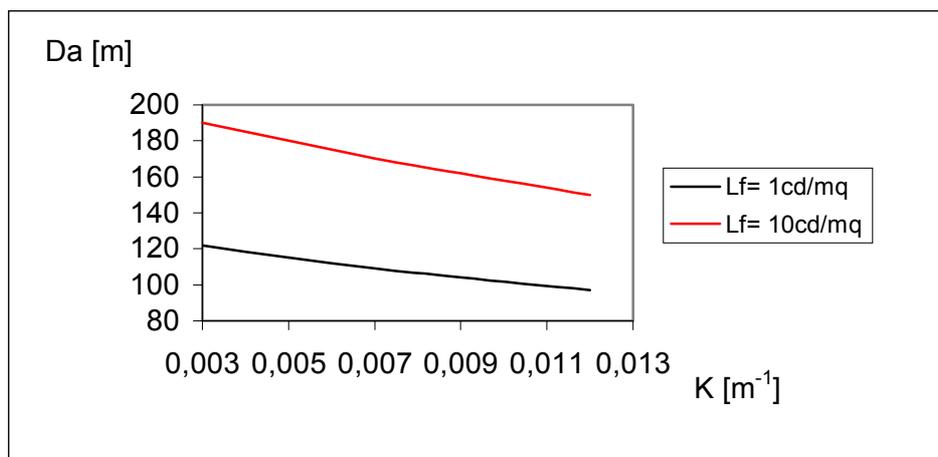


Figura 3 – Variazione della distanza di visibilità in funzione dell’opacità dell’aria e della luminanza di fondo, per ostacolo di 40 cm.

Appare evidente, dallo studio effettuato, come ad un incremento della luminanza della carreggiata più che lineare, non corrisponda un altrettanto elevato aumento della visibilità: la velocità massima che il guidatore dovrebbe mantenere per evitare spiacevoli conseguenze nel caso in cui si trovasse improvvisamente di fronte ad un ostacolo, è garantita da una $L_f=5\text{ cd/m}^2$, con un incremento della distanza di visibilità per l’arresto, passando da $L_f=5\text{ cd/m}^2$ a $L_f=15\text{ cd/m}^2$, di pochi metri. Questo giustifica, in parte, la bontà del modello utilizzato, in quanto, in bibliografia, sono riportati studi che confermano l’andamento asintotico della visibilità all’aumentare della luminanza della carreggiata.

Questo risultato è confermato anche dalla norma UNI 10439 relativa ai “requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato” nella quale si fissa un livello

limite di L_f pari a 2 cd/m^2 . Tale valore risulterebbe sufficiente anche all'interno delle gallerie se l'ambiente chiuso non favorisse il ristagno degli inquinanti, prodotti dai veicoli, che causano una diminuzione del potere di trasmissione della luce attraverso l'aria.

In base a quanto finora esposto, dal punto di vista della sicurezza della circolazione, in gallerie ad un unico senso di marcia, risulta molto più efficace il tentativo di far rispettare un limite di velocità massima, piuttosto che cercare di aumentare la visibilità, incrementando la luminanza media del fondo stradale. Una buona soluzione appare quella dei pannelli a messaggio variabile, anche se poi la coscienza del guidatore è l'unico rimedio veramente efficace nel caso di scarsa visibilità.

7. DISTANZA DI VISIBILITA' PER IL SORPASSO IN GALLERIA

Analizzando la manovra di sorpasso, si può ripetere l'applicazione della Legge di Adrian nella quantificazione delle distanze di visibilità. In questo caso, è possibile evidenziare due casi, secondoché il veicolo sorpassante si veda venire innanzi un altro veicolo a fari spenti o a fari accesi.

Se il veicolo contro-mano ha i proiettori spenti, si può assimilare l'automobile ad un oggetto privo di luminanza propria e dotato, invece, di un certo coefficiente di riflessione. Si possono ricalcolare i coefficienti moltiplicativi delle distanze di visibilità al variare dei livelli di luminanza della carreggiata (Tabelle 8, 9).

