



**NUOVE ASPETTATIVE DI SICUREZZA
PER LE GALLERIE STRADALI:
IL CONTRIBUTO DELLA
RICERCA SCIENTIFICA**

Sascia Canale

Salvatore Leonardi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Sezione: Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e dei Trasporti

Università di Catania – Viale Andrea Doria 6 – 95125 – Catania – Italy

Tel: +39.095.7382202

Fax: +39.095.7382247

E-mail: scanale@dica.unict.it

E-mail: sleona@dica.unict.it

NUOVE ASPETTATIVE DI SICUREZZA PER LE GALLERIE STRADALI: IL CONTRIBUTO DELLA RICERCA SCIENTIFICA

SASCIA CANALE – D.I.C.A. – Università degli Studi di Catania

SALVATORE LEONARDI – D.I.C.A. – Università degli Studi di Catania

SOMMARIO

La presenza delle gallerie stradali lungo un tracciato viario costituisce un elemento condizionante la condotta di guida degli automobilisti. In questa memoria, verranno esposti i risultati di un'indagine sperimentale condotta presso una galleria situata sull'Autostrada A18/Messina-Catania. Si sono analizzate le traiettorie sia all'interno che all'esterno del tunnel. I risultati dello studio forniscono nuovi spunti di riflessione in materia di progettazione geometrica, ed inoltre contribuiscono alla definizione di tecnologie innovative di gestione e di controllo (tunnel intelligente).

ABSTRACT

The presence of the road tunnels along a road system constitutes a conditioning element for the driver behaviour. In this paper, the results of experimental survey, lead in a tunnel of the highway A18/Messina-Catania will come exposed. The trajectories have been analyzed are whether inside or outside the tunnel. The results of the study supply new consideration in matter of geometric planning, and moreover they contribute to the definition of innovative technologies of management and control (intelligent tunnel).

1. INTRODUZIONE

Il presente gruppo di lavoro, da anni, sottolinea l'importanza del contributo della ricerca scientifica nei confronti del perseguimento dell'obiettivo del miglioramento delle prestazioni, in termini di sicurezza, delle infrastrutture stradali. Questa sensibilità verso le problematiche della sicurezza stradale è stata recentemente fatta propria dall'Unione Europea che ha fornito le direttive finalizzate ad una drastica riduzione del numero di morti e di feriti causati da incidenti stradali, entro il prossimo decennio.

I gestori delle strade e, in particolare, dei tunnel, sono attivi per individuare soluzioni ottimali basate sull'infrastruttura (geometria, materiali, vie di fuga, cartelli a messaggio variabile, ecc.) con l'obiettivo di realizzare la strada o il tunnel intelligente.

Riguardo specificamente alla sicurezza delle gallerie stradali, si stanno sviluppando nuove competenze per la gestione logistica degli interventi in caso di guasti dei veicoli all'interno delle gallerie. In particolare, alcuni gestori (ad esempio: Frejus) hanno realizzato periferiche per il controllo termico dei veicoli che si immettono nei tunnel.

Da questo scenario, emerge con evidenza la necessità di fornire sempre maggiore impulso alla ricerca scientifica a vari livelli, allo scopo di poter fornire adeguate risposte ad una questione, quella della sicurezza dei tunnel stradali (ed in generale quella della sicurezza stradale), tanto più sentita ogni qualvolta si analizzano le statistiche degli incidenti in galleria o si pensa ai disastri che compromettono, anche per alcuni anni, il regolare svolgimento delle condizioni di esercizio nei tunnel (ad esempio: Monte Bianco).

Nel contesto appena prospettato, si inquadrano gli obiettivi del presente contributo. Nella prima parte dello studio, dopo aver analizzato alcune problematiche inerenti alla sicurezza delle gallerie stradali, si passeranno in rassegna gli elementi ritenuti maggiormente influenzanti le caratteristiche di sicurezza dei tunnel, con particolare riferimento a quelle tecnologie innovative (a supporto sia della progettazione che delle fasi di gestione) in grado di fornire contributi significativi in termini di abbattimento delle condizioni di pericolosità.

La seconda parte della ricerca prevede, poi, l'esposizione dei risultati di un'indagine sperimentale finalizzata allo studio delle traiettorie in ingresso ed all'interno di una galleria situata sull'Autostrada A18/Messina-Catania. Si ritiene che l'individuazione dei "fusi delle traiettorie" preferenziali da parte degli utenti, oltre a fornire nuovi spunti di riflessione in materia di progettazione geometrica dei tunnel stradali, possa costituire un utile tassello a supporto di quelle tecnologie innovative che, nel quadro più ampio del progetto del "tunnel intelligente", sono mirate a garantire un controllo preventivo dei veicoli nelle zone maggiormente critiche delle gallerie, ovvero l'ingresso e la prima porzione dello sviluppo longitudinale.

2. LA SICUREZZA NEI TUNNEL STRADALI

Il mantenimento di adeguate condizioni di sicurezza all'interno di una galleria richiede attenzioni particolari, in ragione delle conseguenze che possono essere generate dalla presenza, all'interno di questa opera d'arte, di veicoli danneggiati o incidentati.

In effetti, il verificarsi di incidenti che coinvolgono uno o più veicoli, può indurre gravi costrizioni ai fini del corretto funzionamento del tunnel e dell'incolumità degli utenti e del personale addetto alla manutenzione.

In tale contesto, la situazione di maggiore gravità è quella legata al manifestarsi di incendi dei veicoli all'interno del tunnel. Ovviamente, lo spettro di gravità è variabile in funzione del tipo di veicoli coinvolti (dalla situazione più lieve legata all'incendio della singola motocicletta, a quelle via via più severe, associate al coinvolgimento di una o più autovetture, di uno o più autocarri, o di una o più autobotti) [1].

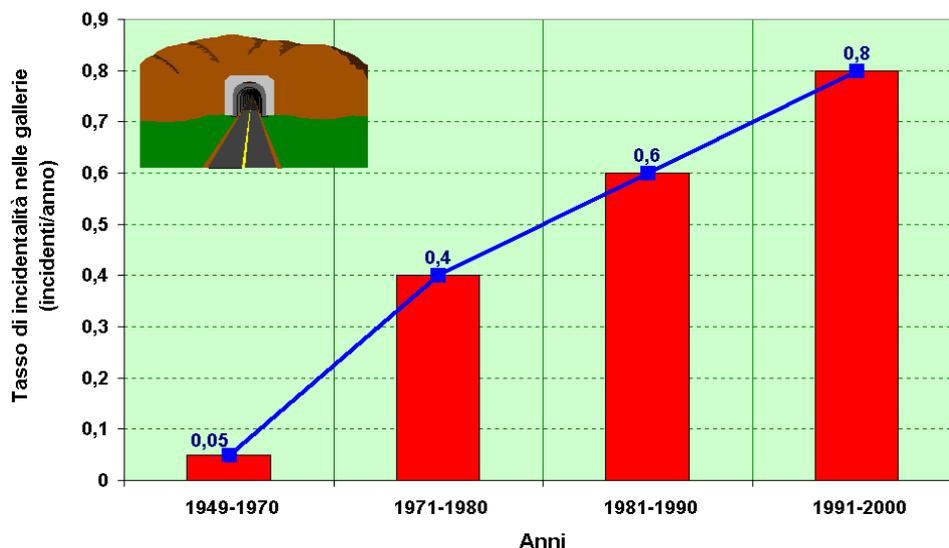


Figura 1 – Variazione del tasso di incidentalità nelle gallerie di tutto il mondo, negli ultimi 50 anni [2].

Gli incendi in galleria sono rari (in Inghilterra si sono riscontrati valori di $1/10^7$ veicoli · km) ma possono avere conseguenze estremamente gravi. Nella tabella 1 sono raccolti i maggiori incidenti occorsi negli ultimi 50 anni nelle gallerie di tutto il mondo. Dall'analisi di tale tabella e del grafico di figura 1 è possibile evincere come il numero di incidenti verificatosi ogni anno risulti via via crescente nel tempo, fino a raggiungere un valore considerevole (0.8 incidenti annui) proprio nell'ultimo decennio [2].

