

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II**



Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici,  
di Trasporto e Territoriali

**XXVII CICLO**

**Funzioni di Prestazione della Sicurezza per la Stima  
della Severità degli Incidenti Stradali**

Mariarosaria Busiello

Relatore  
Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua

Controrelatore  
Prof. Ing. Francesca Russo



## Indice

<b>Capitolo 1 - Gli sviluppi in campo nazionale e internazionale .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introduzione..... 1
1.2	L'approccio europeo .....3
1.3	Le politiche adottate in Italia .....7
1.4	Organizzazione della Ricerca.....10
<b>Capitolo 2 - Stato dell'arte .....</b>	<b>12</b>
2.1	La misura della sicurezza stradale.....12
2.2	Modellazione statistica della sicurezza stradale.....15
2.2.1	Modelli Lineari Generalizzati ..... 16
2.2.1.1	Modello di Poisson ..... 17
2.2.1.2	Modello Binomiale Negativo ..... 18
2.2.1.3	Modelli Zero-Inflated ..... 19
2.2.2	Equazioni di Stima Generalizzate (GEE) ..... 19
2.2.3	Metodo Bayesiano Empirico ..... 21
2.3	Modeling Operating Speed .....23
2.4	The Highway Safety Manual .....26
2.5	Modelli proposti per lo studio della severità di incidente.....31
<b>Capitolo 3 - Calibrazione di Funzioni di Prestazione della Sicurezza per la previsione della lesività degli incidenti .....</b>	<b>34</b>
3.1	Premessa.....34
3.2	Rete di studio.....44
3.3	Calibrazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti.....55
3.3.1	FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in condizioni base..... 55
3.3.2	FPS per la frequenza media annua dei feriti in altre condizioni geometriche ..... 56
3.3.2.1	Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI <sub>l</sub> ) ..... 57
3.3.2.2	Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI <sub>p</sub> )..... 61
3.3.3	Coefficiente di calibrazione della FPS ..... 62
3.4	Calibrazione di FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti.....63
3.4.1	FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base.....63
3.4.2	FPS ad hoc per la frequenza media annua dei feriti e dei morti in altre condizioni geometriche..... 65
3.4.2.1	Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI <sub>l</sub> ) ..... 66
3.4.2.2	Fattore di Modifica degli Incidenti per il grado di scorrevolezza (FMI <sub>Gs</sub> )..... 68
3.4.2.3	Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI <sub>p</sub> )..... 72
3.4.3	Coefficiente di calibrazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti..... 75

3.5	Calibrazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati .....	77
3.5.1	FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di incidentati in condizioni base .....	77
3.5.2	FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di incidentati in altre condizioni geometriche .....	78
3.5.2.1	Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI <sub>l</sub> ) .....	79
3.5.2.2	Fattore di Modifica degli Incidenti per il grado di scorrevolezza (FMI <sub>G<sub>s</sub></sub> ) .....	80
3.5.2.3	Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI <sub>p</sub> ) .....	83
3.5.3	Coefficiente di calibrazione della FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati .....	85
3.6	Calibrazione di FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti attraverso il modello unico per gli incidentati .....	86
3.6.1	FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base .....	86
3.6.2	Coefficienti di calibrazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti .....	88
3.7	Analisi della varianza .....	90
3.7.1	Test di Levene non parametrico .....	91
3.7.2	Test di Kruskal-Wallis .....	92

***Capitolo 4 - Validazione delle Funzioni di Prestazione della Sicurezza per la previsione della lesività degli incidenti .....*** 95

4.1	Rete di validazione .....	95
4.2	Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti .....	99
4.2.1	Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in condizioni base .....	99
4.2.2	Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in altre condizioni geometriche .....	100
4.3	Validazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti .....	103
4.3.2	Validazione delle FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base .....	103
4.3.3	Validazione delle FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in altre condizioni geometriche .....	105
4.4	Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati .....	108
4.4.1	Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di incidentati in condizioni base .....	108
4.4.2	Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di incidentati in altre condizioni geometriche .....	109
4.5	Validazione di FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti attraverso il modello unico per gli incidentati .....	111
4.5.1	Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base .....	111

4.5.2	Validazione delle FPS per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in altre condizioni geometriche .....	114
<b>Capitolo 5 - Conclusioni e Sviluppi futuri.....</b>		<b>117</b>
5.1	Conclusioni .....	117
5.2	Sviluppi Futuri.....	119
5.2.1	Analisi preliminare della dinamica di incidente .....	119
5.2.2	Geometria del tracciato .....	121
<b>Bibliografia.....</b>		<b>124</b>
<b>APPENDICE .....</b>		<b>132</b>
	Funzione di distribuzione Chi-Quadrato con $\nu$ gradi di libertà .....	133
	Valori critici del test di Kruskal -Wallis.....	134



## *Ringraziamenti*

*Alla fine di questo percorso di studi desidero ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine e senza le quali non sarebbe stato possibile realizzare questo lavoro di tesi.*

*Desidero ringraziare il professor Gianluca Dell'Acqua per avermi concesso questa importante opportunità di studio, per avermi trasmesso la metodologia di lavoro e la capacità di affrontare problematiche diverse e per essersi sempre prodigato a far sì che potessi fare esperienze costruttive e utili alla mia crescita come dottore di ricerca.*

*Ringrazio la professoressa Francesca Russo per aver investito la sua conoscenza e il suo tempo in interessanti confronti e importanti contributi sull'intero lavoro svolto.*

*Ringrazio quanti mi sono stati vicino in ogni momento del mio percorso di studi, non sempre privo di ostacoli, offrendomi tutto il loro supporto e sostegno morale.*

*Mariarosaria*



# Capitolo 1 ~ Gli sviluppi in campo nazionale e internazionale

## 1.1 Introduzione

Il concetto di sicurezza stradale è strettamente legato al numero di incidenti o di persone coinvolte, registrati durante un arco temporale di riferimento. Per affrontare le numerose problematiche che lo studio della sicurezza stradale comporta, occorre fare distinzione tra due diversi concetti:

- sicurezza stradale (road safety), cioè una misura quanto più oggettiva possibile della sicurezza;
- sicurezza, o senso di sicurezza, dell'utente (security), cioè la sensazione soggettiva di quanto un utente si senta sicuro su una determinata strada.

Gli interventi tesi a ridurre l'incidentalità presuppongono la conoscenza delle cause che la producono ma rilevare questi dati è un processo molto complesso; bisogna considerare, infatti, che gli incidenti, ancorché numerosi in senso assoluto, sono degli eventi rari se commisurati ai milioni di veicoli che ogni giorno percorrono le strade; le situazioni di pericolo che si verificano durante gli spostamenti sono ben più numerose e, per fortuna, solo raramente si trasformano in un incidente. Il requisito basilare per un'analisi dettagliata dell'evento "incidente" è la conoscenza minuziosa di tutto ciò che ha generato il sinistro, ossia dell'insieme delle componenti infrastrutturali, ambientali e di traffico che si sono presentate in quell'istante, e di cui si dispongono informazioni solo nei rapporti stilati dagli organi di rilievo competenti. Talvolta, però, gli incidenti non sono registrati perché i conducenti coinvolti non ne denunciano l'accaduto, oppure i rapporti di incidente risultano incompleti o errati [1-2]. In ogni caso l'incidente è un evento aleatorio piuttosto raro e, salvo casi eccezionali, non può essere osservato da persone imparziali ed esperte del settore; i testimoni, quando vi sono, per diversi motivi possono essere poco attendibili. Le ricostruzioni fatte a posteriori dalle forze dell'ordine, nelle quali sono indicate le più probabili cause dell'incidente, necessariamente contengono elementi di incertezza. Appare quindi difficile scoprire il nesso tra l'incidente e le cause che lo hanno prodotto.

Si consideri che ogni spostamento può essere visto come il funzionamento di un sistema le cui componenti sono: la strada, il veicolo, l'uomo (il guidatore) e l'ambiente [3-8]. Quando una o più componenti del sistema manifesta anomalie di funzionamento, il sistema comincia a funzionare male e si generano situazioni di pericolo incipiente. Le anomalie, in realtà, possono rientrare e il sistema a questo punto può riprendere il suo normale funzionamento, ovvero possono accentuarsi generando situazioni di pericolo più o meno forti, fino a giungere, in qualche caso, al guasto totale del sistema che corrisponde all'evento di incidente. Alcune anomalie possono prolungarsi nel tempo (guida pericolosa, veicolo in cattivo stato di manutenzione, ecc) senza che accada niente di grave, ovvero possono presentarsi in

modo repentino e grave (manovre errate senza possibilità di recupero, malore del conducente, rottura del veicolo, ecc.) e il sistema collassa in tempi brevissimi (incidente).

Per ciascuna componente possono quindi elencarsi numerosi fattori di rischio; per la strada possono aversi, ad esempio, difetti di geometria dell'asse o della sezione, carenza di visibilità, pavimentazione con bassa aderenza, ed altro; per il veicolo si può avere cattivo stato di manutenzione dei freni e degli organi di guida, pneumatici usurati, eccesso di carico per i mezzi pesanti, ed altro; con riferimento al guidatore si può avere, ad esempio, velocità eccessiva, inosservanza del Codice della Strada, guida distratta o in cattive condizioni fisiche, stato di affaticamento o, al limite, stato di guida in condizioni di abuso di alcool o droga, ecc; per l'ambiente stradale, infine, si possono considerare le condizioni rilevate di traffico, nebbia, ghiaccio, pioggia battente, e così di seguito. Si comprende che l'evento incidente è connesso alla presenza di una serie di variabili di stato difficili da individuare se non con indagini sperimentali meticolose. D'altra parte la riduzione dell'incidentalità richiede proprio l'individuazione, sia pure a grandi linee, dell'evento che ha generato il sinistro. La ricostruzione scientifica degli incidenti è un mezzo particolarmente efficace per ridurre l'incidentalità stradale, poiché è possibile simulare successive misure di intervento, sia per la progettazione di elementi del veicolo che dell'infrastruttura. È per tale ragione che da alcuni decenni molti ricercatori hanno affrontato il problema con numerosi studi teorico-sperimentali, attraverso l'uso di varie metodologie d'indagine.

Il "Global status report on road safety" [9], redatto dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), indica che, in tutto il mondo, il numero totale di morti per incidenti stradali rimane inaccettabilmente elevato a 1,24 milioni di morti l'anno, mentre i feriti variano tra venti e cinquanta milioni. Il gran numero di persone che subiscono lesioni, in parte gravi, in seguito ad incidenti stradali, costituisce la prova che, anche in termini di costi sociali ci si trova di fronte ad una emergenza non trascurabile. Il danno economico non è rappresentato da una spesa diretta sostenuta dalla società, ma è la quantificazione economica degli oneri che, a diverso titolo, gravano sulla stessa a seguito delle conseguenze causate da un incidente stradale. Secondo il report dell'OMS gli incidenti stradali sono l'ottava causa di morte globale, e una delle principali nella popolazione di età inferiore ai 29 anni. È diventato prioritario, pertanto, individuare continuamente nuove strategie di prevenzione che consentano, a breve, medio e lungo termine, di porre un argine a questo fenomeno.

L'utente della strada è il primo anello della catena della sicurezza stradale. Quali che siano le misure tecniche poste in atto, l'efficacia di una politica per la sicurezza stradale dipende in primo luogo dal comportamento degli utenti. Per questo motivo, l'educazione stradale, la formazione e l'applicazione delle leggi rivestono un'importanza essenziale. Tuttavia, il sistema di sicurezza stradale deve tenere conto anche dell'errore umano e dei comportamenti inappropriati, e correggerli.

Al riguardo si annovera la strategia Vision Zero [109] avviata in Svezia nel 1997, che mira all'obiettivo di azzerare le vittime (morti o feriti) a causa degli incidenti

stradali entro il 2020. Vision Zero è l'approccio alla base delle azioni di sicurezza da realizzare, e si basa sull'assunto che non è accettabile l'idea della possibilità di morire o subire lesioni quando ci si muove. Secondo Vision Zero l'incidente non è il problema principale bensì i morti e gli invalidi che questi incidenti creano. E la ragione per la quale la gente muore o resta gravemente menomata è che le persone hanno una certa soglia di tolleranza alla violenza generata dall'impatto; pertanto bisogna concepire un sistema che aiuti le persone a evitare questi tragici eventi.

Esistono particolari analisi sperimentali, in cui lo studio dell'evento di incidente è stato associato al verificarsi di un singolo fattore [10], altre in cui il problema della sicurezza è discretizzato per tipologia di strada [11-12], oppure esistono lavori che evidenziano le necessità di intervento, da parte degli Enti gestori, sulle aree a forte rischio [13]. In definitiva, attraverso un'analisi dettagliata della gran parte dei lavori sperimentali, offerti dalla letteratura scientifica inerente al tema di ricerca trattato, è stato possibile inquadrare esattamente il problema della sicurezza stradale, più propriamente detto road safety.

## 1.2 L'approccio europeo

L'Unione Europea riconosce che la ricerca è essenziale per aumentare la sicurezza sulle strade. Lo sviluppo di componenti, misure e metodi e la diffusione dei risultati della ricerca svolgono un ruolo importante nel migliorare la sicurezza delle infrastrutture stradali.

Nell'ultimo decennio sono stati emanati dall'Unione Europea molteplici documenti aventi lo scopo di aumentare la sensibilità degli Stati Membri verso il problema della sicurezza stradale e verso l'ottenimento di infrastrutture stradali più sicure, giacché per migliorare l'efficienza complessiva del sistema dei trasporti e rispondere alle necessità e alle aspettative dei cittadini è essenziale ridurre il numero di morti e feriti tra gli utenti della strada.

Il 12 settembre 2001 la Commissione Europea ha presentato il Libro bianco "La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte" [14], con cui propone circa sessanta misure per realizzare un sistema di trasporto capace di riequilibrare i diversi modi di trasporto. In materia di sicurezza stradale, la Commissione propone di rafforzare la qualità del settore stradale attraverso un nuovo programma d'azione per il periodo 2002-10 per dimezzare il numero di morti sulle strade; di migliorare l'applicazione dei regolamenti in vigore mediante il rafforzamento delle sanzioni e dei controlli; di realizzare le grandi infrastrutture previste dal programma di reti trans-europee (TEN). Infine la Commissione propone di introdurre nuove tecnologie per le automobili e i sistemi di trasporti intelligenti nel quadro della e-Europa col precipuo scopo di proteggere gli occupanti dei veicoli, rafforzare la protezione dei pedoni e dei ciclisti e migliorare la gestione della velocità.

Nel 2003 il terzo “Programma di azione europeo per la sicurezza stradale” [15], adottato dalla Commissione Europea, fissava un obiettivo ambizioso, ossia il dimezzamento del numero di vittime della strada entro il 2010. Il programma contiene 62 proposte di azioni concrete intese a migliorare la sicurezza del veicolo, dell'infrastruttura e il comportamento degli utenti della strada; inoltre questo programma di azione:

- incoraggia gli utenti a un migliore comportamento, in particolare tramite una più opportuna osservanza della legislazione vigente, la formazione iniziale e continua dei conducenti privati e professionali e mediante la prosecuzione degli sforzi per lottare contro le pratiche pericolose;
- mira a rendere i veicoli più sicuri, in particolare tramite l'armonizzazione e il sostegno al progresso tecnico;
- tende a migliorare le infrastrutture stradali, in particolare tramite l'individuazione e l'eliminazione dei punti pericolosi.
- enumera misure concrete in modo da stabilire un quadro metodologico per l'individuazione delle migliori pratiche e la loro diffusione, attraverso la redazione di guide tecniche, per migliorare la raccolta e l'analisi dei dati relativi agli incidenti e ai danni corporali e per proseguire la ricerca e sviluppo di nuove soluzioni.

Con l'auspicio che questo programma incontrasse l'adesione e la cooperazione di tutti i soggetti interessati, la Commissione propose un impegno solenne, mediante l'adesione ad una carta europea sulla sicurezza stradale, a tutti coloro che detenevano un'autorità, un potere decisionale, un potere economico o sociale o un mandato di rappresentazione. Gli impegni così assunti sarebbero stati resi pubblici e il loro rispetto sarebbe stato controllato.

La Carta europea della sicurezza stradale [110] è stata creata nel 2004 dalla Direzione generale per la mobilità e i trasporti. Da allora questa piattaforma unica di sensibilizzazione sulla sicurezza stradale ha raggiunto ogni livello della società civile in tutti i 28 Stati membri dell'Unione Europea. La Carta europea della sicurezza stradale rappresenta la più grande piattaforma della società civile in materia di sicurezza stradale. Più di 2.300 organismi pubblici e privati si sono impegnati nei confronti della Carta e hanno portato avanti azioni e iniziative che hanno rafforzato la cultura della sicurezza stradale in tutta Europa, migliorato la conoscenza sulle cause degli incidenti e contribuito alla creazione di misure preventive e soluzioni di intervento.

Nel 2008 il Parlamento Europeo emana la Direttiva 2008/96/CE [16] sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali. La direttiva stabilisce quattro procedure per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali: controlli della sicurezza stradale per i progetti di infrastruttura (road safety audit), ispezioni di sicurezza (road safety inspections), classificazione e gestione della sicurezza della rete stradale e dei tratti ad elevata concentrazione di incidenti (network safety ranking), valutazione d'impatto sulla sicurezza stradale per i progetti di infrastruttura (road safety impact assessment). Tali procedure possono essere raggruppate in due gruppi: attività preventive e reattive. Lo scopo di entrambe le attività è rilevare ed eliminare le

cause che possono provocare (attività preventive) o hanno provocato (attività reattive) incidenti, al fine di implementare la migliore strategia di intervento. La direttiva si applica alle strade che fanno parte della rete stradale transeuropea, siano esse in fase di progettazione, in costruzione o già aperte al traffico, ma gli Stati membri possono anche applicare le disposizioni della direttiva, come codice di buone prassi, per le infrastrutture nazionali di trasporto stradale, non comprese nella rete transeuropea.

L'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU), nel marzo del 2010, ha adottato la risoluzione 64/255 denominata " Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020" [17]. L'ONU ha deciso di sollecitare i governi nazionali e tutti i soggetti coinvolti nella sicurezza stradale ponendo il 2020 come riferimento temporale per misurare l'efficacia delle politiche nazionali ed internazionali per la sicurezza della circolazione di persone e merci. I principi guida su cui poggia la strategia proposta dall'ONU, derivano dal cosiddetto approccio Safe System, che aspira a creare un sistema di mobilità che sia in grado di conciliarsi con l'errore umano e che tenga conto della vulnerabilità del corpo umano. L'obiettivo generale proposto è stabilizzare e poi ridurre il livello previsto di vittime della strada in tutto il mondo entro il 2020. La strategia proposta dall'ONU consiste nell'incrementare le attività rivolte alla sicurezza stradale a livello locale, nazionale e regionale e nell'accrescere gli scambi su scala internazionale di esperienze e programmi. Sulla base delle raccomandazioni del World report on road traffic injury prevention [18] e delle proposte della Commission for Global Road Safety, l'ONU ha indicato cinque campi di azione strategici su cui basare le attività del decennio 2011-20:

- 1) gestione della Sicurezza Stradale;
- 2) maggiore sicurezza di Strade e Mobilità;
- 3) maggiore sicurezza dei Veicoli;
- 4) maggiore sicurezza degli Utenti della strada;
- 5) gestione della fase post-incidente.

Il programma europeo 2001-10 per la sicurezza stradale ha salvato oltre 78.000 vite umane ma le strade europee non sono ancora completamente sicure, infatti, molti paesi europei, tra cui l'Italia, non hanno, conseguito i risultati immaginati dal Programma. La conseguenza immediata è stata la comunicazione "Europa 2020 – Una strategia per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva" [19] con cui la Commissione Europea ha confermato l'obiettivo del dimezzamento del numero totale di vittime della strada nell'Unione entro il 2020 a partire dal 2010. Gli orientamenti proposti pongono i cittadini al centro della propria azione, inducendoli a farsi carico della sicurezza propria e altrui, infatti, l'uomo è, oltre che l'utilizzatore, anche il gestore dell'infrastruttura e pertanto attraverso una sua corretta percezione delle informazioni, geometriche e gestionali, dell'infrastruttura stradale ne garantisce una migliore funzionalità e una maggiore sicurezza.

Sono stati individuati sette obiettivi, per ciascuno dei quali saranno proposte azioni a livello nazionale e dell'UE:

- insegnare agli utenti a guidare con maggiore cautela, mediante una strategia europea di educazione e formazione in materia di sicurezza stradale;
- attuare una normativa europea, per far sì che tutti i cittadini dell'UE siano sanzionati allo stesso modo in caso di violazione delle norme stradali;
- incoraggiare i paesi dell'UE ad applicare anche alle strade extraurbane le norme che sono già in vigore sulla rete viaria principale e nelle gallerie;
- migliorare la sicurezza dei veicoli;
- accrescere la sicurezza delle categorie di conducenti più vulnerabili migliorando la comunicazione tra le autorità e gli utenti stradali e introducendo revisioni periodiche per le motociclette, i motorini, ecc.;
- migliorare i servizi di emergenza e di assistenza post-incidente;
- perfezionare gli strumenti per la registrazione e analisi degli incidenti al fine di controllare meglio i progressi compiuti a livello di sicurezza stradale e fornire dati precisi per lo sviluppo di nuove misure preventive.

Questi obiettivi devono essere integrati nei vari elementi della politica europea dei trasporti; per riuscire nell'intento è prevista la creazione di un quadro di cooperazione aperta tra i paesi dell'UE e la Commissione. Parallelamente, i paesi membri dovrebbero anche elaborare piani nazionali o locali per la sicurezza stradale, comprendenti specifici obiettivi nazionali che riflettano la particolare situazione del paese.

Nel 2011 con il Libro Bianco “Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile” [20] la Commissione Europea ribadisce come la riduzione del numero di vittime di incidenti stradali sia considerata un aspetto chiave per il miglioramento delle prestazioni dell'intero sistema di trasporto e per rispondere ad attese e necessità dei cittadini.

In questo contesto l'ISO (International Organization for Standardization) ha definito il nuovo standard 39001:2012 - “Road traffic safety management systems”. La norma, indirizzata a tutte le organizzazioni che interagiscono con il sistema dei trasporti stradali, fornisce indicazioni e descrive i requisiti per aumentare la sicurezza su strada al fine di ridurre il numero di morti e feriti derivanti da incidenti stradali, attraverso la definizione di un'appropriata politica interna, l'individuazione degli obiettivi da conseguire e la messa in opera delle azioni conseguenti. Lo standard richiede all'organizzazione di:

- stabilire, implementare, mantenere e sviluppare un sistema di gestione per la sicurezza stradale;
- migliorare nel tempo i risultati dell'organizzazione in termini di riduzione del rischio stradale;
- assicurare la conformità di strumenti e procedure interne con le norme di settore;
- dimostrare la conformità con lo standard internazionale.

La norma, pertanto, individua gli elementi di buona pratica di gestione del sistema del traffico stradale che permetterà all'organizzazione di raggiungere i risultati desiderati, infatti, la sicurezza stradale è una responsabilità condivisa e tale standard

intende sensibilizzare i guidatori al rispetto degli obblighi legislativi e a un comportamento responsabile.

### 1.3 Le politiche adottate in Italia

Nel 2013 si sono registrati in Italia 181.227 incidenti stradali con lesioni a persone. Il numero dei morti (entro il 30° giorno) ammonta a 3.385 mentre quello dei feriti a 257.421 [21]. Il costo medio degli incidenti rappresenta circa il 2% del PIL nazionale.

Il rapporto dell'Istituto Superiore di Sanità dedicato alla "Promozione della salute nelle scuole. Prevenzione degli incidenti stradali e domestici" [22], evidenzia che gli incidenti stradali rappresentano la prima causa di morte sotto i 40 anni: 220 mila incidenti gravi ogni anno e un bilancio di circa 5 mila morti e più di 310 mila feriti. Si stima che ogni anno circa 1,5 milioni di persone si rivolga al pronto soccorso per incidente stradale e che questi causino circa 20 mila casi di invalidità.

Il primo atto normativo e legislativo con cui si è iniziato ad analizzare il problema della sicurezza stradale e le possibili soluzioni è stato il Piano Nazionale della Sicurezza Stradale (PNSS), istituito con la legge n. 144 del 1999, all'articolo 32. Tale Piano si attua mediante programmi annuali aventi specifiche linee di azione.

Nel PNSS 2001-10 [23], l'Italia, accogliendo le indicazioni della Commissione Europea [15], aveva definito come obiettivo generale il dimezzamento del numero dei morti sulle strade. Il Piano è stato articolato su due livelli di attività:

- azioni strategiche, dedicate alla costruzione delle condizioni tecniche, organizzative, amministrative e funzionali all'innovazione e al miglioramento della capacità di governo della sicurezza stradale;
- misure e interventi puntuali, con carattere di particolare urgenza e relativi alle situazioni note di massimo rischio, ove si determinano il maggior numero di vittime da incidenti stradali e gli interventi possono raggiungere livelli di efficacia particolarmente elevati.

Le principali azioni strategiche condotte possono essere suddivise in:

- ✓ azioni di carattere legislativo;
- ✓ azioni di prevenzione e controllo (enforcement);
- ✓ azioni di governance;
- ✓ campagne di comunicazione e sensibilizzazione.

L'azione normativa è stata particolarmente intensa e mirava a una legislazione più rigorosa e attenta nei confronti dei comportamenti a maggior rischio. Tra i principali interventi si annovera l'introduzione della patente a punti (luglio 2003); l'ampliamento dei poteri di accertamento degli organi di polizia ed inasprimento delle sanzioni per guida sotto l'effetto di alcool o droghe; l'introduzione della disciplina speciale "alcool zero" per i conducenti di età compresa tra 18 e 21 anni, per i

neopatentati e per chi esercita professionalmente l'attività di trasporto di persone o cose.

Fra le azioni di enforcement un intervento di particolare rilievo è stato il sistema di controllo delle velocità medie e l'incremento del numero di controlli sui comportamenti a rischio.

L'aumento della capacità di governance del fenomeno da parte degli Enti di governo del territorio, Regioni in particolare, ma anche Province e Comuni, è stato determinato istituendo i Centri di Monitoraggio (regionali e locali).

Per quanto riguarda, infine, l'attività volta a promuovere e diffondere la sicurezza stradale quale parte integrante dei valori costituenti una reale convivenza civile, si è mirato sia a rafforzare la comunicazione istituzionale, sia ad elaborare nuovi progetti nel campo dell'educazione stradale nella certezza che quest'ultima attività svolge un ruolo strategico per garantire il più alto livello di sicurezza sulle strade italiane.

Il Piano Nazionale della Sicurezza Stradale 2001-10 ha contribuito in maniera significativa alla riduzione del numero di morti e feriti sulle strade italiane. Sulla base dei risultati raggiunti e delle indicazioni della Commissione Europea, l'obiettivo generale del PNSS Orizzonte 2020 [24] è il dimezzamento dei decessi sulle strade al 2020 rispetto al totale dei decessi registrato nel 2010.

Il PNSS Orizzonte 2020 esprime la necessità e la volontà di coinvolgere, sensibilizzare e responsabilizzare ogni cittadino a contribuire a creare una cultura della sicurezza stradale volta a proteggere e conservare il valore della vita.

Per la definizione della strategia di intervento si è tenuto conto di diversi fattori. In primis, si è posta l'attenzione sulle categorie a maggior rischio. Tra le diverse categorie di utenti della strada vi sono, infatti, alcune che, rispetto alle altre, manifestano un livello di rischio maggiore o offrono un più elevato potenziale di miglioramento. Per tali categorie, il PNSS Orizzonte 2020 definisce nove linee strategiche "specifiche" basate su un'analisi dei principali fattori di rischio. I fattori individuati sono velocità, visibilità, uso di alcool e droghe alla guida, vulnerabilità, assenza o mancato utilizzo dei sistemi di protezione, fattori ambientali, massa e forma dei veicoli, mancanza di esperienza alla guida, sottostima del rischio e sovrastima delle proprie capacità, stanchezza, stress e distrazione alla guida. Accanto alle categorie a maggior rischio, sono state prese in considerazione tutte le componenti principali del sistema, ponendo l'attenzione non solo su categorie di utenti, ma anche su fattori quali le tipologie di infrastruttura, i veicoli, la struttura organizzativa, i servizi di soccorso. Per queste componenti, sono state individuate dodici linee strategiche, definite "generali" in quanto vanno a coprire altri aspetti rilevanti per la sicurezza stradale e raggruppate secondo gli obiettivi generali definiti dalla Commissione Europea [19]. Anche la scelta delle linee strategiche generali, così come quella delle linee strategiche specifiche, è basata su un'attenta analisi delle problematiche peculiari dell'incidentalità in Italia e di quanto emerso dal monitoraggio del precedente Piano, combinati con i risultati della ricerca internazionale. In tal senso si è tenuto conto della forte esigenza di ridurre il numero

di feriti, oltre che quello dei morti, scegliendo delle linee strategiche che, oltre ad agire sul livello di mortalità, hanno effetti anche sul livello di ferimento.