Distanza $D_s=495 \text{ m}$ ($V=90 \text{ Km/h}$)								
L_f/ TI	1	2	3	4	5	6	10	15
5	0.83÷0.57	0.96÷0.59	1÷0.61	1÷0.63	1÷0.65	1÷0.66	1÷0.70	1÷0.74
8	0.76÷0.49	0.88÷0.53	0.95÷0.56	1÷0.58	1÷0.60	1÷0.62	1÷0.66	1÷0.70
10	∥	0.84÷0.50	0.91÷0.53	0.96÷0.56	1÷0.58	1÷0.59	1÷0.64	1÷0.67
12	∥	0.80÷0.48	0.86÷0.51	0.91÷0.54	0.95÷0.55	0.98÷0.57	1÷0.62	1÷0.65
15	∥	∥	0.80÷0.48	0.85÷0.51	0.88÷0.53	0.91÷0.54	0.99÷0.59	1÷0.62

Tabella 8 – Esempio di coefficienti correttivi delle distanze di visibilità, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'indice di abbagliamento debilitante TI .

Velocità $V=90 \text{ Km/h}$ ($D_s=495 \text{ m}$)								
L_f/ TI	1	2	3	4	5	6	10	15
5	75÷51	86÷53	90÷55	90÷57	90÷58	90÷59	90÷63	90÷67
8	68÷44	79÷48	86÷50	90÷52	90÷54	90÷56	90÷59	90÷63
10	∥	76÷45	82÷48	86÷50	90÷52	90÷53	90÷58	90÷60
12	∥	72÷43	77÷46	82÷49	86÷50	88÷51	90÷56	90÷59
15	∥	∥	72÷43	77÷46	79÷48	82÷49	89÷53	90÷56

Tabella 9 – Esempio di variazione della velocità necessaria per garantire la visibilità, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'indice di abbagliamento debilitante.

Nel caso della manovra di sorpasso, l'incidenza dell'inquinamento ambientale è superiore rispetto al caso della verifica della distanza di arresto, in quanto si vanno a considerare spazi di manovra maggiori. Figura 4 riporta, in modo sintetico, i risultati più significativi dello studio effettuato; anche in questo caso la velocità massima, alla quale si può eseguire il sorpasso, ha andamento asintotico all'aumentare della luminanza del fondo. Ipotizzando che il veicolo sorpassante ed il veicolo proveniente in senso opposto procedano alla medesima velocità, si vede come questa debba risentire notevolmente di una variazione da $L_f=1 \text{ cd/m}^2$ a $L_f=5 \text{ cd/m}^2$, e molto meno quando L_f aumenta da 5 a 15

cd/m^2 . In ogni caso è difficile garantire una distanza di visibilità tale da consentire il sorpasso se la velocità dei veicoli è superiore a 70 Km/h.