Anno	Galleria Lunghezza	Località Nazione	Veicolo che prese fuoco	Causa d'incendio probabile	Durata incendio	Conseguenze		
						Persone	Veicoli	Impianti e strutture
1949	Holland 3555 m	New York USA	Camion con 11 t di solfuro di carbonio	Esplosione dopo perdita del carico	4 ore	60 feriti dai fumi	10 camion 13 vetture	Danni gravi oltre 200 metri
1974	Monte Bianco 11600 m	Francia – Italia	Camion	Motore	15 min	1 ferito		
1976	Incrocio BP-A6 430 m	Parigi Francia	Camion con 16 t di pellicce di poliestere	Alta velocità	1 ora	12 feriti leggeri (fumi)	1 camion	Danni gravi oltre 150 metri
1979	Nihonzaka 2045 m	Shitzuoka Giappone	4 camion 2 vetture	Tamponam.	159 ore	7 morti 1 ferito	127 camion 46 vetture	Danni gravi oltre 1100 metri
1980	Kajiwara 740 m	Giappone	Camion con 3600 l di vernice in 200 fusti	Capovolgim. dopo urto con parete		1 morto	1 camion 4 t 1 camion 10 t	Danni gravi oltre 280 metri
1982	Caldecott 1080 m	Oakland USA	1 vettura 1 autobus 1 camion con 33000 l di benzina	Tamponam.	2 ore e 40 min	7 morti 4 feriti	3 camion 1 autobus 4 vetture	Danni gravi oltre 580 metri
1983	Pecorilla 662 m	Savona Italia	Camion con pesce	Tamponam.		9 morti 22 feriti	10 vetture	Pochi danni
1986	L'Arme 1105 m	Nizza Francia	Camion con rimorchio	Frenata ad alta velocità		3 morti 5 feriti	1 camion 4 vetture	Alcuni impianti distrutti
1987	Gumefens 340 m	Berna Svizzera	Camion	Tamponam.	2 ore	2 morti	2 camion 1 furgone	Danni modesti
1990	Raidal 4656 m	Raidal Norvegia	Camion con rimorchio per trasporto VW		50 min	1 ferito		Pochi danni
1990	Monte Bianco 11600 m	Francia – Italia	Camion con 20 t di cotone	Motore		2 feriti	1 camion	Alcuni impianti distrutti
1993	Serra Ripoli 442 m	BO – FI Italia	1 vettura 1 camion con rulli di carta	Tamponam.	2 ore e 30 min	4 morti 4 feriti	5 camion 11 vetture	Pochi danni
1993	Havden 1290 m	Hayanger Norvegia	1 motocicletta 2 vetture	Tamponam.	1 ora	5 feriti nel tampon.	1 motocicl. 2 vetture	Distrutti 111 m di materiale isolante
1994	Huguenot 3914 m	Sud Africa	Autobus con 45 passengeri	Guasto elettrico	1 ora	1 morto 28 feriti	1 autobus	Danni gravi
1995	Pfander 6719 m	Austria	Camion con rimorchio	Scontro	1 ora	3 morti 4 feriti	1 camion 1 furgone 1 vettura	Danni gravi
1995	Isola delle Femmine 148 m	Palermo Italia	1 autocisterna di gas liquido 1 piccolo autobus	Tamponam.		5 morti 20 feriti	1 autocisterna 1 autobus	Danni gravi – galleria chiusa per 25 giorni
1999	Monte Bianco 11600 m	Francia Italia	Camion con farina e margarina	Perdita olio dal motore		39 morti	23 camion 10 vetture 1 motocicl. 2 autopompe VVFF	Danni gravi
1999	Tauern 6401 m	A10 Salisburgo – Spittal Austria	Camion con vernice	Tamponam. a catena fra 4 vetture e 2 camion		12 morti 59 feriti	16 camion 24 vetture	Danni gravi
2000	Seljestud 1272 m	E134 Drammen – Haugesund Norvegia	1 vettura	Tamponam. a catena: 5 vetture fra 2 camion con rimorchio	45 min	6 feriti	1 camion 4 vetture 1 motocicl.	

Tabella 1 – Maggiori incidenti occorsi nelle gallerie stradali del mondo [2].

Il trend crescente del tasso di incidentalità in galleria trova facile giustificazione nel contemporaneo incremento dei flussi di traffico che interessa la rete infrastrutturale mondiale. Appare pertanto opportuno, non potendo invertire questo trend, che le gallerie (soprattutto quelle di una determinata lunghezza) si dotino di opportuni sistemi di sicurezza. Ciò anche alla luce del fatto che, nel prossimo futuro, è in programmazione la realizzazione di nuove gallerie di notevole lunghezza. Basti pensare, in Italia, alla variante di Valico sul tratto Firenze-Bologna dell'Autostrada del Sole, o alla galleria ferroviaria del sistema ad alta velocità Torino-Lione, che sarà lunga 52 km.

2.1. Il quadro normativo italiano

In Italia è recentemente entrato in vigore il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 5 Giugno 2001, "Sicurezza nelle gallerie stradali" (G.U. n° 217, 18/09/2001). In base a tale decreto, agli enti proprietari o concessionari di strade, viene ordinato [3]:

- la ricognizione delle gallerie in esercizio con la compilazione della scheda di cui all'allegato 1 della circolare 6 dicembre 1999, n. 7938 (entro 6 mesi dalla data di pubblicazione del decreto);
- la segnalazione, con congruo anticipo rispetto all'imbocco della galleria, dei cantieri stradali per lavori o per interventi di manutenzione da realizzare all'interno delle gallerie stradali e la realizzazione prima dell'imbocco della galleria stessa di eventuali restringimenti o cambi di carreggiata, mediante un idoneo piano di segnalamento.
- la verifica puntuale della corretta apposizione e stato d'efficienza di tutti i dispositivi di segnaletica orizzontale, verticale e complementare prevista dal codice della strada (entro 12 mesi dalla data di pubblicazione del decreto);
- l'effettuazione delle verifiche tecniche relative alla distanza di visuale libera e, ove necessario, la determinazione dei relativi limiti di velocità anche in corrispondenza delle zone di approccio alla galleria (entro 12 mesi dalla data di pubblicazione del decreto);
- la segnalazione ai prefetti interessati, nel caso si rendessero necessari provvedimenti di divieto di transito per i veicoli che trasportano talune categorie di materiali pericolosi, affinché individuino l'esistenza di eventuali percorsi alternativi, il livello di rischio degli stessi e, conseguentemente, adottino i relativi provvedimenti (entro 12 mesi dalla data di pubblicazione del decreto);
- il mantenimento delle pareti laterali delle gallerie di colore chiaro (colorazione bianca) fino ad un'altezza minima di 2,0 metri, con particolare attenzione alle zone di imbocco (entro 12 mesi dalla data di pubblicazione del decreto);
- la predisposizione di un programma di adeguamento degli impianti di illuminazione delle gallerie ai sensi delle indicazioni contenute nelle istruzioni tecniche CIE 88-1990 (entro il 31 dicembre 2002).

Tale Decreto, inoltre, preannuncia la pubblicazione di una specifica normativa tecnica in cui verranno descritte le modalità di attuazione degli altri adempimenti previsti nella circolare 6 dicembre 1999, n. 7938, nonché gli ulteriori interventi per il miglioramento della sicurezza, ivi compresa la definizione dei criteri per l'analisi del rischio e gli adempimenti conseguenti all'art. 8/bis della legge 13 luglio 1999, n. 226.

In particolare, in tale normativa tecnica dovranno essere stabiliti, per tutte le gallerie di lunghezza maggiore di 1000 m, i tempi necessari al loro inserimento nel piano provinciale della protezione civile (art. 14 legge 225/92), con annesso manuale di

sicurezza di cui al decreto legislativo 626/94, garantendo altresì il numero di uomini e mezzi ipotizzati per ciascuna condizione.

Si sottolinea infine, a livello legislativo, l'esistenza del DPR 246, derivante dalla direttiva 89/106/CEE, recepita nella legislazione italiana del 21/4/93. In tale decreto vengono citati i requisiti di resistenza al fuoco che devono essere posseduti dai materiali che costituiscono i tunnel e vengono inoltre riportate le caratteristiche generali cui devono soddisfare gli impianti di sicurezza.