Orizzonte 2020 pone, inoltre, particolare attenzione sul miglioramento del sistema di gestione della sicurezza stradale. Di particolare importanza sono le attività rivolte al miglioramento del sistema di raccolta e trasmissione dei dati d'incidentalità; alla creazione di strutture dedicate al monitoraggio della sicurezza stradale e alla elaborazione di piani e programmi efficaci ed efficienti; alla creazione di un Osservatorio Nazionale della Sicurezza Stradale mirato all'analisi e alla diffusione di dati, conoscenze, strumenti e informazioni sulle migliori pratiche condotte in ambito nazionale ed internazionale; allo stanziamento di adeguati finanziamenti per la realizzazione delle misure indicate dal Piano.

Secondo quanto chiarito nella Bozza per gli Interventi di Adeguamento delle strade esistenti del 21 Marzo 2006 [25], la rete stradale italiana esistente ha un elevato sviluppo planimetrico con caratteristiche geometriche, funzionali e di traffico multiformi, definite con criteri e standard progettuali in taluni casi molto diversi e non abbastanza congruenti alle condizioni d'impiego attuali. La Bozza [25], secondo le disposizioni del D.M. 22/04/2004 [26], disciplina, anche se a carattere non cogente, i criteri per la progettazione ed esecuzione degli interventi di adeguamento, strutturali e non, della rete stradale esistente, purché debitamente approvati ed inseriti negli strumenti di pianificazione e programmazione degli enti proprietari e/o gestori. Essi sono improntati al miglioramento della funzionalità operativa e della sicurezza delle strade, nel rispetto degli esistenti vincoli ambientali, archeologici, paesaggistici ed economici. Gli interventi possono interessare sia la realtà fisica dell'infrastruttura (interventi strutturali), sia i suoi modi d'uso, in termini di limitazione dell'utenza ammessa, modifica delle attrezzature e impianti a servizio della circolazione, definizione di piani di gestione della circolazione e delle emergenze (interventi non strutturali). La potenziale idoneità di provvedimenti strutturali e non strutturali a conseguire gli obiettivi prestazionali di sicurezza in esercizio dovrà essere dimostrata mediante l'analisi delle condizioni di incidentalità e di sicurezza, e l'individuazione dei benefici attesi a seguito della realizzazione degli interventi di adeguamento previsti.

Gli indirizzi operativi per le analisi di sicurezza stradale sono a oggi esplicitati nelle "Linee Guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali" [27]. Le Linee Guida sono state emanate ai sensi del Decreto Legislativo n. 35/2011, di recepimento della Direttiva 2008/96/CE [16], e stabiliscono i criteri e le modalità per l'effettuazione dei controlli della sicurezza stradale sui progetti e delle ispezioni di sicurezza sulle infrastrutture esistenti e per l'attuazione del processo per la classificazione della sicurezza della rete stradale. Le Linee Guida hanno come finalità quella di orientare, coordinare e rendere omogenee le attività di tutti i soggetti coinvolti nel processo della sicurezza delle infrastrutture stradali. L'ambito di applicazione è rappresentato dalle infrastrutture viarie ricadenti nella rete stradale trans-europea (TEN), mentre per tutte le altre strade le Linee Guida costituiscono norme di principio non cogenti. L'analisi di sicurezza della rete stradale deve essere eseguita individuando le caratteristiche geometriche e funzionali di tratti stradali

elementari, omogenei da un punto di vista sia geometrico sia funzionale, distinguendo le infrastrutture tra l'ambito urbano ed extraurbano e per tipologia di strada (doppia o singola carreggiata), e deve essere finalizzata a effettuare la classificazione della sicurezza della rete esistente. La classificazione consentirà di individuare la priorità dei tratti in cui intervenire e deve essere operata analizzando prioritariamente gli incidenti mortali, ma ai fini di un'analisi più approfondita dell'incidentalità della rete stradale, è opportuno valutare anche i dati riguardanti gli incidenti con feriti. È dunque necessario fare un'analisi dei dati di incidentalità e utilizzare adeguati indicatori calcolati per tratto omogeneo e operare una distinzione tra l'ambito urbano e quello extraurbano e per tipologia di strada. L'individuazione degli indicatori di incidentalità deve essere condotta con adeguate procedure che tengano conto della variabilità statistica del fenomeno.

Obiettivo della ricerca è contribuire all'analisi del funzionamento della rete stradale esistente da parte degli Organi Competenti nel rispetto dei criteri riportati nel D.Lgs. n.35/11, al fine di individuare ed eliminare le criticità della rete stradale che provocano il reiterarsi di incidenti lesivi. Secondo tale decreto, infatti, ogni Organo Competente deve suddividere la propria rete stradale per attuare il programma delle ispezioni che consentirà di ridurre le criticità riferibili alla rete stessa.

Il lavoro di ricerca si inserisce in un filone di ricerca molto ampio, i cui aspetti, presentando un elevato grado di sofisticazione, sono stati studiati con metodo e supportati dai dati sperimentali. Sono state calibrate funzioni di prestazione della sicurezza stradale (FPS) specializzate per severità di incidente, per l'analisi delle condizioni di sicurezza in fase di esercizio delle infrastrutture viarie esistenti. L'analisi sperimentale condotta, che s'illustrerà in dettaglio nel corso del manoscritto, riguarda elaborazioni sviluppate nel corso di un triennio, relativa a strade extraurbane a carreggiata unica e doppio senso di circolazione.

L'attualità della ricerca è dimostrata dal fatto che c'è un progetto in corso del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, [111]) cui sta lavorando l'accademia delle scienze.

#### 1.4 Organizzazione della Ricerca

Il manoscritto è stato organizzato e sviluppato in cinque capitoli.

Il Capitolo 1 esamina il background del programma di ricerca, gli obiettivi e gli scopi prefissati, sintetizzando brevemente i risultati cui si è pervenuti.

Il Capitolo 2 illustra i numerosi lavori sperimentali e teorici offerti dalla letteratura scientifica internazionale e nazionale che hanno riguardato il tema della sicurezza su strade extraurbane a singola carreggiata, perfezionando gli studi teorico-sperimentali dagli anni trascorsi a oggi, attraverso l'uso di nuove metodologie che permettano di fornire risultati sempre più rappresentativi della realtà.

Il Capitolo 3 definisce la procedura di calibrazione di funzioni di prestazione della sicurezza stradale (FPS) per la previsione della frequenza media annua del numero dei feriti, dei morti e del totale degli incidentati. Le FPS sono state sviluppate nell'ipotesi di distribuzione binomiale negativa delle frequenze e presentano un coefficiente di determinazione superiore in ogni caso al 70%. La possibilità di utilizzare un modello unico per la previsione della frequenza dei feriti e dei morti attraverso dei fattori di ponderazione su base percentuale, rispetto a modelli ad hoc per la previsione della frequenza media annua dei soli feriti e dei soli morti, è stata valutata con il test di Kruskal-Wallis.

Il Capitolo 4 tratta della procedura di validazione delle funzioni di prestazione prodotte. Tra gli strumenti per stimare l'adeguatezza delle FPS si è fatto riferimento all'analisi dei residui. In particolare è stato utilizzato il metodo grafico delle carte di controllo dei residui e del diagramma dei residui quadratici cumulati. La bontà di adattamento è stata espressa attraverso la stima di tre indicatori statistici sintetici.

Il Capitolo 5 raccoglie le conclusioni e le possibili linee di sviluppo futuro della ricerca.

## Capitolo 2 ~ Stato dell'arte

### 2.1 La misura della sicurezza stradale

Quando si affronta un'analisi di incidentalità, occorre considerare che gli indicatori e le possibili metodologie di analisi possono essere diverse in funzione dello scopo per il quale l'analisi viene fatta. Tra le principali finalità di un'analisi di incidentalità, nell'ambito della definizione degli interventi per il miglioramento della sicurezza stradale, vi sono:

- l'identificazione dei siti caratterizzati da una maggiore sinistrosità su cui intervenire in via prioritaria (analisi a livello di rete);
- l'analisi delle potenziali cause dell'incidentalità in un dato sito (analisi a livello di progetto);
- l'analisi dell'efficacia dell'intervento già realizzato in termini di riduzione effettiva dell'incidentalità.

Sono stati proposti [28-29] quali migliori indicatori della sicurezza la densità incidentale e il tasso degli incidenti.

La densità incidentale ( $D_{i,j}$ ), è definita come il numero di incidenti ( $N_{i,j}$ ) accaduti sull' $i$ -esimo tronco stradale<sup>1</sup>, caratterizzato da una lunghezza  $L_i$ , espressa in chilometri, nel  $j$ -esimo periodo di osservazione avente una durata di  $A_j$  anni, rapportati alla lunghezza del tronco stesso e alla durata di osservazione:

$$D_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{L_i * A_j} \quad [\text{incidenti/km/anno}] \quad (1)$$

Il tasso di incidentalità, è definito come il numero di incidenti ( $N_{i,j}$ ) accaduti sull' $i$ -esimo tronco stradale, caratterizzato da una lunghezza  $L_i$ , espressa in chilometri, nel  $j$ -esimo periodo di osservazione avente una durata di  $A_j$  anni, rapportati alla lunghezza del tronco stesso ed il numero di chilometri percorsi dal traffico nel tronco in esame nel periodo di osservazione, calcolato in funzione del Traffico Giornaliero Medio ( $TGM_{i,k}$ ) determinato per l' $i$ -esimo tronco per il generico anno:

$$T_{i,j} = \frac{N_{i,j} * 10^8}{L_i * \sum_{k=1}^{A_j} TGM_{i,k} * 365} \quad [\text{incidenti}/10^8 \text{ veic*km}] \quad (2)$$

Si precisa che la lunghezza dei tronchi non dovrebbe superare il chilometro o in ambito urbano qualche centinaio di metri. Il periodo di osservazione cui, generalmente, si fa riferimento per le analisi di incidentalità, è di 5 anni ma nel

---

<sup>1</sup> Tratto di strada comprendente l'intero sviluppo tra due intersezioni, anche non successive, con strade di classe superiore o inferiore alla propria [25].

definire tale periodo occorre tenere presente una serie di fattori che possono avere una rilevanza sostanziale in fase di analisi dei dati:

- un arco temporale troppo piccolo (quale, ad esempio, l'anno) può portare a risultati non significativi dal punto di vista statistico;
- un arco temporale eccessivo può portare a trascurare l'effetto di mutamenti dell'ambiente infrastrutturale, normativo, della meccanica dei veicoli e della comportamentistica che portano a una globale modificazione del quadro incidentale. Per questo motivo sono generalmente da evitare periodi di osservazione di durata superiore a 5 anni.

Nell'uso corrente sono entrati come indicatori dell'incidentalità anche la densità dei morti pari al numero di morti per anno per cento chilometri di strada; i tassi di persone incidentate e di decessi pari, rispettivamente, al numero di persone incidentate (feriti più morti), o di persone decedute, per cento milioni di veicoli per chilometro.

In particolare la densità dei morti è adottata nel PNSS 2002-10 [23] quale parametro per la classificazione delle pericolosità dei tronchi stradali che costituiscono una rete. Con riferimento ad un periodo di osservazione di cinque anni, il PNSS propone la seguente classificazione dei tronchi stradali:

- relativamente sicure, se negli ultimi cinque anni si sono verificati rarissimi incidenti con morti;
- a bassa incidentalità, se negli ultimi cinque anni si sono registrati pochi incidenti mortali, senza carattere di ricorsività;
- intermedie, se negli ultimi cinque anni si è verificato un rilevante numero di incidenti mortali, senza caratteri di ricorsività;
- ad elevato rischio, se negli ultimi cinque anni si sono verificati numerosi incidenti mortali, con prevalenti caratteri di ricorsività;
- a massimo rischio, se negli ultimi cinque anni si sono verificati numerosi incidenti mortali, con prevalenti caratteri di ricorsività.

I valori critici di densità dei morti che distinguono una classe rispetto all'altra sono stati indicati nelle azioni prioritarie del PNSS, differenziati per le diverse tipologie di strade.

Nel caso in cui si faccia, invece, riferimento al tasso di incidentalità la rete può essere classificata in base alla procedura proposta dal D.P. CNR 13465/1995 [30] in tronchi a “debole”, “media” e “forte” incidentalità sulla base del confronto tra il tasso di incidentalità di un dato tronco in un dato periodo di osservazione ( $T_{ij}$ ) e due tassi di controllo, indicati con  $T_{inf}$  e  $T_{sup}$ , secondo il seguente schema:

- se  $T_{ij} < T_{inf}$  il tronco è detto a debole incidentalità;
- se  $T_{inf} \leq T_{ij} < T_{sup}$  il tronco è detto a media incidentalità;
- se  $T_{ij} \geq T_{sup}$  il tronco è detto a forte incidentalità.

L'analisi viene riferita ad un itinerario stradale<sup>2</sup>, suddiviso in tronchi elementari di lunghezza  $L_i$ , quanto più possibile omogenei tra loro. L'omogeneità è intesa come

<sup>2</sup> Insieme di archi e tronchi stradali, appartenenti in genere ad una stessa rete, che costituiscono un percorso individuato all'interno di documenti di pianificazione [25].

variazione, entro limiti sufficientemente ristretti, dei parametri maggiormente significativi per l'analisi, quali caratteristiche geometriche, condizioni del piano viabile, entità e composizione del traffico, disciplina della circolazione, condizioni ambientali prevalenti. Per ciascun tronco elementare occorre conoscere i volumi di traffico e il numero di incidenti relativi a un sufficiente numero di anni antecedenti quello di analisi (almeno tre e preferibilmente cinque o sei), inoltre durante tale periodo non devono essere state apportate importanti modifiche riguardanti le caratteristiche dell'infrastruttura, del traffico e delle regole di circolazione.

Detti:

- $L_i$  la lunghezza del tronco i-esimo, espresso in km;
- $A_j$  il numero di anni;
- $TGM_k$  il traffico giornaliero medio su base annua, per il k-esimo anno;
- $n$  il numero di tronchi elementari in cui è stato suddiviso l'itinerario;
- $N_i$  il numero di incidenti registrati negli  $A_j$  anni sul tronco i-esimo;
- $M_i$  il momento di traffico del tronco i per gli  $A_j$  anni, pari a:

$$M_i = 365 * L_i * \sum_{k=1}^{A_j} TGM_k \quad (3)$$

i valori di controllo possono essere determinati mediante le espressioni seguenti:

$$T_{inf}^* = T_m - K * \sqrt{\frac{T_m}{M_i}} - \frac{1}{2 * M_i} \quad (4)$$

$$T_{sup}^* = T_m + K * \sqrt{\frac{T_m}{M_i}} + \frac{1}{2 * M_i} \quad (5)$$

in cui:

$K$  è la costante di probabilità della distribuzione di Poisson posta pari a 1,645, con una probabilità di errore del 10%;

$T_m$  è il tasso di incidentalità medio su un dato itinerario nello stesso periodo di osservazione, calcolato come:

$$T_m = \frac{10^8 * \sum_{i=1}^n N_i}{365 * L_i * \sum_{k=1}^{A_j} TGM_k} \quad (6)$$

Quest'analisi ha valore relativo nell'ambito di un itinerario, ma non ha valore assoluto, sia pur limitato a categorie di strade, poiché non si possono indicare, allo stato attuale, valori di soglia critici.

In definitiva, una delle funzioni essenziali delle analisi di incidentalità è la definizione di correlazioni quantitative tra i parametri caratterizzanti l'incidentalità dei diversi tronchi di una rete e le caratteristiche infrastrutturali e funzionali di ciascun

tronco. A tal proposito, esistono in letteratura diversi modelli previsionali e studi atti a definire dette correlazioni.

## 2.2 Modellazione statistica della sicurezza stradale

Da oltre mezzo secolo numerosi ricercatori hanno proposto modelli per lo studio dell'incidentalità stradale, frutto di osservazioni empiriche in varie parti del mondo. Pur nella grande varietà di criteri e di metodologie con cui il problema è stato affrontato, l'intento unico è quello di indagare su come un prescelto indicatore della sicurezza sia legato ai numerosi fattori identificati come cause, o concause, dell'incidentalità, ciò al fine di fare previsioni e studi a riguardo.

Attraverso un'analisi dettagliata della gran parte dei lavori sperimentali, offerti dalla letteratura scientifica sul tema di ricerca trattato, è stato possibile inquadrare esattamente il problema della sicurezza stradale.

Attualmente le tecniche per analizzare le relazioni tra componenti dell'ambiente stradale e incidentalità si basano sulle Funzioni di Prestazione della Sicurezza (FPS), che esprimono il livello di sicurezza che può essere assegnato ad un'infrastruttura stradale o a uno specifico elemento (tronchi stradali, intersezioni, etc.).

Le FPS sono modelli predittivi che consentono di determinare la frequenza di incidenti in funzione di variabili esplicative selezionate in base ai dati disponibili nell'area di studio e secondo gli obiettivi dell'analisi. Il traffico, presente come variabile esplicativa nella maggior parte dei modelli, è inserito come Traffico Giornaliero Medio (TGM). Altre variabili, prese frequentemente in considerazione, riguardano le caratteristiche geometriche, allo stato della pavimentazione, alle condizioni meteorologiche e d'illuminazione e agli utenti.

Un vantaggio nell'uso di siffatti modelli risiede nella possibilità sia di poter estendere all'indietro il periodo di riferimento, sia di poter fare previsioni per il futuro; purché si conoscano i valori precedenti e possano ragionevolmente prevedersi per il futuro i valori delle variabili esplicative.

Un modello, in generale, è una relazione del tipo:

$$\bar{y} = f(X_1, X_2, \dots, X_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) \quad (7)$$

in cui si indica con  $\bar{y}$  la media del numero di incidenti che si verificano in un certo periodo di riferimento, con  $X_1, X_2, \dots, X_n$  le variabili che si ritiene possano influenzare  $\bar{y}$  e con  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  i coefficienti da determinare.

Inizialmente la ricerca, per costruire modelli aventi gli incidenti come variabile dipendente, si è concentrata sull'uso della regressione lineare multipla che assume una relazione lineare fra  $\bar{y}$  e le variabili  $X_n$ :

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \dots + \beta_n \cdot X_n \quad (8)$$

Tuttavia, la validità di questa tecnica statistica presuppone che i dati sperimentali siano statisticamente indipendenti fra loro e che siano normalmente distribuiti, ciò è in contraddizione con le caratteristiche degli incidenti stradali, fenomeno non lineare in realtà; inoltre manca il requisito di omoscedasticità, ossia la costanza della varianza del numero degli incidenti. Sono stati, allora, introdotti i modelli lineari generalizzati.

### 2.2.1 Modelli Lineari Generalizzati

I Modelli Lineari Generalizzati (GLM) rappresentano una generalizzazione del più classico modello lineare nell'ambito della regressione lineare. L'impiego di tali modelli consente di:

- ampliare la famiglia di funzioni su cui si basa la distribuzione della variabile dipendente;
- eliminare il limite, proprio dei modelli lineari tradizionali, costituito dalla necessità di operare in condizioni di costanza della varianza dei residui;
- introdurre, nella costruzione del modello, una funzione di legame.

La forma generale del modello è:

$$y = \bar{y} + \varepsilon \quad (9)$$

In questo caso il legame fra il valore atteso del numero di incidenti  $\bar{y}$  e le variabili esplicative  $X_n$  è espresso da una funzione  $g$  invertibile e derivabile:

$$g(\bar{y}) = X\beta \quad (10)$$

quindi il modello lineare assume la forma seguente:

$$y = g^{-1}(X\beta) + \varepsilon \quad (11)$$

La funzione  $g$  è detta funzione di legame e, in genere, è scelta in modo da assumere valori in tutto l'insieme dei numeri reali. Un motivo per cui non è opportuno che la funzione di legame sia la funzione identica è che il valore atteso della variabile aleatoria  $y$  può appartenere a un sottoinsieme proprio dei numeri reali e, in caso di funzione di legame identica, nella stima dei coefficienti  $\beta$  del modello, sarebbe necessario imporre dei vincoli; ad esempio se la variabile risposta avesse legge di Bernoulli, la stima del suo valore atteso dovrebbe appartenere all'intervallo  $[0, 1]$ , se avesse legge di Poisson, il suo valore atteso dovrebbe appartenere ai numeri reali positivi, e così via. In generale la scelta della funzione di legame dipende dal tipo di distribuzione della variabile dipendente (cfr. Tabella 2.1). I parametri  $\beta$  dei modelli lineari generalizzati vengono stimati tramite il metodo della massima verosimiglianza.

Tabella 2.1-Tipiche distribuzioni statistiche con intervallo di definizione e funzione di legame

Distribuzione	Intervallo di definizione	Nome del legame	Funzione di legame	Funzione media
Normale	$(-\infty, +\infty)$	Identità	$X\beta = \bar{y}$	$\bar{y} = X\beta$
Esponenziale	$(0, +\infty)$	Inversa	$X\beta = (\bar{y})^{-1}$	$\bar{y} = (X\beta)^{-1}$
Gamma		Inversa	$X\beta = (\bar{y})^{-2}$	$\bar{y} = (X\beta)^{-1/2}$
Gaussiana inversa		quadratica		
Poisson	$[0, +\infty)$	Log	$X\beta = \ln(\bar{y})$	$\bar{y} = \exp(X\beta)$
Bernoulli	$[0, 1]$			
Binomiale	$[0, N]$			
Multinomiale	$[0, N]$	Logit	$X\beta = \ln\left(\frac{\bar{y}}{1-\bar{y}}\right)$	$\bar{y} = \frac{\exp(X\beta)}{1+\exp(X\beta)} = \frac{1}{1+\exp(-X\beta)}$
Categorica	vettore k di interi $[0, 1]$			

Lord et al. [31-32] suggeriscono che per studiare meglio il fenomeno dell’incidentalità è necessario utilizzare una categoria di modelli generali linearizzati, chiamati modelli di conteggio. In particolare gli autori propongono il modello di Poisson, il modello Binomiale Negativo e i modelli Zero-Inflated.

Agüero-Valverde [33] applica i tre modelli ai dati di incidente rilevati in Pennsylvania e ne dimostra la validità nell’interpretare l’incidentalità stradale in base ai residui (definiti come differenza tra valore predetto e osservato).

### 2.2.1.1 Modello di Poisson

Il modello di Poisson ha funzione di distribuzione del tipo:

$$P(k) = \frac{e^{-\bar{y}} \cdot (\bar{y})^k}{k!} \tag{12}$$

L’Equazione 12 fornisce la probabilità di k incidenti in un periodo prefissato, quando è noto il valore atteso del numero di incidenti  $\bar{y}$ . Come mostrato in Tabella 2.1, la funzione di legame adottata per una siffatta distribuzione è di tipo logaritmico, ciò per evitare valori attesi negativi, pertanto è comune ritrovare modelli di Poisson scritti nella forma:

$$\bar{y} = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_n^{\beta_n} \tag{13}$$

oppure:

$$\bar{y} = e^{(\beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_n \cdot X_n)} \tag{14}$$

in cui  $\bar{y}$  è il numero atteso di incidenti in un prefissato periodo, le  $X_n$  sono le variabili esplicative e i coefficienti  $\beta_n$  sono i parametri da stimare a partire dai dati sperimentali.

Hauer [34] evidenzia alcune problematiche legate alla forma di tali modelli necessari alla stima della frequenza degli incidenti attesi. La prima critica sollevata riguarda i fattori  $X^\beta$  ed  $\exp(\beta X)$  che non possono rappresentare relazioni che riportano picchi o inflessioni (cfr. Figura 2.1).

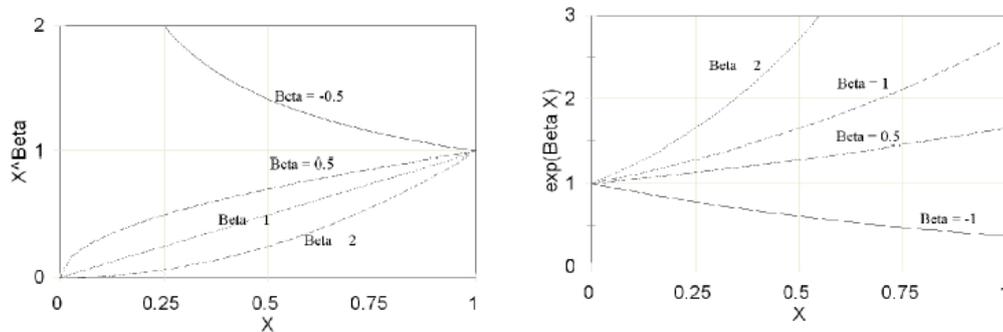


Figura 2.1-Funzioni tipo  $X^\beta$  e  $\exp(\beta X)$

La seconda critica riguarda l'individuazione del livello di sicurezza su un segmento stradale. In particolare, nel caso in cui siano presenti punti di rischio, il numero di incidenti generati da tali elementi deve essere sommato al numero di incidenti che si sarebbero generati sull'elemento stradale senza la presenza dei punti di rischio. La semplice somma degli incidenti nel modello previsionale non riesce a tenere in considerazione la densità e la distribuzione di tali punti critici.

Poch [35] e Vellaisamy [36], infine, sottolineano che i dati sperimentali (conteggio degli incidenti) denunciano molto spesso una varianza numericamente superiore alla media, ossia una dispersione maggiore di quella prevista dalla legge di Poisson (sovra dispersione). I modelli di Poisson, anche se sono strumenti precisi per predire il numero atteso di incidenti sono basati sull'ipotesi di equidispersione ossia di uguaglianza di media e varianza:  $\bar{y} = E(y|X) = VAR(y|X)$ . Pertanto è stato proposto di assumere come funzione di probabilità dei conteggi di incidenti la binomiale negativa.

### 2.2.1.2 Modello Binomiale Negativo

Il modello Binomiale Negativo ha funzione di distribuzione del tipo:

$$P_X(x) = \binom{x+k-1}{k-1} p^k (1-p)^x \quad (15)$$

L'Equazione 15 fornisce la probabilità che si verificano k-1 incidenti in x+k-1 conteggi degli incidenti.

Questa distribuzione è chiamata binomiale negativa poiché è possibile riscrivere la sua espressione in modo da far comparire dei coefficienti binomiali negativi, scritti, in generale, come  $X = Y - k$ .

La scelta tra la funzione di tipo Poissoniano e quella di tipo binomiale negativa, secondo Mohammadi et al. [37], si basa sulla variabilità del numero di incidenti rilevati per particolari condizioni di traffico. Se la varianza è simile alla media, la distribuzione di Poisson risulta essere più appropriata, altrimenti è preferibile utilizzare la distribuzione binomiale negativa.

Tre sono le cause fondamentali di sovra dispersione [39]:

- eterogeneità, ossia gli eventi sono una variabile casuale ( $y$ ) governata da un parametro  $\bar{y}$ , esso stesso, variabile casuale;
- correlazioni tra misurazioni;
- non indipendenza degli eventi.

In definitiva l'utilizzo di modelli basati su ipotesi di distribuzione poissoniana, o binomiale negativa, sembra più appropriato per l'analisi dell'incidentalità.