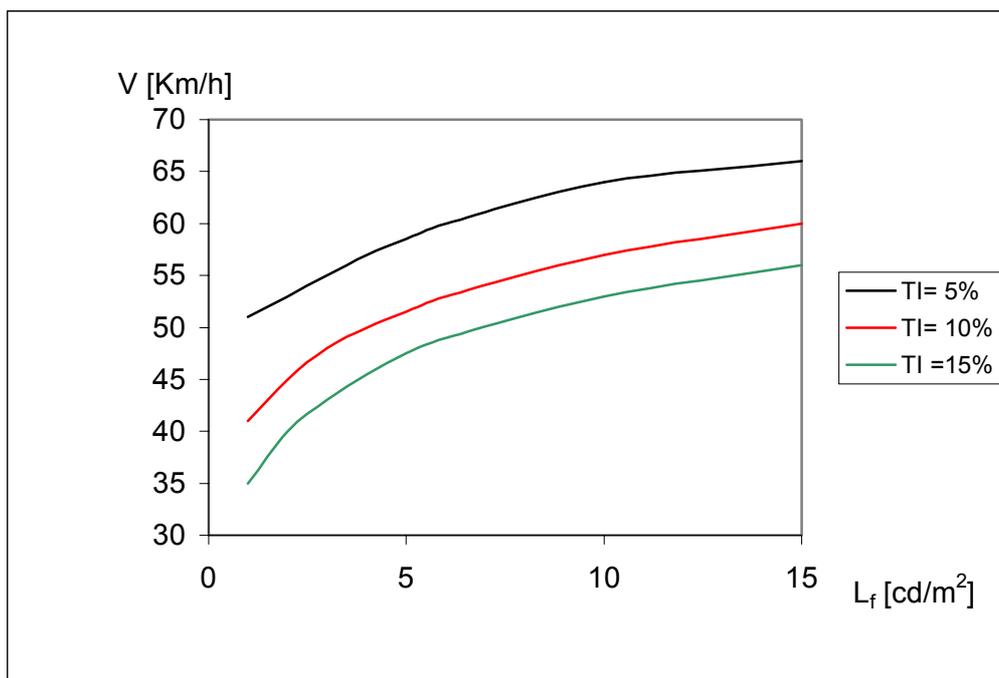


Figura 4 – Variazione della velocità di sorpasso massima con Lf e TI.

Il livello di luminanza dei proiettori anabbaglianti, di cui sono dotate le automobili, è notevolmente superiore (circa tre ordini di grandezza) rispetto a quello prodotto dal sistema di illuminazione. Questo spiega le distanze nettamente superiori alle quali è visibile un veicolo che procede in senso opposto con i fari accesi e, di conseguenza, le velocità più elevate alle quali è possibile effettuare la manovra di sorpasso, anche nel caso di condizioni di ridotta visibilità: nel caso più critico si può comunque procedere a velocità di 90 Km/h. E' da notare come, in questo particolare caso, si tratti di distinguere un ostacolo in contrasto positivo, cioè più chiaro dello sfondo sul quale è visto.

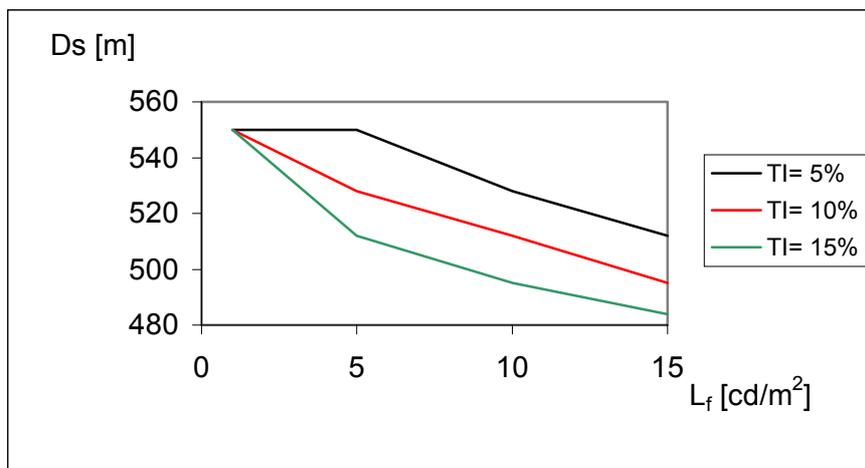


Figura 5 – Variazione della distanza per il sorpasso con Lf e TI.

Si giustifica perciò l'andamento delle curve di Figura 5, in cui si rileva come all'aumentare della luminanza del fondo e dell'indice di abbagliamento, le distanze per il sorpasso diminuiscono, perché diminuisce il contrasto tra l'oggetto e il fondo.

8. CONCLUSIONI

Sulla base delle elaborazioni condotte si può tentare di fornire un criterio di variazione generale della distanza di visibilità per l'arresto, in funzione delle dimensioni dell'ostacolo, per vari livelli della luminanza del fondo.

