

SICUREZZA STRADALE E GEOMETRIA VERTICALE DEI TRACCIATI. DEDUZIONE DI UNA CORRELAZIONE TRA TASSI DI INCIDENTALITÀ E PENDENZE LONGITUDINALI DELLE LIVELLETTE

Salvatore Leonardi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università degli Studi di Catania

Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania

Tel: +39.095.7382202 - Fax: +39.095.7382247 - E-mail: sleona@dica.unict.it

SOMMARIO

I risultati di molte ricerche condotte a livello internazionale evidenziano come la geometria verticale influisca significativamente sul grado di sicurezza dei tracciati stradali. Si è visto, in particolare, come le condizioni più gravose si manifestino sui tratti in discesa a causa dell'accentuarsi della velocità di marcia degli utenti. Viceversa, le livellette in salita forniscono contributi pressoché trascurabili al livello di rischio, fino a pendenze dell'ordine del 4%; per pendenze superiori il livello di pericolosità si incrementa, pur non raggiungendo i limiti caratteristici dei tratti in discesa.

In tale contesto, obiettivo del presente studio è quello di valutare razionalmente gli effetti delle pendenze delle livellette sulla variazione dei tassi di incidentalità relativi alle infrastrutture stradali. Per tale analisi, al fine di poter disporre di un campione d'indagine significativo, occorre avere a disposizione dati (sia geometrici che di incidentalità) relativi ad un'infrastruttura di notevole estesa chilometrica.

Il trattamento e l'elaborazione dei dati relativi all'autostrada Salerno - Reggio Calabria (lunga 442 km e con pendenze massime del 6%), hanno consentito di dedurre, in primo luogo, una correlazione attendibile tra sicurezza e condizionamenti indotti dalla geometria verticale e, in secondo luogo, di trovare adeguati riscontri con i risultati di analoghi studi internazionali.

ABSTRACT

The results of many international researches highlight as the vertical geometry significantly affects the degree of safety of the roadway. The heaviest conditions are

shown on the downgrade section because increase the speed of the users.

Contrariwise, the upgrade section almost provide contributions negligible at the risk level, up to slopes of the order of 4%; for upper slopes the dangerousness level is increased. In such context, present study's aim is rationally to evaluate the effects of the slopes on the variation of the accident rates. For such investigation, it is important to have geometrical and accident data concerning an infrastructure of significant length.

The treatment and the elaboration of the data concerning the Salerno-Reggio Calabria highway (long 442 km with maximum slopes of 6%) allow to infer, in the first place, a reliable correlation between safety and vertical geometry and, in the second place, to receive confirmation from analogous international studies' results.

1. INTRODUZIONE

Con la presente memoria, si vuole porre particolare attenzione alle implicazioni, sulla sicurezza stradale, da parte della geometria verticale.

In Italia, le problematiche relative al legame tra sicurezza e geometria verticale sono state finora affrontate, quasi esclusivamente, nei termini della deduzione di tutti quei parametri mirati all'ottimizzazione della visione prospettica dei tracciati (coordinamento piani-altimetrico). In ambito internazionale, invece, molte campagne di ricerca sono state indirizzate, già a partire dagli anni '50, alla valutazione del ruolo assunto dal "profilo longitudinale" nel condizionare il grado di pericolosità delle tronchi in rettilineo.

Raff, a conclusione di un suo studio del 1953 [1], afferma che: "sui tronchi autostradali analizzati, non sembra sussistere alcuna relazione tra pendenza longitudinale e tassi di incidentalità".

Nel 1956 **Bitzel**, riferendosi ad una campagna d'indagine condotta su un campione di autostrade tedesche, arriva a dedurre che si ha un aumento di circa il 40% del tasso di incidentalità per ogni incremento percentuale della pendenza delle livellette (ciò è vero, però, per pendenze inferiori al 6%) [2].

Bowman, in uno studio del 1958 sugli incidenti relativi all'autostrada dell'Ohio, conclude che le livellette in discesa con pendenze inferiori al 3.14% presentano un tasso di incidentalità leggermente superiore alle livellette con pendenze estremamente ridotte, mentre le livellette in salita producono un incremento del tasso di incidentalità (rispetto alla situazione di pendenza quasi nulla) soltanto per pendenze inferiori al 2% [3].

Mullins e Keese, analizzando i diagrammi di collisione relativi a circa 10000 incidenti verificatisi in 54 miglia di autostrade di cinque città del Texas, hanno affermato, nel

1961 che: “il picco del raccordo convesso (cresta) ed il tratto in discesa immediatamente seguente sono caratterizzati dai minimi valori del tasso di incidentalità, mentre il tratto in discesa del raccordo concavo (sacca) è quello che presenta il tasso di incidentalità più elevato” [4].

Hillier e Wardrop, nel 1966, sulla base dei dati provenienti da 55 miglia dell'autostrada Londra-Birmingham, hanno ricavato i Fattori di Variazione degli Incidenti (AMF) riportati nella tabella 1 [5].

Da/A	0.50%	0.75%	1.00%	1.25%	1.50%	1.75%	2.00%
0.50%	1.00	1.02	1.05	1.10	1.16	1.24	1.35
0.75%	0.98	1.00	1.03	1.08	1.14	1.21	1.32
1.00%	0.95	0.97	1.00	1.04	1.10	1.18	1.28
1.25%	0.91	0.93	0.96	1.00	1.06	1.13	1.23
1.50%	0.86	0.88	0.91	0.95	1.00	1.07	1.16
1.75%	0.81	0.82	0.85	0.89	0.93	1.00	1.09
2.00%	0.74	0.76	0.78	0.82	0.86	0.92	1.00

Tabella 1. Fattori di variazione degli incidenti con la pendenza (Hillier e Wardrop)

Dall'analisi dei dati relativi ad una superstrada di Chicago (**Crosstown Associates**, 1968) sono stati dedotti i dati, riportati in tabella 2, relativi a tronchi stradali in rettilineo [6]. In questo caso i tratti in salita hanno un tasso di incidentalità più elevato rispetto ai tronchi a pendenza ridotta.

	<i>Incidenti/Milioni di veicoli * Miglio</i>
Livellente in salita	1.87
Livellente con pendenza $\pm 0.5\%$	1.10
Livellente in discesa	2.49

Tabella 2. Relazione tra incidentalità e pendenza delle livellette (Crosstown Associates)

Una pubblicazione **OECD** del 1976 [7], citando le conclusioni di uno studio di Leisch et al. (1971), evidenzia come la probabilità di incidente sia maggiore in corrispondenza dei punti estremi dei raccordi (sacche e creste).

Recentemente **Hauer** (2000) analizzando criticamente la fonte bibliografica che sta alla base del report OECD, giunge ad una conclusione alquanto differente: mentre i tassi di incidentalità sulle sacche sono più elevati rispetto ai tratti di notevole lunghezza e di pendenza ridotta, lo stesso non si può dire per le creste [8]. Secondo Hauer il rapporto dell'OECD si basa sull'opinione che il tasso di incidentalità sulle creste sia

significativamente più alto del normale. In realtà, a suffragare tale opinione giungono pochissimi studi, ed anzi molti studi autorevoli sembrano screditare tale opinione. Ad esempio Fitzpatrick (1997) trova che i tassi di incidentalità su autostrade extraurbane a due corsie con distanza di visibilità per l'arresto limitata (per la presenza di creste) sono simili ai tassi di incidentalità su tutte le autostrade extraurbane.