### 2.2.1.3 Modelli Zero-Inflated

L'analisi di dati di conteggio può essere talvolta complessa a causa di un eccessivo numero di valori pari a zero. Nel caso particolare dell'incidentalità questo è possibile giacché se si considerano gli incidenti avvenuti su una rete, è possibile notare come ci siano alcuni elementi (tronchi stradali, intersezioni, etc.) interessati dagli incidenti, e tanti altri non interessati. In tali circostanze è possibile impiegare modelli alternativi ai due precedenti che contemplino la possibilità di trattare esplicitamente questa inflazione di zeri: i Modelli Zero Inflated. Tali modelli, presentati inizialmente da Lambert [39], sono caratterizzati da una struttura parametrica che adatta opportunamente la risposta nulla come illustrato da Long e Freese [40]. La struttura di un modello di regressione per una variabile zero-inflated, infatti, presenta due parti; una riguarda i coefficienti che corrispondono alla regressione di Poisson o alla regressione binomiale negativa; l'altra interessa l'analisi con gli zeri. La seconda parte può seguire la distribuzione di Poisson, nel qual caso si parlerà di modelli ZIP (Zero Inflated Poisson) oppure seguire una distribuzione Binomiale Negativa, nel qual caso si parlerà di modelli ZINB (Zero Inflated Negative Binomial).

### 2.2.2 Equazioni di Stima Generalizzate (GEE)

I metodi di tipo GEE, proposti da Liang e Zeger [41], consentono l'interpretazione dei dati sperimentali tramite un modello marginale che restituisce una variabile media di risposta (funzione di un certo numero di variabili indipendenti) per le osservazioni che condividono le stesse covariate; più specificamente un modello GEE restituisce le variazioni, in media, nella popolazione per ogni incremento unitario di una covariata.

La procedura GEE consiste in un'estensione dei modelli lineari generalizzati e può essere considerata come uno strumento efficace per saggiare un'ipotesi circa

l'influenza di uno o più fattori su una variabile dipendente di tipo binario o distribuita in modo esponenziale, allorché si disponga di dati raccolti nel tempo su più siti.

Sebbene la notazione impiegata sia la stessa dei modelli GLM (cfr. Equazione 11), in un modello GEE le osservazioni sono considerate dipendenti tra loro e la correlazione è stimata con un opportuno stimatore; perciò  $\beta$  è un vettore di parametri da stimare e  $g$  rappresenta la relazione funzionale intercorrente tra variabili dipendenti e covariate.

Per la stima dei parametri  $\beta$  occorre risolvere la seguente equazione:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^T V_i^{-1} [Y_i - \mu_i] = 0 \tag{16}$$

in cui  $Y_i$  sono i valori osservati sulla variabile risposta, per  $i = 1, \dots, n$ , e per ogni  $Y_i$  si dispone di un vettore di variabili esplicative  $X_i$ ; mentre  $D_i$  è il vettore delle derivate prime dell'equazione di stima rispetto a  $\beta$  ed ha la seguente forma:

$$D_i = \frac{\partial \mu_i}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mu_i}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \mu_i}{\partial \beta_2} & \dots & \frac{\partial \mu_i}{\partial \beta_p} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \frac{\partial \mu_{ni}}{\partial \beta_1} & \frac{\partial \mu_{ni}}{\partial \beta_2} & \dots & \frac{\partial \mu_{ni}}{\partial \beta_p} \end{bmatrix} \tag{17}$$

con:

$V_i$  = matrice di covarianza;

$\beta_p$  = parametri di regressione da stimare;

$\mu_i$  = valore atteso dell'osservazione  $i$ -esima.

Tenuto conto che non è possibile conoscere a priori il tipo di correlazione intercorrente tra i dati, Liang e Zeger [41] hanno proposto l'uso di una matrice di covarianza  $V'(\alpha)$ , basata sulla matrice di correlazione  $R_i(\alpha)$ . In questo modo, si esegue la stima dei parametri  $\beta$  sostituendo  $V_i$  con  $V'_i$  nelle equazioni fondamentali sopra riportate.

La matrice di covarianza si ricava attraverso l'espressione seguente:

$$V'(\alpha) = A_i^{1/2} R_i(\alpha) A_i^{1/2} \tag{18}$$

in cui la matrice  $R_i(\alpha)$  descrive la correlazione temporale intercorrente fra le diverse osservazioni;  $A_i$  è una matrice diagonale comprendente le varianze degli elementi di  $Y_i$ , calcolati a partire dai parametri  $\beta$ .

È evidente che la specificazione della forma della correlazione nella variabile dipendente rappresenta il problema centrale nell'ottenimento di stime più efficienti. Infatti, sebbene secondo Liang e Zeger [41] i modelli GEE siano, nella generalità dei casi, "robusti" anche in assenza di una corretta specificazione della struttura di

correlazione, secondo Ballinger [42] quando la struttura specificata è molto lontana da quella reale, ci si può aspettare perdita di efficienza nelle stime.

La ricerca della reale struttura di correlazione attraverso la procedura GEE e la valutazione della bontà della stima, con criteri appropriati, possono migliorare la precisione delle stime e influenzare positivamente l'affidabilità delle previsioni di sicurezza. Le regressioni GEE possono condursi considerando differenti matrici di correlazione, cioè assumendo che le osservazioni ripetute siano correlate in modi diversi; in generale tre sono le principali strutture di correlazione:

- una matrice di correlazione di tipo indipendente, per la quale tutte le osservazioni sono indipendenti le une dalle altre; in tal caso i risultati forniti dalla procedura GEE coincidono con quelli ottenibili da regressione in ambiente GLM;
- una matrice di correlazione per consentire stime libere della correlazione tra le osservazioni;
- una matrice di correlazione in cui non vi sia un ordine logico nelle osservazioni.

### 2.2.3 Metodo Bayesiano Empirico

Per migliorare ulteriormente la stima della sicurezza, numerosi ricercatori hanno applicato allo studio dell'incidentalità una tecnica nota come metodo Bayesiano Empirico (BE). Con questo metodo si aumenta la precisione della stima e si corregge l'errore di regressione alla media, ossia l'oscillazione casuale del numero di incidenti intorno al valore medio. In estrema sintesi, il concetto principale di tale metodologia è di utilizzare una popolazione di riferimento da cui estrarre le entità, cioè gli elementi cui si riferisce lo studio a parità di variabile dipendente. Infatti si tiene conto di due informazioni: la prima è rappresentata dalla storia degli incidenti relativa all'entità in questione; la seconda informazione riguarda la storia degli incidenti relativa a un gruppo di entità simili a quella in esame (gruppo di riferimento), e la stima è tanto migliore quanto più numeroso è il gruppo di riferimento.

Un'esposizione completa del metodo BE applicato allo studio dell'incidentalità è stata fornita da Hauer [43-44] che illustra i pregi di questa metodologia attraverso alcuni esempi. Si immagini, per esempio, di voler stimare il numero atteso di incidenti  $\bar{y} \approx E[y]$  di una data entità riferiti a un certo periodo. Sono disponibili due tipi di informazioni: è noto che l'entità in questione, date le sue caratteristiche (geometriche, di traffico, ecc.), fa parte di una popolazione di riferimento di  $n$  entità ciascuna con un proprio valore di  $\bar{y}$ ; la seconda informazione è data dalla conoscenza del numero di incidenti  $y$  che, nel periodo considerato, si sono verificati sull'entità in esame. Nella popolazione di riferimento alcune entità avranno registrato 0 incidenti, altre 1 incidente, altre 2 e così via: tra esse si considerano solo le entità che hanno registrato esattamente  $y$  incidenti. Si indicano con  $E[\bar{y} | y]$  e  $VAR[\bar{y} | y]$ , rispettivamente media e varianza degli  $\bar{y}$  relativi alla popolazione estratta.

La migliore stima possibile della sicurezza dell'entità in esame è quella che tiene conto del contributo delle due informazioni: la prima derivante dal gruppo di

riferimento, la seconda relativa al conteggio di incidenti per l'entità in questione, pesate, rispettivamente, con i pesi  $\alpha$  e  $1-\alpha$ . Si può quindi scrivere:

$$E[\bar{y} | y] = \alpha \cdot E[\bar{y}] + (1 - \alpha) \cdot y \quad (19)$$

in cui  $\alpha$  è un numero compreso fra 0 ed 1.

Si dimostra che si ottiene la migliore precisione della stima se si calcola  $\alpha$  con la formula seguente:

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{\text{VAR}[y]}{E[y]}} \quad (20)$$

L'Equazione 19 può anche scriversi come segue:

$$E[\bar{y} | y] = y + \alpha \cdot (E[\bar{y}] - y) \quad (21)$$

nella quale si evidenzia l'effetto della regressione alla media: infatti si ottiene la stima di  $\bar{y}$  come somma del numero di incidenti  $y$  e di un termine correttivo, che sarà positivo o negativo a seconda che risulti  $E[\bar{y}] > y$  o  $E[\bar{y}] < y$ , che indica la regressione alla media. Si dimostra anche che si può stimare la varianza con l'Equazione 22:

$$\text{VAR}[\bar{y} | y] = (1 - \alpha) \cdot E[\bar{y} | y] \quad (22)$$

Dalle relazioni scritte in precedenza, si evince che è necessario conoscere media e varianza dei valori attesi degli incidenti per le  $n$  entità della popolazione di riferimento.

Inoltre, è mostrato che valgono le seguenti relazioni:

$$E[\bar{y}] = E[y] \quad (23)$$

$$\text{VAR}[\bar{y}] = \text{VAR}[y] - E[\bar{y}] \quad (24)$$

Detti quindi  $n(y)$  il numero di entità in cui si sono verificati  $y$  incidenti, possono calcolarsi media e varianza campionarie come segue:

$$m_y = \frac{\sum y \cdot n(y)}{n} \quad (25)$$

$$s_y^2 = \frac{\sum (y - m_y)^2 \cdot n(y)}{n} \quad (26)$$

Se si estende la sommatoria a tutti i valori di  $y$ ; al crescere di  $n$  si ha  $m_y \rightarrow E[y]$  e  $s_y^2 \rightarrow \text{VAR}[y]$ .

Diversi autori [45-46] hanno dimostrato il pregio del metodo Bayesiano Empirico nella validazione dei modelli predittivi degli incidenti mettendo a confronto la frequenza media degli incidenti prevista, determinata usando un modello predittivo, con la frequenza degli incidenti osservata. La teoria del metodo empirico di Bayes, come descritto da Donnell et al. [47], è alla base dell'Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM, [48]), sviluppato dalla Federal Highway Administration (FHWA), e sarà utilizzata nel Comprehensive Highway Safety Improvement Model (CHSIM).

Chen [49] e Tabatabaee [50] hanno calibrato modelli di previsione dell'incidentalità adottando i processi decisionali di Markov e il Metodo Bayesiano Empirico al fine di stabilire la procedura migliore che permetta di trasferire i modelli generati in contesti diversi da quelli in cui sono stati calibrati. Ancora una volta il metodo Bayesiano Empirico è risultato il metodo statisticamente più attendibile e concettualmente superiore alla selezione di un unico modello perché riduce i problemi di incertezza.

### 2.3 Modeling Operating Speed

La circolare del Transportation Research Board (TRB) “Modeling Operating Speed: Synthesis Report” [51] è un compendio che contiene i modelli delle velocità operative sviluppati in tutto il mondo negli ultimi 50 anni. La velocità è, infatti, uno dei più importanti fattori che gli utenti della strada tengono in considerazione nel valutare la convenienza e l'efficienza di un percorso piuttosto che un altro. La velocità è il parametro utilizzato dai progettisti per definire il grado di consistency di una infrastruttura viaria [52-54]; con tale termine, infatti, si suole indicare la misura di quanto la geometria stradale e le caratteristiche operative siano conformi alle aspettative dei conducenti. Per tali motivi la velocità gioca un notevole ruolo nel campo dell'ingegneria stradale per l'intero arco di vita utile di una infrastruttura viaria. Da diverso tempo, la comunità scientifica è concorde nell'affermare la validità della velocità operativa, definita come l'85° percentile della distribuzione delle velocità, quale parametro che meglio rappresenta il comportamento di guida degli utenti su strada in condizioni di flusso libero. Per questo ricercatori di tutto il mondo hanno elaborato diversi modelli di previsione delle velocità operative utili anche come strumenti di progettazione, pianificazione e supporto alle decisioni per migliorare il funzionamento delle infrastrutture esistenti e da realizzare. Nel report i modelli sono raggruppati per tipologia di infrastruttura investigata e per ambito geografico; la velocità operativa è sempre espressa in funzione di parametri infrastrutturali, ambientali e di traffico. Nello studio dei modelli prodotti negli anni, sono state

riscontrate delle lacune o dei limiti di applicazione perciò il report contiene anche suggerimenti per lo sviluppo di future ricerche.

L'influenza della velocità sulla sicurezza della circolazione è stata messa in risalto anche a livello europeo da Breen [55] che tenendo conto delle molteplici comunicazioni della Commissione Europea ha redatto l'High Level Group on Road Safety in cui individua delle possibili linee strategiche di intervento per i feriti gravi come ridurre le velocità inadeguate o eccessive alla guida.

Molti ricercatori [56-57] hanno studiato il comportamento dei guidatori in funzione della velocità identificando tutti i possibili fattori che possono influenzare le condizioni di sicurezza.

Fuller et al. [58] hanno valutato il rischio di incidente generato da velocità di guida inappropriate, utilizzando un simulatore di guida dinamico. La sperimentazione ha coinvolto 70 partecipanti, con età media di circa 25 anni. A ciascun partecipante era richiesto di guidare su diversi percorsi ad una determinata velocità, quindi l'utente esprimeva un giudizio sulla difficoltà di guida e sul livello di rischio di incidente percepito su quel percorso mantenendo la velocità fissata. La sperimentazione conferma le precedenti ricerche sul legame tra la velocità e la probabilità di incidente ed evidenzia che l'utente modifica la propria velocità di guida in funzione di un livello di rischio di incidente che ritiene accettabile e sostenibile.

Tarko [59] estende la teoria economica della scelta del consumatore al comportamento di guida degli utenti proponendo un modello per cui la scelta della singola velocità deriva da una decisione ottimale che l'utente compie istantaneamente nel preferire una riduzione del tempo di percorrenza stimato. Secondo Tarko, infatti, il rischio di incidente e i sistemi di controllo della velocità sono considerati dall'utente dei deterrenti della velocità, mentre la percezione di un guadagno di tempo è considerata come un incentivo alla velocità.

Žilioniene e Vorobjovas [60] dimostrano che l'assenza di omogeneità lungo un tracciato stradale può violare le aspettative dell'utente aumentando il ritardo nei tempi di risposta, il numero di manovre scorrette e l'adozione di velocità inadeguate con conseguente verificarsi di un incidente. Possibili fattori che possono influenzare le condizioni di sicurezza durante la guida possono essere imputati a scelte personali, alle condizioni del veicolo, all'infrastruttura e alle sue caratteristiche ambientali. Lo studio è stato condotto sulla rete stradale lituana applicando i tre criteri di congruenza di Lamm e Choueri. Le autrici suggeriscono di assicurare la compatibilità degli elementi planimetrici perché è un fattore di sicurezza del traffico. Se, infatti, c'è compatibilità, la probabilità di errori di guida è ridotta, mentre elementi incompatibili possono trarre in inganno il conducente e indurlo a una guida pericolosa a causa delle considerevoli variazioni di velocità.

Török [61] ha investigato l'influenza dei fattori ambientali sulla scelta della velocità adottata dagli utenti. Lo studioso intende dimostrare che gli utenti della strada, sebbene soggetti a norme di guida, adeguano la velocità di guida in funzione di considerazioni personali; secondo lo studioso, infatti, le decisioni degli utenti sono influenzate da fattori ambientali e alcuni di questi sono stimoli prevedibili e

intenzionali. Due modelli sono stati sviluppati: per ambito urbano ed extraurbano. Le variabili indipendenti sono: la distanza di sicurezza, il limite di velocità e la larghezza della corsia. I risultati evidenziano che in ambito extraurbano gli utenti adeguano la velocità in funzione delle reali condizioni della strada e non del limite di velocità, precisamente all'aumentare della distanza di visibilità e/o della larghezza della corsia l'utente attinge valori di velocità crescenti; in ambito urbano i parametri considerati sono inefficaci ai fini della scelta della velocità di guida da adottare.

Quddus [62] analizza il legame tra velocità media, variazione di velocità e tasso di incidentalità il sistema informativo geografico GIS. L'autore sviluppa due modelli: binomiale negativo e logaritmico con distribuzione degli errori di Poisson. La correlazione tra le variabili adoperate è stata investigata con un modello Bayesiano gerarchico. Il database utilizzato è composto di 266 tronchi stradali di 13 autostrade e 17 strade extraurbane. I risultati ottenuti evidenziano che la velocità media non influenza i tassi di incidentalità a dispetto di altre variabili come il volume di traffico, la geometria e il numero di corsie. Invece la variazione di velocità tra due elementi geometrici successivi è risultata statisticamente correlata ai tassi di variazione in maniera positiva pertanto un incremento dell'1% nella variazione di velocità comporta un incremento dei tassi di incidentalità dello 0.3%.

Nella letteratura scientifica si ritrovano memorie orientate all'osservazione del comportamento dei guidatori lungo i rettili o le curve [63]. I modelli di previsione delle velocità in rettilo sono relazioni tra la velocità operativa in rettilo e le generali peculiarità del tronco esaminato, non solo di natura geometrica bensì ambientale, di traffico, morfologica, e infrastrutturale [64]. I modelli per la previsione della velocità operativa su elementi curvilinei circolari si avvalgono, essenzialmente, di due tipologie di variabili: quelle proprie dell'elemento considerato, di natura non strettamente geometrica, e quelle relative agli elementi limitrofi o del tracciato nel suo complesso [65].

Il report realizzato dal National Cooperative Highway Research Program, per competenza del Transportation Research Board [66], si propone come guida allo studio degli effetti dell'eccesso di velocità, sulle condizioni che possono indurre gli utenti ad adottare velocità inadeguate alle intersezioni e suggerisce possibili soluzioni ingegneristiche per ridurre la velocità. Tuttavia Richard et al. [67] evidenziano come, molto spesso, le soluzioni adottate per ridurre la velocità siano efficaci in determinate località ma risultino dispendiose e inadeguate in altre. Pertanto suggeriscono di continuare a migliorare le informazioni sulle attitudini e le motivazioni che spingono gli utenti ad assumere un comportamento di guida rischioso in termini di velocità adottate.

Tra le strategie adottate in diversi ambiti geografici, per ridurre la velocità si segnalano i dispositivi di moderazione del traffico o di traffic calming [68-70]. Gli interventi di moderazione del traffico rappresentano un utile strumento di adeguamento delle strade esistenti che consentono non solo di ridurre la velocità ma di intervenire anche sul comportamento di guida dell'utente e sul traffico, infatti, tali dispositivi spezzano la continuità della geometria stradale, creano un elemento di

disturbo che altera il comportamento dell'utente, inducendone la moderazione della velocità [71].

## 2.4 The Highway Safety Manual

In passato, nella pratica tecnica si manteneva ancora un approccio basato prevalentemente sull'esperienza del professionista. Una delle cause era dovuta all'assenza di guide o manuali di riferimento che consentissero di adottare un approccio quantitativo alla sicurezza stradale, fondato su solide basi scientifiche. Attualmente tra i principali strumenti a disposizione degli ingegneri stradali, come evidenziato da Porter et al [72], vi è l'Highway Safety Manual [73]. Lo scopo dell'HSM è di trasmettere a un'ampia schiera di professionisti trasportisti le attuali conoscenze riguardo alla sicurezza stradale, in modo da tener sempre presente tale aspetto nelle attività di pianificazione, programmazione, progettazione e realizzazione delle nuove infrastrutture stradali, e negli interventi di manutenzione delle infrastrutture esistenti.

L'HSM è composto di quattro sezioni.

La prima sezione riporta i concetti e le conoscenze base necessari per utilizzare l'HSM nella pratica comune. Questa sezione è, ulteriormente, suddivisa in tre capitoli. Il primo capitolo riporta un quadro generale dei metodi di stima e di previsione dell'incidentalità stradale, e i metodi esistenti per valutare l'efficacia degli interventi di messa in sicurezza. Il secondo capitolo è dedicato al fattore umano e a come questo possa influenzare l'interazione tra guidatore e strada. Ad esempio, spiega perché l'occhio umano non riesca a valutare accuratamente la velocità di un veicolo in avvicinamento, mostrando come la relazione tra la distanza di avvistamento di un veicolo e la dimensione della sua sagoma non sia una relazione lineare. A distanze elevate, infatti, le dimensioni di un veicolo in arrivo variano poco, mentre a distanza ravvicinata avviene il contrario. Ciò implica che a distanze elevate l'utente tende a sottostimare le velocità, mentre la sovrastima a distanze ravvicinate. Nell'ultimo capitolo si procede alla descrizione di come misurare la sicurezza di una infrastruttura viaria e ai dati necessari per stimare l'incidentalità.

La seconda sezione illustra le procedure e le informazioni utili per monitorare e avviare un processo di riduzione dell'incidentalità. I sei capitoli che costituiscono questa sezione descrivono il processo di gestione della sicurezza dell'infrastruttura stradale, articolato in sei fasi operative. Infatti, attraverso l'applicazione degli strumenti e delle metodologie incluse nell'HSM, è possibile:

- identificare i siti con potenzialità di riduzione della frequenza o della gravità degli incidenti stradali;
- identificare i fattori che hanno contribuito all'incidentalità e le relative possibili contromisure;
- condurre delle valutazioni economiche degli interventi e assegnare delle priorità;

- valutare la variazione dell'incidentalità delle misure realizzate.

Un aspetto interessante di questa sezione è la spiegazione di come le procedure descritte consentano di monitorare e individuare i siti che necessitano di interventi mirati alla riduzione della frequenza e della severità degli incidenti sulle infrastrutture esistenti. Il manuale suggerisce gli strumenti più appropriati da utilizzare per programmare degli interventi sulla rete a favore della sicurezza stradale, o per valutare gli effetti delle eventuali modifiche apportate a un progetto nelle fasi di progettazione preliminare e definitiva, o ancora per monitorare le prestazioni dell'infrastruttura esistente valutando l'efficacia degli interventi realizzati.

La terza sezione riporta i modelli per stimare le prestazioni di sicurezza delle infrastrutture stradali esistenti. I modelli predittivi si basano su funzioni di prestazione della sicurezza stradale (FPS) che consentono di stimare la frequenza media degli incidenti (incluso, tra l'altro, la severità dell'incidente e il tipo di collisione) su reti stradali, singole strade o specifico elemento del tracciato (nel seguito indicati con la terminologia "sito"), sia in ambito urbano che extraurbano. Tale stima può essere calcolata con riferimento alle condizioni esistenti, a scenari alternativi rispetto a quello esistente oppure a nuovi progetti. Il metodo predittivo è applicato a un dato periodo d'interesse in cui il volume di traffico (Average Annual Daily Traffic, AADT) e le caratteristiche geometriche della strada si mantengono costanti. Le FPS sono basate su una distribuzione binomiale negativa e si riferiscono a siti specifici che rientrano nelle cosiddette "condizioni base" in relazione alle caratteristiche geometriche e di traffico. In particolare un sito è in condizioni di base se:

- la larghezza della corsia è pari a 12 piedi (3,66 m);
- la banchina è pavimentata ed ha una larghezza pari a 6 piedi (1,83 m);
- la densità degli accessi è di 5 accessi per miglio (3 accessi per km);
- la pendenza longitudinale è dello 0%;
- non vi sono curve orizzontali, né verticali, strisce centrali rumorose, corsia di sorpasso, corsie per la svolta a sinistra, illuminazione, sistemi di controllo dei limiti di velocità;
- il livello di pericolosità del sito, calcolato secondo Zegeer et al. [74], è pari a 3.

Per applicare il modello di regressione a tronchi che non rientrano nelle condizioni geometriche di base, è necessario correggere la SPF con dei coefficienti moltiplicativi, noti come Accident Modification Factor (AMF), e con un fattore di calibrazione che consente di correggere il modello portando in conto particolari caratteristiche del sito in analisi quali: comportamento degli utenti, condizioni meteo-climatiche, ambito geografico, norme, ecc. Il metodo predittivo associa la frequenza media degli incidenti alla frequenza degli incidenti osservata, utilizzando il Metodo Empirico di Bayes.

La quarta sezione descrive le procedure per la calibrazione degli AMF. Tali coefficienti rappresentano l'efficacia degli interventi effettuati all'infrastruttura, come ad esempio le modifiche alla geometria della strada o quelle di tipo operativo alla

circolazione, e forniscono una stima della variazione di incidentalità in un sito a seguito delle modifiche apportate.

In definitiva, l'HSM costituisce un riferimento per tutti i professionisti che si occupano di sicurezza stradale [75]. Fornisce, infatti, delle procedure di calibrazione per adattare i modelli predittivi alle realtà locali e indicazioni utili sugli ambiti di applicazione delle metodologie e degli strumenti proposti. A supporto delle procedure e dei metodi inclusi, il manuale riporta molteplici esempi pratici [76].

Martinelli et al. [77] hanno applicato la procedura di calibrazione del modello di previsione dell'incidentalità, proposto dall'HSM, alle strade extraurbane ad unica carreggiata e doppio senso di circolazione ricadenti nella rete della viabilità ordinaria della provincia di Arezzo. Lo scopo era valutare l'applicabilità del modello americano a contesti geografici differenti. Il database di riferimento include circa 938 km di strade extraurbane a doppia corsia su cui sono stati rilevati 402 incidenti nel triennio 2002-04. La rete è stata suddivisa in tronchi stradali secondo quanto suggerito dal manuale HSM. Gli autori hanno definito cinque classi di traffico; quindi hanno calibrato degli AMF specifici per il raggio delle curve planimetriche, la larghezza della carreggiata e della banchina, la pendenza longitudinale, la densità degli accessi. Per ciascuna classe di traffico, inoltre, sono stati calibrati nuovi coefficienti di calibrazione definiti, diversamente da quanto suggerito dall'HSM, come media pesata sulla lunghezza totale dei tronchi appartenenti alle classi fissate. L'HSM propone due differenti modelli per la previsione degli incidenti su strade extraurbane; uno definisce condizioni geometriche di base e non, e richiede l'applicazione degli AMF e del fattore di calibrazione; l'altro non prevede distinzione alcuna e perciò è denominato modello completo. Entrambi i modelli suggeriti dal manuale sono stati applicati alla rete di studio. I risultati hanno evidenziato che il modello base con gli AMF funziona meglio rispetto al modello completo, e che per ogni classe di traffico individuata bisogna adottare un diverso coefficiente di calibrazione calcolato attraverso la media pesata sulla lunghezza totale dei tronchi stradali in ogni classe. Infine è stato osservato che la calibrazione è assolutamente necessaria per la trasferibilità del modello in un contesto geografico differente, al fine di avere una previsione degli incidenti adeguata.

Xie et al. [78] hanno applicato il modello di previsione dell'HSM per la rete autostradale dello Stato dell'Oregon. La procedura adoperata per determinare la frequenza di incidente è quella suggerita dal manuale; gli autori, però, riscontrano che il valore del coefficiente di calibrazione è inferiore all'unità e perciò il modello calibrato per la rete autostradale dell'Oregon tende a sovrastimare la reale frequenza di incidente rilevata. Secondo i ricercatori la causa è da attribuirsi al metodo di registrazione degli incidenti; al fine di dimostrare tale ipotesi, sono state confrontate le percentuali dell'HSM per i diversi livelli di severità di incidente con quelle dell'Oregon. È emerso che i fattori di calibrazione per gli incidenti lesivi sono maggiori di quelli relativi al totale degli incidenti; ciò dimostra che ci sono errori di registrazione e quindi per determinare la frequenza di incidente in questo Stato bisogna utilizzare dei fattori di calibrazione distinti per severità di incidente.

Sun, et al. [79] hanno calibrato funzioni di prestazione della sicurezza per le strade extraurbane ad unica carreggiata e più corsie per senso di marcia dello Stato della Louisiana. Gli autori hanno suddiviso la rete in tronchi stradali ed hanno applicato il modello HSM rispettando i valori critici del traffico e delle caratteristiche infrastrutturali proposti dal manuale. Il coefficiente di calibrazione, però, mostra che il modello HSM sottostima il numero di incidenti rispetto a quelli rilevati. In aggiunta sono stati verificati quattro dei tredici metodi proposti dal manuale per identificare i tronchi stradali critici cui assegnare priorità d'intervento. Precisamente la pericolosità è stata identificata attraverso il calcolo della frequenza di incidente, dei tassi di incidente, della frequenza media di incidente calcolata con il modello HSM, e della frequenza media di incidente calcolata con il metodo bayesiano empirico corretto. Il confronto tra i risultati ottenuti mostra che i metodi basati sul calcolo della frequenza di incidente e delle frequenze medie di incidente restituiscono valori simili; sono perciò da preferirsi al metodo basato sul calcolo dei tassi di incidente.