3. TECNICHE PER MIGLIORARE LA SICUREZZA DELLE GALLERIE.

Tra i compiti principali dei vari "attori" di una galleria (progettisti, operatori, controllori del traffico, ecc.), ci deve essere quello di assicurare un adeguato livello di sicurezza, sia per lo staff di servizio, sia per i fruitori del sistema.

Il grado di sicurezza di una galleria stradale è funzione di tre elementi:

- 1) la configurazione geometrica della via: geometria orizzontale, geometria verticale, sezione trasversale;
- 2) il volume di traffico;
- 3) la qualità delle attrezzature di sicurezza.

3.1. Sicurezza nelle gallerie: il ruolo della conformazione geometrica del tracciato

E' ormai noto che la presenza di un tunnel stradale altera, accentuandoli, molti aspetti comportamentali degli utenti. In effetti, in galleria, molti degli elementi che caratterizzano la percorribilità di un tracciato "all'aperto" vengono sostituiti da altri elementi che, complessivamente rendono l'attività di guida maggiormente impegnativa e meno confortevole (ad esempio: il confinamento dovuto alle pareti laterali ed alla volta del tunnel, la larghezza ridotta della carreggiata, l'illuminazione artificiale, ecc.).

È necessario, pertanto, che la conformazione geometrica dell'asse stradale all'interno del tunnel, possa garantire le corrette distanze di visibilità ed il miglior comportamento ottico dell'utente.

Le osservazioni appena svolte fanno inoltre comprendere come, soprattutto per i tratti stradali in galleria, sia indispensabile sviluppare strumenti maggiormente sofisticati per arrivare a definire e a valutare la configurazione geometrica dei tracciati.

Osserviamo in proposito che lo straordinario progresso conseguito dalla tecnologia informatica ha già reso disponibili, per le applicazioni tecniche, apparecchi e codici di calcolo molto sofisticati. La grande velocità di elaborazione consente, inoltre, di generare immagini in tempo reale, cioè di modificare ed aggiornare la visualizzazione, secondo funzioni spaziali o temporali, od anche in base a comandi o movimenti dell'utente "comunicati" tramite apposite periferiche opportunamente interfacciate. Rappresentazioni di questo tipo, che vanno sotto il nome generico di sistemi di "realtà virtuale", negli ultimi anni hanno conosciuto un rapido e crescente successo.

Per quanto attiene al settore dell'ingegneria stradale, numerosi centri internazionali di ricerca hanno allestito dei simulatori di guida. Si tratta di abitacoli strumentati, dove le superfici vetrate sono sostituite da schermi o sistemi di proiezione di immagini generate da un calcolatore. Il principio di funzionamento è piuttosto semplice: attraverso una modellazione matematica, il sistema calcola risposte simulate alle decisioni e alle azioni di controllo del guidatore, riproducendo ciò che avverrebbe in un veicolo reale. Il software di generazione attualizza l'immagine dell'ambiente esterno e la riproduce in tempo reale sugli schermi.

In pratica, una volta definito bidimensionalmente il tracciato, tramite una procedura-software dedicata, viene realizzato il modello tridimensionale dell'intero contesto in cui si articola il nastro stradale. Il modello predisposto viene poi "importato", in un software per l'elaborazione di immagini tridimensionali, tramite il quale è possibile anche specificare le caratteristiche dell'illuminazione naturale o artificiale. Sempre in questa fase, ha luogo l'operazione di rendering delle superfici, che avviene attraverso l'assegnazione di tessiture e colori agli oggetti realizzati.

L'ultimo parametro che deve essere definito è il percorso del punto di vista, che corrisponde all'occhio del guidatore tramite l'impostazione delle funzioni $x(t)$ e $y(t)$. Una volta imposta la velocità di avanzamento del veicolo, il calcolatore è pronto per l'elaborazione del filmato e si può, quindi, procedere alla simulazione [4].

In definitiva, adottando la tecnologia appena esposta, è possibile: verificare ogni difettosità nella percezione visuale dell'itinerario, valutare l'intervento correttivo da realizzare, effettuare le modifiche alla geometria del tracciato, simulare nuovamente la percorrenza della strada, procedere alla valutazione dell'efficacia dell'intervento effettuato tramite un giudizio fornito da una serie di "collaudatori virtuali" dell'infrastruttura.

La necessità di utilizzare strumenti informatici con cui eseguire verifiche ottiche dei tracciati stradali è particolarmente evidente nel caso delle gallerie, soprattutto per la zona degli imbocchi e per i tratti caratterizzati dalla compresenza di raccordi verticali ed orizzontali. Tali software, fornendo la rappresentazione prospettica statica e dinamica del tracciato stradale in galleria, permettono al progettista di verificare in modo puntuale e continuo la correttezza della modellazione del tunnel stradale, al fine di assicurare la visibilità necessaria e favorire la guida ottica degli utenti.

A questo punto è importante osservare come il comportamento ottico degli utenti non sia condizionato dalla sola geometria verticale dei tracciati. E' noto infatti che la percezione visiva di un tracciato è generata dalla composizione simultanea di due piani: uno orizzontale (su cui giace la planimetria) ed uno verticale (contenente il profilo longitudinale). Le tecniche di analisi tridimensionale dovrebbero pertanto contribuire anche all'ottimizzazione del coordinamento piani-altimetrico degli elementi geometrici che caratterizzano l'asse stradale all'interno dei tunnel.

In tale contesto non è trascurabile, poi, mettere in conto anche l'influenza delle pendenze sui guasti (dovuti principalmente a danni al motore, all'impianto elettrico ed a fuoriuscite di carburante) che possono interessare i veicoli in marcia all'interno dei tunnel. In base ad una serie di indagini condotte su numerosi tunnel europei ed americani si è visto, infatti, che il numero di guasti sui tratti in salita può essere anche 5 volte maggiore rispetto a quello dei tratti in discesa; ciò si verifica già a partire da pendenze modeste come quelle del 2.5%. Quanto appena affermato trova riscontro principalmente nelle gallerie sotfluviali (sagomate a V), presenti principalmente in Norvegia, che raggiungono pendenze particolarmente elevate.

A conferma di quanto detto, si riporta (Fig. 2) un diagramma dedotto dall'analisi di alcuni tunnel autostradali francesi, in cui viene mostrata una correlazione lineare tra il "tasso dei guasti" e l'entità della pendenza longitudinale [5].

Si osservi, per contro, che i tassi di incidentalità (riscontrati principalmente in tunnel caratterizzati da elevati volumi di traffico) sono generalmente maggiori per i tratti in discesa; ciò a causa delle maggiori velocità che vengono assunte dai veicoli.

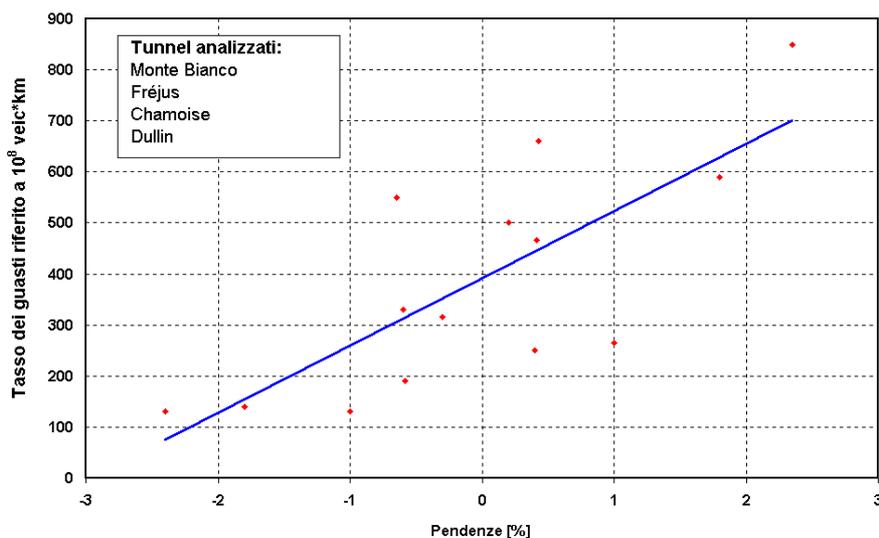


Figura 2 – Correlazione tra tasso dei guasti in galleria ed entità delle pendenze longitudinali [5].