Uno studio di **Vostrez e Lundy** del 1964, successivamente revisionato da Leisch et al (1971) e da Roy Jorgensen Associates (1978), riporta i risultati relativi ad una serie di tronchi autostradali in rettilineo della California (Tab. 3) [9].

	Incidenti/Milioni di veicoli * Miglio	
	<i>Veicoli pesanti: 4% - 5%</i>	<i>Veicoli pesanti: 11 %</i>
Tronchi in rettilineo (pianeggianti)	0.84	1.12
Tronchi in rettilineo (in salita)	0.71	1.51
Tronchi in rettilineo (in discesa)	1.07	1.29

Tabella 3. Incidentalità sui rettilinei autostradali della California (Vostrez e Lundy)

Il nuovo fattore introdotto in questo studio è la percentuale di veicoli pesanti. Si evince che, quando la percentuale di veicoli lenti è elevata, anche il tasso di incidentalità sui tronchi in salita tende ad incrementarsi.

Uno studio pubblicato da **Cirillo et al.** nel 1969 introduce, per la prima volta, il concetto che il verificarsi di un incidente stradale è condizionato da molteplici fattori (larghezza della carreggiata, curvatura orizzontale, pendenza longitudinale, distanza di visibilità, ecc.) [10]. Gli autori, tramite l'applicazione di modelli statistici basati sull'analisi multivariabile, hanno ottenuto una correlazione con il tasso di incidentalità secondo cui gli incidenti annui aumentano di 0.01 unità, per ogni 1000 veic/giorno e per ogni incremento percentuale unitario di pendenza.

Dunlap et al. (1978) riferendosi a due autostrade dell'Ohio e della Pennsylvania, hanno trovato che, su entrambe le infrastrutture, il tasso di incidentalità si incrementa con l'aumentare della pendenza dei tratti in discesa [11]. Tuttavia, non c'è alcuna variazione significativa del tasso di incidentalità al variare della pendenza delle livellette in salita.

Risultati analoghi a quelli relativi al precedente rapporto di Dunlap, ma relativi a pendenze più elevate, sono stati ottenuti da alcuni ricercatori inglesi del **Department of Transport** di Londra nel 1993 [12]. Dal diagramma riportato in figura 1, si evince come a valori elevati della pendenza longitudinale corrisponda un incremento del tasso

di incidentalità. In particolare, le condizioni più gravose si manifestano sui tratti a pendenza negativa (in discesa) mentre sui tratti in salita, anche a pendenza notevole (8%), si hanno condizioni di rischio alquanto simili a quelle che si avrebbero in piano.

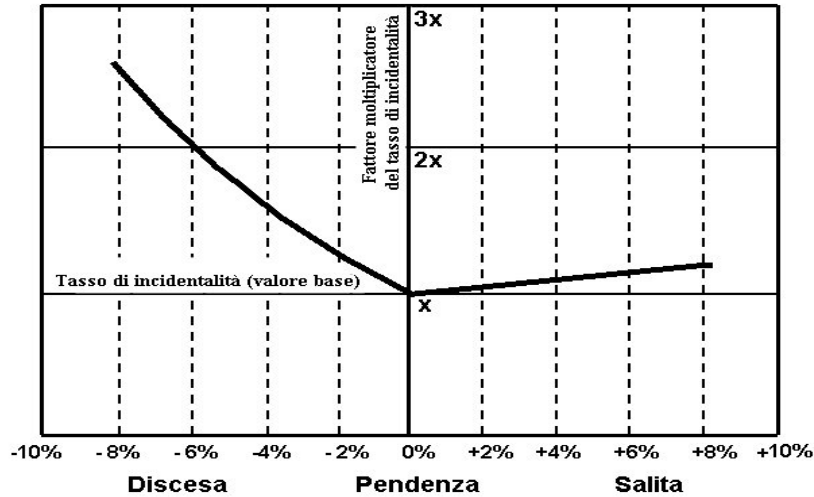


Figura 1. Influenza della pendenza sull'incidentalità (Department of Transport)

Hedman, in una pubblicazione del 1990, cita uno studio di Brüde et al. (1980) in base al quale, passando da livellette quasi orizzontali a pendenze del 2.5% e del 4% si verificano incrementi dei tassi di incidentalità rispettivamente del 10% e del 20% [13].

Li et al. (1994), utilizzando i dati relativi a 560 km del sistema autostradale a due corsie del British Columbia hanno calibrato un modello statistico multivariato per incidenti (mortalità e con feriti) in cui la pendenza longitudinale è una delle variabili [14]. In base a tale modello, la funzione che descrive la variazione dell'incidentalità è la seguente:

$$AMF(\Delta_{\% \text{ pendenza}}) = 1 + 0.136 \cdot \frac{\Delta_{\% \text{ pendenza}}}{\sqrt{\text{incidenti/km}}} \quad (1)$$

Miaou, utilizzando i dati relativi ad 11539 tronchi stradali dello Utah, con riferimento ai soli incidenti a veicolo isolato (numericamente pari a 6680), ha proposto, nel 1995, la seguente correlazione [15]:

$$AMF(\Delta_{\% \text{ pendenza}}) = e^{0.081 \cdot \Delta_{\% \text{ pendenza}}} \approx 1 + 0.081 \cdot \Delta_{\% \text{ pendenza}} \quad (2)$$

In base a tale relazione, una diminuzione di pendenza dell'1% determina una riduzione del numero di incidenti pari all'8.1%.

L'ultimo studio che citiamo è quello pubblicato da **Lamm, Beck e Zumkeller** nel 2000 [16]. Da un'indagine riguardante una serie di autostrade extraurbane a due corsie in Germania (di estesa chilometrica complessivamente pari a 3046 km e con 43390

incidenti in 21 anni non consecutivi compresi tra il 1970 ed il 1995), gli autori sono giunti alle seguenti conclusioni:

- ◆ le pendenze positive comprese tra lo 0% ed il 4% si possono considerare relativamente sicure;
- ◆ le pendenze comprese tra il 4% ed il 6% forniscono un modesto contributo al livello di incidentalità delle infrastrutture stradali;
- ◆ le pendenze longitudinali superiori al 6% evidenziano un significativo incremento del tasso di incidentalità;
- ◆ la percorrenza dei tronchi stradali a pendenza negativa (in discesa) comporta maggiori condizioni di pericolo rispetto alla percorrenza in salita.

Con il presente studio, si vuole fornire un ulteriore tassello per la composizione di quell'ambizioso mosaico che è la conoscenza di come i vari aspetti della geometria di un tracciato contribuiscano, sia singolarmente che globalmente, alla definizione del grado di sicurezza delle infrastrutture stradali. Tramite l'analisi dei dati di incidentalità relativi all'autostrada A3 (Salerno - Reggio Calabria) e lo studio della conformazione plani-altimetrica del tracciato, si arriverà a proporre delle relazioni analitiche in grado di esprimere la correlazione tra i tassi di incidentalità e la pendenza delle livellette associate ai tratti in rettilineo dell'infrastruttura presa in esame.