Howard and Steven [80] hanno calibrato il modello HSM per le strade extraurbane dello Stato del Kansas. Sono stati usati due differenti campioni d'indagine per le fasi di calibrazione e validazione. Come per lo stato dell'Oregon [78], il coefficiente di calibrazione indica una sovrastima della frequenza degli incidenti rispetto ai valori rilevati. Per migliorare la precisione del modello calibrato, ed essendo gli incidenti con investimento di animali molto frequenti in Kansas, gli autori hanno formulato quattro ipotesi: (1) calcolare un coefficiente di calibrazione statale, (2) calcolare coefficienti di calibrazione specializzati per tipologia di incidente, (3) calibrare un modello per contea o (4) per tronco stradale che tenga conto dell'elevata frequenza di incidenti con investimento di animali. I risultati, valutati attraverso il metodo bayesiano empirico, dimostrano che i modelli calibrati sono più accurati di quello HSM. In particolare gli autori suggeriscono di adottare il modello con il coefficiente di calibrazione statale per determinare la frequenza totale degli incidenti; di adottare un modello per contea che tenga conto degli incidenti con investimento di animali nel caso di analisi a livello di progetto.

Banihashemi [81] ha sviluppato un algoritmo euristico per calibrare funzioni di prestazione della sicurezza e coefficienti AMF per la rete stradale extraurbana dello Stato di Washington. Le FPS sono state confrontate con quelle del manuale HSM. La rete ha una consistenza di oltre 5.000 miglia (più di 8.000 km) ed è stata suddivisa in tronchi stradali; i dati di incidentalità si riferiscono a un periodo di osservazione di 3 anni (2002-04). L'autore ha calibrato una FPS in cui le variabili esplicative sono il traffico (AADT) e la lunghezza del tronco stradale in esame; quindi ha calibrato i coefficienti AMF per la larghezza della corsia e della banchina, il raggio delle curve circolari e la pendenza longitudinale. Il confronto della FPS sviluppata, con il modello HSM, è stato fatto su tre livelli di aggregazione: (a) considerare ogni dato come singola osservazione, (b) considerare soli i tronchi stradali con lunghezza minima di 10 miglia (~ 16 km); (c) considerare tronchi stradali aggregati in base alle caratteristiche geometriche e di traffico. I risultati hanno dimostrato che il modello HSM funziona e pertanto non è necessario calibrare nuovi modelli.

In seguito lo stesso autore [82] ha condotto un'analisi di sensitività che consente di valutare la numerosità del campione di indagine, necessaria per la calibrazione di un modello di previsione degli incidenti per differenti infrastrutture stradali, e la sua influenza sul coefficiente di calibrazione. Le infrastrutture investigate possono essere raggruppate in quattro gruppi:

- 1) strade extraurbane ad unica carreggiata e doppio senso di marcia
- 2) strade extraurbane ad unica carreggiata e più corsie per senso di marcia
- 3) strade extraurbane a doppia carreggiata e più corsie per senso di marcia
- 4) strade urbane e suburbane

Sono stati calcolati diversi coefficienti di calibrazione utilizzando differenti percentuali della numerosità del campione relativo a ciascun gruppo considerato. Tali coefficienti sono stati confrontati con i coefficienti di calibrazione calcolati sull'intero gruppo di riferimento, e considerati ideali. Precisamente Banhashemi ha valutato l'effetto della consistenza del campione sul coefficiente di calibrazione verificando che i diversi coefficienti di calibrazione differissero da quelli ideali di una quantità compresa tra il 5% e il 10%. I risultati di questa ricerca, quindi, contribuiscono a definire la numerosità di un campione d'indagine per ottenere un congruo coefficiente di calibrazione.

Brimley et al. [83] hanno applicato il modello HSM per le strade extraurbane ad unica carreggiata e doppio senso di marcia dello Utah. Come riscontrato da Sun, et al. [81], il coefficiente di calibrazione, calcolato secondo la procedura HSM, sottostima il numero di incidenti rispetto a quelli rilevati. Gli autori hanno calibrato quattro FPS locali, nell'ipotesi di distribuzione della frequenza degli incidenti di tipo binomiale negativa, secondo due livelli di significatività, pari rispettivamente al 75% e al 95%. Il modello migliore, selezionato in base al criterio di informazione bayesiano (BIC), è significativo al 95% e le variabili esplicative sono la lunghezza del tronco stradale in esame, il traffico, la percentuale dei mezzi pesanti e la velocità.

Zegeer et al. [84] hanno applicato il modello HSM a specifici elementi del tracciato. Gli autori hanno rilevato dati infrastrutturali, di traffico e di incidentalità per numerosi rettifili, curve circolari e curve di transizione rettilineo-cerchio. È stata calcolata la frequenza degli incidenti rilevati su ciascun elemento e sono stati ricavati i valori di media e deviazione standard; per le curve circolari la deviazione standard è superiore rispetto ai rettifili e alle curve di transizione, perciò è stato calibrato il modello HSM per le sole curve planimetriche. L'analisi di sensitività ha evidenziato che le variabili esplicative per la previsione della frequenza di incidente lungo le curve planimetriche sono il traffico, il raggio e lo sviluppo della curva considerata. Infine, l'analisi dei residui ha dimostrato l'affidabilità del modello calibrato.

Russo et al. [85] hanno valutato la trasferibilità del modello proposto dall'HSM per una rete extraurbana italiana. La rete d'indagine ha una estensione di 1.800 km ed è stata suddivisa in 288 tronchi stradali omogenei secondo quanto suggerito dal manuale HSM; a ciascun tronco sono stati attribuiti dati infrastrutturali, di traffico e di incidentalità. I dati infrastrutturali sono la lunghezza dei tronchi, il tasso di variazione della curvatura, la larghezza della carreggiata e della banchina, la pendenza

longitudinale, la densità degli accessi. I dati di incidentalità si riferiscono al periodo 2003-10 e in particolare i primi cinque anni sono stati utilizzati per la fase di calibrazione mentre i restanti tre per la fase di validazione. Gli autori hanno distinto i tronchi stradali omogenei secondo le condizioni base e non base definite dal manuale; quindi per i tronchi che non rispettavano le condizioni base, sono stati applicati gli AMF suggeriti dal manuale. Per valutare l'effettiva trasferibilità del modello americano alla rete italiana è stato calcolato il coefficiente di calibrazione secondo la definizione fornita dal manuale HSM. I risultati ottenuti hanno evidenziato una sovrastima del numero di incidenti rispetto a quelli rilevati; pertanto un nuovo modello di previsione degli incidenti è stato calibrato per la rete di studio con l'adozione di una forma funzionale che rispetta quanto proposto dall'HSM. Sono state formulate differenti ipotesi per i tronchi stradali in condizioni geometriche base così come specifici AMF e coefficiente di calibrazione sono stati determinati. L'analisi dei residui, calcolati come differenza tra i valori predetti e rilevati, e di tre indicatori statistici sintetici, ha dimostrato la validità del modello locale calibrato. Gli autori hanno altresì fornito fattori di ponderazione su quota percentuale per stimare la variazione della frequenza media di incidente al variare della dinamica.

## 2.5 Modelli proposti per lo studio della severità di incidente

Un'analisi critica della produzione scientifica consolidata evidenzia che diversi ricercatori hanno tentato di definire modelli predittivi per strade extraurbane a due corsie. Tuttavia solo alcuni di questi studi si sono focalizzati su modelli che permettono di valutare la gravità degli incidenti stradali nel tentativo di ridurre le conseguenze in termini di numero di feriti e di morti [86]. Di seguito si riassumono brevemente alcuni di questi, con particolare riguardo non tanto alla formulazione del modello, quanto al processo di selezione del campione e all'approccio utilizzato per l'analisi statistica.

Pardillo Mayora et al. [87] hanno sviluppato un modello di regressione binomiale negativo per la previsione degli incidenti lesivi sulle strade extraurbane a doppia senso di marcia della rete stradale nazionale spagnola. Il campione di indagine ha una consistenza di 3.450 km ed è stato suddiviso in tre distinti sotto campioni per mitigare la ridondanza nelle informazioni statistiche. Ciascun sotto campione è stato stratificato in funzione del Traffico Giornaliero Medio (TGM). Le soglie definite corrispondono ai valori di traffico per i quali la congestione nelle strade extraurbane spagnole comincia a svilupparsi (tra 6.000 e 8.000 veic/giorno) o diventa severa (12.000 veic/giorno). Le due procedure adottate hanno permesso di ottenere delle stime affidabili e accurate degli incidenti lesivi, inoltre è possibile tenere conto della relazione tra frequenza di incidenti e caratteristiche della strada.

Oh [88] ha sviluppato quattro modelli di regressione specializzati per dinamica di incidente per intersezioni extraurbane a quattro rami. Il primo modello prevede la

probabilità di incidente a veicolo isolato, il secondo e il terzo prevedono la probabilità di incidente, rispettivamente tra due e fra tre o più veicoli, il quarto è un modello unico che tiene conto di tutte le dinamiche precedenti. Per determinare la severità di incidente, ciascun modello è stato raffinato con informazioni relative alle condizioni meteorologiche, alle manovre di traffico e alla geometria dell'intersezione considerata. I risultati evidenziano che la severità aumenta se il numero degli occupanti i veicoli cresce, se sulla strada principale il limite di velocità è elevato e le curve circolari hanno raggi molto piccoli. Viceversa una riduzione della severità è associata all'incremento del traffico, alla presenza di accessi e di corsie per la svolta a sinistra.

Eboli e Mazzulla [89], e successivamente Venkataraman et al [90], hanno investigato le relazioni tra severità degli incidenti, in termini di numero di feriti e numero di veicoli coinvolti, e le caratteristiche geometriche, ambientali e dell'utente su strade extraurbane. Gli studiosi italiani [89] hanno adottato la tecnica dello Structural Equation Model (SEM), mentre quelli americani [90] hanno sviluppato un modello di regressione binomiale negativo. In entrambi i casi, i risultati ottenuti indicano che le caratteristiche geometriche influenzano notevolmente la severità degli incidenti. In particolare gli studiosi americani hanno evidenziato che i principali parametri discriminanti sono la curvatura e la larghezza della corsia. Inoltre garantendo una buona visibilità del tracciato, soprattutto nelle ore notturne, si riduce la severità di incidente.

Kim [91] ha sviluppato modelli di previsione degli incidenti che causano feriti, morti o incidentati (feriti e morti) per le autostrade della Korea. L'autore ha sviluppato modelli di regressione del tipo probit indagando sui fattori che apparentemente sembrano non essere correlati tra loro ma che contribuiscono a generare l'evento incidente. Il campione di indagine è composto di 26 autostrade; i dati di incidentalità fanno riferimento al quinquennio 2002-06 e permettono di avere informazioni su: data, dinamica, età e genere del conducente, fattori ambientali e geometrici. Le variabili adoperate per i modelli sono: condizioni di luce, giorno della settimana, dinamica dell'incidente, condizioni climatiche, tipo di pavimentazione, genere, età e livello di attenzione del conducente, localizzazione, caratteristiche geometriche planimetriche e altimetriche. Per il modello predittivo del numero di incidenti con soli feriti sono risultate significative, al 90%, solo otto variabili, stessa percentuale di significatività anche per il modello dei soli morti ma in tal caso le variabili significative sono dieci; infine, tutte le variabili sono risultate significative al 99% per il modello unico.

Kashani e Mohaymany [92] hanno individuato i fattori che influenzano la severità di incidente sulle strade extraurbane iraniane. Gli autori hanno utilizzato la tecnica degli alberi di classificazione e regressione (CART), indicando due principali variabili esplicative: la dinamica di incidente e l'uso della cintura di sicurezza. In particolare sono state individuate 26 dinamiche di incidente ma quella che si riscontra frequentemente è la manovra di sorpasso.

Kunt et al [93] confrontano tre modelli di previsione della severità di incidente sulle autostrade in Iran. I dati di incidentalità si riferiscono all'anno 2007 ed hanno una consistenza pari a 1.000 incidenti. Le variabili esplicative sono età e genere del conducente, uso della cintura di sicurezza, tipo di veicolo, condizioni meteorologiche, tipologia di pavimentazione e fondo stradale, velocità, condizioni di luce, dinamica di incidente, localizzazione, volume di traffico. I modelli sono stati sviluppati utilizzando le reti neurali artificiali (RNA), gli algoritmi genetici (AG) e l'ottimizzazione matematica (OM). Sono state determinate undici equazioni attraverso l'AG e la migliore equazione è stata combinata con il metodo OM. Il modello di previsione migliore è stato selezionato confrontando i valori del coefficiente di correlazione, tre indicatori statistici sintetici: la deviazione media assoluta, l'errore quadratico medio e la somma dell'errore quadratico. La RNA ha fornito le stime più precise, infatti, il valore assunto dal coefficiente di correlazione è di circa 0,87; l'AG e la combinazione di AG e OM sono caratterizzati da un valore del coefficiente di correlazione di circa 0,79. L'utilizzo di più di un modello ha consentito agli autori di comprendere la relazione tra variabili in ingresso e in uscita (combinazione di AG e OM) ed ha permesso di ottenere previsioni accurate (RNA).

Bauer e Harwood [94] hanno sviluppato funzioni di prestazione della sicurezza stradale per strade extraurbane a unica carreggiata e doppio senso di circolazione. In particolare gli studiosi hanno stimato, attraverso opportuni coefficienti di modifica degli incidenti (AMF) gli effetti di diverse combinazioni della pendenza longitudinale e della curvatura sulla sicurezza delle strade investigate in termini di riduzione del numero di incidenti lesivi.

Lu et al. [95] hanno sviluppato funzioni di prestazioni della sicurezza utilizzando il metodo Bayesiano Empirico (EB), adottato nell'HSM e il software SafetyAnalys. I modelli consentono di stimare la frequenza media del totale degli incidenti e di quelli lesivi; i risultati evidenziano che le stime prodotte sono molto simili pertanto entrambe le metodologie sono affidabili.

È evidente come il tema della calibrazione di modelli di previsione della severità degli incidenti meriti di essere approfondito mediante ricerche dedicate.

## Capitolo 3 ~ Calibrazione di Funzioni di Prestazione della Sicurezza per la previsione della lesività degli incidenti

### 3.1 Premessa

Obiettivo della ricerca è la calibrazione di funzioni di prestazione della sicurezza stradale (FPS) per la previsione della frequenza media annua dei feriti, dei morti e del totale degli incidentati su strade extraurbane a carreggiata unica. Le FPS consentono di valutare le condizioni di sicurezza offerte dalle infrastrutture viarie in fase di progetto e di esercizio. Le FPS sono state calibrate sulle strade extraurbane della rete della viabilità ordinaria della Provincia di Salerno (cfr. Figure 3.1a-3.1b). La rete investigata rappresenta un buon campione di indagine data la grande varietà di condizioni orografiche (montuoso, collinare e pianeggiante), configurazioni geometriche, tipo di movimento servito (di penetrazione, di accesso e di uscita), funzioni assunte dalle strade nel contesto territoriale attraversato (collegamento provinciale, interlocale, comunale), componenti di traffico e relative categorie (autovetture, autocarri, ciclomotori, autobus, pedoni, ecc.), accessi (da area o da edificio privato, da strada ad uso privato), velocità operative, tipologia di intersezioni (lineari a raso e a rotatoria, a livelli sfalsati).



Figura 3.1a-Stralcio della rete stradale di studio

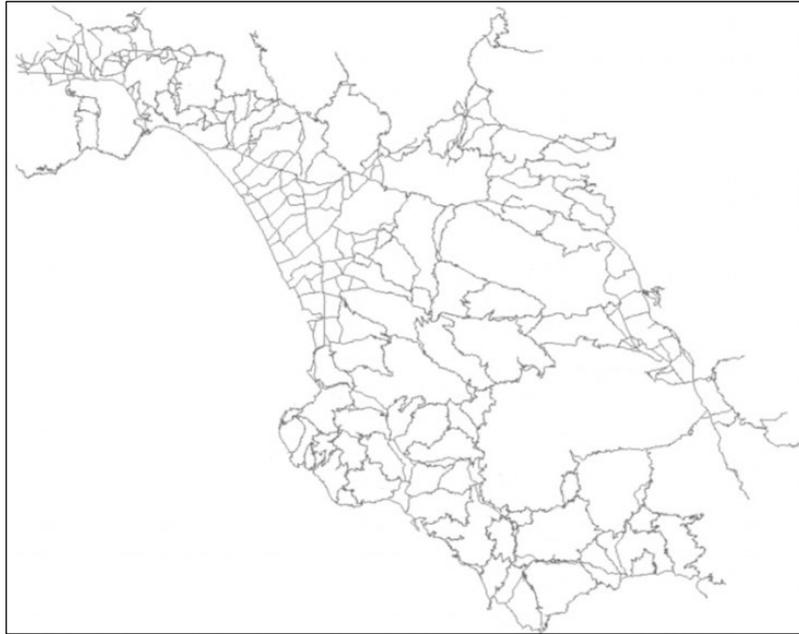


Figura 3.1b-Rete stradale di studio

La rete di studio ha uno sviluppo complessivo di circa 3.000 km e si compone di strade realizzate prima dell'entrata in vigore del Decreto Ministeriale del 5 Novembre 2001 [26] ma ascrivibili alle categorie C ed F extraurbane come definito dallo stesso D.M. (cfr. Figura 3.2).

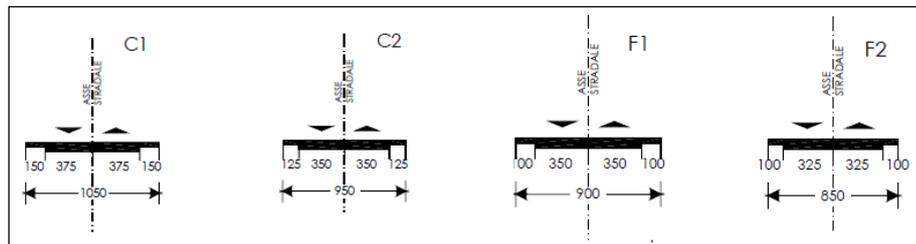


Figura 3.2-Configurazione delle piattaforme stradali in esame

Su queste strade la circolazione si svolge in modo alquanto diverso rispetto a quelle a carreggiate separate poiché per superare veicoli più lenti occorre invadere la corsia di marcia della corrente opposta. Caratteristiche geometriche tali da non garantire le visuali di sorpasso, in percentuali più o meno elevate del tracciato, danno luogo alla formazione di plotoni costituiti da veicoli veloci costretti ad accodarsi a quelli più lenti. I valori di portata di servizio sono, in media, di 500 autoveicoli equivalenti/ora per corsia mentre i valori di capacità sono di 1.700 autoveicoli/ora per direzione di marcia.

Sono state monitorate 552 sezioni stradali per un totale di circa 7.000 ore di rilievo; 415 sezioni ricadono in rettilineo, 117 in curve circolari e le restanti 20 sono sezioni in corrispondenza di curve a raggio variabile. I dati infrastrutturali, di traffico e di incidentalità sono stati rilevati in sito e/o acquisiti presso gli Enti gestori.

I dati infrastrutturali sono stati acquisiti con rilievi in sito integrati da informazioni derivanti dalla Cartografia Tecnica della Regione Campania. In Figura 3.3 è riportato un esempio di stralcio cartografico relativo alla geometrizzazione di parte della Strada Statale SS 426.

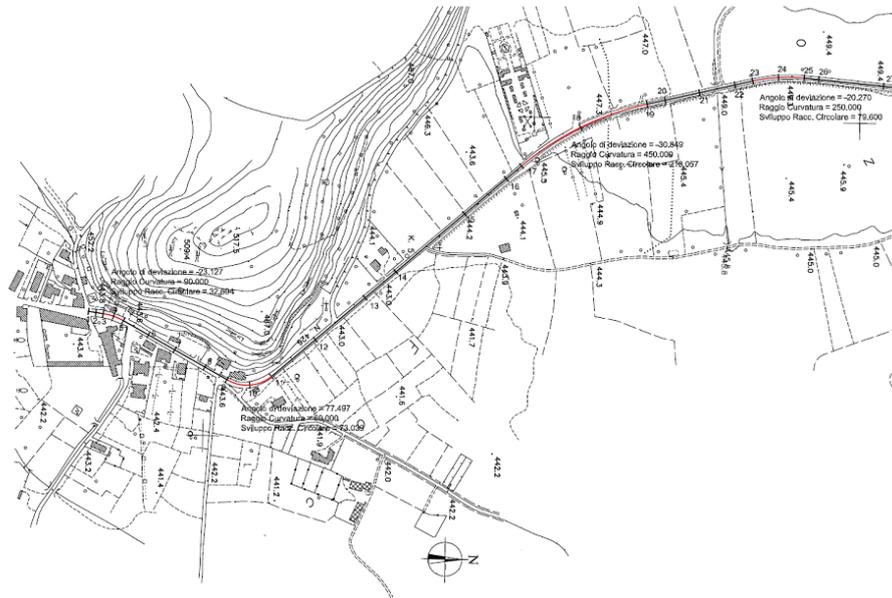
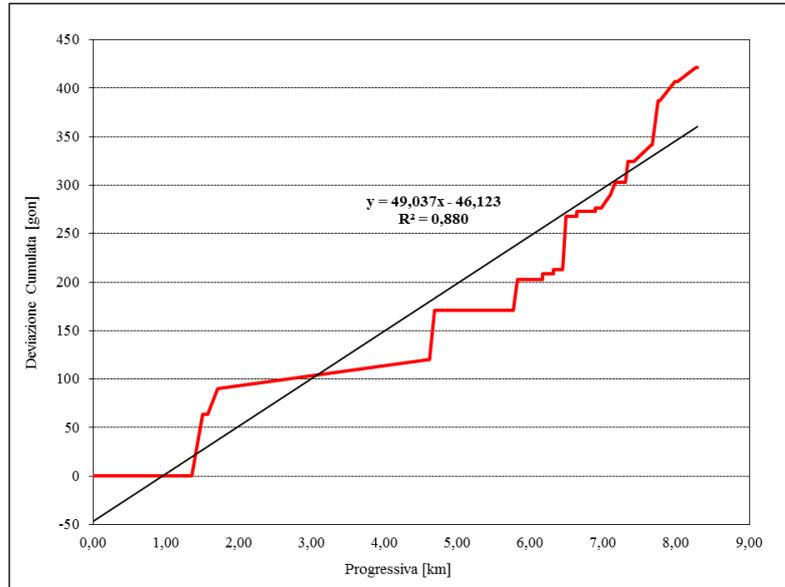


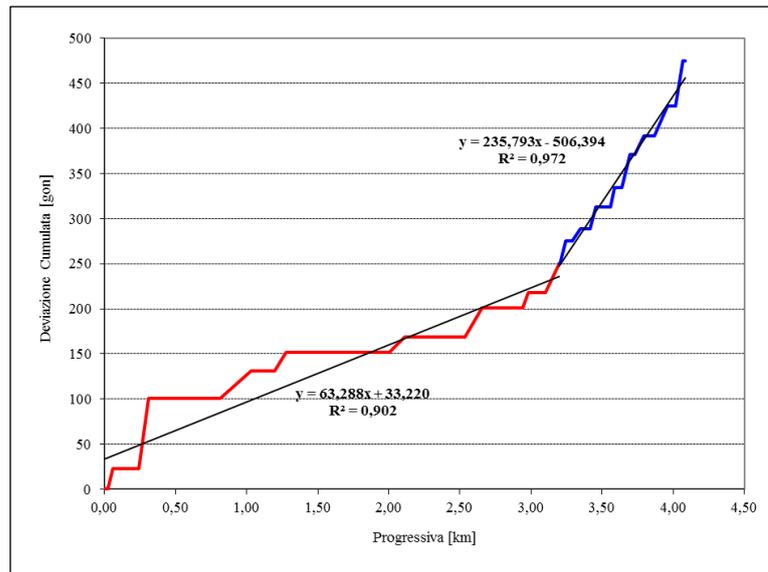
Figura 3.3-Stralcio cartografico di geometrizzazione

In particolare la ricostruzione dello spazio stradale ha riguardato l'acquisizione dei seguenti parametri: lunghezza dei rettifili, degli archi delle curve circolari e a raggio variabile, raggio e angolo di deviazione delle curve, pendenza longitudinale, larghezza delle corsie e delle banchine, presenza di svincoli ed intersezioni a raso, densità degli accessi per km e valore medio del tasso di variazione della curvatura ( $CCR_m$ ).

Il  $CCR_m$  è il rapporto tra la cumulata dei valori assoluti degli angoli di deviazione, variabili lungo l'ascissa curvilinea di un generico tronco stradale, e la lunghezza di quest'ultimo [96]. Il significato geometrico del  $CCR_m$  è fornito dal coefficiente angolare della retta che interpola la curva cumulata delle deviazioni angolari in funzione della progressiva. Le dimensioni del  $CCR_m$  sono, pertanto, quelle di un angolo misurato in gradi centesimali (gon) diviso una lunghezza (km). In Figura 3.4 sono riportati due esempi di stima del  $CCR_m$ : la Figura 3.4a restituisce la rappresentazione dell'unico tronco omogeneo con un  $CCR_m$  pari a 49,037 gon/km di cui si compone la Strada Provinciale SP 312 che ha uno sviluppo di circa 8,30 km; la Figura 3.4b restituisce i due tronchi stradali omogenei con un  $CCR_m$ , rispettivamente, pari a 63,288 gon/km per il primo, e un  $CCR_m$  pari a 235,793 gon/km per il secondo, che caratterizzano la Strada Statale SS 426.



a)



b)

Figura 3.4-Esempi di stima del CCRm: a) SP 166; b) SS 426

I valori di traffico giornaliero medio (TGM) gravanti sulla rete stradale di studio sono stati acquisiti mediante monitoraggio in sito e simulazioni modellistiche [97].

Le strumentazioni impiegate per i rilievi del traffico sono del tipo in postazione mobile e in postazione fissa. Le apparecchiature utilizzate in postazione mobile per il monitoraggio in sito sono conta traffico laser di fabbricazione SODI Scientifica. Il principio di funzionamento dello strumento è basato sull'emissione e sulla ricezione di una coppia di raggi laser, diretti perpendicolarmente all'asse stradale (Figura 3.5a); i raggi laser sono del tipo a bassa potenza e, pertanto, innocui per gli occupanti dei veicoli. Lo strumento è stato installato su un cavalletto allocato esternamente alla carreggiata (Figure 3.5b e c) per registrare, con riferimento a ciascun passaggio

veicolare, l'istante in cui è avvenuto il transito (data, ora, minuti e secondi), la velocità istantanea (in km/h), la lunghezza (in metri) del veicolo e la direzione di marcia [98].