Per concludere l’analisi degli elementi geometrici condizionanti la sicurezza di marcia in galleria, occorre far riferimento alla sezione trasversale della carreggiata. Osserviamo preliminarmente come, da una serie di studi sull’incidentalità condotti in campo internazionale, sia stato possibile dedurre le seguenti considerazioni di validità generale (riferite cioè a tratti sia “all’aperto” che “al chiuso”) [6]:

- le corsie delle strade extraurbane con larghezza variabile tra 3,4 e 3,7 metri presentano il più basso tasso di incidentalità;
- le corsie di larghezza inferiore a 3.0 metri contribuiscono al verificarsi di incidenti in cui vengono coinvolti più veicoli;
- le corsie larghe 3,95 m sono caratterizzate da una percentuale di incidentalità circa tre volte inferiore a quella relativa alle corsie larghe poco più di 2 m;
- con la realizzazione di una banchina pavimentata di 1,8 metri su una strada che ne era priva, si può giungere ad una riduzione degli incidenti fino al 40%.

Nell’ambito dei condizionamenti indotti dalla sezione trasversale, si inquadrano le problematiche legate alla vicinanza delle pareti laterali del tunnel alla corsia di marcia. Infatti, soprattutto in prossimità dell’imbocco delle gallerie, si manifesta il cosiddetto “effetto parete”, dovuto alla ridotta distanza tra i piedritti del portale ed il margine della carreggiata, e causa di sensibili riduzioni della velocità e di modifiche delle traiettorie di approccio con palesi spostamenti dei veicoli verso il centro della sede stradale.

Il perdurare poi di condizioni di guida all’interno di gallerie caratterizzate spesso dalla mancanza di banchine e di corsie di emergenza, può contribuire ad esasperare la sensazione di oppressione legata alla presenza di un ambiente spaziale confinato sia superiormente che trasversalmente (effetto caverna) [7].

Il rilievo sperimentale descritto nel paragrafo 4 servirà a confermare le osservazioni appena svolte. In questo contesto occorre sottolineare come la nuova Normativa CNR imponga, per le gallerie di nuova realizzazione, il mantenimento, all’interno delle stesse, della medesima sagoma trasversale che caratterizza la sede stradale “a cielo aperto” [8]. Si ribadisce, inoltre, il ruolo determinante che può essere svolto dalle tecniche di simulazione in realtà virtuale e di rendering scientifico, ai fini della determinazione del miglior connubio tra geometria orizzontale (sia longitudinale che

trasversale) e verticale; i vantaggi che si otterrebbero sono da ricercarsi essenzialmente nell'ottimizzazione delle condizioni del comfort e della sicurezza di guida all'interno e in avvicinamento ai tunnel, con la conseguente riduzione dell'effetto parete e dell'effetto caverna.

3.2. Sicurezza nelle gallerie: l'influenza dei volumi di traffico

Si è già osservato che l'incremento continuo e costante dei volumi di traffico porta come naturale conseguenza l'incremento della probabilità (e conseguentemente della frequenza) di sinistri stradali.

Volendo adesso prendere in considerazione gli aspetti peculiari dell'incidentalità nelle gallerie stradali, si deve rilevare come la maggior parte dei sinistri avvenga di notte e con bassi volumi di traffico. In effetti, l'analisi dei dati di incidentalità relativi a numerose gallerie europee ed americane ha messo in risalto come le condizioni di rischio maggiori siano quelle associate a condizioni di deflusso medio-basse che invogliano gli utenti ad attingere ad elevati valori della velocità.

A conferma di quanto affermato, si riportano, a titolo d'esempio due diagrammi (Fig. 3 e 4) relativi, rispettivamente, al numero di incidenti ed al tasso di incidentalità valutati per il Tunnel Fourvière (Francia) in 7 anni di funzionamento (periodo d'indagine 1985-1991). Dall'osservazione di tali grafici, infatti, si può notare come i tassi di incidentalità più alti (mediamente superiori a $100 \cdot 10^{-8}$ veic*km e con punte che sfiorano i $160 \cdot 10^{-8}$ veic*km) si abbiano in corrispondenza delle ore di "morbida"; le ore di "punta" sono invece caratterizzate generalmente da tassi inferiori a $40 \cdot 10^{-8}$ veic*km [5].

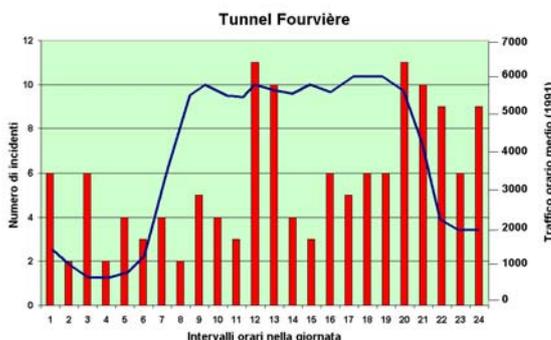


Figura 3 – Tunnel Fourvière: numero di incidenti [5].

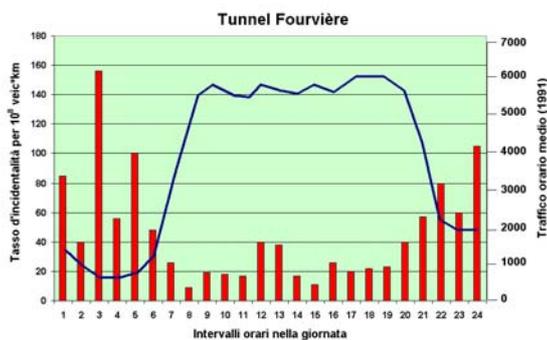


Figura 4 – Tunnel Fourvière: tasso di incidentalità [5].

3.3. Sicurezza nelle gallerie: l'importanza delle attrezzature di sicurezza

I sistemi e le apparecchiature di sicurezza, utili sia come strumenti di prevenzione degli incidenti, sia per far fronte alle emergenze provocate dal verificarsi di guasti e/o incidenti, vengono comunemente suddivisi in termini di strutture fisse, mobili ed attrezzature di controllo.

Tra le *strutture fisse* rientrano i seguenti dispositivi:

- ◆ impianti di ventilazione, di illuminazione ed elettrici;
- ◆ nicchie e rifugi;
- ◆ piazzole d'emergenza e d'inversione;
- ◆ vie di fuga e bypass;
- ◆ drenaggi;
- ◆ sistemi di soppressione del fuoco (sprinkler, estintori, muri ad acqua, ecc.).

Alla categoria delle *strutture mobili* (necessarie soprattutto per quei tunnel lontani da centri abitati importanti), appartengono invece:

- ◆ autopompe (analoghe a quelle dei Vigili del Fuoco);
- ◆ ambulanze (attrezzate principalmente per l'ossigenoterapia e la rianimazione);
- ◆ motociclisti (per rapidi interventi in caso di vetture in panne dentro il tunnel).

Alla famiglia delle *attrezzature di controllo e di sorveglianza* dei tunnel appartengono quei sistemi necessari a provvedere alle seguenti mansioni:

- monitorare i flussi di traffico e impedire le congestioni;
- gestire al meglio la densità e la velocità del flusso veicolare;
- comunicare le restrizioni di traffico agli utenti che si immettono in galleria;
- mobilitare le unità di emergenza in caso di incidente;
- iniziare, quando necessario, le operazioni appropriate di emergenza;
- monitorare di continuo l'equipaggiamento di sicurezza del tunnel in modo da conservarlo sempre operativo;
- attivare, quando necessario, il piano di soccorso e/o d'evacuazione;
- indicare con tempestività la zona dell'incidente e del potenziale incendio;
- controllare in continuo i valori delle concentrazioni di gas nocivi e le condizioni di visibilità all'interno del tunnel.