Si avrà poi modo di trarre considerazioni di validità generale che, per molti aspetti, troveranno importanti riscontri con le conclusioni a cui sono pervenuti gli studiosi di cui si è appena riferito.

2. L'AUTOSTRADA SALERNO-REGGIO CALABRIA: CARATTERISTICHE GEOMETRICHE, DI TRAFFICO E DI INCIDENTALITÀ

L'autostrada Salerno-Reggio Calabria, dell'estesa di 442 km, rappresenta l'unico valido collegamento delle regioni meridionali alla grande rete autostradale italiana ed europea.

Il tracciato, iniziato e completato tra gli anni '60 e '70, interessa l'estremità meridionale della penisola, attraversando catene e massicci appartenenti alla dorsale appenninica e pianure e valli notevolmente difficili dal punto di vista orografico.

Il vertiginoso aumento del traffico, specie di quello pesante, l'intervenuto aggiornamento delle normative hanno riproposto con urgenza, a distanza di un trentennio dalla realizzazione dell'opera, la riqualificazione della stessa al fine di adeguarla al ruolo di saldatura con gli itinerari europei per il tramite di quelli nazionali.

In tale contesto si inquadra la strategia di intervento dell'ANAS che ha provveduto, negli ultimi anni, a porre in sicurezza l'arteria attraverso un rilevante piano manutentorio che ha interessato il piano viabile, le strutture di protezione laterali e centrali, nonché il rinnovo della segnaletica verticale ed orizzontale. Parallelamente è stato predisposto un programma di interventi straordinari di ammodernamento con una radicale razionalizzazione dell'arteria finalizzata al recupero della sicurezza e della scorrevolezza della circolazione.

La scelta della nuova sezione autostradale è stata subordinata ai volumi di traffico effettivamente rilevati ed opportunamente proiettati al 2010 e 2020, attraverso un algoritmo tarato anche sulla scorta dei dati del censimento della popolazione e dei consumi dei carburanti nelle stazioni di servizio in esercizio lungo l'autostrada stessa.

È risultata economicamente ammissibile l'adozione di una terza corsia di marcia, nonché di una di emergenza e di uno spartitraffico centrale di 4.00 m soltanto per l'area salernitana, cioè fra lo svincolo di Salerno e quello per Sicignano per una lunghezza complessiva di circa 53 km, laddove i volumi di traffico sono di circa 30000 veicoli/giorno. Nelle altre aree i volumi si riducono sensibilmente e, pertanto, non si è ritenuta conveniente la previsione della terza corsia, ma soltanto di quella di emergenza e dello spartitraffico centrale di 4.00 m [17].

Le considerazioni svolte fino a questo punto servono anche a far comprendere che, allo stato attuale, l'autostrada Salerno-Reggio Calabria è un enorme cantiere; ciò si traduce, oltre che nei prevedibili disagi per gli utenti, anche nell'impossibilità da parte dello scrivente di procedere ad un'analisi razionale delle possibili correlazioni tra geometria del tracciato e tassi di incidentalità. Tuttavia, anche alla luce degli studi internazionali precedentemente illustrati, facenti riferimento ad indagini su arterie di notevole estesa chilometrica, è parso opportuno fare ugualmente riferimento all'infrastruttura in oggetto la quale, oltre al notevole sviluppo planimetrico, presenta anche una conformazione altimetrica (con livellette che raggiungono pendenze del 6%) che ben si presta ad affrontare le problematiche inerenti alla correlazione tra sicurezza dei tracciati e geometria verticale. Al fine di poter portare avanti la ricerca, si è fatto riferimento ad un periodo d'indagine in cui l'infrastruttura in esame presentava pressoché invariata la sua conformazione originaria, e per il quale risultavano acquisibili i dati particolareggiati inerenti alla distribuzione degli incidenti lungo tutto il tracciato.

Grazie ad uno studio condotto dall'Ente ANAS, è stato possibile analizzare il panorama incidentale dell'autostrada A3 per il decennio 1986-1995; per il triennio 1993-1995 si è

poi avuta la possibilità di accedere ai dati relativi alla corretta ubicazione degli incidenti lungo tutta l'estesa chilometrica.

Proprio le informazioni sugli incidenti verificatisi nel triennio '93-'95 costituiscono la base statistica di riferimento per il presente studio.

Con riferimento al periodo d'analisi, la conformazione geometrica dell'infrastruttura prevedeva una sezione tipo composta da due carreggiate di due corsie da 3.75 m, separate da uno spartitraffico centrale di 1.10 m, e da due banchine laterali di 1.50 m, per una larghezza totale della piattaforma di 19.10 m.

Tale organizzazione della sezione non è prevista né dall'attuale legislazione, né dalla precedente normativa del CNR. Lo standard che più si avvicina è quello del III tipo delle norme CNR 78/80, che prevede un intervallo di velocità di progetto $80 \div 100$ km/h. Le altre caratteristiche plano-altimetriche sono di seguito sintetizzate:

- raggio di curvatura planimetrico minimo: 300 m (in qualche caso 200 m e 250 m);
- raggio minimo dei raccordi verticali concavi: 6000 m;
- raggio minimo dei raccordi verticali convessi: 10000 m.

Riguardo ai dati di traffico viene rappresentato, in figura 2, un diagramma relativo ai flussi complessivamente interessanti l'infrastruttura. In particolare, si riportano i flussi cumulati nel triennio di riferimento, per una serie di tratte omogenee dal punto di vista delle condizioni di deflusso ed identificate dagli estremi delle relative progressive chilometriche.

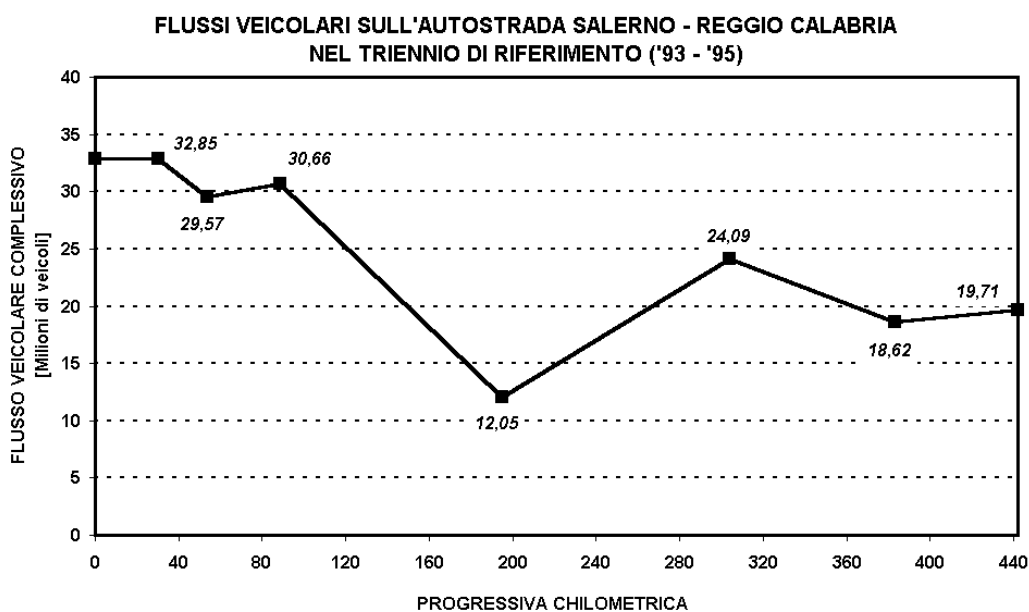


Figura 2. Flussi veicolari nel triennio 93-95 (Autostrada Salerno – Reggio Calabria)

Per quel che concerne poi il livello di sicurezza dell'infrastruttura in oggetto, si può osservare che la serie storica degli incidenti, nei dieci anni che vanno dal 1986 al 1995, mette in evidenza un andamento crescente fino al 1990, anno in cui si tocca il picco con 1676 eventi, con una repentina contrazione a partire dal 1991. In pratica, nel secondo quinquennio (1991-1995) il numero degli incidenti si è più che dimezzato, rispetto al primo quinquennio (1986-90) (Fig. 3).