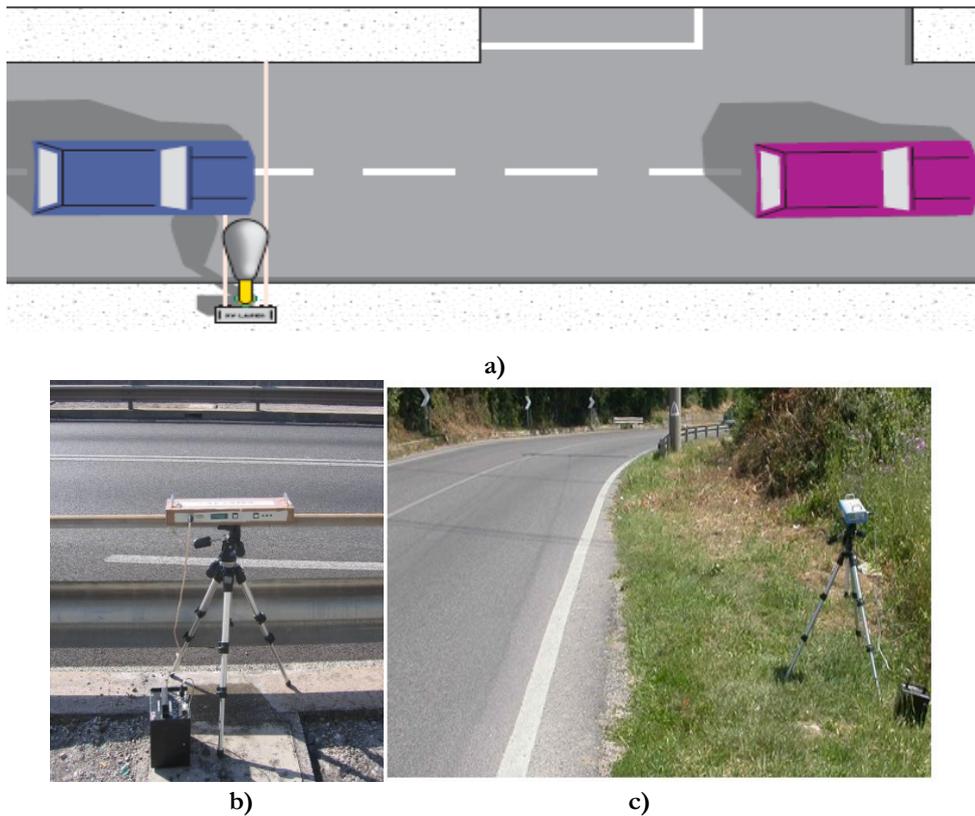


Figura 3.5-KV Laser

Le apparecchiature utilizzate in postazione fissa sono antenne radar di fabbricazione EIS (Electronic Integrated System). Il principio di funzionamento è basato sulla emissione, e la successiva ricezione, di microonde, ovvero di radiazioni elettromagnetiche ad alta frequenza con lunghezza d'onda compresa fra le onde radio e la radiazione infrarossa. Le onde sono a bassa potenza e, quindi, innocue per gli occupanti dei veicoli (Figura 3.6a). L' antenna è installata su pali dell'illuminazione pubblica ed è opportunamente segnalata ai conducenti (Figura 3.6b). Lo strumento registra, per ciascun passaggio veicolare, la lunghezza del veicolo (in metri), la velocità media (in km/h) e la direzione di marcia. I dati sono registrati in continuo ed immagazzinati con cadenza temporale di un minuto e trasmessi quotidianamente alla centrale operativa attraverso una rete di moduli di connessioni GSM (Figura 3.6c) [99].

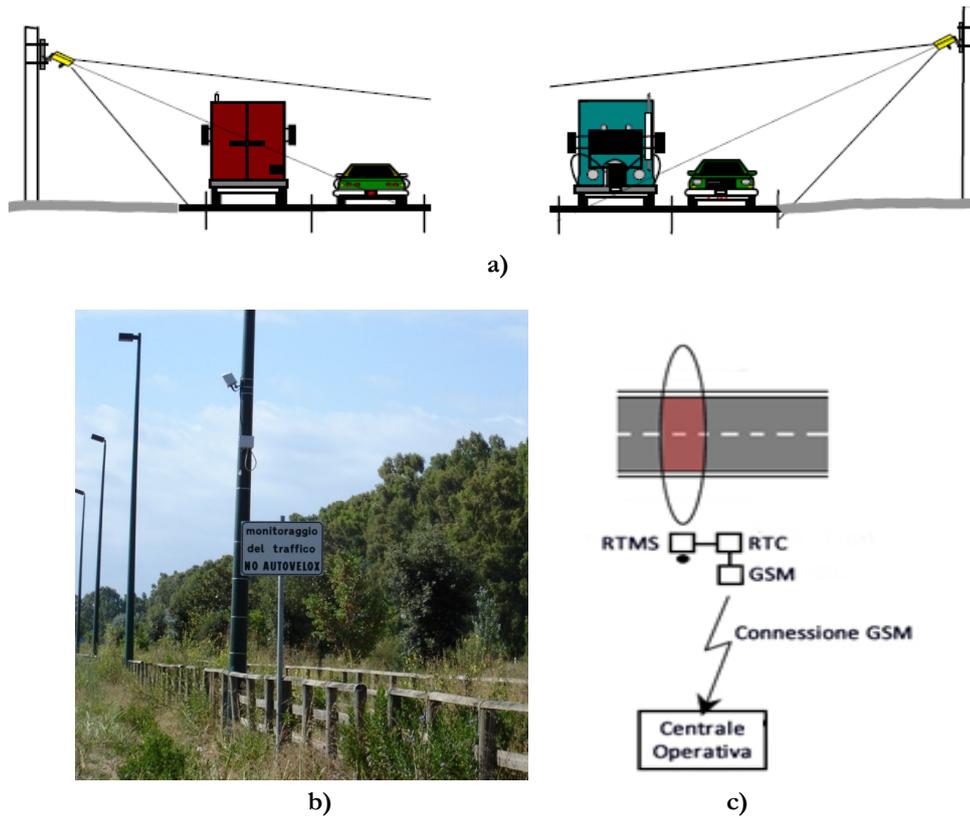


Figura 3.6-Antenna Radar

I dati di incidentalità sono stati acquisiti dai rapporti di incidente stilati dagli organi competenti. Per ciascun incidente sono stati registrati: data e ora, condizioni di luce (giorno/notte), localizzazione (strada e comune), elemento geometrico (rettifilo/curva), dinamica, numero di feriti, numero di morti, tipologie di veicoli coinvolti, condizioni meteorologiche, caratteristiche del fondo stradale (asciutto/bagnato). I dati rilevati si riferiscono ad un periodo di osservazione di cinque anni (2006–10); in totale sono stati rilevati 2.021 incidenti di cui 726 con solo danni a cose e 1.295 lesivi, determinando 2.089 feriti e 235 morti.

Le dinamiche investigate sono state raggruppate in tre categorie:

- scontro frontale, laterale e fronto-laterale;
- tamponamento;
- urto con veicolo temporaneamente fermo o in arresto, urto con veicolo in sosta effettiva, urto con ostacolo accidentale, fuoriuscita del veicolo, frenata improvvisa.

La distribuzione percentuale delle dinamiche è la seguente: scontro (52%), urto (26%) e tamponamento (22%). Nel 93% dei casi di incidenti avvenuti per scontro o urto si sono registrati solo feriti mentre nel restante 7% sono stati registrati anche morti. Nel caso di incidenti avvenuti per tamponamento nel 99% sono stati registrati solo feriti mentre nell'1% si sono registrati anche morti.

Per gli scopi dello studio, la calibrazione delle FPS è stata condotta con riferimento ai soli tronchi stradali omogenei<sup>1</sup> ( $CCR_m$  costante) su cui è stato rilevato almeno un ferito.

La risultante rete di calibrazione presenta una consistenza complessiva pari a oltre 2.000 km ed è costituita da strade extraurbane ad unica carreggiata e doppio senso di circolazione. In Tabella 3.1 sono consegnate le statistiche dei tronchi omogenei costitutivi la rete di studio.

Tabella 3.1- Statistiche descrittive della rete

	<i>TGM</i> [veic/giorno]	<i>i</i> [%]	<i>L</i> [km]	<i>l</i> [m]	<i>CCR<sub>m</sub></i> [gon/km]	$\Delta$ [accessi/km]
<b>Min</b>	250	0,12	1,42	2,50	30,05	0,00
<b><math>\mu</math></b>	3.490	2,25	5,16	3,00	479,14	2,73
<b>Max</b>	12.000	6,95	8,37	5,50	562,67	5,00
<b><math>\sigma</math></b>	2.648	1,46	1,17	1,64	148,27	1,61
<b>CV</b>	0,76	0,65	0,23	0,50	0,31	0,59

	<i>Freq. Feriti</i> [feriti/anno]	<i>Freq. Morti</i> [morti/anno]	<i>Freq. Incidentati</i> [incidentati/anno]
<b>Min</b>	0,20	0,00	0,20
<b><math>\mu</math></b>	1,19	0,21	1,32
<b>Max</b>	5,00	1,00	5,20
<b><math>\sigma</math></b>	1,93	0,13	2,08
<b>CV</b>	1,62	2,60	1,57

*Simbologia: pendenza longitudinale (i), lunghezza del tronco omogeneo (L), larghezza della corsia (l), densità degli accessi per km ( $\Delta$ )*

Il coefficiente di variazione ( $CV$ ), definito come rapporto tra la deviazione standard ( $\sigma$ ) e la media ( $\mu$ ), è un indice di dispersione dei valori campionari intorno alla media, è indipendente dall'unità di misura ed esprime di quanto la deviazione standard supera la media. In particolare, se:

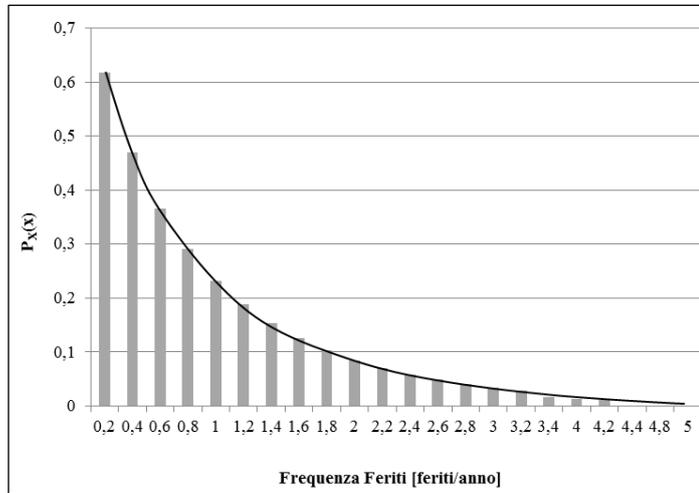
- $CV = 0$ , allora  $\sigma = 0$  e la media è uno stimatore perfetto;
- $CV > 0.5$ , la media non è uno stimatore corretto;
- $CV \leq 0.5$ , la media è uno stimatore corretto.

Pertanto dalla Tabella 3.1 emerge che la media è uno stimatore corretto nel caso della larghezza della corsia, della lunghezza del tronco omogeneo e del tasso di variazione della curvatura medio. Al contrario nel caso del  $TGM$ , della pendenza longitudinale e della densità degli accessi per miglio la media non è uno stimatore corretto. Infine si osserva che le frequenze del numero di feriti, morti e incidentati presentano una deviazione standard superiore alla media ( $CV$  maggiore dell'unità), dunque si può ipotizzare che la legge di probabilità che meglio esprime la distribuzione delle frequenze sia del tipo binomiale negativa (cfr. Equazione 27).

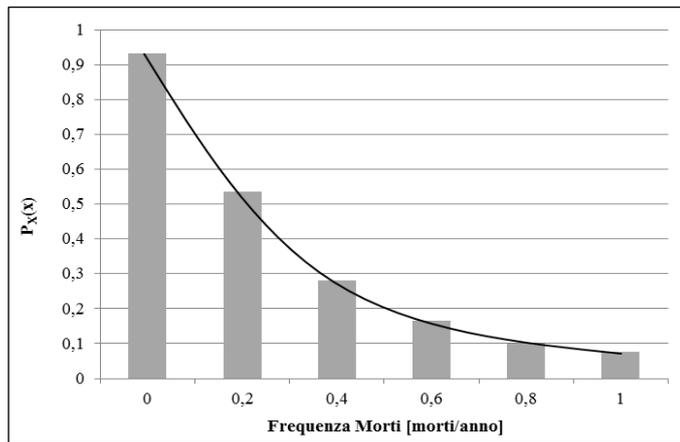
$$P_X(x) = \binom{x+k-1}{k-1} p^k (1-p)^x \quad (27)$$

<sup>1</sup> Tratto di strada con caratteristiche geometriche e funzionali costanti lungo l'intero sviluppo, con solo puntiformi o locali eccezioni [25].

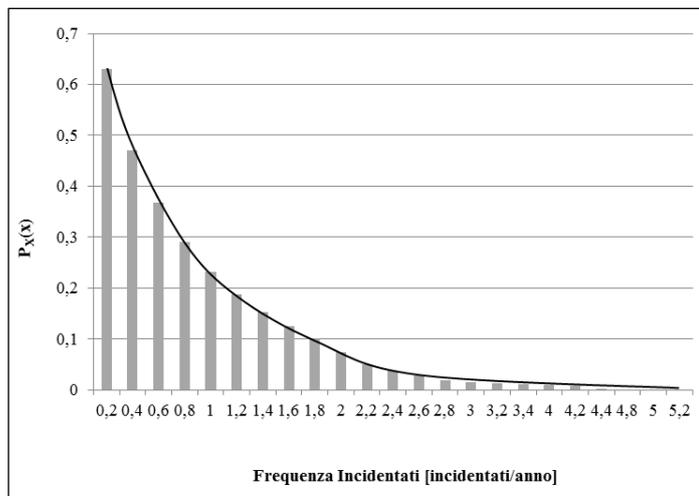
La Figura 3.7 illustra l'andamento della funzione massa di probabilità ( $pmf$ ) quando la variabile aleatoria (v.a.), binomiale negativa, è la frequenza dei feriti (cfr. Figura 3.7a), dei morti (cfr. Figura 3.7b), degli incidentati (cfr. Figura 3.7c).



a)



b)



c)

Figura 3.7- $Pmf$  della v.a. Binomiale Negativa: a) Frequenza Feriti; b) Frequenza Morti; c) Frequenza Incidentati

Maggiori informazioni sulla distribuzione delle frequenze si possono desumere dal diagramma a scatola e baffi o Box-Plot in Figura 3.8.

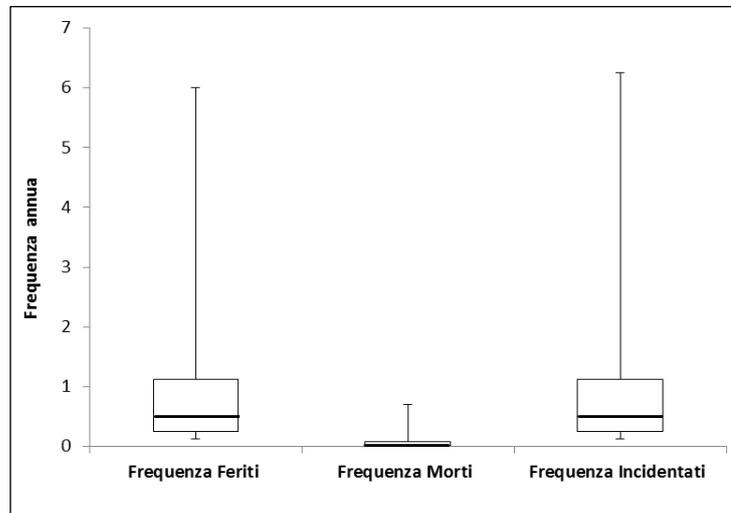


Figura 3.8-Box-Plot della frequenza dei feriti, morti e incidentati

Il Box-Plot è un grafico che descrive le caratteristiche salienti della distribuzione individuando i valori minimo e massimo del campione, la mediana, il primo ed il terzo quartile (ovvero i quantili di ordine 0,25 e 0,75), la distanza interquartilica, gli eventuali dati anomali. In particolare il Box-Plot è un rettangolo, con asse parallelo all'asse dei dati, di lunghezza pari alla distanza interquartilica, separato in due in corrispondenza della mediana. Sono inoltre presenti due propaggini lineari detti baffi che lo collegano rispettivamente ai valori di minimo e di massimo. Il baffo ha lunghezza pari a 1.5 volte l'altezza della scatola, pari alla distanza interquartilica; ovviamente è inferiore se il massimo valore osservato dista dal terzo quartile meno di 1.5 volte la distanza interquartilica.

Confrontando tra loro le lunghezze dei due baffi e le altezze dei due rettangoli ottenuti in corrispondenza della mediana, si ottengono informazioni sulla simmetria della distribuzione: questa è tanto più simmetrica quanto più le lunghezze dei baffi risultano simili tra loro e le altezze dei due rettangoli risultano simili tra loro. Precisamente se le altezze dei due rettangoli sono simili tra loro la distribuzione è simmetrica e la media aritmetica coincide con la mediana; viceversa la distribuzione è asimmetrica, la media aritmetica è minore o maggiore della mediana a seconda che si tratti di asimmetria negativa o positiva, rispettivamente.

Il 50% delle osservazioni si trovano comprese tra il terzo ed il primo quartile perciò la misura della dispersione della distribuzione è data dalla distanza interquartilica. Se tale distanza è piccola, la metà delle osservazioni si trova fortemente concentrata intorno alla mediana; all'aumentare della distanza interquartilica aumenta la dispersione del 50% delle osservazioni intorno alla mediana.

Nel caso particolare dalla Figura 3.8 si può desumere che le tre distribuzioni investigate risultano asimmetriche ed il 50 % delle osservazioni è fortemente

concentrata intorno alla mediana; ciò implica la probabile presenza di dati anomali e pertanto si adotteranno delle tecniche statistiche specifiche per analizzare i dati a disposizione (cfr. §3.2).

Con riferimento a ciascun tronco stradale omogeneo è stato calcolato un ulteriore parametro sintetico rappresentativo dell'andamento planimetrico del tronco stesso. Tale parametro è un indicatore del grado di scorrevolezza ( $G_s$ ) dell'andamento planimetrico essendo stato definito come il rapporto tra la distanza intercorrente tra i punti di inizio e di fine del tronco ( $l_0$ ) e la lunghezza dello sviluppo del tronco stesso ( $l_r$ ):

$$G_s = \frac{l_0}{l_r} \tag{28}$$

Gli estremi dell'intervallo di definizione del grado di scorrevolezza del tronco ( $G_s$ ) sono 0 ( $l_r \gg l_0$ , tortuosità molto elevata e quindi modesta linearità) e 1 (tortuosità molto bassa).

La matrice di correlazione (cfr. Tabella 3.2) restituisce i valori dell'indice di correlazione di Pearson ( $\rho_{xy}$ ) e di p-value (p).

Tabella 3.2-Matrice di correlazione

<i>Frequenze</i>	<i>l</i> [m]	<i>TGM</i> [veic/giorno]	<i>G<sub>s</sub></i>	<i>i</i> [%]	<i>L</i> [km]	$\Delta$
<i>Freq. Feriti</i>	0,224	0,385	0,136	-0,123	0,196	0,192
[feriti/anno]	p=0,000	p=0,000	p=0,010	p=0,020	p=0,000	p=0,215
<i>Freq. Morti</i>	0,119	0,124	0,017	-0,058	0,187	0,18
[morti/anno]	p=0,024	p=0,019	p=0,004	p=0,026	p=0,000	p=0,022
<i>Freq. Incidentati</i>	0,225	0,395	0,187	-0,187	0,136	0,265
[incidentati/anno]	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,000	p=0,010	p=0,245

La stima dell'indice di correlazione di Pearson, anche detto coefficiente di correlazione di Pearson (o di Bravais-Pearson) tra due variabili aleatorie, esprime una eventuale relazione di linearità tra la covarianza di due variabili ed il prodotto delle rispettive deviazioni standard. Date, infatti, due variabili statistiche  $X$  e  $Y$ , l'indice di correlazione di Pearson (Equazione 29) è definito come rapporto tra la loro covarianza ( $\sigma_{xy}$ ) ed il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili ( $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ ).

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \tag{29}$$

Il coefficiente di Pearson può attingere valori compresi nell'intervallo [-1; +1]. In particolare se:

- $\rho_{xy} > 0$  le variabili  $X$  e  $Y$  si dicono direttamente correlate, o correlate positivamente;
- $\rho_{xy} = 0$  le variabili  $X$  e  $Y$  si dicono non correlate;
- $\rho_{xy} < 0$  le variabili  $X$  e  $Y$  si dicono inversamente correlate, o correlate negativamente.

Dai dati proposti in Tabella 3.2 si evince che le frequenze del numero di feriti, morti e incidentati sono positivamente correlate a tutte le variabili, ad eccezione della pendenza, l'unica variabile sempre negativamente correlata.

Il test t di Student è stato eseguito per valutare la significatività dei coefficienti delle variabili e di correlazione individuati. I valori di p-value (cfr. Tabella 3.2) dimostrano che le correlazioni in blu sono significative.

Il p-value di un test di verifica d'ipotesi indica la probabilità, ovvero il livello di significatività  $\alpha$  del test, di ottenere un risultato pari o più estremo di quello rilevato, supposta vera l'ipotesi nulla ( $H_0$ ), cioè l'ipotesi che si vuole verificare nel test. Se il p-value è minore del livello di significatività  $\alpha$ , generalmente fissato al 5%, od anche all'1%, l'ipotesi nulla è rifiutata; più basso è il valore p, più rilevante è il risultato. Nel caso l'ipotesi nulla sia rifiutata, si accetterà l'ipotesi alternativa, indicata con  $H_1$ . Se si rifiuta un'ipotesi nulla quando nella realtà è vera, si commette un errore di prima specie; accettando, invece, un'ipotesi nulla, falsa, si commette un errore di seconda specie.

### 3.2 Rete di studio

La configurazione della rete si assume invariante in quanto nel periodo di osservazione non sono stati realizzati significativi interventi di adeguamento strutturale.

La rete di calibrazione presenta un'estensione di oltre 1.000 km, cui sono stati associati 693 incidenti di cui 583 hanno determinato feriti, 110 hanno determinato incidentati. La rete di validazione ha una consistenza pari a circa 1.000, km cui sono associati 602 incidenti di cui 512 hanno determinato feriti, 90 hanno determinato incidentati. I dati adottati si riferiscono al quinquennio 2006-10.

In Figura 3.9 è restituita la variazione percentuale del numero dei morti in relazione al numero totale di incidenti e alla percentuale dei feriti, dalla quale si evince che la presenza di un morto implica necessariamente la presenza di almeno un ferito.

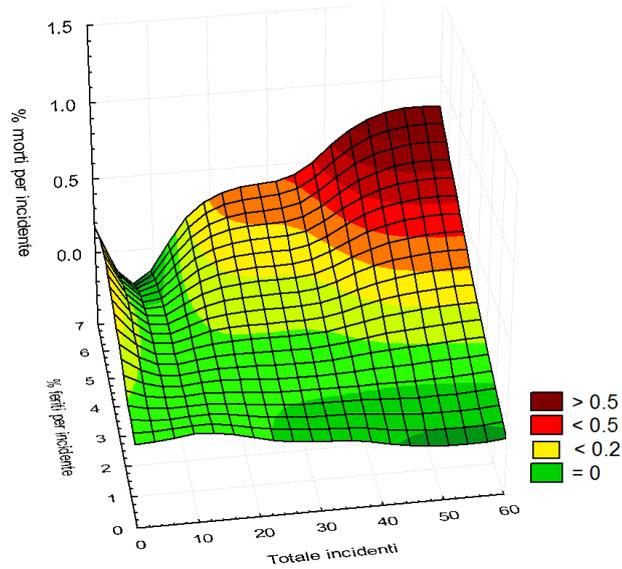


Figura 3.9-Variazione percentuale dei morti in relazione al numero totale di incidenti e percentuale di feriti.

FPS per la previsione della frequenza di soli feriti e FPS per la previsione della frequenza di feriti e morti sono state opportunamente calibrate in analogia con quanto proposto dall’Highway Safety Manual per la previsione della frequenza media del numero di incidenti.

Si introduce ora il concetto di *condizioni base*, ovvero le caratteristiche infrastrutturali dei tronchi stradali omogenei in corrispondenza dei quali si registrano i valori minimi della frequenza di feriti e/o di incidentati. Valori minimi (cioè frequenze annue inferiori a 0,7 feriti/anno sui tronchi su cui non sono stati rilevati morti, ovvero frequenze annue inferiori a 1,22 feriti/anno, 0,23 morti/anno e 1,45 incidentati/anno) si raggiungono se si verificano contestualmente entrambe le condizioni seguenti:

$$\begin{cases} G_s \geq 0,8 \\ i \leq 1\% \end{cases} \quad (30)$$

Per determinare i valori critici delle variabili geometriche significative (cfr. Tabella 3.2), si è ricorso ad una particolare tecnica di data mining: gli alberi di classificazione e regressione (CART) [100-101]. Essi costituiscono una tecnica di indagine non parametrica che permette di esplorare correlazioni, modelli e tendenze significative che si manifestano tra i dati presenti in ampi database, utilizzando tecniche statistiche ed algoritmi matematici. I CART presentano alcuni significativi vantaggi che li rendono candidati ideali nell’ambito delle tecniche di campionamento oggetto di analisi. In particolare, l’assenza di una specificazione richiesta sulla distribuzione dei dati sottoposti ad indagine permette il superamento di taluni vincoli viceversa presenti nelle tecniche tradizionali, che molto spesso ne impediscono una corretta applicazione. Si aggiunga, inoltre, che i risultati sono facilmente interpretabili e accurati. Il nome albero deriva dal fatto che i dati sono ripartiti secondo un processo

ricorsivo di separazione binomiale che visivamente può essere rappresentato appunto come un albero rovesciato nel quale ogni ramo, denominato nodo padre, si divide in due altri rami, denominati nodi figli, e così via fino ai nodi terminali, detti foglie, i quali coincidono con gli elementi della partizione finale. Precisamente i nodi foglia rappresentano le classificazioni e le ramificazioni l'insieme delle proprietà che portano a quelle classificazioni. Di conseguenza ogni nodo interno risulta essere una macro-classe costituita dall'unione delle classi associate ai suoi nodi figli. La proprietà che si associa ad ogni nodo interno è chiamata condizione di split. La costruzione di un CART avviene nel seguente modo:

1. in un nodo  $t$  con  $N_t$  osservazioni, si definisce la probabilità che gli elementi del nodo  $t$  ricadano nella classe  $j$ :

$$p(j|t) = \frac{1}{N_t} \sum_{x \in t} I(y_i = j) \quad \text{con } j=1, \dots, J \quad (31)$$

2. si sceglie, per ogni nodo, la condizione che minimizza la probabilità di classificare con  $j$  una osservazione di classe  $j$ ?. Per il nodo  $t$  si ha:

$$R(t) = \frac{1}{N_t} \sum_{x \in t} I(y_i \neq j) = 1 - p(j|t) \quad (32)$$

In dettaglio, tra tutti i possibili split  $s$  appartenenti all'insieme di soglie dicotomiche  $S$ , si cerca quel particolare  $s^*$  che produce rami il più possibile omogenei fra loro, dividendo  $t$  nei nodi figli  $t_1$  e  $t_2$ :

$$\Delta R(s^*, t) = \max_{s \in S} \Delta R(s, t) \quad (33)$$

con

$$\begin{cases} \Delta R(s, t) = R(t) - [p_1 R(t_1) + p_2 R(t_2)] \\ p_1 = \left(\frac{1}{N_t} \mid X \leq s^*\right) \\ p_2 = \left(\frac{1}{N_t} \mid X > s^*\right) \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} \quad (34)$$

Tale procedura viene ripetuta ad ogni nodo e l'algoritmo si arresta quando in ogni foglia c'è un solo caso oppure quando tutti i casi che compongono un nodo afferiscono alla stessa classe.

Per valutare la bontà di uno split si usa comunemente l'indice di impurità di Gini, che per il nodo  $i$ -esimo è definito come:

$$1 - \sum_k \hat{p}_{ik}^2 \quad (35)$$

dove l'indice  $k$  si riferisce alle classi del fattore di classificazione e

$$\hat{p}_{ik} = \frac{n_{ik}}{n_i} \quad (36)$$

è la frazione degli  $n_i$  soggetti nel nodo  $i$ -esimo assegnato alla  $k$ -esima classe. Eseguire uno split secondo l'indice di Gini significa quindi dividere in due parti il nodo cercando di minimizzare la varianza media dei nodi figli.