In definitiva, gli obiettivi di un sistema di controllo di traffico coprono una vasta gamma di interessi e di campi di prevenzione e sicurezza: dalla minimizzazione dell'inquinamento e delle emissioni, alla gestione delle condizioni di emergenza, all'ottimizzazione dei tempi di transito, del consumo di carburante, del costo del trasporto, ecc. Questi sistemi hanno però il limite di non riuscire a discriminare se l'arresto del veicolo analizzato sia temporaneo o a seguito di incidente. A causa di tale limite fondamentale, e per la necessità di controllare e monitorare le cause di fermo veicolare per l'intera tratta del tunnel in modo semiautomatico, si è progressivamente dato impulso alla ricerca di tecnologie innovative, applicabili ai tunnel sia nuovi che esistenti, che possano renderli "intelligenti" (in grado cioè di ridurre la probabilità incidentale ed in modo tale che la gestione di una situazione di crisi variabile risulti semiautomatica) [1], [9].

Nell'ambito di tali tecniche innovative si può inquadrare, ad esempio, il sistema denominato Preventive Safety Setter (messo a punto recentemente dall'ENEA, nell'ambito del Progetto FIT – Firing In Tunnel), per la regolazione dei flussi veicolari e, simultaneamente, per la gestione ed il controllo del traffico in condizioni d'incidente.

Tale sistema si basa su di un controllo "emulativo", chiamato emulatore "Visio". Con questo strumento, il controllo e la gestione del traffico saranno ottenuti mediante una serie di led luminosi scorrevoli con la tecnologia delle strisce luminose usate in pubblicità, comandati dall'emulatore. Tali strisce luminose, ancorate al terreno mediante una rotaia, indirizzeranno ogni utente mediante una navetta di luce verde che precederà ciascun veicolo. Ogni automobilista, pertanto, avrà la propria navetta verde di traghettamento all'interno della galleria e sarà guidato da essa in condizioni sia di marcia normale, che di sorpasso, che di emergenza.

In caso d'incidente, oltre alla regolazione ed alla evacuazione dei veicoli che formano la coda formatasi a causa dell'incidente, l'emulatore invierà la posizione di tutti i veicoli registrati nel tunnel, mediante opportune telecamere, alla banca dati tridimensionale in realtà virtuale del tunnel. Qualora dovesse presentarsi un incidente severo, con gravissime conseguenze, il sistema provvederà ad inviare, sia i dati elaborati

che la situazione in realtà virtuale ottenuta, al supporto decisionale in sala controllo del tunnel; contemporaneamente, la “situazione” in realtà virtuale verrà visualizzata su periferica portatile, in modo da permettere ai Vigili del Fuoco impiegati nel tunnel, di scegliere i percorsi più idonei all’azione di emergenza da portare a termine [9].

In conclusione, sviluppare l’intelligenza dei tunnel nell’ottica della sicurezza preventiva, relativa agli incidenti severi che possono verificarsi, significa:

- 1) applicare ad essi una tecnologia innovativa;
- 2) installare opportuni sensori di rilevamento;
- 3) dettare regole di comportamento in funzione della variabilità dell’ambiente in cui il tunnel è immerso e di cui contemporaneamente fa parte;
- 4) abbassare ragionevolmente, in via preventiva, la probabilità del primo incidente;
- 5) minimizzare, infine, la probabilità degli incidenti successivi.

4. L’INDAGINE SPERIMENTALE

Il rilievo sperimentale descritto nel presente paragrafo rientra nell’ambito delle problematiche connesse alla variabilità del comportamento degli utenti dei tunnel ed alle implicazioni, in termini di sicurezza, sulla percorribilità delle gallerie stradali. L’indagine sperimentale è finalizzata infatti allo studio sia delle traiettorie veicolari in avvicinamento al portale, sia di quelle percorse dagli utenti all’interno della galleria.

La galleria oggetto del rilievo è quella denominata S. Antonio ubicata sull’autostrada A18 Messina-Catania (direzione Messina), al km 40 dal casello “Catania Nord, San Gregorio”, 600 metri prima dello svincolo per Taormina (Fig. 5). Il tunnel presenta uno sviluppo longitudinale pari a 195 metri.

La scelta della suddetta galleria è stata motivata dalla necessità di poter posizionare gli strumenti per il rilievo all’esterno del tunnel e in modo tale che anche le riprese all’interno fossero possibili da fuori. In effetti, proprio qualche decina di metri prima dell’imbocco, è presente un cavalcavia che ha consentito il corretto posizionamento delle videocamere per le riprese filmate.



Figura 5 – Ubicazione della galleria S. Antonio sull’autostrada A18 (Messina-Catania).

Per le operazioni di ripresa si sono impiegate due telecamere S-VHS: una, rivolta a monte dell’imbocco, per il rilievo delle traiettorie di immissione (videocamera A), l’altra, con l’obiettivo orientato verso il portale d’ingresso, per filmare le manovre dei veicoli all’interno del tunnel (videocamera B) [10].

Si ribadisce che lo studio delle traiettorie proposto in questo studio è mirato a valutare i condizionamenti indotti sugli utenti dalla presenza fisica dei tunnel stradali; in tale contesto, le considerazioni relative al comportamento dei veicoli sia all'interno che all'esterno della galleria verranno svolte soltanto per quei veicoli che potevano essere considerati isolati. Al fine di ridurre il lavoro di "eliminazione" dei veicoli condizionati da altri veicoli, si è scelta una fascia oraria d'indagine che non fosse "di punta". Le fasi del rilievo si sono pertanto concentrate nell'intervallo orario compreso tra le 9.45 e le 10.45 di domenica 23/01/2000.

In una prima fase è stato svolto un esame visivo del filmato proveniente dalla videocamera A, finalizzato ad individuare ed a selezionare quei veicoli che accedevano alla galleria senza condizionamento alcuno. Dall'analisi dei 143 veicoli che si sono complessivamente immessi nel tunnel, è stato possibile definire sei classi di comportamento di seguito riportate:

- 1) veicoli che mantengono la direzione sulla corsia di marcia normale;
- 2) veicoli che si spostano verso la mezzeria della carreggiata;
- 3) veicoli che, provenendo dalla corsia di sorpasso, vi permangono fino all'imbocco;
- 4) veicoli che sorpassano poco prima del cavalcavia;
- 5) veicoli che si spostano dalla corsia di marcia normale a quella di sorpasso;
- 6) veicoli che si spostano dalla corsia di sorpasso a quella di marcia normale.