La normativa C.N.R. vigente prevede che il guidatore debba disporre di una distanza di visibilità tale da permettergli di individuare un ostacolo fisso di dimensioni pari a 0,15 m ed un ostacolo mobile di 1,10 m. Queste grandezze vengono utilizzate in fase progettuale. Si tratta di verificare se, nelle condizioni di esercizio, il guidatore sia veramente in grado di vedere un ostacolo di altezza pari a quella minima. Dalle relazioni precedentemente analizzate si ricavano i seguenti risultati (Tabella 10):

Distanza di visibilità di un ostacolo di 0.15 m				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	47 m \div 10%	63 m \div 10%	67 m \div 10%	73 m \div 10%
K massimo	47 m \div 10%	63 m \div 10%	75 m \div 10%	82 m \div 10%

Tabella 10 –Variazione della distanza di visibilità di un ostacolo di 15 cm, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Dalla tabella precedente, si può ricavare la velocità massima per la guida in sicurezza (Tabella 11).

Velocità massima [Km/h]				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	50 \div 56	59 \div 65	64 \div 71	67 \div 75
K massimo	50 \div 56	59 \div 65	60 \div 68	64 \div 70

Tabella 11 –Variazione della velocità massima per l'arresto in sicurezza, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Si può vedere come l'opacità non influenzi le velocità minori e, quindi, in gallerie appartenenti alle strade urbane locali e di quartiere (Cat. E, F del Codice della Strada) non siano necessari particolari provvedimenti. Nelle gallerie di Categoria D si devono contenere i livelli di opacità, oppure garantire luminanze del fondo stradale più elevate. Nelle altre gallerie si dovrebbe limitare drasticamente la velocità, oppure migliorare la visibilità degli ostacoli.

In galleria, un ostacolo fisso di 0,15 m può essere, ad esempio, il bordo del marciapiede. Per evitare che i veicoli possano urtare contro questo tipo di ostacolo, si prevede l'utilizzo di segnaletica verticale costituita da *delineatori*. Supponendo che tali sistemi di segnalazione diminuiscano il loro potere riflettente in esercizio, a causa dell'inquinamento e dello sporco prodotto dai gas di scarico, si ottengono i risultati di cui a Tabella 12 e 13.

Si vede come i delineatori migliorino in maniera sostanziale la visibilità dei bordi della carreggiata, anche se le condizioni di sicurezza per gallerie di tipo A sono garantite solo per ridotti livelli di opacità; altrimenti, anche con luminanze del fondo molto elevate, siamo vicini al limite di sicurezza.

Distanza di visibilità dei delineatori				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	278 m÷10%	349 m÷10%	356 m÷10%	394 m÷10%
K massimo	152 m÷10%	179 m÷10%	214 m÷10%	240 m÷10%

Tabella 12 –Variazione della distanza di visibilità di un delineatore, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Velocità massima [Km/h]				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	125÷137	>140	>140	>140
K massimo	92÷102	106÷117	110÷121	116÷128

Tabella 13 –Variazione della velocità massima per l'arresto in sicurezza, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Una verifica analoga può essere eseguita per un segnale del tipo “indicatore di ostacolo”, utilizzato nel caso di restringimenti della carreggiata e alla fine delle piazzole di sosta (Tabella 14, 15).

Distanza di visibilità dell'indicatore di ostacolo				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	155 m÷10%	180 m÷10%	233 m÷10%	241 m÷10%
K massimo	114 m÷10%	156 m÷10%	179 m÷10%	187 m÷10%

Tabella 14 –Variazione della distanza di visibilità di un indicatore di ostacolo, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Velocità massima [Km/h]				
L_f [cd/m^2]	1	5	10	15
K minimo	94÷104	100÷112	115÷126	117÷129
K massimo	80÷88	94÷104	100÷111	102÷114

Tabella 15 –Variazione della velocità massima per l'arresto in sicurezza, al variare della luminanza di fondo L_f e dell'opacità dell'aria.

Per le gallerie appartenenti a strade delle categorie C, D, E, F non appaiono esservi particolari problemi. Per strade di tipo B ($V=110$ Km/h) si deve contenere il livello di opacità o garantire valori di luminanza ≥ 10 cd/m^2 . Per le strade di categoria A si è prossimi al limite accettabile: in questo caso si potrebbe pensare di dotare i segnali di un sistema di illuminazione propria che ne aumenti la visibilità (ed in effetti questa soluzione trova già impiego in casi particolari).