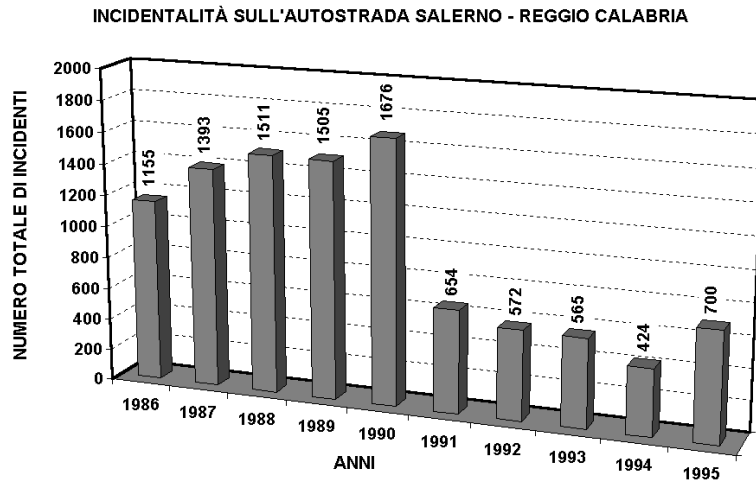


Figura 3. Andamento dell'incidentalità sull'autostrada Salerno – Reggio Calabria

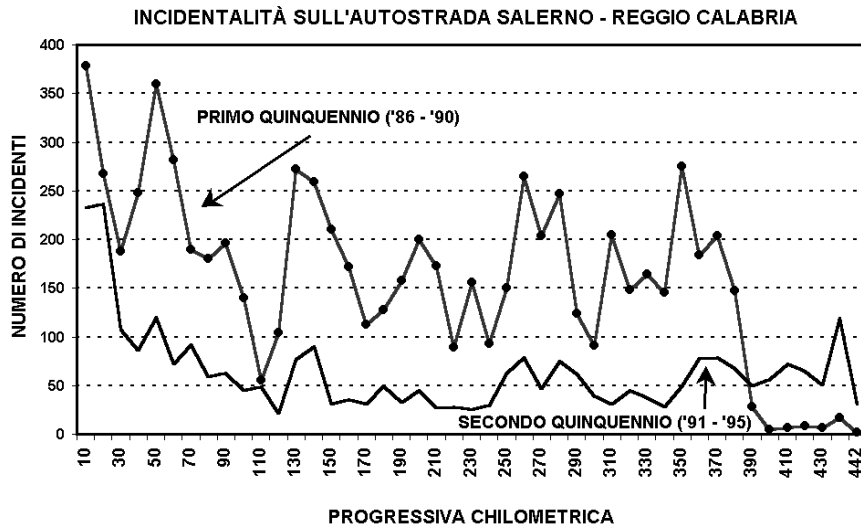


Figura 4. Incidentalità sulla Salerno-Reggio Calabria nei due quinquenni di riferimento

Questa riduzione è riscontrabile ovunque con la mancata eccezione dell'ultima tratta (dal km 380 al km 440), dove si è verificato, un incremento di tipo esponenziale fra il primo ed il secondo quinquennio (Fig. 4).

Il tratto maggiormente critico è quello fra il km 430 e il 440, dove si è passati dai 17 incidenti del primo quinquennio ai ben 119 del secondo quinquennio, che corrispondono in assoluto ai valori incidentali di un'autostrada urbana. Molto probabilmente i riflessi delle problematiche di attraversamento dello Stretto di Messina non sono influenti sulle condizioni di incidentalità dell'ultima tratta.

Quasi specularmente, i più alti valori di incidentalità si trovano nella prima tratta dal km 0 al km 50, con il picco di ben 611 incidenti, in dieci anni, nei primi 10 chilometri.

3. TRATTAMENTO E ANALISI DEI DATI

Al fine di procedere in maniera razionale al trattamento dei dati di incidentalità relativi al triennio 93-95, si è eseguito, in primo luogo, un duplice filtraggio dei dati, ovvero:

- 1) si sono "collocati" gli incidenti lungo lo sviluppo complessivo del tracciato, distinguendo le due direzioni di marcia;
- 2) si sono selezionati i dati di incidentalità relativi ai tronchi in rettilineo.

La tabella 4 sintetizza le informazioni ricavate da questa prima analisi.

Tratte omogenee	Progressive chilometriche	Direzione SA - RC			Direzione RC - SA			Incidenti totali
		Incidenti in rettilineo	Incidenti in curva	Incidenti totali	Incidenti in rettilineo	Incidenti in curva	Incidenti totali	
1	30.200	153	71	224	78	55	133	357
2	53.879	73	23	96	36	26	62	158
3	88.530	32	19	51	60	34	94	145
4	195.000	72	52	124	112	68	180	304
5	304.000	108	63	171	71	51	122	293
6	383.200	86	51	137	55	34	89	226
7	442.000	56	40	96	66	44	110	206
Totali		580	319	899	478	312	790	1689

Tabella 4. Dati di incidentalità relativi all'autostrada Salerno-Reggio Calabria

Si ribadisce che la suddivisione dell'itinerario in 7 tratte omogenee è stata eseguita in funzione del flusso veicolare; a tal proposito, si precisa che, non avendo a disposizione l'esatta suddivisione delle portate veicolari nelle due direzioni di marcia, nel seguito si farà riferimento ad un flusso, per ogni tratta, equamente distribuito nelle due direzioni di percorrenza. In definitiva, al termine di questa prima fase di trattamento dei dati, si giunge con una mole di dati ridotta di circa il 37% rispetto a quella di partenza: gli incidenti "utili" per l'analisi, ossia quelli accaduti nei tratti in rettilineo, sono 1058 (580 nella direttrice SA-RC, 478 nella direzione opposta) a fronte dei 1689 iniziali.

Il passo successivo è stato quello di associare ogni incidente verificatosi in rettilo al valore di pendenza longitudinale (positiva in salita e negativa in discesa, secondo la notazione tradizionale) relativo alla livelletta corrispondente. In particolare, per ogni tratta omogenea, si è adottato il criterio di analizzare congiuntamente le informazioni provenienti dalla planimetria e dal profilo altimetrico; qualora l'incidente era localizzato in corrispondenza o in prossimità di un raccordo verticale, si è scelto di attribuirlo ad una delle due livellette raccordate, in funzione dell'effettiva localizzazione plani-altimetrica dell'incidente stesso.