La scelta della struttura classificatoria è stata effettuata attraverso la tecnica del pruning. Detto criterio consiste nel far crescere la dimensione dell'albero andando successivamente a ridurre il numero delle diramazioni in maniera tale da individuare una sequenza di sottoalberi di dimensione decrescente:  $T_{\max}, T_1, T_2, \dots, R$ , dove  $R$  è il nodo radice. Al fine di individuare i sottoalberi migliori a parità di numero di foglie, si definisce, per ogni albero  $T \leq T_{\max}$ , una misura  $R_\alpha(T)$  detta funzione di costo complessità, cioè:

$$R_\alpha(T) = R(T) + \alpha |\tilde{T}| \quad (37)$$

Tale misura è data dalla somma dell'impurità globale dell'albero  $R(T)$  e da un parametro  $\alpha$  che impone una penalità sul numero di foglie. Per ogni valore di  $\alpha$ , si trova il sottoalbero  $T(\alpha) \leq T_{\max}$  che minimizza  $R_\alpha(T)$ , ovvero:

$$R_\alpha(T(\alpha)) = \min_{T \leq T_{\max}} R_\alpha(T) \quad (38)$$

Il sottoalbero ottimale sarà quello per cui la stima del tasso di errata classificazione è minima, cioè:

$$R(T^*) = \min_{T \in T_{\max}} R(T) \quad (39)$$

Per la rete di calibrazione il sottoalbero ottimale è consegnato in Figura 3.10. Esso si compone di 33 nodi di cui 17 sono nodi terminali. Dalla figura emerge che la prima variabile rispetto alla quale viene classificata la frequenza media annua degli incidentati, per il campione di calibrazione, è il TGM. Precisamente la prima biforcazione si ha per un valore del TGM pari a 4.098 veic/giorno; quindi il nodo 2, con TGM non superiore a tale valore, è ulteriormente suddiviso nel nodo terminale 5 e nel nodo 4 in funzione di un valore della lunghezza dei tronchi pari a 2,84 chilometri. Dal nodo contenente i tronchi stradali omogenei con lunghezza non superiore a 2,84 chilometri si diramano i nodi 6 e 7 distinti in base ad un valore limite del grado di scorrevolezza di 0,802. I tronchi con grado di scorrevolezza non

superiore a 0,802 si biforcano, in base ad un valore limite della larghezza della corsia pari a 3,6 metri, nei nodi 8 e 9. Il nodo 8, contenente i tronchi con larghezza della corsia non superiore a 3,6 metri si divide, in base al TGM nel nodo 10 e nel nodo terminale 11. Il valore critico di TGM è pari a 3.927 veic/giorno. Continuando il nodo 10 si biforca, per un valore limite della pendenza longitudinale del 3,9%, nei nodi 12 e 13, di cui quest'ultimo è di tipo terminale. Infine il nodo 12 viene suddiviso nei nodi terminali 14 e 15, nuovamente in base alla pendenza longitudinale. Il valore critico, in questo caso è 1,5%.

I tronchi con larghezza della corsia non superiore a 3,6 metri, compresi nel nodo 9, sono suddivisi nel nodo 16 e nel nodo terminale 17 in base ad un valore limite della lunghezza del tronco di 1,89 chilometri. Dal nodo 16, infine, si dipartono i due nodi terminali 18 e 19 distinti in base ad un valore del TGM di 3.881 veic/giorno.

I tronchi con grado di scorrevolezza superiore a 0,802, compresi nel nodo 7, sono distinti nel nodo terminale 20 e nel nodo 21 per un valore limite della pendenza longitudinale pari a 1,2%. Proseguendo il nodo 21 è suddiviso, in funzione di un valore della lunghezza del tronco di 1,79 chilometri, nei nodi 22 e 23. Il nodo 22 è suddiviso ulteriormente in base ad un valore del TGM di 2.237 veic/giorno; si ricavano i nodi terminali 24 e 25.

Proseguendo dal CART si osserva che il nodo 3, contenente i tronchi stradali omogenei con valori di TGM superiori a 4.098 veic/giorno, è distinto nei nodi 26 e 27. In particolare il nodo 26 è successivamente biforcato nel nodo terminale 28 e nel nodo 29 distinti in base ad un valore del grado di scorrevolezza pari a 0,75. Il nodo 28, è suddiviso ulteriormente in base ad un valore limite della lunghezza del tronco di 2,40 chilometri; si ricavano il nodo terminale 30 ed il nodo 31. Da quest'ultimo si diramano i nodi terminali 32 e 33 distinti in base ad un valore critico del TGM di 5.035 veic/giorno.

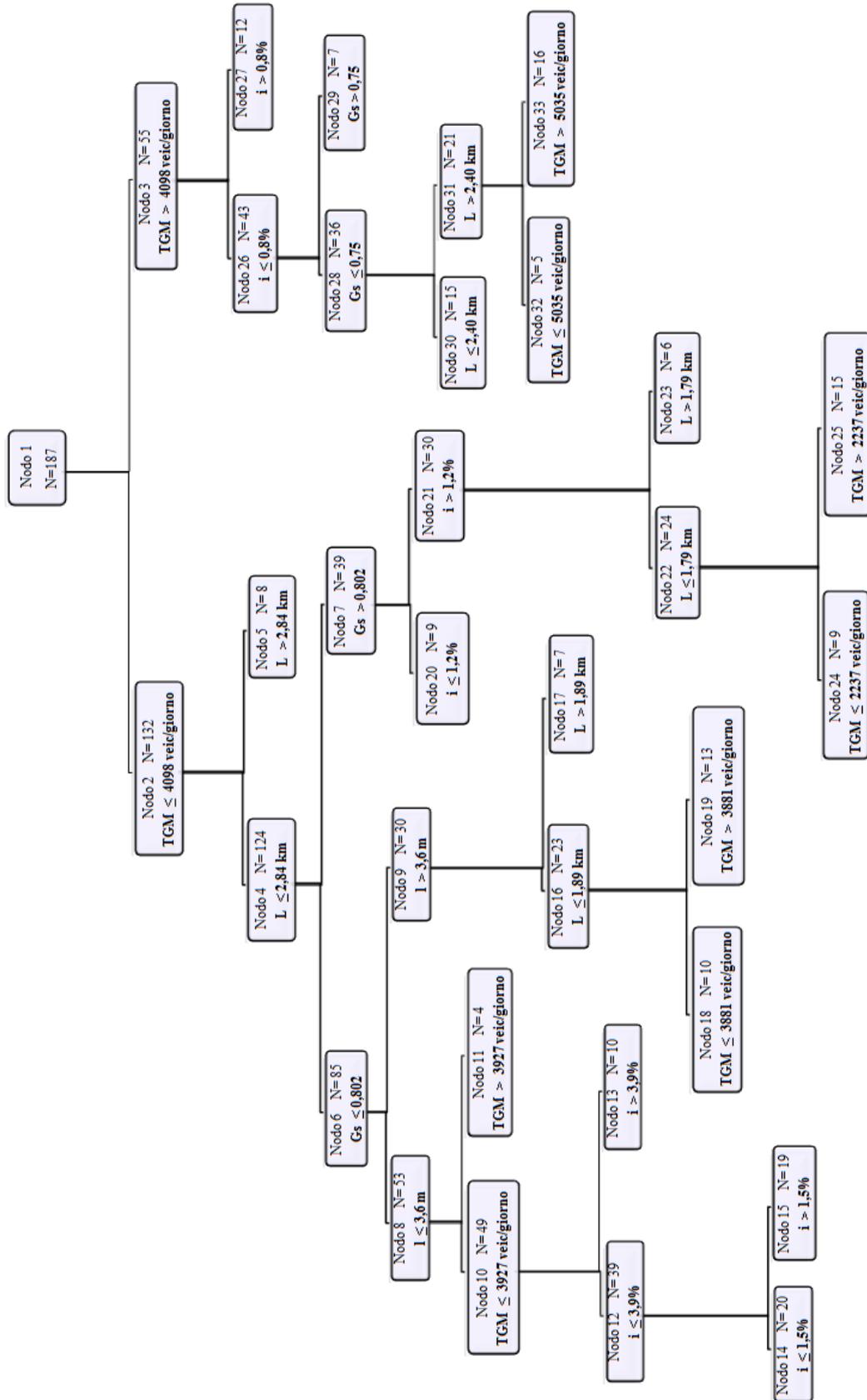


Figura 3.10–Albero di classificazione e regressione (CART) per il campione di calibrazione

Due analisi distinte sono state condotte per i tronchi sui quali sono stati registrati solo feriti e per quelli sui quali si sono registrati incidentati, poiché non sono stati rilevati morti se si verificano contestualmente le seguenti condizioni:

$$\begin{cases} L > 3 \text{ km} \\ G_s > 0,8 \\ i < 5\% \end{cases} \quad (40)$$

La scelta di frazionare il campione originario dipende dall'esigenza di scegliere tra le seguenti opzioni:

- a) calibrare una FPS per la previsione della frequenza media di feriti;
- b) calibrare due FPS ad hoc, una per la previsione della frequenza media dei feriti e l'altra per la previsione della frequenza media dei morti;
- c) calibrare una FPS unica per la previsione della frequenza media degli incidentati. In tal caso la frequenza media di feriti e di morti potrà essere determinata mediante fattori di ponderazione su base percentuale.

In definitiva, con riferimento al solo periodo di calibrazione, si riconoscono quattro differenti classi disgiunte:

1. tronchi stradali omogenei in condizioni base, su cui sono stati registrati solo feriti; per una estensione complessiva di 135 km;
2. altri tronchi omogenei su cui sono stati registrati solo feriti, per una estensione complessiva di circa 710 km;
3. tronchi omogenei in condizioni base su cui si sono registrati sia feriti che morti, per una estensione complessiva di 27 km;
4. altri tronchi omogenei su cui si sono registrati sia feriti che morti, per una estensione complessiva di 175 km.

La numerosità, la media, la deviazione standard e il coefficiente di variazione di feriti e incidentati sono consegnati in Tabella 3.3.

Tabella 3.3-Statistiche descrittive delle frequenze medie annue del campione di calibrazione

<i>Campione Feriti</i>				
Condizioni	Totale	$\mu$	$\sigma$	C.V.
Base	150	0,70	0,89	1,27
Altre	518	0,92	1,06	1,15
<i>Campione Incidentati</i>				
Condizioni	Totale	$\mu$	$\sigma$	C.V.
Base	152	1,45	1,78	1,23
Altre	387	2,32	2,71	1,17

Dalla Tabella si evince una sovra dispersione delle frequenze dei feriti e degli incidentati intorno alle medie confermando l'ipotesi di distribuzione binomiale negativa dei campioni (cfr. § 3.1).

L'eventuale presenza di frequenze anomale è stata valutata adottando il metodo grafico della carta di controllo di Shewart [102]. Per costruire la carta di controllo è necessario stimare i parametri  $\mu$  e  $\sigma$  della distribuzione campionaria di indagine. Il

valore  $\mu$  fissa la linea centrale del grafico di controllo,  $\pm 3\sigma$  definisce le distanze a cui tracciare, rispettivamente la linea di controllo superiore ed inferiore. Lo spazio compreso tra le due linee prende il nome di fascia di controllo. Per aumentare la sensibilità delle carte di controllo vengono utilizzati i cosiddetti limiti di attenzione disposti a  $\pm 2\sigma$  dalla linea centrale.

Alla tecnica delle carte di controllo di Shewart è stato affiancato un metodo razionale che permette di formulare un giudizio di accettazione dei dati in base a leggi statistiche: il criterio di Chauvenet [103-104]. Secondo tale criterio un valore, di una serie di N misure, può essere rigettato se la sua deviazione (d) dal valore medio delle misure complessive è così grande che la probabilità che si presenti una misura, fra le N, con una deviazione uguale o maggiore, è minore di  $1/2N$ . Quindi, se in una serie di N misure si accerta che la probabilità che la deviazione d, ovvero il complemento a 1 della funzione degli errori del rapporto  $d/\sigma$ , è minore della quantità  $1/2N$ , allora la misura viene esclusa dalla serie:

$$P \left[ X > \left( \frac{X - X_{\text{medio}}}{\sigma} \right) \right] = 1 - \text{erf}(d/\sigma) \leq 1/2N \quad (41)$$

La funzione degli errori è definita nel modo seguente:

$$\text{erf}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-z^2/2} dz \quad (42)$$

avendo posto t pari al rapporto  $d/\sigma$ .

Per applicare il criterio di Chauvenet la procedura da seguire consta di cinque passi di seguito descritti.

1. Calcolare, in valore assoluto, lo scostamento dei dati dal valore medio delle misure complessive:

$$d = x_i - x_{\text{medio}} \quad (43)$$

2. calcolare il rapporto tra lo scostamento d e la deviazione standard della serie di misure ( $\sigma$ )
3. calcolare la funzione degli errori (erf) del precedente rapporto,  $\text{erf}(d/\sigma)$
4. calcolare il complemento a 1 della funzione erf
5. calcolare la quantità  $1/2N$

In riferimento alla Figura 3.11 e Tabella 3.4 si osserva che il campione è costituito da 30 tronchi omogenei in condizioni base a cui sono associati valori di frequenza dei feriti tali che il 93% del campione ricade nella fascia di attenzione  $[0,70 \pm 1,78]$  mentre il restante 7% ricade nella fascia di controllo  $[0,70 \pm 2,67]$ .

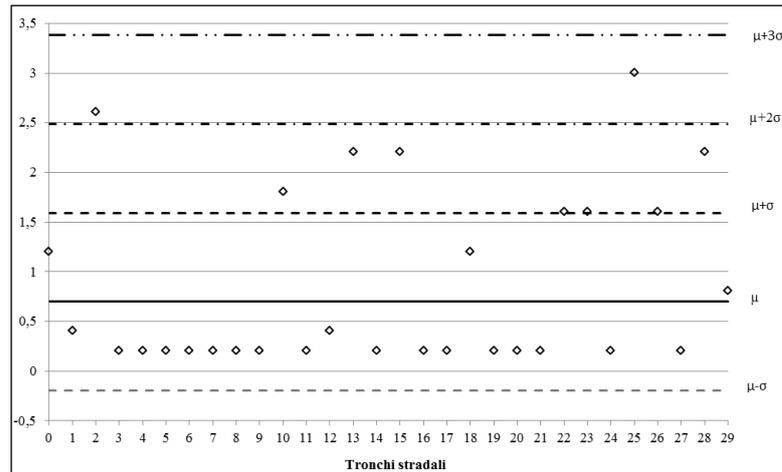


Figura 3.11-Carta di Controllo della Frequenza dei Feriti per il campione in condizioni base

Tabella 3.4-Sintesi della Frequenza dei Feriti per il campione in condizioni base

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
21	7	2	0
70%	23%	7%	0%

Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i valori della frequenza dei feriti rilevata sui tronchi omogenei in condizioni base per testare l'affidabilità della carta di controllo utilizzata. Dalla Tabella 3.5 emerge che esiste almeno un valore di frequenza anomalo, in particolare il valore pari a 3 feriti/anno è da scartare (cfr. Figura 3.11). È stato appurato che la differenza in percentuale dei dati esclusi adottando la carta di controllo o il criterio di Chauvenet non superasse un valore limite fissato pari al 5%.

Tabella 3.5-Criterio di Chauvenet per il campione in condizioni base

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,111	0,010	
$\mu$	0,828	0,474	0,016
<b>Max</b>	2,574	0,911	

In riferimento alla Figura 3.12 e Tabella 3.6 si osserva che il campione è costituito da 132 tronchi omogenei in altre condizioni geometriche a cui sono associati valori di frequenza dei feriti tali che il 98% del campione è compreso nella fascia di attenzione  $[0,92 \pm 2,12]$  mentre il restante 2% ricade nella fascia di controllo  $[0,92 \pm 3,18]$ .

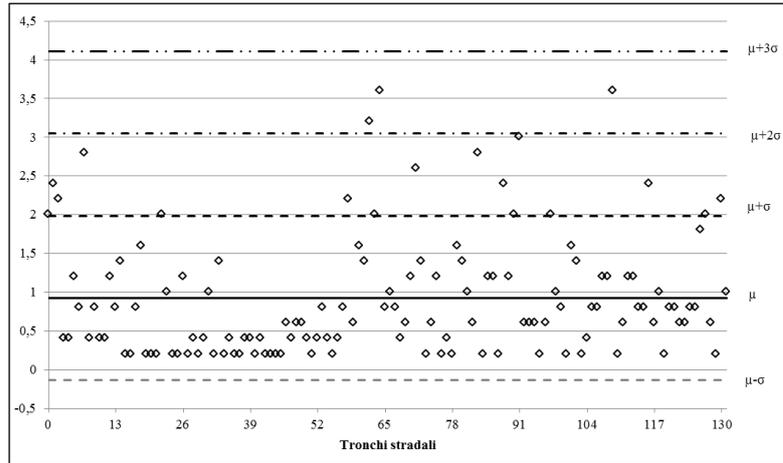


Figura 3.12-Carta di Controllo della Frequenza dei Feriti per il campione in altre condizioni

Tabella 3.6-Sintesi della Frequenza dei Feriti per il campione in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
113	16	3	0
86%	12%	2%	0%

Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i valori della frequenza dei feriti rilevata sui tronchi omogenei in altre condizioni geometriche. Dalla Tabella 3.7 emerge che nessuna misura deve essere scartata.

Tabella 3.7- Criterio di Chauvenet per il campione in condizioni base

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,022	0,018	
<b><math>\mu</math></b>	0,570	0,382	0,004
<b>Max</b>	2,880	0,996	

In riferimento alla Figura 3.13 e Tabella 3.8 si osserva che il campione è costituito da 8 tronchi omogenei in condizioni base a cui sono associati valori di frequenza degli incidentati tali che tutto il campione è compreso nella fascia di attenzione  $[1,45 \pm 3,56]$ . In virtù di tale risultato non è stato applicato il criterio di Chauvenet al campione in esame.

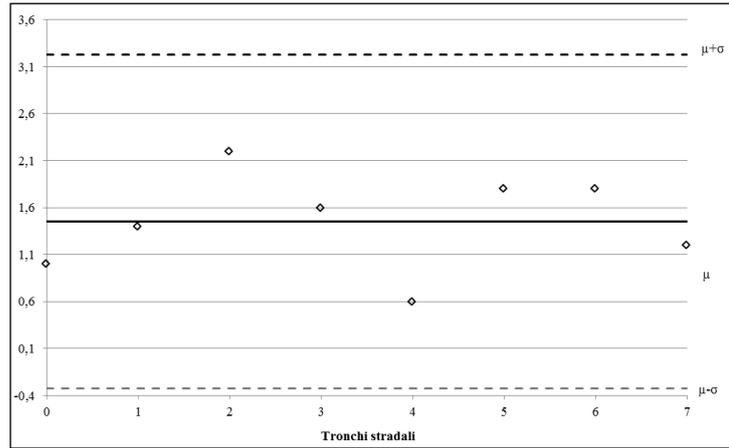


Figura 3.13-Carta di Controllo della Frequenza degli Incidentati per il campione in condizioni base

Tabella 3.8 Sintesi della Frequenza degli Incidentati per il campione in condizioni base

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[incidentati/anno]	[incidentati/anno]	[incidentati/anno]	[incidentati/anno]
8	0	0	0
100%	0%	0%	0%

In riferimento alla Figura 3.14 e Tabella 3.9 si osserva che il campione è costituito da 17 tronchi omogenei in altre condizioni geometriche a cui sono associati valori di frequenza degli incidentati tali che tutto il campione è compreso nella fascia di attenzione  $[2,32 \pm 6,42]$ . Per l'assenza di dati compresi nella fascia di accettazione non è stato applicato il criterio di Chauvenet al campione in esame.

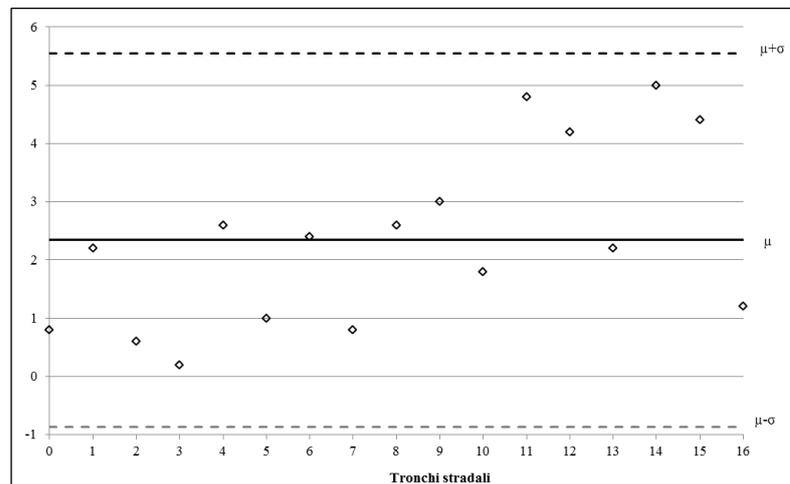


Figura 3.14-Carta di Controllo della Frequenza degli Incidentati per il campione in altre condizioni

Tabella 3.9-Sintesi della Frequenza degli Incidentati per il campione in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[incidentati/anno]	[incidentati/anno]	[incidentati/anno]	[incidentati/anno]
17	0	0	0
100%	0%	0%	0%

### 3.3 Calibrazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti

#### 3.3.1 FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in condizioni base

In riferimento alla rete con soli feriti, registrati dal 2006 al 2010, e nell'ipotesi di distribuzione binomiale negativa della frequenza, si è calibrata la FPS come di seguito:

$$F_{base} = TGM * L * 365 * 10^{-6} * e^{(A_0)} \quad (44)$$

in cui:

$F_{base}$ : frequenza totale dei feriti stimata per un tronco stradale in condizioni base, valutata come il rapporto tra il numero di feriti, registrato su ciascun tronco nel periodo di osservazione, e la durata del periodo di osservazione (pari a 5 anni);

TGM: traffico giornaliero medio, espresso in veicoli/giorno;

L: lunghezza del tronco stradale, espresso in chilometri.

I valori di media, deviazione standard e coefficiente di variazione di ciascuna variabile, sono consegnati in Tabella 3.10.

*Tabella 3.10-Statistiche descrittive delle variabili della FPS*

	L [km]	TGM [veic/giorno]	Frequenza feriti [feriti/anno]
$\mu$	2,79	5.534	0,70
$\sigma$	1,59	3.553	0,89
C.V.	0,57	0,64	1,27

Il coefficiente  $A_0$  è stato opportunamente calibrato, pertanto la FPS per la rete stradale investigata è data dall'Equazione 45:

$$F_{base} = TGM * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-2,13)} \quad (45)$$

Il valore del coefficiente  $A_0$  si può ritenere affidabile in quanto il p-value risulta inferiore al livello di significatività fissato per il test statistico (5%). L'equazione è caratterizzata da un valore del coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ) elevato (cfr. Tabella 3.11), ed il diagramma di performance (cfr. Figura 3.15) evidenzia l'affidabilità della FPS calibrata.

*Tabella 3.11-Coefficiente  $A_0$  per la calibrazione della FPS per la previsione dei feriti*

$A_0$	$\sigma$	p-value	Limite superiore intervallo di confidenza	Limite inferiore intervallo di confidenza	$\rho^2$
-2,13	0,157	0,000002	-1,805	-2,444	0,87

Il diagramma di performance si costruisce riportando sull'asse delle ordinate i valori della variabile analizzata, predetti dal modello, e sull'asse delle ascisse i valori riscontrati nella realtà; la disposizione dei punti lungo la bisettrice del piano rappresentato (retta di identità) indica che il modello interpreta correttamente il fenomeno osservato ( $\Delta_{min} = 0,03$ ;  $\Delta_{max} = 0,81$ ;  $\Delta_{med} = 0,25$ ).

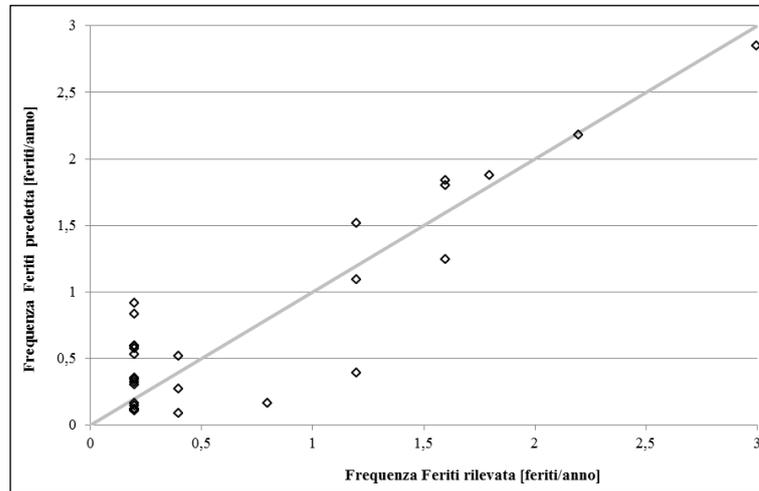


Figura 3.15–Diagramma di Performance della FPS per la frequenza dei feriti in condizioni base

### 3.3.2 FPS per la frequenza media annua dei feriti in altre condizioni geometriche

La FPS può essere applicata anche ai tronchi stradali in condizioni differenti rispetto a quelle di base correggendo la stessa mediante i fattori di modifica degli incidenti (FMI), che portano in conto le differenze esistenti tra le caratteristiche geometriche base e quelle specifiche del sito in esame.

I fattori correttivi esprimono la variazione di incidentalità che dipende dalla variazione di un carattere specifico e considerando invariante tutte le altre condizioni. Nel caso in esame, in analogia con l'approccio del manuale HSM, i fattori correttivi sono calcolati come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata sui tronchi in altre condizioni e la stessa rilevata in condizioni base.

Esaminando le condizioni base ed i dati associati a ciascun tronco stradale investigato emerge che i parametri per i quali si necessita una correzione sono la larghezza della corsia e la pendenza longitudinale dei tronchi. La frequenza dei feriti in altre condizioni è definita dall'Equazione 46:

$$F_{altre} = F_{base} * FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i \quad (46)$$

in cui:

$F_{altre}$ : frequenza media dei feriti prevista in un anno su un tronco stradale in condizioni geometriche non base;

$F_{base}$ : frequenza media annua dei feriti in condizioni base, calcolata attraverso l'Equazione 45;

$FMI_l$  e  $FMI_p$ : fattori correttivi della FPS relativi, rispettivamente, alla larghezza della corsia ed alla pendenza.

Di seguito le procedure adoperate per il calcolo di tali fattori.

### 3.3.2.1 Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI)

Il parametro larghezza della corsia (misurata in piedi) non è intervenuto nella definizione delle condizioni base poiché, diversamente da quanto accade nel contesto americano, non influenza direttamente le performance di sicurezza stradale se non associato al traffico (TGM). Nell'HSM fissata la larghezza pari a 12 piedi o più, al variare del traffico, la frequenza media di incidente resta costante intorno ad un valore minimo. Per la rete di studio, fissata la larghezza pari a 12 piedi o più, le frequenze riscontrate variano sempre al variare del traffico. La variazione permane anche nel caso in cui si fa riferimento alla frequenza dei feriti, come illustrato in Figura 3.16. Il grafico evidenzia che per valori crescenti del traffico e della larghezza della corsia, la frequenza dei feriti rilevata aumenta considerevolmente. Per tali ragioni questo parametro non è discriminante per la definizione delle condizioni base ma non si può prescindere dalla sua influenza per la definizione della FPS in condizioni diverse da quelle base.

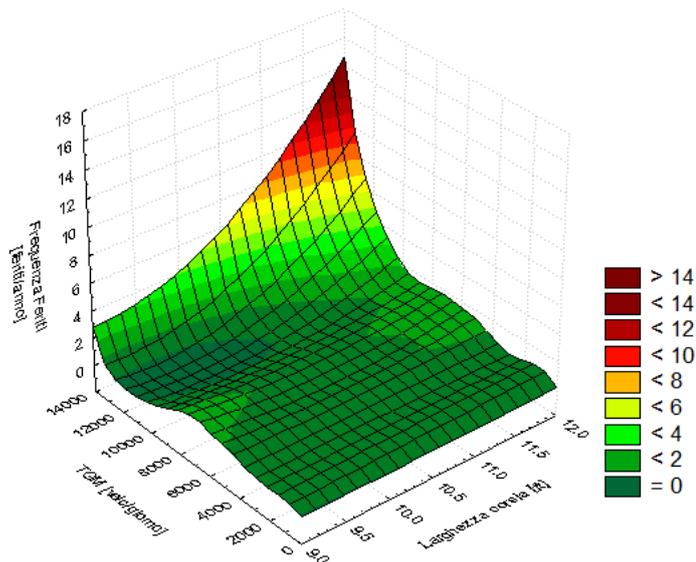


Figura 3.16-Diagramma Frequenza feriti rilevata – TGM - Larghezza della corsia

I dati sono stati raggruppati in modo omogeneo (in base al CV) secondo tre classi di larghezza della corsia: non superiore a 3,2 metri, variabile tra 3,2 e 4,5 metri, non inferiore a 4,5 metri. In Tabella 3.12 sono consegnati i valori di larghezza della

corsia rilevata in sito da attribuire ad una delle tre classi definite in precedenza con i corrispondenti valori delle statistiche descrittive.