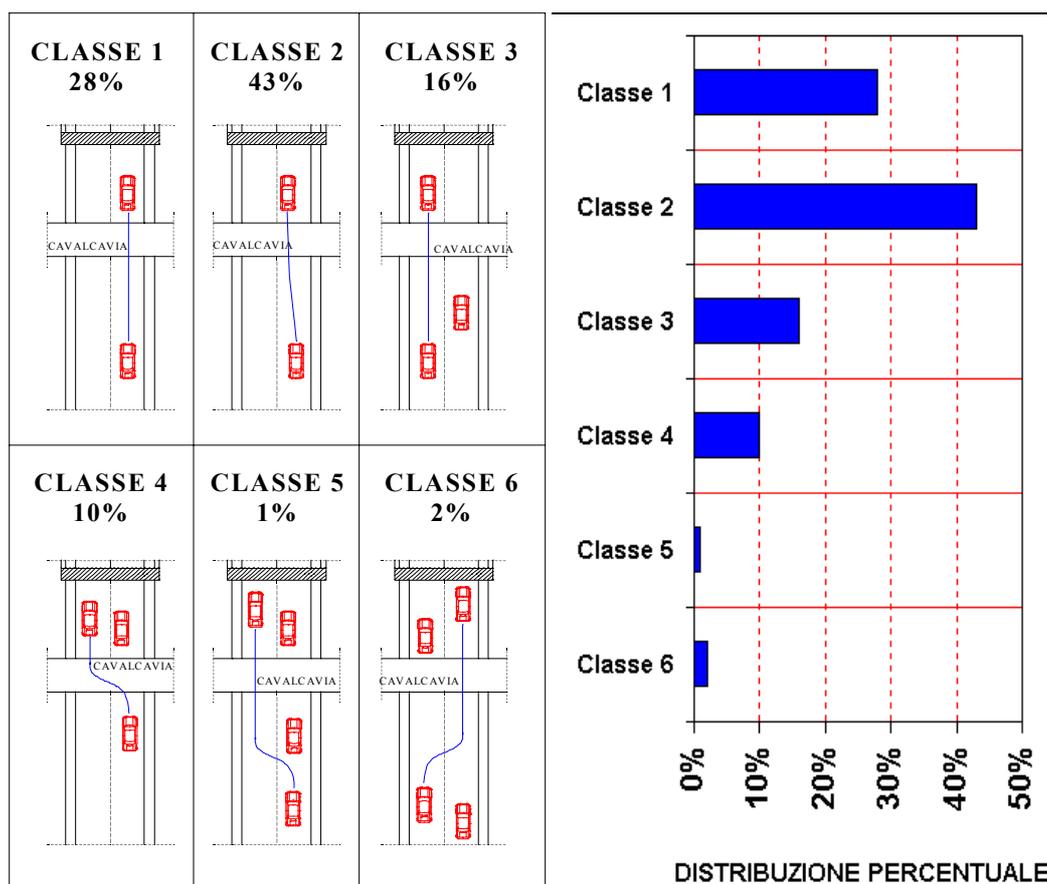


Figura 6 – Distribuzione percentuale delle “classi di comportamento” dei veicoli in ingresso.

Dall'osservazione della distribuzione percentuale delle diverse classi di comportamento (Fig. 6) si ottiene la conferma dei risultati ottenuti da altri gruppi di ricerca, sia nazionali [11] che internazionali, in base ai quali il fenomeno dello spostamento laterale dei veicoli verso la mezzera della carreggiata (classe 2) costituisce l'aspetto comportamentale prevalente (43%). Le classi di comportamento 5 e 6 sono invece indicative di aspetti comportamentali poco frequenti ed associabili, probabilmente, a situazioni contingenti.

L'analisi visiva delle immagini restituite dalla videocamera B si è pertanto concentrata sui 61 veicoli appartenenti alla seconda classe di comportamento; in particolare, si è potuto appurare, mediante conteggio manuale, che:

- 48 veicoli (pari al 79%), dopo aver percorso un tratto più o meno lungo all'interno del tunnel, rientrano verso il margine destro della carreggiata, annullando (o quanto meno riducendo) lo spostamento laterale che ne aveva caratterizzato la marcia prima dell'immissione;
- 13 veicoli (21%) manifestavano comportamenti differenti (9 si sono gradualmente posizionati sulla corsia di sinistra e sono fuoriusciti dal tunnel mantenendosi sempre su di essa; 4 sono transitati sulla corsia di sinistra per circa metà dello sviluppo longitudinale della galleria per poi rientrare sulla corsia di marcia normale prima della fine del tunnel).

In definitiva, lo studio delle traiettorie, a mezzo della tecnologia informatizzata descritta in appresso, è stato condotto sui 48 veicoli che, sia in ingresso che all'interno del tunnel, presentavano il comportamento statisticamente più frequente.

Il passo successivo è stato quello di allestire una videocassetta contenente soltanto gli spezzoni dei filmati relativi alle traiettorie eseguite di 48 veicoli suddetti.

Gli stralci della registrazione (VHS) sono stati poi elaborati attraverso un sistema integrato di gestione delle immagini composto da:

- videoregistratore;
- modulo hardware per l'acquisizione delle immagini;
- moduli software per la gestione e l'elaborazione dei fotogrammi acquisiti.

Il sito oggetto del rilievo è stato caratterizzato topograficamente mediante un rilievo di dettaglio delle strisce costituenti la linea tratteggiata della segnaletica di demarcazione delle corsie. Ogni striscia è stata identificata mediante un codice alfanumerico.

L'asse di riferimento del rilievo è stato fissato coincidente con la linea mediana della striscia che delimita la corsia di marcia dalla banchina (Fig. 7).

La restituzione fotogrammetrica, eseguita sulle immagini acquisite ed opportunamente calibrate in funzione delle misure effettuate "in situ" ha riguardato:

- la distanza (L_i) tra il punto che individua il baricentro della ruota posteriore destra di ogni veicolo e l'asse che divide longitudinalmente la linea di separazione tra la corsia di marcia e la banchina;
- la distanza (d_i) tra la ruota posteriore e l'asse che taglia trasversalmente il portale d'imbocco.

La sensibilità dell'apparecchiatura di ripresa, la postazione scelta per l'acquisizione dei filmati ed i comandi di visualizzazione offerti dal software per il trattamento delle immagini, hanno consentito di ottenere misure della distanza laterale (L_i) con una precisione dell'ordine dei 5 centimetri. L'errore sulla misura delle distanze longitudinali (d_i) è contenuto invece entro i 10 centimetri.

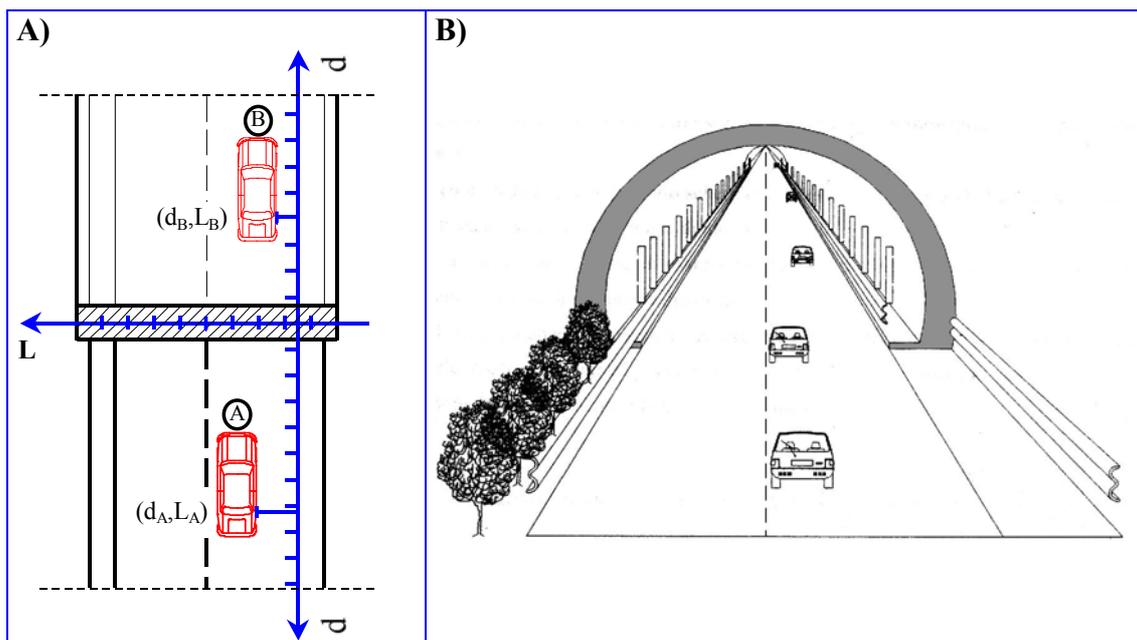


Figura 7 – A) Elementi di riferimento scelti per l'impostazione della restituzione fotogrammetrica delle traiettorie rilevate; B) Visione prospettica della galleria (Videocamera B).

La misura dei tempi intercorrenti per l'attraversamento di determinati punti della traiettoria, è stata effettuata con estrema precisione sfruttando una funzione avanzata del software di gestione delle immagini. Questa funzione consente di:

- analizzare “frame by frame” i fotogrammi di un filmato, per “step” di tempo selezionabili dall'operatore (nel nostro caso si è scelto uno step pari ad 1/25 di secondo);
- valutare i tempi intercorrenti per percorrere le varie sezioni di cui si compone la traiettoria effettuata;
- ricavare le grandezze geometriche per descrivere la posizione occupata dal veicolo.