A titolo d'esempio, nelle figure 5 e 6 sono rappresentate, per ognuna delle direzioni di marcia, le distribuzioni degli incidenti in rettilo per una delle tratte omogenee in cui è stata frazionata l'autostrada A3 (quella compresa tra il chilometro 30.20 ed il chilometro 53.879).

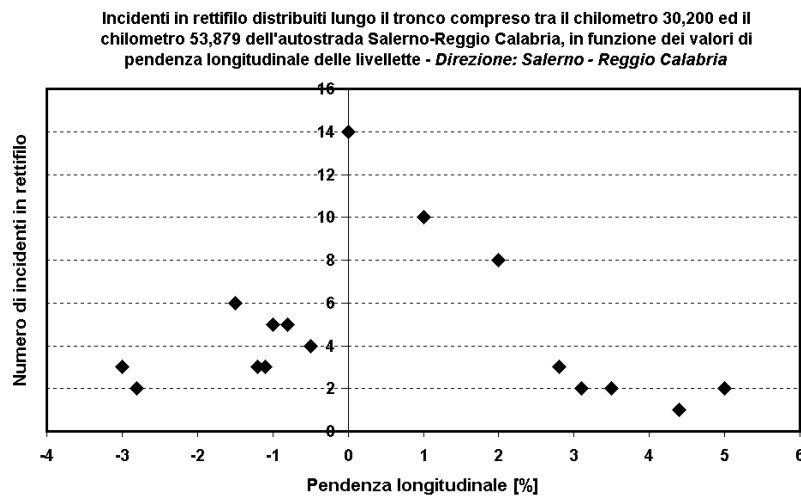


Figura 5. Incidenti in rettilo tra il km 30.200 e il km 53.879. Direzione SA - RC

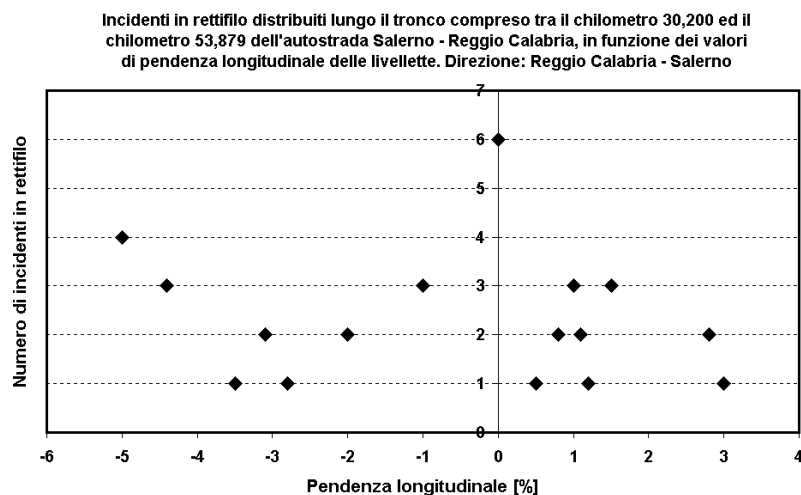


Figura 6. Incidenti in rettilo tra il km 30.200 e il km 53.879. Direzione RC - SA

La terza fase del trattamento dei dati consiste nella scelta di una procedura adeguata a collegare ad ogni valore della pendenza longitudinale un unico tasso di incidentalità. A tal fine, si è adottato il seguente iter procedurale:

- Si sono calcolati i tassi di incidentalità associati ad ogni valore della pendenza longitudinale. Tale valutazione è stata eseguita rapportando il numero di incidenti verificatisi, durante il triennio 1993/1995, nel tratto di rettilineo caratterizzato da un dato valore della pendenza con l'estesa chilometrica del tratto stesso e con il flusso veicolare circolante lungo la tratta nel medesimo periodo di riferimento. In definitiva, il tasso di incidentalità (TI) relativo ad un certo valore della pendenza longitudinale ($p\%$) è dato dalla seguente relazione:

$$TI_{p\%} = \frac{N_R}{Q \cdot L_R} \left[\frac{\text{Incidenti}}{\text{Milioni di veicoli} \cdot \text{km}} \right] \quad (3)$$

dove:

- N_R = numero di incidenti, in rettilineo, verificatisi nel tratto a pendenza assegnata, durante il periodo d'analisi;
- Q = flusso veicolare sul tratto considerato, nel triennio di riferimento [milioni di veicoli];
- L_R = lunghezza del tratto in rettilineo [km].

Al termine di questa fase, ci si è ritrovati con ben 693 valori del tasso di incidentalità. Infatti, poiché la valutazione del TI è stata effettuata indipendentemente per ognuna delle tratte omogenee, al termine delle varie elaborazioni, si sono inevitabilmente ottenuti diversi valori del tasso di incidentalità associati allo stesso valore della pendenza longitudinale.

- Si è proceduto ad un accorpamento dei dati ottenuti al punto precedente, in modo tale che ad ogni valore della pendenza longitudinale corrispondesse un solo valore del tasso di incidentalità.

L'approccio più semplice per la risoluzione del problema poteva essere quella di far riferimento, per ogni valore della pendenza, alla media aritmetica dei TI corrispondenti. Si è però scelto di adottare un criterio che, seppur più articolato, risulta statisticamente più affidabile. In pratica si è voluto tenere presente un concetto essenziale della statistica, e cioè che un valore medio, comunque calcolato, non è sufficiente a rappresentare l'insieme delle osservazioni effettuate (o l'insieme dei valori assunti dalla variabile statistica); è necessario quindi affiancare ad esso altri indici che siano in grado di fornire delle informazioni sulla dispersione, in

pratica sulla distanza delle varie osservazioni dal valore medio che rappresenta il centro della distribuzione. Occorre pertanto considerare gli scarti dei valori (x_i) dalla media aritmetica (M), ossia le differenze $x_i - M$. Per valutare la maggiore o minore dispersione dei valori dalla media aritmetica, si cerca un valore medio degli scarti. Sappiamo che la media aritmetica degli scarti è zero e pertanto non è significativa. Uno degli indici più utilizzato è lo scarto quadratico medio, ovvero la media quadratica, semplice o ponderata, degli scarti dei valori dalla media aritmetica. Lo scarto quadratico medio (σ) nella sua formulazione generale assume l'espressione di seguito riportata:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n}} \quad (4)$$

dove n è il numero complessivo dei valori assunti dalla variabile [18].

Nello specifico si è agito, valutando per ognuno dei 111 valori delle pendenze longitudinali globalmente presenti sull'autostrada Salerno-Reggio Calabria (tante infatti sono le pendenze comprese tra -6% e $+6\%$), il valore medio (TMI) del tasso di incidentalità ed il corrispondente valore dello scarto quadratico medio (σ_{TMI}).

Successivamente sono stati calcolati i due seguenti parametri di riferimento:

➤ $TMI + \sigma_{TMI}$ e $TMI - \sigma_{TMI}$

Tali parametri, congiuntamente, definiscono il range di significatività prescelto per la variabile analizzata (ossia il tasso di incidentalità). Ciò vuol dire che quei valori del tasso di incidentalità che si discostano ampiamente dall'intervallo ($TMI - \sigma_{TMI}$, $TMI + \sigma_{TMI}$) non vengono considerati significativi e vengono conseguentemente scartati dall'analisi statistica.