Tabella 3.12-Definizione delle classi di larghezza della corsia

<b>Larghezza corsia [m]</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>C.V.</b>
$\leq 3,2$	2,75	0,25	0,09
$3,2 < l \leq 4,5$	3,50	0,26	0,07
$> 4,5$	5,03	0,46	0,09

Per ciascuna delle tre classi di larghezza della corsia, le seguenti classi di traffico sono state definite:

1.  $TGM \leq 3000$  veic/giorno; in tale condizione la frequenza assume valori minori di 1,6 feriti/anno;
2.  $3000 < TGM \leq 7500$  veic/giorno; in tale condizione la frequenza assume valore massimo pari a 2,4 feriti/anno;
3.  $TGM > 7500$  veic/giorno: in tale condizione la frequenza assume valori maggiori di 2,4 feriti/anno.

L'omogeneità dei sottoinsiemi individuati è stata verificata con il metodo grafico della carta di controllo. A seguire i risultati delle carte di controllo e le statistiche descrittive della frequenza dei feriti per entrambi i campioni frazionati.

• **“Campione base”**

In riferimento alla Tabella 3.13, si osserva che i nove sottoinsiemi individuati possono ritenersi omogenei poiché la totalità delle frequenze ricade sempre nella fascia di attenzione  $[\mu \pm 2\sigma]$ , ad eccezione della larghezza della corsia non inferiore a 4,5 metri in corrispondenza di un TGM non superiore a 3.000 veic/giorno, per cui risulta che solo l'86% del campione ricade nella fascia di attenzione mentre tutto il campione è compreso nella fascia di controllo  $[\mu \pm 3\sigma]$ .

Tabella 3.13-Sintesi delle Carte di Controllo per la frequenza dei feriti

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	$\mu \pm \sigma = 60\%$	$\mu \pm \sigma = 83\%$	$\mu \pm \sigma = 100\%$
	$\mu \pm 2\sigma = 40\%$	$\mu \pm 2\sigma = 17\%$	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$
	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu \pm \sigma = 80\%$	$\mu \pm \sigma = 75\%$	$\mu \pm \sigma = 67\%$
	$\mu \pm 2\sigma = 20\%$	$\mu \pm 2\sigma = 25\%$	$\mu \pm 2\sigma = 33\%$
	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$
$> 4,5$	$\mu \pm \sigma = 86\%$	$\mu \pm \sigma = 100\%$	
	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$	X
	$\mu \pm 3\sigma = 15\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	

Dalla Tabella 3.14 si evince che ad un fissato valore della larghezza della corsia, e per valori crescenti del traffico, corrisponde un incremento della frequenza media dei feriti. I valori di CV sono sempre inferiori all'unità pertanto non c'è sovra dispersione delle frequenze rispetto al valor medio.

Tabella 3.14-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti rilevata in condizioni base

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	$\mu = 0,59$	$\mu = 0,63$	$\mu = 0,70$
	$\sigma = 0,41$	$\sigma = 0,44$	$\sigma = 0,46$
	C.V. = 0,69	C.V. = 0,70	C.V. = 0,66
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu = 0,57$	$\mu = 0,62$	$\mu = 0,68$
	$\sigma = 0,49$	$\sigma = 0,40$	$\sigma = 0,55$
	C.V. = 0,86	C.V. = 0,64	C.V. = 0,81
$> 4,5$	$\mu = 0,55$	$\mu = 0,60$	
	$\sigma = 0,39$	$\sigma = 0,50$	X
	C.V. = 0,71	C.V. = 0,83	

#### • Campione non base”

In riferimento alla Tabella 3.15 si osserva che anche in questo caso, i nove sottoinsiemi individuati possono ritenersi omogenei poiché almeno l'85% delle frequenze ricade sempre nella fascia di attenzione  $[\mu \pm 2\sigma]$ , mentre tutto il campione è compreso nella fascia di controllo  $[\mu \pm 3\sigma]$ .

Dalla Tabella 3.16 si evince che ad un fissato valore della larghezza della corsia, e per valori crescenti del traffico, corrisponde un incremento della frequenza media dei feriti.

Tabella 3.15-Sintesi delle Carte di Controllo per la frequenza dei feriti

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	$\mu \pm \sigma = 85\%$	$\mu \pm \sigma = 100\%$	$\mu \pm \sigma = 71\%$
	$\mu \pm 2\sigma = 12\%$	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$	$\mu \pm 2\sigma = 29\%$
	$\mu \pm 3\sigma = 4\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu \pm \sigma = 93\%$	$\mu \pm \sigma = 77\%$	$\mu \pm \sigma = 67\%$
	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$	$\mu \pm 2\sigma = 8\%$	$\mu \pm 2\sigma = 33\%$
	$\mu \pm 3\sigma = 7\%$	$\mu \pm 3\sigma = 14\%$	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$
$> 4,5$	$\mu \pm \sigma = 100\%$	$\mu \pm \sigma = 76\%$	
	$\mu \pm 2\sigma = 0\%$	$\mu \pm 2\sigma = 18\%$	X
	$\mu \pm 3\sigma = 0\%$	$\mu \pm 3\sigma = 6\%$	
	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	$> \mu \pm 3\sigma = 0\%$	

Tabella 3.16-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti rilevata in altre condizioni

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	$\mu = 1,06$	$\mu = 1,13$	$\mu = 1,23$
	$\sigma = 1,04$	$\sigma = 1,01$	$\sigma = 1,03$
	C.V. = 0,98	C.V. = 0,89	C.V. = 0,84
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu = 0,75$	$\mu = 0,80$	$\mu = 0,82$
	$\sigma = 0,45$	$\sigma = 0,52$	$\sigma = 0,43$
	C.V. = 0,60	C.V. = 0,65	C.V. = 0,52
$> 4,5$	$\mu = 0,71$	$\mu = 0,72$	
	$\sigma = 0,50$	$\sigma = 0,63$	X
	C.V. = 0,70	C.V. = 0,87	

In ultimo sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.17) per ciascun sottoinsieme omogeneo come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata in altre condizioni e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.17-FMI<sub>1</sub>

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	FMI=1,80	FMI=1,79	FMI=1,76
$3,2 < l \leq 4,5$	FMI=1,32	FMI=1,29	FMI=1,21
$> 4,5$	FMI=1,29	FMI=1,20	X

I risultati ottenuti evidenziano che per uno specifico valore del traffico, e per valori crescenti della larghezza della corsia, gli FMI decrescono; inoltre essi assumono sempre valore maggiore dell'unità: ciò indica che tali fattori tendono ad incrementare la frequenza media dei feriti stimata, rispetto alla frequenza valutata in condizioni base.

**3.3.2.2 Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI<sub>i</sub>)**

I tronchi della rete trattata nella fase di calibrazione della FPS per la previsione della frequenza di feriti sono in condizioni base se la pendenza è non superiore all'1%; diversamente bisogna correggere la FPS con un fattore di modifica (FMI<sub>i</sub>).

Per definire degli intervalli di pendenza omogenei rispetto alla frequenza dei feriti è stato analizzato il campione costituito da altri tronchi omogenei su cui sono stati registrati solo feriti. Come illustrato in Figura 3.17 il campo di variazione delle frequenze, ossia l'intervallo ]0,01; 0,05], è stato suddiviso in quattro intervalli di ampiezza unitaria, per ciascuno dei quali sono state calcolate le frequenze medie dei feriti.

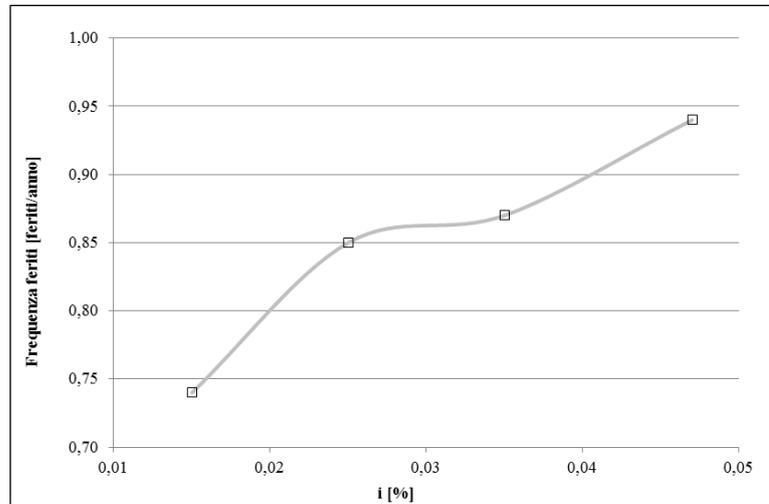


Figura 3.17-Frequenza dei feriti in funzione della pendenza

Dalla Tabella 3.18 si evince che le frequenze medie stimate assumono valori pressoché costanti in due intervalli di pendenza: ]0,01-0,04] e ]0,04-0,05].

Tabella 3.18-Frequenza media stimata per la definizione di classi omogenee di pendenza

<b>Pendenza media</b>	<b>Frequenza media stimata</b>
<b>[%]</b>	<b>[feriti/anno]</b>
0,015	0,74
0,025	0,85
0,035	0,87
0,047	0,94

Dunque il campione è stato ripartito in due sottoinsiemi: il primo comprende i tronchi stradali con pendenza variabile tra 0,01 e 0,04; il secondo comprende i tronchi con pendenza variabile tra 0,04 e 0,05. Le statistiche descrittive della frequenza dei feriti per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.19.

Tabella 3.19-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti al variare della pendenza

$i \leq 1\%$	$1\% < i \leq 4\%$	$4\% < i \leq 5\%$
$\mu = 0,70$	$\mu = 0,86$	$\mu = 0,94$
$\sigma = 0,89$	$\sigma = 0,98$	$\sigma = 1,02$
C.V. = 1,27	C.V. = 1,14	C.V. = 1,08

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.20) come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.20-FMI <sub>i</sub>		
$i \leq 1\%$	$1\% < i \leq 4\%$	$4\% < i \leq 5\%$
FMI=1,00	FMI=1,23	FMI=1,34

I valori degli FMI aumentano all'aumentare della pendenza e sono sempre maggiori dell'unità, quindi; ciò implica che all'aumentare della pendenza, la frequenza media dei feriti cresce rispetto a quella stimata in condizioni base.

### 3.3.3 Coefficiente di calibrazione della FPS

La FPS è stata, ulteriormente, corretta mediante un fattore di calibrazione ( $C_s$ ) per considerare l'influenza che le diverse specificità locali hanno non solo sul numero di feriti attesi ma anche sul legame tra questi e ciascuno specifico fattore considerato. Tale fattore si definisce come rapporto tra la sommatoria del numero di feriti rilevati sui tronchi in altre condizioni geometriche e la sommatoria del numero di feriti rilevata sui tronchi in condizioni geometriche di base. Il valore restituito è pari a 0,587. L'equazione del modello che consente di stimare la frequenza media dei feriti in un anno su tronchi di strada extraurbana ad unica carreggiata e doppio senso di marcia è la seguente:

$$F = 0,587 * F_{base} * (FMI_1 * FMI_{Gs} * FMI_i) \quad (47)$$

Per la misura dell'adeguatezza della FPS si è utilizzato il metodo grafico del diagramma dei residui cumulati (CUMulative REsiduals o CURE = Residui quadratici Cumulati).

Il diagramma CURE consente di rappresentare un processo statistico caratterizzato dall'indipendenza di ogni osservazione di un serie storica da quelle che la precedono. Per riprodurre un siffatto diagramma, in relazione ad una variabile, bisogna calcolare il residuo per ogni osservazione, ordinare i residui in senso crescente, relativamente alla variabile, quindi cumularli. Un salto verticale nel grafico rappresenta un residuo insolitamente elevato e può indicare la presenza di una osservazione molto distante dal resto dei dati disponibili. In tale circostanza è necessaria un'indagine maggiormente dettagliata e considerare se trattenere o meno l'osservazione per la definizione del modello.

La Figura 3.18 illustra il diagramma dei residui quadratici cumulati per il campione di calibrazione non ideale: i residui quadratici cumulati sono in ordinata ed in ascissa il TGM gravante sul tronco stradale. Non sono evidenti salti verticali, ciò conferma l'adeguatezza della FPS nell'interpretare correttamente i dati rilevati.

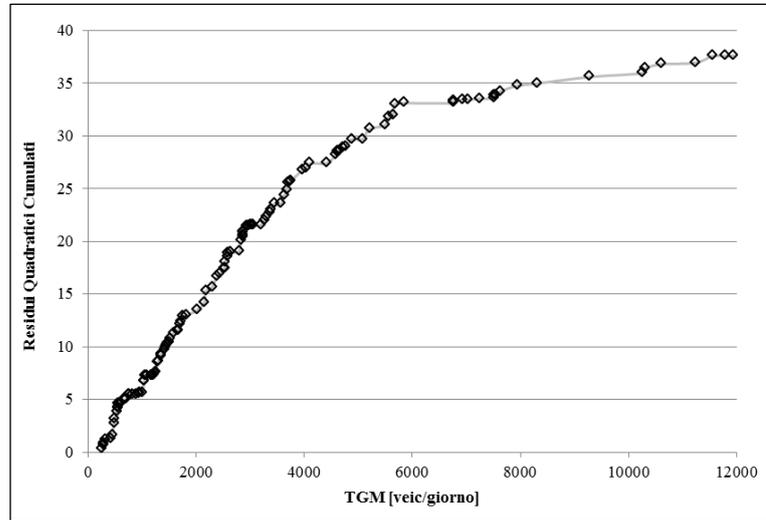


Figura 3.18-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati

### 3.4 Calibrazione di FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti

#### 3.4.1 FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base

In riferimento alla rete con incidentati, registrati dal 2006 al 2010, e nell'ipotesi di distribuzione binomiale negativa della frequenza, si sono calibrate le FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti (cfr. Equazione 48) e del numero di morti (cfr. Equazione 49):

$$F_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(A_0)} \quad (48)$$

$$M_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(A_1)} \quad (49)$$

in cui:

$F_{\text{base}}$ ,  $M_{\text{base}}$ : frequenza totale relativa, rispettivamente, ai feriti ed ai morti, stimata per un tronco stradale in condizioni base. La frequenza è stata valutata come il rapporto tra il numero di feriti (morti), registrato su ciascun tronco nel periodo di osservazione, e la durata del periodo di osservazione (pari a 5 anni);

TGM: traffico giornaliero medio, espresso in veicoli/giorno;  
 L: lunghezza del tronco stradale, espresso in chilometri.

I coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  sono stati opportunamente calibrati, pertanto le FPS per la rete stradale investigata sono le seguenti:

$$F_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-1,93)} \quad (50)$$

$$M_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-3,55)} \quad (51)$$

I valori dei coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  si possono ritenere affidabili in quanto il p-value risulta essere inferiore al livello di significatività fissato per il test statistico (5%). Le equazioni sono caratterizzate da un valore del coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ) elevato (cfr. Tabella 3.21), ed i diagrammi di performance (cfr. Figure 3.19 e 3.20) evidenziano l'affidabilità delle FPS calibrate.

Tabella 3.21-Coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  per la calibrazione delle FPS per la previsione dei feriti e dei morti

	<i>Stima</i>	$\sigma$	<i>p-value</i>	<i>Limite superiore intervallo di confidenza</i>	<i>Limite inferiore intervallo di confidenza</i>	$\rho^2$
$A_0$	-1,93	0,165	0,000008	-1,538	-2,318	0,85
$A_1$	-3,55	0,459	0,000011	-2,469	-4,640	0,82

In Tabella 3.22 si consegnano i valori minimi, medi e massimi dei residui in relazione ai diagrammi di performance proposti a seguire.

Tabella 3.22-Residui

<i>Residuo</i>	<i>Frequenza feriti [feriti/anno]</i>	<i>Frequenza morti [morti/anno]</i>
<b>Min</b>	0,02	0,01
<b>Med</b>	0,25	0,06
<b>Max</b>	0,41	0,15

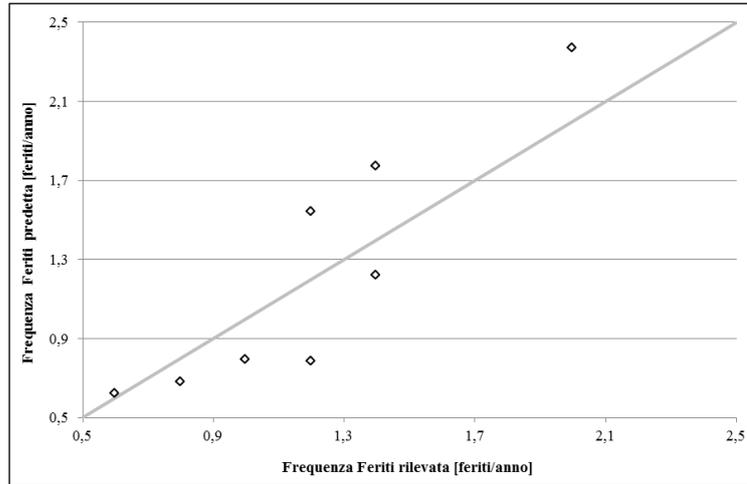


Figura 3.19-Diagramma di Performance della FPS ad hoc per la frequenza dei feriti in condizioni base

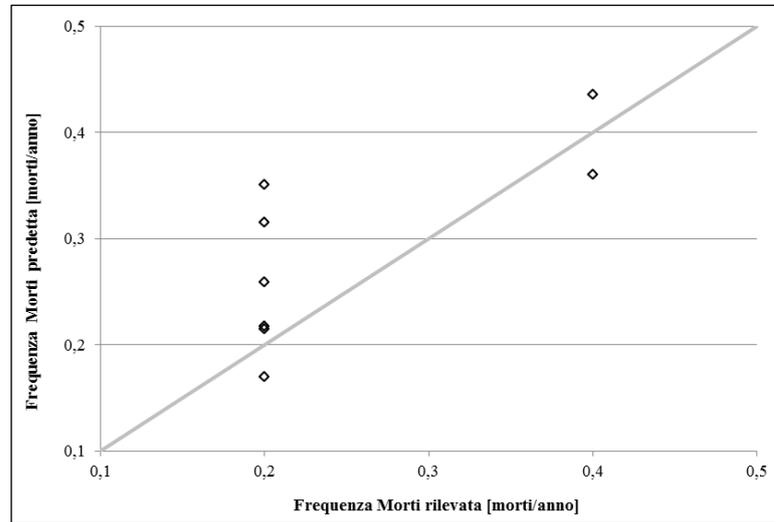


Figura 3.20- Diagramma di Performance della FPS ad hoc per la frequenza dei morti in condizioni base

### 3.4.2 FPS ad hoc per la frequenza media annua dei feriti e dei morti in altre condizioni geometriche

Le FPS calibrate possono essere applicate anche ai tronchi stradali in condizioni differenti rispetto a quelle di base correggendo le stesse mediante i fattori di modifica degli incidenti (FMI), che portano in conto le differenze esistenti tra le caratteristiche geometriche base e quelle specifiche del sito in esame.

In analogia con l'approccio del manuale HSM, i fattori correttivi sono stati calcolati come rapporto tra la frequenza media dei feriti (morti) rilevata sui tronchi in altre condizioni e la stessa valutata in condizioni base. I parametri per i quali si necessita una correzione sono la larghezza della corsia, il grado di scorrevolezza e la pendenza longitudinale dei tronchi.

La frequenza dei feriti e dei morti sui tronchi stradali in altre condizioni è definita, rispettivamente dalle Equazioni 52 e 53:

$$F_{\text{altre}} = F_{\text{base}} * FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i \quad (52)$$

$$M_{\text{altre}} = M_{\text{base}} * FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i \quad (53)$$

in cui:

$F_{\text{altre}}$ ,  $M_{\text{altre}}$ : frequenza media prevista in un anno su un tronco stradale in altre condizioni geometriche, relativa, rispettivamente, ai feriti ed ai morti;

$F_{\text{base}}$ ,  $M_{\text{base}}$ : frequenza media annua relativa ai feriti ed ai morti in condizioni base, calcolata attraverso le Equazioni 50 e 51.

$FMI_l$ ,  $FMI_{Gs}$  e  $FMI_i$ : fattori correttivi delle FPS relativi, rispettivamente, alla larghezza della corsia, al grado di scorrevolezza ed alla pendenza.

Di seguito le procedure adoperate per il calcolo di tali fattori.

### 3.4.2.1 Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI)

Sono state fissate le stesse classi di larghezza della corsia e di traffico definite al §3.3.2.1. Verificata l'omogeneità dei sottoinsiemi individuati, attraverso le carte di controllo ed il criterio di Chauvenet, sono stati definiti i valori medi delle frequenze dei feriti e dei morti rilevati in condizioni diverse da quelle base (cfr. Tabella 3.23).

Tabella 3.23- Frequenze medie dei feriti e dei morti rilevate in altre condizioni

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	≤ 3000	3000 < TGM ≤ 7500	> 7500
≤ 3,2	$\mu_F = 1,78$ $\mu_M = 0,39$	$\mu_F = 1,80$ $\mu_M = 0,47$	X
3,2 < l ≤ 4,5	X	$\mu_F = 1,31$ $\mu_M = 0,31$	$\mu_F = 1,56$ $\mu_M = 0,41$
> 4,5	$\mu_F = 1,15$ $\mu_M = 0,28$	$\mu_F = 1,17$ $\mu_M = 0,29$	$\mu_F = 1,28$ $\mu_M = 0,30$

A seguire le statistiche descrittive della frequenza dei feriti e dei morti per il campione in condizioni base, ed i relativi fattori di modifica.

#### • Feriti

In Tabella 3.24 si consegnano i valori medi delle frequenze dei feriti rilevati in condizioni base. Si osserva che ad un valore della larghezza della corsia variabile tra 3,2 e 4,5 metri, e per valori crescenti del traffico, corrisponde un incremento della frequenza media dei feriti. Negli altri casi i dati a disposizioni fanno riferimento solo

ad alcune delle classi di larghezza della corsia e di traffico fissate. I valori di CV sono sempre inferiori all'unità pertanto non c'è sovra dispersione delle frequenze rispetto al valor medio ed il campione è omogeneo rispetto alla variabile di studio.

Tabella 3.24-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti rilevata in condizioni base

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	≤ 3000	3000 < TGM ≤ 7500	> 7500
≤ 3,2	X	$\mu_F = 1,30$ $\sigma = 1,10$ C.V. = 0,85	X
3,2 < l ≤ 4,5	$\mu_F = 0,80$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_F = 1,00$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_F = 1,27$ $\sigma = 0,96$ C.V. = 0,76
> 4,5	X	X	$\mu_F = 1,20$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00

Quindi sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.25) per ciascun sottoinsieme omogeneo, come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata in altre condizioni (cfr. Tabella 3.23) e la stessa rilevata in condizioni base (cfr. Tabella 3.24).

Tabella 3.25-FMI<sub>i</sub> per la correzione della FPS ad hoc per la frequenza media dei feriti

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	≤ 3000	3000 < TGM ≤ 7500	> 7500
≤ 3,2	X	FMI=1,38	X
3,2 < l ≤ 4,5	X	FMI=1,31	FMI=1,23
> 4,5	X	X	FMI=1,07

I risultati ottenuti evidenziano che per uno specifico valore della larghezza della corsia, e per valori crescenti del traffico, gli FMI decrescono; inoltre essi assumono sempre valore maggiore dell'unità; ciò denota valori di frequenza su tronchi non in condizione base superiore a quella rilevata su tronchi in condizione base.

• **Morti**

In Tabella 3.26 si consegnano i valori medi delle frequenze dei morti rilevati in condizioni base. Si osserva che ad un valore della larghezza della corsia variabile tra 3,2 e 4,5 metri, e per valori crescenti del traffico, corrisponde un incremento della frequenza media dei morti. Negli altri casi i dati a disposizioni fanno riferimento solo ad alcune delle classi di larghezza della corsia e di traffico fissate. I valori di CV sono sempre inferiori all'unità pertanto non c'è sovra dispersione delle frequenze rispetto al valor medio ed il campione è omogeneo rispetto alla variabile di studio.

Tabella 3.26-Statistiche descrittive della frequenza dei morti rilevata in condizioni base

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	X	$\mu_M = 0,30$ $\sigma = 0,13$ C.V. = 0,65	X
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu_M = 0,20$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_M = 0,20$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_M = 0,27$ $\sigma = 0,20$ C.V. = 0,74
$> 4,5$	X	X	$\mu_M = 0,20$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00

Quindi sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.27) per ciascun sottoinsieme omogeneo, come rapporto tra la frequenza media dei morti rilevata in altre condizioni (cfr. Tabella 3.23) e la stessa rilevata in condizioni base (cfr. Tabella 3.26).

Tabella 3.27-FMI<sub>1</sub> per la correzione della FPS ad hoc per la frequenza media dei morti

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	X	FMI=1,57	X
$3,2 < l \leq 4,5$	X	FMI=1,55	FMI=1,52
$> 4,5$	X	X	FMI=1,50

I risultati ottenuti evidenziano che per uno specifico valore del traffico, e per valori crescenti della larghezza della corsia, gli FMI decrescono; inoltre essi assumono sempre valore maggiore dell'unità; ciò denota valori di frequenza su tronchi non in condizione base superiore a quella rilevata su tronchi in condizione base.

### 3.4.2.2 Fattore di Modifica degli Incidenti per il grado di scorrevolezza (FMI<sub>Gs</sub>)

Il fattore di modifica (FMI<sub>Gs</sub>) della FPS deve essere calibrato per la previsione della frequenza di feriti e morti su tronchi che non sono in condizioni base ( $G_s \geq 0,8$ ).

#### • Feriti

La frequenza dei feriti ha un andamento crescente per valori di  $G_s$  inferiori al valore critico 0,623, e andamento decrescente per valori maggiori di  $G_s$  critico (cfr. Figura 3.21).

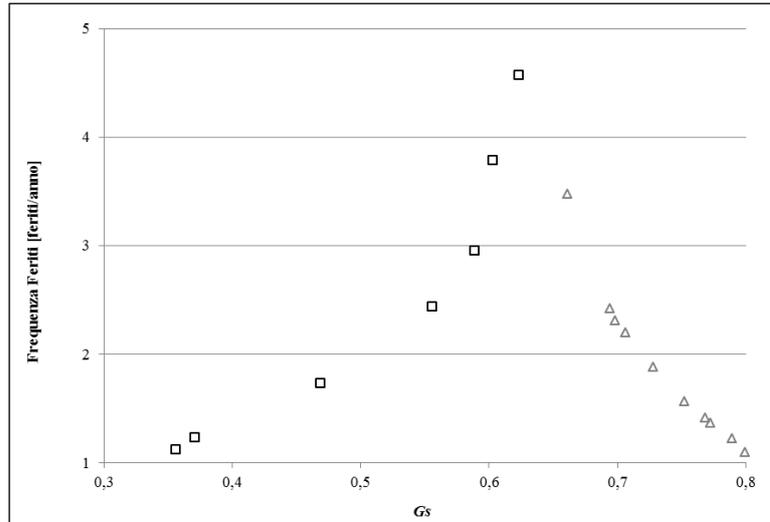


Figura 3.21-Frequenza dei feriti in funzione di Gs

Il campione è stato così ripartito in due sottoinsiemi: uno comprende i tronchi stradali con  $G_s$  non superiore a 0,623 e l'altro i tronchi stradali con  $G_s$  variabile tra 0,623 e 0,8.

Specifiche relazioni bidimensionali sono state studiate per valutare l'incidenza della scorrevolezza sulla frequenza dei feriti rilevata.

1)  $G_s < 0,623$

L'equazione che esprime la variazione della frequenza per valori di  $G_s$  non superiori a 0,623 (curva nera in Figura 3.21) è la seguente:

$$\text{Freq. Feriti}_{\text{Predetta}} = 0,013 * e^{(9,41 * G_s)} \tag{54}$$

I valori assunti dai coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  (Tabella 3.28) sono significativi (p-value << 5%). Il modello interpreta correttamente la variabilità del fenomeno di studio come evidenziato dal coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ), che assume valore prossimo all'unità, e dal diagramma di performance (Figura 3.22) in cui non si riscontrano significative variazioni tra i valori della variabile analizzata, predetti dal modello, ed i valori rilevati nella realtà ( $\Delta_{\text{min}} = 0,07$ ;  $\Delta_{\text{max}} = 0,78$ ;  $\Delta_{\text{med}} = 0,38$ ).