Per l'indagine, in definitiva, si è fatto riferimento ad un intervallo temporale di 0.04 secondi, corrispondente a circa 1 metro di ascissa curvilinea, adeguato alla descrizione delle traiettorie veicolari con velocità media di 100 km/h. Si sono dunque tracciate le traiettorie dei veicoli interpolando i punti tramite funzioni polinomiali di 2° grado.

Dall'analisi delle traiettorie d'ingresso (Fig. 8) è possibile trarre le seguenti osservazioni:

- tutti i veicoli iniziano il loro spostamento laterale verso il margine sinistro della carreggiata a partire da una distanza minima dall'imbocco pari a 140-150 m;
- l'entità dello scostamento rispetto alla linea di margine della banchina (riferito alla ruota posteriore destra) varia tra 0.49 m e 3.48 m;
- lo spostamento laterale tende ad annullarsi man mano che ci si avvicina al portale d'ingresso (mediamente tra i 50 e i 100 m da questo).

Si tratta di osservazioni che confermano come il comportamento degli utenti sia considerevolmente influenzato dalla visione del portale d'ingresso che, evidentemente, viene percepito come una sorta di ostacolo che altera le “normali” condizioni di guida su strada all'aperto [11].

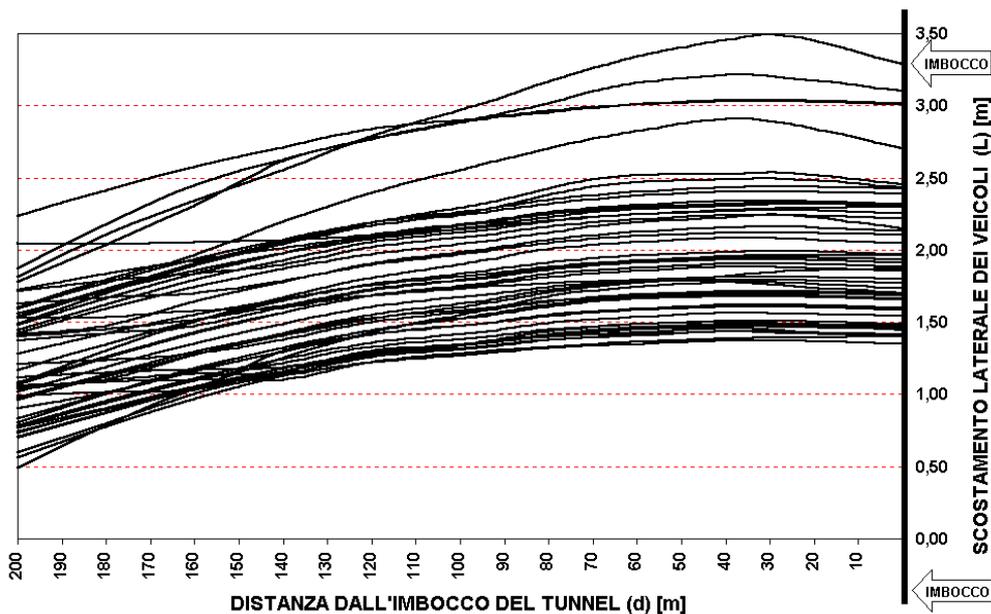


Figura 8 – Traiettorie veicolari in avvicinamento al tunnel.

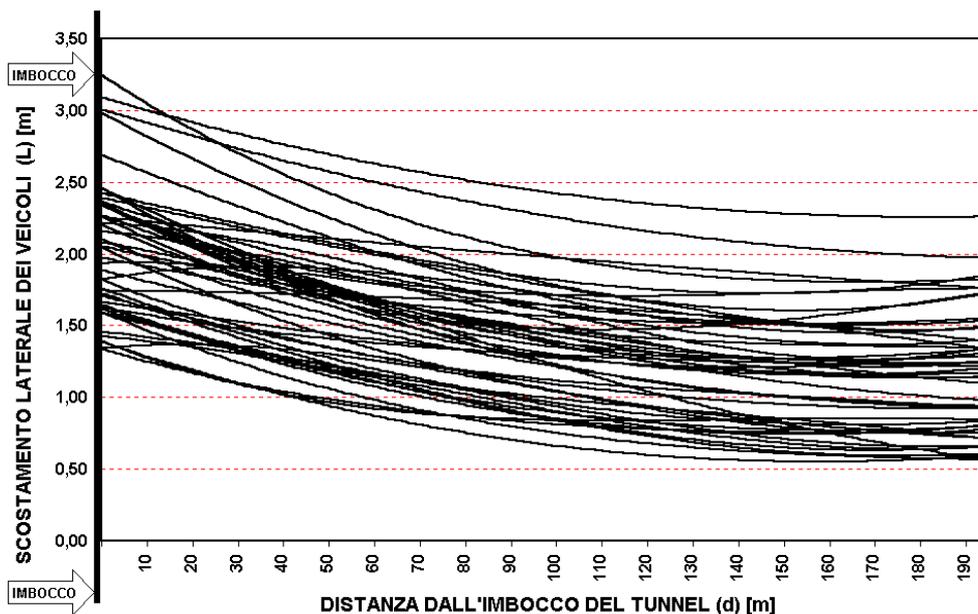


Figura 9 – Traiettorie veicolari all'interno della galleria.

Per quel che concerne invece il comportamento dei veicoli in marcia all'interno del tunnel, dall'osservazione del diagramma di figura 9 è possibile evincere che:

- tutti i veicoli iniziano il loro spostamento verso il margine destro della strada a partire dall'inizio dell'imbocco ed entro una distanza da esso pari a 30-40 m;
- l'entità dello scostamento rispetto alla linea di margine della banchina (riferito alla ruota posteriore destra) varia tra 0.51 m e 3.34 m;
- tutti i veicoli tornano a percorrere traiettorie parallele all'asse del tunnel (con scostamenti, rispetto alla linea di margine compresi tra 0.51 m e 1.50), dopo una distanza dall'imbocco pari a 120-140 m.

Le considerazioni appena svolte evidenziano un importante risultato: i veicoli, una volta superato il punto di discontinuità costituito dal portale d'ingresso, tendono quasi subito a spostarsi lateralmente al fine di ripristinare le condizioni di marcia in prossimità del margine destro della carreggiata. L'annullamento di tale "gradiente di accostamento al margine" si manifesta entro i primi 150 metri del tunnel; da questo punto in poi l'utente proseguirà il suo tragitto parallelamente all'asse della galleria, senza ulteriori spostamenti trasversali.

Nella figura 10 sono stati rappresentati i campi di appartenenza delle curve relative alle traiettorie dei veicoli all'esterno ed all'interno della galleria. In particolar modo, per ognuna delle due situazioni d'indagine, sono state tracciate le seguenti tre curve:

- la curva che delimita superiormente il fuso di appartenenza del 90% delle traiettorie veicolari;
- la curva che delimita inferiormente il fuso di appartenenza del 90% delle traiettorie veicolari;
- la curva di inviluppo di tutte le traiettorie.

Per ognuna delle curve suddette è stata ricavata l'equazione che descrive lo scostamento della ruota posteriore destra rispetto alla linea che delimita la banchina (L) in funzione della distanza della ruota medesima dal portale d'ingresso (d). Tali relazioni sono riconducibili ad equazioni di secondo grado del tipo:

$$L = a \cdot d^2 + b \cdot d + c \quad [1]$$

dove i coefficienti a, b e c sono di seguito tabellati.

		a	b	c
Traiettorie esterne al tunnel	<i>Limite superiore del fuso</i>	-0.00003	0.0025	2.36
	<i>Limite inferiore del fuso</i>	-0.00004	0.0032	1.39
	<i>Curva di inviluppo</i>	-0.00003	0.0028	1.88
Traiettorie interne al tunnel	<i>Limite superiore del fuso</i>	0.00003	-0.0100	2.35
	<i>Limite inferiore del fuso</i>	0.00002	-0.0088	1.42
	<i>Curva di inviluppo</i>	0.00003	-0.0094	1.88

Tabella 3 – Coefficienti per la definizione analitica delle traiettorie veicolari interne ed esterne al tunnel.