Consideriamo ad esempio, il caso dei valori di TI associati alla pendenza longitudinale del 4%. Come si può facilmente dedurre dall'istogramma di figura 7, dei 26 valori di TI ce ne sono 5 (quelli contrassegnati dai numeri 1, 10, 15, 20 e 23) che si scostano palesemente dall'intervallo di significatività (in questo caso: $TMI = 0.27$, $\sigma_{TMI} = 0.08$). I 5 valori suddetti sono stati pertanto scartati e, come verifica, è stata eseguita nuovamente l'analisi statistica dei 21 dati rimasti (Fig. 8). Si può notare come il range di significatività si sia notevolmente ridotto d'ampiezza ($TMI = 0.28$, $\sigma_{TMI} = 0.02$). Anche in questo caso ci sono 2 valori (contrassegnati dai numeri 4 e 5) che cadono al di fuori dell'intervallo di riferimento; tuttavia essi non

vengono esclusi dall'analisi in quanto, "provenendo" da un filtraggio che ha ridotto drasticamente il valore dello scarto quadratico medio, non influiscono significativamente sul valore finale del tasso medio di incidentalità di riferimento (TMI_R) che, per la pendenza del 4%, rimane fissato pari a 0.28.

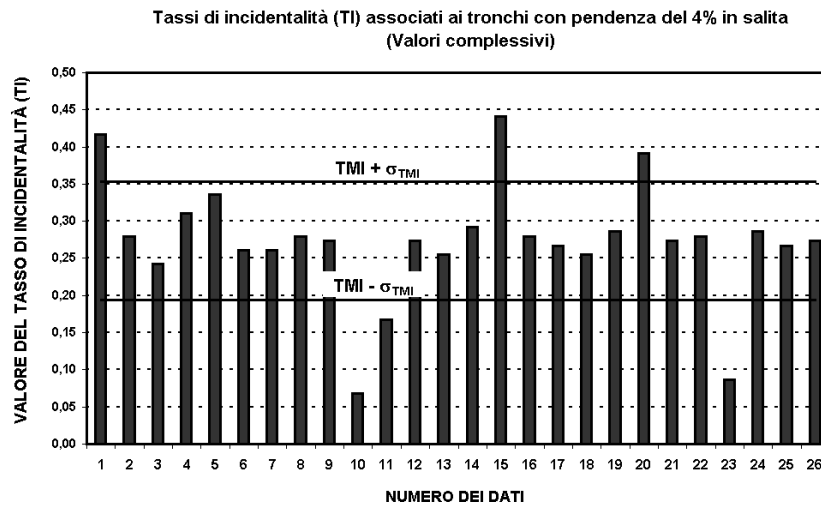


Figura 7. Analisi statistica dei tassi di incidentalità ($p = 4\%$). Dati globali

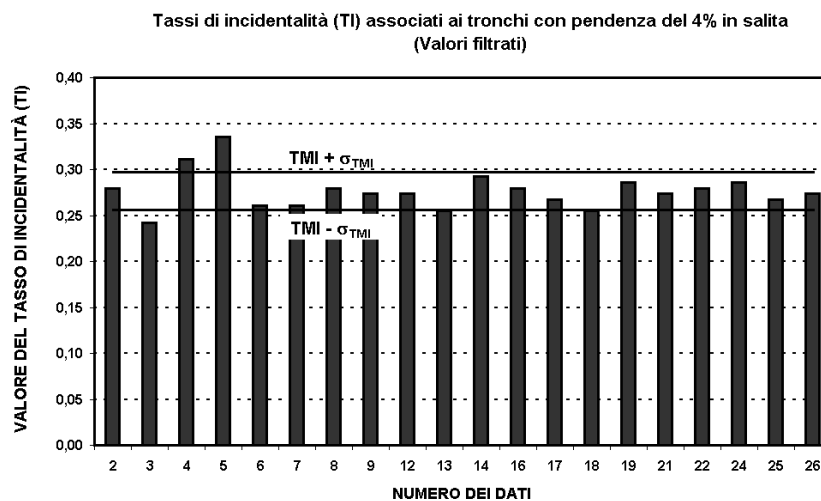


Figura 8. Analisi statistica dei tassi di incidentalità ($p = 4\%$). Dati filtrati

Sempre a titolo d'esempio si riportano, nelle figure 9 e 10, i risultati dell'indagine statistica condotta sui tassi di incidentalità relativi alla pendenza del -4% . Analogamente al caso precedente vengono scartati 5 valori di TI (indicati con i numeri 6, 8, 13, 17 e 21). Si passa dalla situazione iniziale in cui $TMI = 0.81$ e $\sigma_{TMI} = 0.46$ a quella finale caratterizzata da $TMI = 0.74$ e $\sigma_{TMI} = 0.06$. In definitiva, per la pendenza pari a -4% , si ha: $TMI_R = 0.74$.

Alla luce dei risultati dedotti complessivamente dall'analisi dei dati, si ha la conferma di come il “filtraggio” dei dati di incidentalità, effettuato con il criterio appena esposto, risulti particolarmente utile ed affidabile per individuare i dati veramente significativi per l'indagine statistica. In effetti, tramite il semplice confronto con l'intervallo di significatività avente per estremi i valori medi del tasso di incidentalità rispettivamente decrementati ed incrementati del valore dello scarto quadratico medio, è possibile determinare immediatamente quelle situazioni anomale in termini di incidentalità. Si riesce subito, cioè, ad identificare quei casi che, per il sussistere di condizioni influenti in maniera specifica sul grado di sicurezza del tracciato, sono caratterizzati da tassi di incidentalità che si discostano palesemente (frequentemente in eccesso) dal range di significatività compiutamente definito dallo scarto quadratico medio.

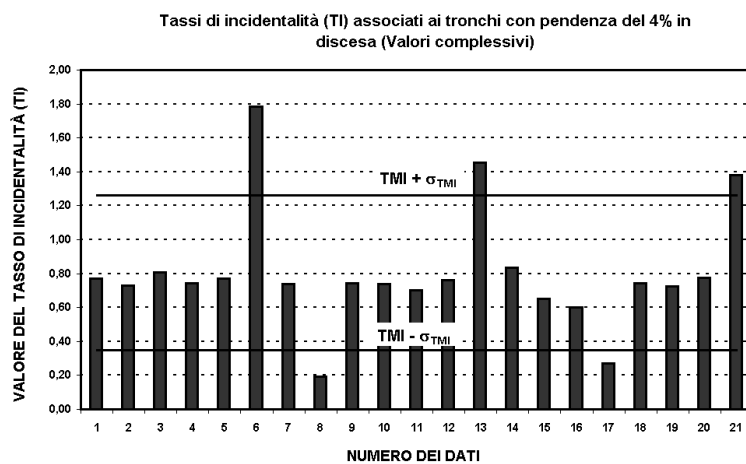


Figura 9. Analisi statistica dei tassi di incidentalità ($p = -4\%$). Dati globali

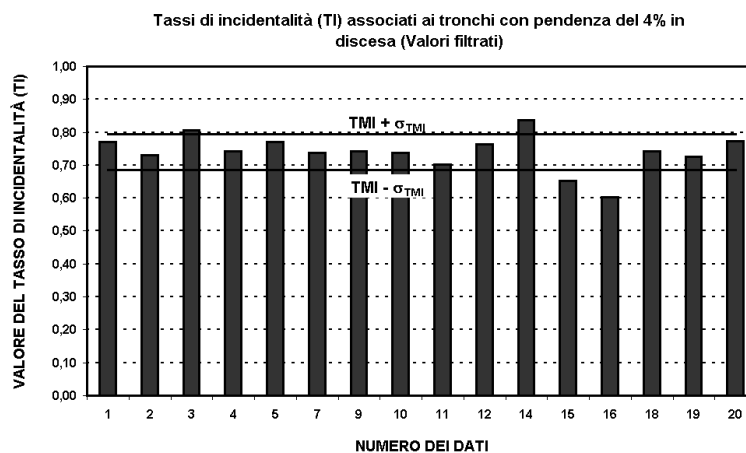


Figura 10. Analisi statistica dei tassi di incidentalità ($p = -4\%$). Dati filtrati

- Si sono graficizzati i tassi medi di incidentalità di riferimento in funzione dei valori delle pendenze delle livellette (Fig. 11).