In generale, si è osservato che nelle gallerie a foro unico, in cui potrebbe avvenire il sorpasso, se si vuole garantire la manovra in sicurezza, a opacità minima, sono sufficienti livelli di luminanza di 1 e 5 cd/m^2 . Se l'opacità è massima, il sorpasso in gallerie con limite di velocità superiore ai 50 Km/h non dovrebbe essere consentito.

L'illuminazione artificiale è indispensabile per garantire buoni livelli di visibilità in galleria. La riduzione di visibilità, a causa di un'atmosfera poco limpida, può provocare inconvenienti soprattutto nel caso delle gallerie in cui i limiti di velocità sono più elevati. Per questo, potrebbe rivelarsi utile inserire nelle gallerie degli opacimetri che, collegati ad apposito software, siano idonei a incrementare i livelli di luminanza della

carreggiata in caso di ridotta visibilità, oppure aumentino la portata d'aria del sistema di ventilazione quando il traffico è molto intenso, al fine di smaltire fumi e gas. Per aumentare la sicurezza in galleria, si può pensare anche ai pannelli a messaggio variabile, abbinati ad impianti semaforici, che invitino a ridurre la velocità in caso di scarsa visibilità. Fondamentali sono anche: una manutenzione periodica all'impianto di illuminazione (per garantire il buon funzionamento e la pulizia delle lampade); una pulizia delle pareti e della segnaletica (per ristabilirne il potere di riflessione della luce); la zebratura dei bordi del marciapiede, per aumentarne la visibilità.

BIBLIOGRAFIA

- Tartaglia M. - *L'inquinamento dell'aria da traffico stradale: analisi, calcolo, valutazione*. Cosenza, Editoriale BIOS 1999.
- Di Mattia A. - *Incidentalità sulle strade statali*. Atti XXIII Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Verona 18-21 maggio 1998.
- Bellini D. - *L'influenza delle gallerie sulla sicurezza autostradale*. Rivista LE STRADE – 3/1996
- Cafiso S., Colombrita F. - *Interventi per la riduzione del rischio nel trasporto stradale di merci pericolose (1^ parte)*. Rivista STRADE & AUTOSTRADE – 6/1999.
- Cafiso S., Colombrita F. - *Interventi per la riduzione del rischio nel trasporto stradale di merci pericolose (2^ parte)*. Rivista STRADE & AUTOSTRADE – 2/2000.
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) - *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*, Pubblicazione CIE 88/1990 .
- Fellin L., Forcolini G., Palladino P. - *Manuale di illuminotecnica*, AIDI (Associazione Italiana Di Illuminazione) – Milano TECNICHE NUOVE 1999.
- Rossi G. - *L'illuminazione stradale*. Rivista LE STRADE – 4/1997.
- Cantisani G. - *Flickering e abbagliamento da sorgenti luminose secondarie nelle gallerie stradali*. Rivista QUARRY & CONSTRUCTION – 12/1999.
- Chiota G. - *La funzione visiva nella guida*. Rivista VIE E TRASPORTI – luglio/agosto 1983.
- Serres A. - *Les modèles de visibilité*. Bulletin liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées – sept./oct. 1991.
- Serres A., Paulmier G. - *La circulation et la visibilité par temps de brouillard*. Bulletin liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées – mars/avril 1992.
- Novellas F. - *Eclairage des tunnels routiers. Intérêt des systèmes à mobilisation de contraste*. Revue générale des routes et des aérodromes – déc. 1982.
- Colomb M., Guillard Y. - *Prévision des distances de visibilité et de lisibilité en circulation routière de nuit*. Bulletin liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées – nov./déc. 1991.
- Adrian W. - *Visibilité de cibles. Modèle de calcul*. Revue LUX – jan./fév. 1991.
- Lecocq J. - *Niveaux de visibilité en éclairage public. Modèle d'Adrian appliqué aux cibles hémisphériques*. Revue LUX – mai/juin/juillet 1992.
- Gallager M. - *Contrast requirements of urban driving*. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD SPECIAL REPORT – Washington 1975.
- Mazziotti L. - *Quando la galleria si riempie di fumo: un problema attuale*. Rivista ANTINCENDIO – marzo 2000.