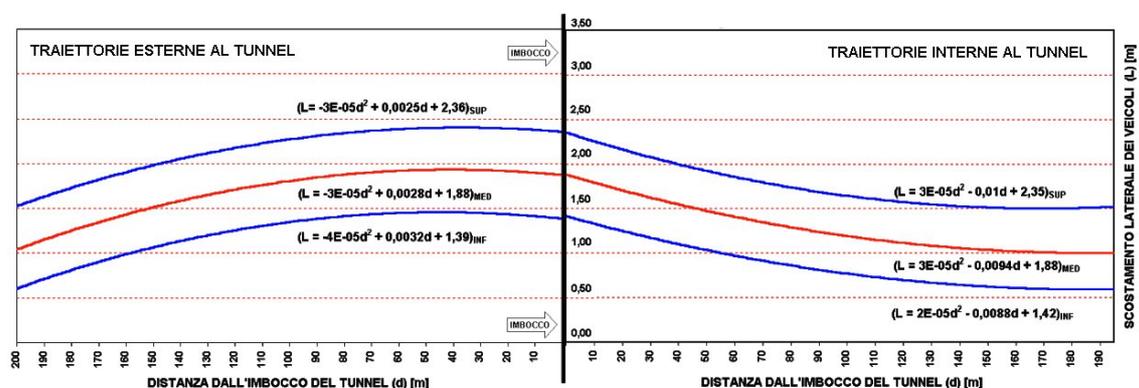


Figura 10 – Fusi di appartenenza delle traiettorie veicolari all'esterno ed all'interno della galleria.

A commento conclusivo dei risultati ottenuti dal rilievo sperimentale descritto fino a questo punto, possiamo affermare che, da un punto di vista prettamente geometrico, qualora i risultati dedotti potessero considerarsi di validità generale (a tal fine, si ritiene che occorrono altri rilievi sperimentali da eseguire su numerose altre gallerie di diverso sviluppo longitudinale), si potrebbe pensare ad una prosecuzione della sezione stradale presente nei tratti “a cielo aperto” (e quindi comprensiva di banchine e di corsie di emergenza) soltanto nei primi 120-150 metri della galleria, prevedendo un successivo graduale restringimento della sagoma trasversale della carreggiata e quindi del tunnel.

Ribadiamo che la soluzione prospettata, prima di poter essere considerata una reale proposta progettuale, deve essere confortata da ulteriori indagini sia teoriche che sperimentali mirate a validarne i presupposti teorici; è facile comunque intuire che, se tale conformazione geometrica venisse riconosciuta come un intervento migliorativo delle condizioni di sicurezza delle gallerie, si manifesterebbero enormi vantaggi anche in termini economico-finanziari, soprattutto al confronto della soluzione prospettata dalle nuove norme del CNR, ovvero il mantenimento invariato della sagoma trasversale su tutto l’itinerario stradale.

Osserviamo poi che l’esito della presente ricerca può costituire, a nostro avviso, un valido supporto per quegli interventi di sicurezza preventiva strutturati con l’apporto di tecnologie innovative. In effetti, l’aver definito analiticamente i “fusi” di appartenenza delle traiettorie veicolari sia a monte che a valle dell’elemento di “discontinuità” rappresentato dal portale d’ingresso, può, ad esempio, fornire precise indicazioni sulla corretta dislocazione delle “rotaie” che fungono da supporto materiale per le strisce luminose preposte a “traghetare” in sicurezza gli utenti all’interno delle gallerie.

5. CONCLUSIONI

Gli eventi incidentali nelle gallerie, pur essendo fortunatamente molto rari, manifestano però elevate potenzialità in termini di gravità delle conseguenze che possono riguardare il gran numero di utenti che, quotidianamente, le attraversano. Per di più l’analisi statistica dei dati di incidentalità rivela un trend decisamente crescente con l’aumentare dei flussi veicolari in circolazione.

Le aspettative di sicurezza stradale e, in particolare, quelle relative alla sicurezza delle gallerie, possono venir soddisfatte dai continui sforzi dei ricercatori e degli studiosi di diversi settori tra loro correlati.

Con il presente contributo, attraverso la caratterizzazione delle traiettorie veicolari all’interno ed all’esterno della galleria esaminata, è stato possibile definire i contesti più frequenti in cui è possibile inquadrare le tendenze comportamentali di gran parte degli utenti.

Dal punto di vista delle possibili “implicazioni pratiche” associate ai risultati ottenuti, si ritiene che siano due gli aspetti fondamentali su cui si potrà dibattere in un futuro prossimo:

- in primo luogo, alla luce della caratterizzazione complessiva delle traiettorie percorse dai veicoli, e tramite l’apporto di altre indagini sperimentali e di ulteriori studi teorici, risulterà fattibile pervenire ad una rielaborazione razionale dei criteri di progettazione geometrica dei tunnel stradali;
- in secondo luogo, grazie alla descrizione analitica delle fasce di appartenenza delle traiettorie, sarà inoltre possibile suggerire il corretto posizionamento di dispositivi visuali di “orientamento” per gli utenti, utili ai fini della sicurezza preventiva.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *A. Sacripanti. Le gallerie infrastrutturali e la loro sicurezza* - Riv. Energia, Ambiente e Innovazione. N° 2 – 2001.
- [2] *A.A.V.V. The World's longest tunnel page-* Sito Web: <http://home.no.net/lotsberg>.
- [3] *Decreto Ministero Lavori Pubblici. Sicurezza nelle gallerie stradali* - 5 Giugno 2001 (G.U. n°217, 18/09/2001).
- [4] *A. D'Andrea, G. Cantisani, F. Vatteroni. Approccio alle tecniche di simulazione della percezione visiva* - Atti del X Convegno S.I.I.V. (Infrastrutture viarie del XXI secolo: Classificazione e riqualificazione del patrimonio esistente - Progetto delle nuove vie) – Acireale (CT) – 26/28 Ottobre 2000.
- [5] *Comitato Tecnico A.I.P.C.R. sui tunnel stradali. The first road tunnel* – Atti del XX Congresso Mondiale della Strada – Montreal – 03/09 Settembre 1995.
- [6] *K.W. Ogden - Safer Roads* - Avebury Technical - England – 1996.
- [7] *D. Bellini. L'influenza delle gallerie sulla rete autostradale* – Riv. Le Strade – Marzo 1996.
- [8] *CNR. Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade* – Roma – Gennaio 2001.
- [9] *N. Pacilio, A. Sacripanti. Tunnel intelligenti (Gallerie dinamiche e analisi di rischio variabile nel tempo)* – ENEA – 2001.
- [10] *S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia. Pericolosità in autostrada in relazione alla esecuzione della manovra di sorpasso* - Riv. Strade & Autostrade - Anno IV - N. 3 – Maggio/Giugno 2000.
- [11] *B. Crisman, S. Fonzari, R. Roberti. Studio sperimentale sul comportamento degli utenti in corrispondenza dell'imbocco dei tunnel stradali* - Atti del Convegno S.I.I.V. (La sicurezza stradale: Strategie e strumenti dell'ingegneria delle infrastrutture viarie) – Pisa – 29/30 Ottobre 2000.
- [12] *S. Fonzari. Geometria ottica applicata ai tunnel stradali* – Atti della giornata di studio SIIV: La sicurezza intrinseca delle infrastrutture stradali – Roma – 20/21 Febbraio 1997.
- [13] *P. Carrea. La nuova frontiera della sicurezza in galleria: Obiettivo zero incidenti. La sfida globale "veicolo tunnel intelligenti"* – Riv. Quarry and Construction – N° 7 – Luglio 2001.
- [14] *C. Benedetto, M.R. De Blasiis, A. Benedetto. La verifica degli standard di progetto in funzione dell'informazione visuale* – Riv. Strade e Autostrade – Anno V – N° 4 – Luglio/Agosto 2001.
- [15] *Comitato Tecnico A.I.P.C.R. sui tunnel stradali. Gallerie stradali* – Atti del XXIII Convegno Nazionale Stradale – Verona – 18/21 Maggio 1998.
- [16] *F. Cuaz. La sicurezza nelle gallerie stradali* – Rapporto AISCAT – 3-4/2000.