Nel diagramma di figura 11 sono riportate anche le linee di regressione (polinomiali di secondo grado) che approssimano l'andamento dei dati ottenuti tramite la procedura descritta fino a questo punto. Tali curve, distinte per le due situazioni possibili (livellette in discesa e in salita), hanno le seguenti espressioni:

$$TI_D = 0.0347 \cdot p^2 + 0.0333 \cdot p + 0.338 \quad (5)$$

$$TI_S = 0.0176 \cdot p^2 - 0.0756 \cdot p + 0.3396 \quad (6)$$

dove:

- TI_D = Tasso di incidentalità per livellette in discesa [inc/milioni di veicoli x km];
- TI_S = Tasso di incidentalità per livellette in salita [inc/milioni di veicoli x km];
- p = pendenza della livelletta [%].

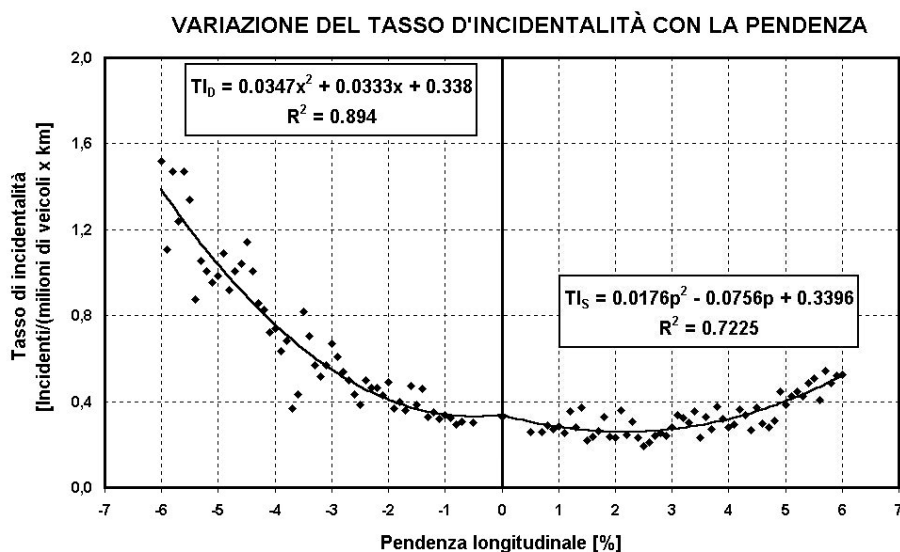


Figura 11. Relazione tra la pendenza delle livellette ed il tasso di incidentalità

- Si è proceduto, infine, ad una omogeneizzazione dei dati ottenuti finalizzata ad una semplice individuazione dei diversi livelli di pericolosità che competono alle differenti conformazioni altimetriche delle livellette. In pratica, si è agito rapportando i vari valori dei tassi di incidentalità, valutati in base alle equazioni (5) e (6), al valore che compete alla situazione di livelletta in piano ($p=0\%$). Una volta attribuito alle livellette in piano il livello di pericolosità di riferimento (livello x), è risultata automatica la deduzione del grado di pericolosità associato alle tratte a

diversa pendenza. In definitiva, si sono ottenuti i Fattori di Variazione degli Incidenti (AMF) in funzione dei valori di pendenza che possono essere assunti dalle livellette.

Il diagramma di figura 12, fornisce una rappresentazione sintetica ed efficace dei livelli di pericolosità connessi alle differenti livellette.

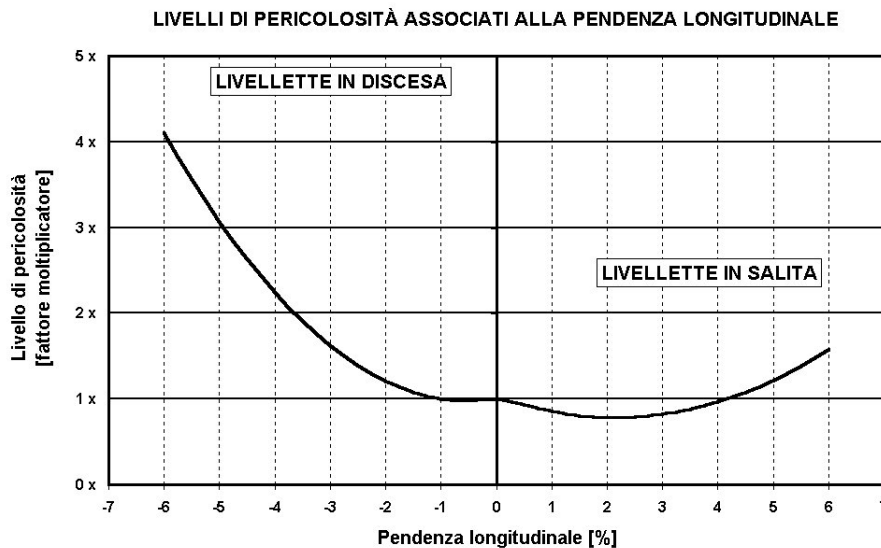


Figura 12. Livelli di pericolosità in funzione della pendenza delle livellette

Ad esempio, la variazione di pendenza dall'1% al 2% in discesa, comporta un valore di AMF pari ad 1.21, ovvero un incremento di pericolosità di circa il 20%; viceversa, passare da una pendenza dell'1% ad una del 2% in salita, implica la quasi stazionarietà del grado di pericolosità (infatti $AMF = 0.92$).

A conclusione del presente paragrafo, è opportuno svolgere alcune considerazioni sui risultati ottenuti. Occorre innanzitutto notare che, a conferma delle conclusioni cui sono pervenuti molti degli studi internazionali sintetizzati all'inizio della presente memoria, anche le correlazioni tra incidentalità e pendenze longitudinali relative ai 442 km di sviluppo dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria evidenziano non solo la maggiore pericolosità dei tratti in discesa rispetto a quelli in salita, ma anche la scarsa variabilità delle condizioni di rischio associate alle tratte a pendenza positiva. In particolare si può osservare che:

- nel caso di livellette in salita, il livello di pericolosità si mantiene pressoché costante per valori di pendenza inferiori al 4%; il grado di rischio si incrementa poi gradualmente fino a toccare un massimo per $p=6\%$ in corrispondenza del quale

l'incremento della pericolosità, rispetto alla conformazione altimetrica pianeggiante, è pari circa al 50%;

- nel caso di livellette in discesa, il grado di pericolosità risulta significativamente variabile già a partire da pendenze superiori all'1%; in base alle correlazioni dedotte, si può arrivare ad un livello di rischio pari a circa 4 volte quello associato alle livellette a pendenza nulla;

4. CONCLUSIONI

Con il presente contributo si è voluto porre l'accento sulle questioni inerenti alle implicazioni, sulla sicurezza stradale, da parte della geometria verticale dei tracciati.

Si sono inizialmente sintetizzati i risultati dei principali studi internazionali che, dal 1953 ad oggi, hanno avuto come oggetto la problematica che si sta affrontando. In particolare, si è notato come gran parte di tali studi, pur portando a correlazioni analitiche alquanto differenti, siano concordi nell'individuare i tratti in discesa come quelli più pericolosi, già a partire da pendenze relativamente modeste. Viceversa, per i tratti in salita, i tassi di incidentalità variano in maniera significativa solo per pendenze superiori al 5%.

Dopo aver analizzato le caratteristiche complessive (geometria, flussi veicolari, serie storica degli incidenti) dell'autostrada Salerno-Reggio Calabria ed averne chiarito le motivazioni che ne hanno fatto l'infrastruttura di riferimento per il presente studio, si è descritta la procedura adottata per il trattamento dei dati e per la loro elaborazione.

Il risultato finale si è tradotto nella proposta di due relazioni analitiche in grado di permettere la valutazione della variabilità dei tassi di incidentalità (espressi in incidenti/milioni di veicoli x km) in funzione della variazione della pendenza longitudinale (espressa in percentuale) nelle due configurazioni altimetriche possibili (salita e discesa) associate ai tratti in rettilineo del tracciato. La generalizzazione dei risultati ottenuti ha permesso di ribadire la maggiore pericolosità dei tratti in discesa rispetto a quelli in salita.

A tal proposito, si sottolinea che, tra gli obiettivi futuri dello scrivente e degli altri collaboratori all'attività di ricerca, c'è quello di approfondire meglio le questioni legate alla pericolosità dei tratti in discesa. Infatti, l'aver ricavato, per le livellette con pendenza pari a -6%, un livello di pericolosità circa 4 volte maggiore di quello attribuito alle tratte a pendenza nulla, induce a ricercare ulteriori conferme in merito, non fosse altro per il fatto che, in letteratura, si trovano risultati notevolmente

contrastanti tra loro; si passa, ad esempio, dall'affermazione in base alla quale, già con pendenze in discesa del 2%, si manifesta un incremento del tasso di incidentalità (sempre rispetto alla configurazione piana) del 200-250%, all'affermazione, maggiormente "cautelativa", in base a cui, in corrispondenza della pendenza del -6%, si ha il "semplice" raddoppio del livello di pericolosità.

In tale contesto, risulterà senz'altro utile prendere in esame altre infrastrutture stradali per le quali risultino fruibili i dati indispensabili per procedere ad un'indagine analoga a quella svolta. L'analisi di ulteriori infrastrutture consentirà, inoltre, di verificare la validità delle correlazioni sperimentali dedotte per la Salerno-Reggio Calabria, e di apportare eventuali affinamenti e/o modifiche finalizzate all'ottenimento di un modello previsionale dell'incidentalità quanto più rappresentativo possibile della "situazione italiana".

Altre questioni meritevoli di ulteriori studi e di successivi approfondimenti, sono, infine, quelle inerenti ad almeno tre differenti problematiche:

- i condizionamenti indotti dalla presenza dei raccordi verticali e dalla loro conformazione geometrica (raggi di curvatura);
- gli effetti, sempre sulla sicurezza della circolazione, dei tratti planimetrici curvilinei (sia circolari che di transizione) associati alle livellette caratterizzate da differenti valori della pendenza longitudinale;
- il ruolo, sicuramente importante, dei mezzi pesanti (sia come tipologia che come percentuale sul flusso complessivo) nell'influenzare le caratteristiche di pericolosità dei tracciati, in relazione alle possibili configurazioni altimetriche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. S. Raff. *Interstate highway-accident study*. Highway Research Board Bulletin 74. Traffic Accident Studies Washington D.C. 1953.
- [2] I. F. Bitzel. *Effect of motorway design on accidents in Germany*. Highways and Bridges and Engineering Works, Vol.24, N°1161. 1956.
- [3] B. H. Bowman. *Ohio turnpike accident study*. Traffic Engineering, Vol. 28, N°. 9. 1958.
- [4] B. F. K. Mullins, C. J. Keese. *Freeway traffic accident analysis and safety study*. Highway Research Board Bulletin 291. 1961.
- [5] J. A. Hillier, J. G. Wardrop. *Effect of gradient and curvature on accidents on London-Birmingham motorway*. Traffic Engineering & Control. 1966.

- [6] Crosstown Associates. *Correlation of accident rates and highway geometric features*. Draft. 1968.
- [7] Organisation for Economic Cooperation and Development. *Hazardous Road Locations: Identification and Countermeasures*. Paris, 1976.
- [8] E. Hauer. *Road Grade and Safety*. Review of literature for the interactive highway. Safety design model. 2000 (Sito web: members.rogers.com/hauer).
- [9] J. Vostrez, R. A. Lundy. *Comparative freeway study A-IV-1*. State of California. Division of Highways. 1964.
- [10] J. A. Cirillo, S. K. Dietz, R. L. Beatty. *Analysis and modelling of relationships between accidents and the geometric and traffic characteristics of the interstate system*. Bureau of Public Roads. 1969.
- [11] D. F. Dunlap, P.S. Fancher, R. E. Scott, C. C. MacAdam, L. Segel. *Influence of combined highway grade and horizontal alignment on skidding*. National Cooperative Highway Research Program Report 194, Transportation Research Board, Washington, 1978.
- [12] Department of Transport. *Design Manual for Road and Bridges - Road Geometry - Links - Part 1*. TD 9/93. Highway Link Design. England, 1993.
- [13] K. O. Hedman. *Road design and safety*. VTI Rapport 351A. Swedish Road and Traffic Research Institute. Linköping (Sweden), 1990.
- [14] J. Li, W. Abdelwahad, G. Brown. *Joint effect of access and geometry on two-lane rural highway safety in British Columbia*. Canadian Journal of Civil Engineering, XXI (vi). 1994.
- [15] S. P. Miaou. *Development of adjustment factors for single vehicle run-off-the-road accident rates by horizontal curvature and grade*. Oak Ridge National Laboratory. Draft. August 3 -1995.
- [16] R. Lamm, A. Beck, K. Zumkeller. *Analysis and evaluation of interrelationships between traffic safety and highway geometric design on two-lane rural roads*. 2nd International Symposium on Highway Geometric Design by Transportation Research Board (TRB). Mainz (Germany), 14/17 June 2000.
- [17] ANAS (Ente Nazionale per le Strade). *Grandi interventi: l'autostrada Salerno – Reggio Calabria*. Sito web: <http://www.enteanas.it>.
- [18] G. Cicchitelli. *Probabilità e Statistica*. Maggioli Editore. Collana Università. Rimini, 2001.