Tabella 3.28-Coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  per  $G_s \leq 0,623$

	Stima	$\sigma$	p-value	Limite superiore intervallo di confidenza	Limite inferiore intervallo di confidenza	$\rho^2$
$A_0$	0,013	0,039	0,0303	0,134	-0,081	0,95
$A_1$	9,41	2,490	0,0300	15,119	1,292	

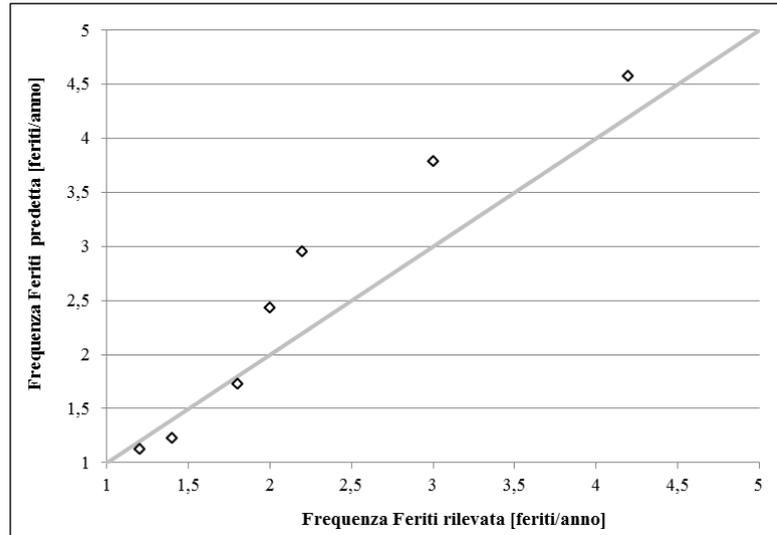


Figura 3.22-Diagramma di Performance per  $G_s \leq 0,623$

2)  $0,623 < G_s < 0,8$

L'equazione che esprime la variazione della frequenza per valori di  $G_s$  compresi nell'intervallo  $]0,623; 0,8[$  (curva grigia in Figura 3.21) è la seguente:

$$\text{Freq. Feriti}_{\text{Predetta}} = 6689 * e^{(-10,91 * G_s)} \quad (55)$$

Anche per il secondo sottoinsieme i valori dei coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  (cfr. Tabella 3.29) sono significativi ed il modello interpreta correttamente il fenomeno di studio come evidenziato dal coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ) e dal diagramma di performance (cfr. Figura 3.23) in cui le frequenze si addensano intorno alla retta di identità, infatti non vi sono significative variazioni tra i valori della frequenza predetta e quelli rilevati ( $\Delta_{\min} = 0,01$ ;  $\Delta_{\max} = 0,20$ ;  $\Delta_{\text{med}} = 0,09$ ).

Tabella 3.29-Coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  per  $0,543 < G_s < 0,8$

	<i>Stima</i>	$\sigma$	<i>p-value</i>	<i>Limite superiore intervallo di confidenza</i>	<i>Limite inferiore intervallo di confidenza</i>	$\rho^2$
$A_0$	6689	2486,313	0,0072	16765,341	-9676,455	0,97
$A_1$	-10,91	0,090	0,0005	-5,700	-15,600	

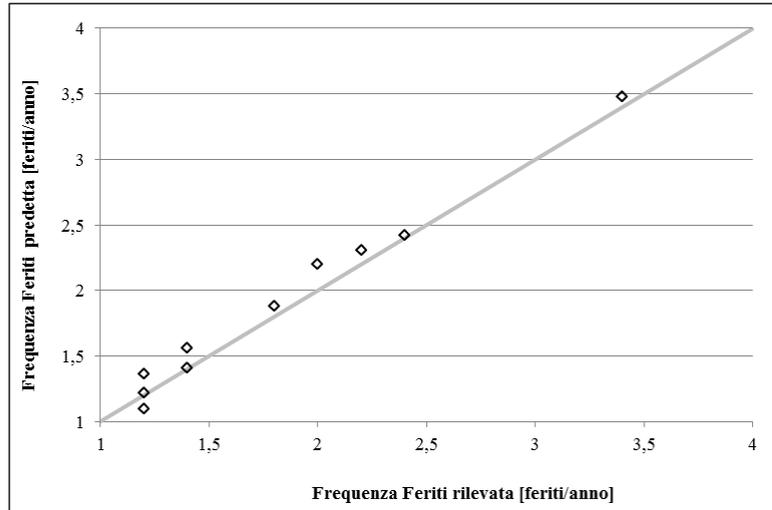


Figura 3.23-Diagramma di Performance per  $0,623 < G_s < 0,8$

Le statistiche descrittive della frequenza dei feriti per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.30

Tabella 3.30-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti al variare del grado di scorrevolezza

$G_s \leq 0,623$	$0,623 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
$\mu = 2,25$	$\mu = 1,82$	$\mu = 1,22$
$\sigma = 2,34$	$\sigma = 2,03$	$\sigma = 1,45$
C.V. = 1,04	C.V. = 1,11	C.V. = 1,19

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.31) come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.31-FMI<sub>G<sub>s</sub></sub>

$G_s \leq 0,623$	$0,623 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
FMI=1,84	FMI=1,49	FMI=1,00

I valori degli FMI crescono al diminuire di  $G_s$ , inoltre, essi sono sempre maggiori dell'unità; ciò implica che al ridursi della scorrevolezza corrisponde un aumento della frequenza media dei feriti rispetto a quella stimata in condizioni base.

• **Morti**

L'analisi dei valori di frequenza dei morti al variare del grado di scorrevolezza evidenzia che è possibile distinguere due classi di  $G_s$  tali che il valore critico risulti essere pari a 0,623. In particolare in Figura 3.24 si osserva che la frequenza dei morti ha andamento crescente fino al valore critico di  $G_s$ , quindi tende a decrescere.

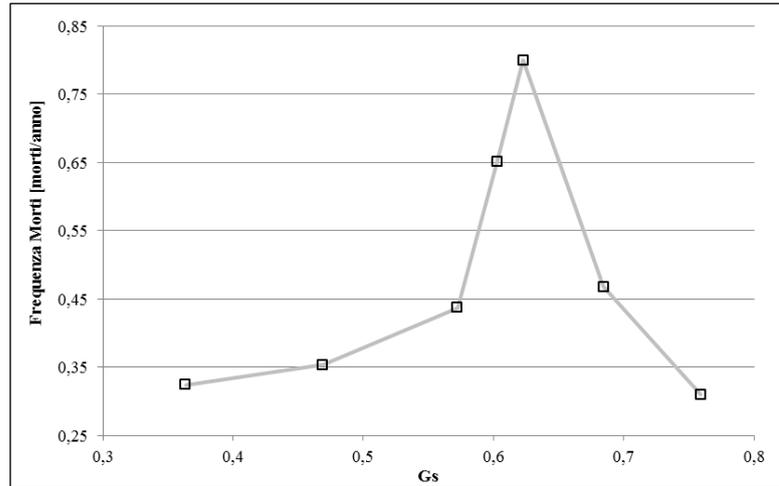


Figura 3.24-Frequenza dei morti in funzione di Gs

Il campione è stato così ripartito in due sottoinsiemi: uno comprende i tronchi stradali con  $G_s$  non superiore a 0,623 e l'altro i tronchi stradali con  $G_s$  variabile tra 0,623 e 0,8. Le statistiche descrittive della frequenza dei morti per ciascun sottoinsieme individuato sono consegnate nella Tabella 3.32.

Tabella 3.32-Statistiche descrittive della frequenza dei morti al variare del grado di scorrevolezza

$G_s \leq 0,623$	$0,623 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
$\mu = 0,37$	$\mu = 0,34$	$\mu = 0,23$
$\sigma = 0,38$	$\sigma = 0,37$	$\sigma = 0,26$
C.V. = 1,03	C.V. = 1,08	C.V. = 1,13

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.33) come rapporto tra la frequenza media dei morti stimata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.33-FMI <sub>Gs</sub>		
$G_s \leq 0,543$	$0,543 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
FMI=1,61	FMI=1,48	FMI=1,00

I valori degli FMI crescono al diminuire di  $G_s$ , inoltre, essi sono sempre maggiori dell'unità; ciò implica che al ridursi della scorrevolezza corrisponde un incremento della frequenza media dei morti rispetto a quella stimata in condizioni base.

### 3.4.2.3 Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI<sub>i</sub>)

Il fattore di modifica (FMI<sub>i</sub>) della FPS deve essere calibrato per la previsione della frequenza di feriti e di morti sui tronchi omogenei che non sono in condizioni base ( $i \leq 1\%$ ).

• **Feriti**

Per definire degli intervalli di pendenza omogenei rispetto alla frequenza dei feriti è stato analizzato il campione costituito dai tronchi omogenei in altre condizioni geometriche su cui sono stati registrati incidentati. Il campo di variazione delle frequenze, ossia l'intervallo ]0,01; 0,07], è stato suddiviso in cinque intervalli di ampiezza unitaria, per ciascuno dei quali sono state calcolate le frequenze medie dei feriti (cfr. Figura 3.25).

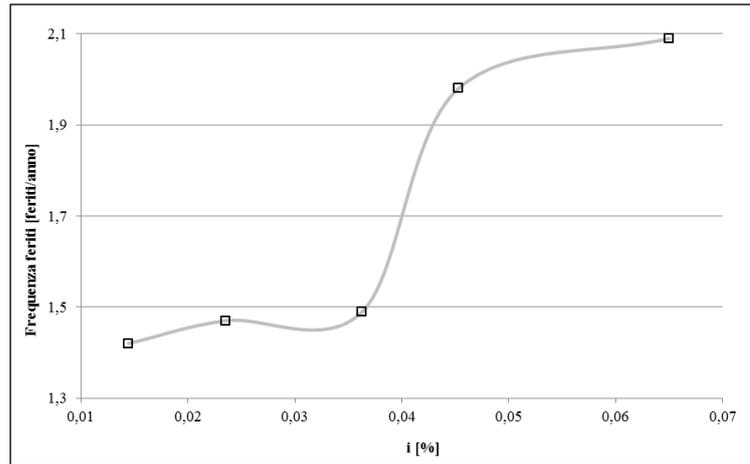


Figura 3.25-Frequenza dei feriti in funzione della pendenza

Dalla Tabella 3.34 si evince che le frequenze medie stimate assumono valori pressoché costanti in due intervalli di pendenza: ]0,01-0,04] e ]0,04-0,07].

Tabella 3.34-Frequenza media dei feriti stimata per la definizione di classi omogenee di pendenza

<b>Pendenza media</b> [%]	<b>Frequenza media stimata</b> [feriti/anno]
0,014	1,42
0,023	1,47
0,036	1,49
0,045	1,98
0,065	2,11

Dunque il campione è stato ripartito in due sottoinsiemi: il primo comprende i tronchi stradali con pendenza variabile tra 0,01 e 0,04; il secondo comprende i tronchi con pendenza maggiore di 0,04. Le statistiche descrittive della frequenza dei feriti per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.35.

Tabella 3.35-Statistiche descrittive della frequenza dei feriti al variare della pendenza

<b><math>i \leq 1\%</math></b>	<b><math>1\% &lt; i \leq 4\%</math></b>	<b><math>i &gt; 4\%</math></b>
$\mu = 1,22$	$\mu = 1,45$	$\mu = 2,16$
$\sigma = 1,45$	$\sigma = 1,62$	$\sigma = 2,20$
C.V. = 1,19	C.V. = 1,12	C.V. = 1,02

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.36) come rapporto tra la frequenza media dei feriti rilevata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

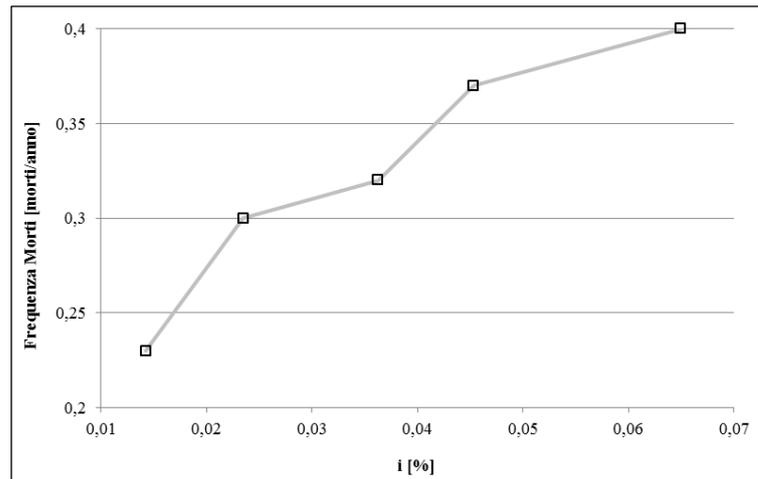
*Tabella 3.36-FMI<sub>i</sub>*

$i \leq 1\%$	$1\% < i \leq 4\%$	$i > 4\%$
FMI=1,00	FMI=1,19	FMI=1,36

I valori degli FMI crescono all'aumentare della pendenza e ciò implica che ad un incremento della pendenza corrisponde un incremento della frequenza media dei feriti rispetto a quella stimata in condizioni base.

• **Morti**

Dopo una attenta analisi dei dati, il campo di variazione delle frequenze dei morti, ossia l'intervallo ]0,01; 0,07], è stato suddiviso in cinque intervalli di ampiezza unitaria, per ciascuno dei quali sono state calcolate le frequenze medie dei morti (cfr. Figura 3.26).



*Figura 3.26-Frequenza dei morti in funzione della pendenza*

Dalla Tabella 3.37 emerge che le frequenze medie stimate nell'intervallo di pendenza ]0,01-0,02] assumono valori tali da poter fissare il valore critico di pendenza, per la definizione delle condizioni di base, pari a 0,02 in luogo di 0,01 come indicato nell'Equazione 30 (cfr. §3.2). Inoltre i valori di frequenza si possono considerare pressoché costanti negli intervalli ]0,02-0,04] e ]0,04-0,07].

Tabella 3.37-Frequenza media dei morti stimata per la definizione di classi omogenee di pendenza

<b>Pendenza media</b>	<b>Frequenza media stimata</b>
<b>[%]</b>	<b>[morti/anno]</b>
0,014	0,23
0,023	0,30
0,036	0,32
0,045	0,37
0,065	0,40

Dunque il campione è stato ripartito in due sottoinsiemi: il primo comprende i tronchi stradali con pendenza variabile tra 0,02 e 0,04; il secondo comprende i tronchi stradali con pendenza maggiore di 0,04. Le statistiche descrittive della frequenza dei morti per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.38.

Tabella 3.38-Statistiche descrittive della frequenza dei morti al variare della pendenza

<b><math>i \leq 2\%</math></b>	<b><math>2\% &lt; i \leq 4\%</math></b>	<b><math>i &gt; 4\%</math></b>
$\mu = 0,23$	$\mu = 0,31$	$\mu = 0,37$
$\sigma = 0,26$	$\sigma = 0,33$	$\sigma = 0,38$
C.V. = 1,13	C.V. = 1,06	C.V. = 1,02

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.39) come rapporto tra la frequenza media dei morti stimata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.39-FMI<sub>i</sub>

<b><math>i \leq 2\%</math></b>	<b><math>2\% &lt; i \leq 4\%</math></b>	<b><math>i &gt; 4\%</math></b>
FMI=1,00	FMI=1,35	FMI=1,61

I valori degli FMI crescono all'aumentare della pendenza e quindi la frequenza media dei morti risulta maggiore rispetto a quella stimata in condizioni base.

### 3.4.3 Coefficiente di calibrazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti

Per considerare l'influenza che le diverse specificità locali hanno non solo sul numero di feriti e di morti attesi, ma anche sul legame tra questi e ciascuno specifico fattore considerato, le FPS sono state, ulteriormente, corrette mediante un fattore di calibrazione ( $C_c$ ). Tale fattore si definisce come rapporto tra la sommatoria del numero di feriti (morti) rilevati sui tronchi in altre condizioni geometriche e la sommatoria del numero di feriti (morti) rilevati sui tronchi in condizioni geometriche di base.

Quindi sono stati calcolati i coefficienti di calibrazione; i valori restituiti sono pari a 0,224 per la previsione dei feriti e 0,292 per la previsione dei morti.

In definitiva le equazioni che consentono di stimare la frequenza media dei feriti e dei morti in un anno su tronchi di strada extraurbana ad unica carreggiata e doppio senso di marcia sono le seguenti:

$$F_{\text{ad hoc}} = 0,224 * F_{\text{base}} * (FMI_1 * FMI_{Gs} * FMI_i) \quad (56)$$

$$M_{\text{ad hoc}} = 0,292 * M_{\text{base}} * (FMI_1 * FMI_{Gs} * FMI_i) \quad (57)$$

Per la misura dell'adeguatezza delle FPS (cfr. Equazioni 56 e 57) si è ricorso al metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma consente di rappresentare un processo statistico caratterizzato dall'indipendenza di ogni osservazione di un serie storica da quelle che la precedono. Per riprodurre un siffatto diagramma, in relazione ad una variabile, bisogna calcolare il residuo per ogni osservazione, ordinare i residui in senso crescente, relativamente alla variabile, quindi cumularli. Un salto verticale nel grafico rappresenta un residuo insolitamente elevato e può indicare la presenza di una osservazione molto distante dal resto dei dati disponibili.

Dalle Figure 3.27 e 3.28 non sono evidenti salti verticali, ciò conferma l'adeguatezza delle FPS nell'interpretare correttamente i dati rilevati.

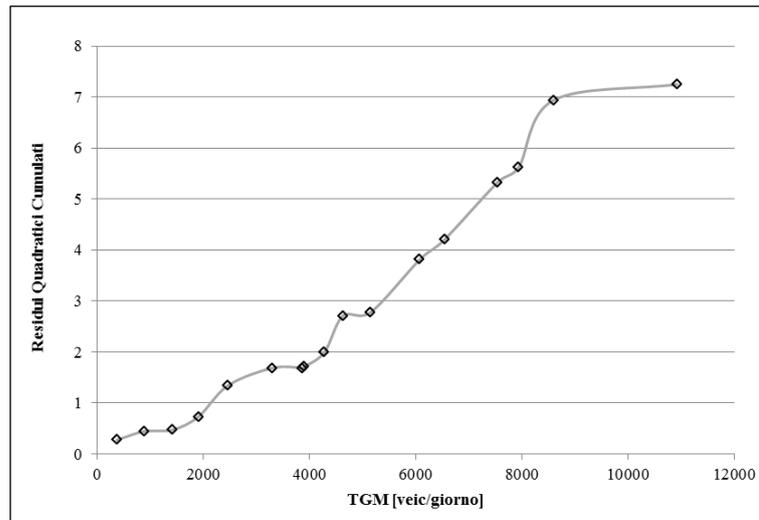


Figura 3.27-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza del numero di feriti

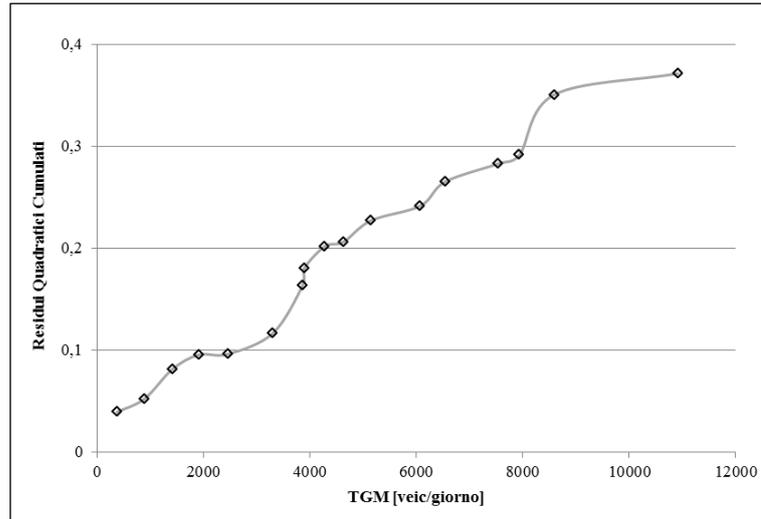


Figura 3.28-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza del numero di morti

### 3.5 Calibrazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati

#### 3.5.1 FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di incidentati in condizioni base

In riferimento alla rete con incidentati, registrati dal 2006 al 2010, e nell'ipotesi di distribuzione binomiale negativa della frequenza, è stata calibrata la FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati (cfr. Equazione 58).

$$I_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(A_0)} \quad (58)$$

in cui:

$I_{\text{base}}$ : frequenza totale degli incidentati, stimata per un tronco stradale in condizioni base. La frequenza è stata valutata come il rapporto tra il numero di incidentati, registrato su ciascun tronco nel periodo di osservazione, e la durata del periodo di osservazione (pari a 5 anni);

TGM: traffico giornaliero medio, espresso in veicoli/giorno;

L: lunghezza del tronco stradale, espresso in chilometri.

Il coefficiente  $A_0$  è stato opportunamente calibrato, pertanto la FPS per la rete stradale investigata è la seguente:

$$I_{\text{base}} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-1,75)} \quad (59)$$

Il valore del coefficiente  $A_0$  si può ritenere affidabile in quanto il p-value risulta essere inferiore al livello di significatività fissato per il test statistico (5%). L'equazione è caratterizzata da un valore del coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ) elevato (cfr. Tabella 3.40).

Tabella 3.40-Coefficiente  $A_0$  per la calibrazione della FPS per la previsione degli incidentati

$A_0$	$\sigma$	p-value	Limite superiore intervallo di confidenza	Limite inferiore intervallo di confidenza	$\rho^2$
-1,75	0,155	0,000009	-1,387	-2,120	0,87

Dal diagramma di performance (Figura 3.29) non si riscontrano significative variazioni tra i valori della variabile analizzata, predetti dal modello, ed i valori rilevati nella realtà; pertanto si può ritenere che il modello calibrato interpreta correttamente il fenomeno osservato ( $\Delta_{\text{min}} = 0,01$ ;  $\Delta_{\text{max}} = 0,64$ ;  $\Delta_{\text{med}} = 0,22$ ).

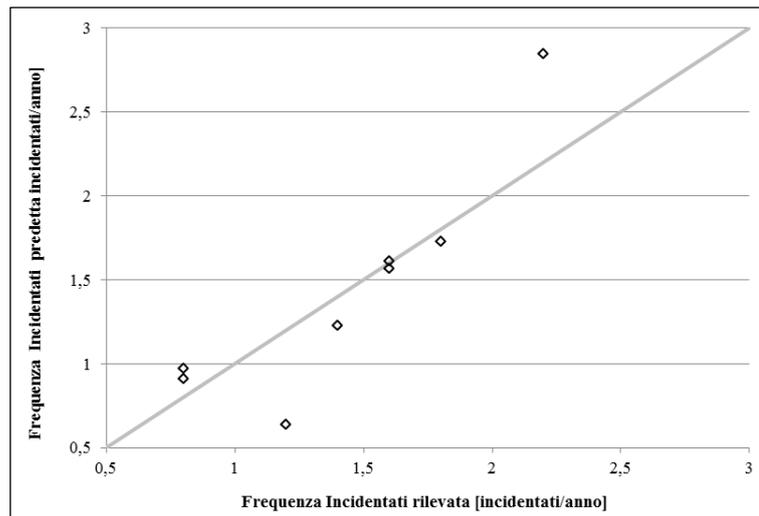


Figura 3.29-Diagramma di Performance della FPS per la frequenza degli incidentati in condizioni base

### 3.5.2 FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di incidentati in altre condizioni geometriche

Fattori di modifica degli incidenti (FMI) sono stati definiti per portare in conto le differenze esistenti tra le caratteristiche geometriche base e quelle specifiche del sito in esame. In analogia con l'approccio del manuale HSM, tali fattori correttivi sono stati calcolati come rapporto tra la frequenza media degli incidentati rilevata sui tronchi in altre condizioni e la stessa valutata in condizioni base. Esaminando le condizioni base ed i dati associati a ciascun tronco stradale investigato emerge che i parametri per i quali si necessita una correzione sono la larghezza della corsia, il grado di scorrevolezza e la pendenza longitudinale dei tronchi.

In definitiva la frequenza degli incidentati in altre condizioni è definita dall'Equazione 60:

$$I_{\text{altre}} = I_{\text{base}} * FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i \quad (60)$$

dove:

$I_{\text{altre}}$ : frequenza media degli incidentati prevista in un anno su un tronco stradale in condizioni geometriche diverse da quelle base;

$I_{\text{base}}$ : frequenza media annua degli incidentati in condizioni base, calcolata attraverso l'Equazione 59;

$FMI_l$ ,  $FMI_{Gs}$  e  $FMI_i$ : fattori correttivi della FPS relativi, rispettivamente, alla larghezza della corsia, al grado di scorrevolezza ed alla pendenza.

Di seguito le procedure adoperate per il calcolo di tali fattori.

### 3.5.2.1 Fattore di Modifica degli Incidenti per la larghezza della corsia (FMI)

Sono state fissate le stesse classi di larghezza della corsia e di traffico definite al §3.3.2.1.

In Tabella 3.41 si consegnano i valori medi delle frequenze degli incidentati rilevati in condizioni diverse da quelle base.

Tabella 3.41-Frequenze medie degli incidentati rilevate in altre condizioni

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	≤ 3000	3000 < TGM ≤ 7500	> 7500
≤ 3,2	μ <sub>1</sub> = 2,17 σ = 1,61 C.V. = 0,74	μ <sub>1</sub> = 2,27 σ = 1,43 C.V. = 0,63	X
3,2 < l ≤ 4,5	X	μ <sub>1</sub> = 1,62 σ = 1,20 C.V. = 0,74	μ <sub>1</sub> = 1,97 σ = 1,23 C.V. = 0,62
> 4,5	μ <sub>1</sub> = 1,43 σ = 0,96 C.V. = 0,67	μ <sub>1</sub> = 1,46 σ = 0,95 C.V. = 0,65	μ <sub>1</sub> = 1,48 σ = 0,94 C.V. = 0,64

In Tabella 3.42 si consegnano i valori medi delle frequenze degli incidentati rilevati in condizioni base. Si osserva che ad un valore della larghezza della corsia variabile tra 3,2 e 4,5 metri, e per valori crescenti del traffico, corrisponde un aumento della frequenza media degli incidentati. Negli altri casi i dati a disposizione fanno riferimento solo ad alcune delle classi di larghezza della corsia e di traffico fissate. I valori di CV sono sempre inferiori all'unità pertanto non c'è sovra dispersione delle frequenze rispetto al valor medio.

Tabella 3.42-Statistiche descrittive della frequenza degli incidentati rilevata in condizioni base

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	X	$\mu_1 = 1,60$ $\sigma = 1,36$ C.V. = 0,85	X
$3,2 < l \leq 4,5$	$\mu_1 = 1,00$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_1 = 1,20$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00	$\mu_1 = 1,54$ $\sigma = 1,25$ C.V. = 0,81
$> 4,5$	X	X	$\mu_1 = 1,40$ $\sigma = 0,00$ C.V. = 0,00

Quindi sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.43) per ciascun sottoinsieme omogeneo, come rapporto tra la frequenza media degli incidentati rilevata in altre condizioni (cfr. Tabella 3.41) e la stessa rilevata in condizioni base (cfr. Tabella 3.42).

Tabella 3.43-FMI<sub>l</sub> per la correzione della FPS ad hoc per la frequenza media degli incidentati

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	$\leq 3000$	$3000 < TGM \leq 7500$	$> 7500$
$\leq 3,2$	X	FMI=1,42	X
$3,2 < l \leq 4,5$	X	FMI=1,35	FMI=1,28
$> 4,5$	X	X	FMI=1,06

I risultati ottenuti evidenziano che per uno specifico valore del traffico, e per valori crescenti della larghezza della corsia, gli FMI decrescono; inoltre essi assumono sempre valore maggiore dell'unità, ciò denota valori di frequenza su tronchi non in condizione base superiore a quella rilevata su tronchi in condizione base.

### 3.5.2.2 Fattore di Modifica degli Incidenti per il grado di scorrevolezza (FMI<sub>Gs</sub>)

Il fattore di modifica (FMI<sub>Gs</sub>) della FPS è stato calibrato per la previsione della frequenza degli incidentati sui tronchi stradali che non sono in condizioni base ( $G_s \geq 0,8$ ). La frequenza degli incidentati ha un andamento crescente per valori di  $G_s$  inferiori al valore critico 0,623, e andamento decrescente per valori maggiori di  $G_s$  critico (cfr. Figura 3.30).

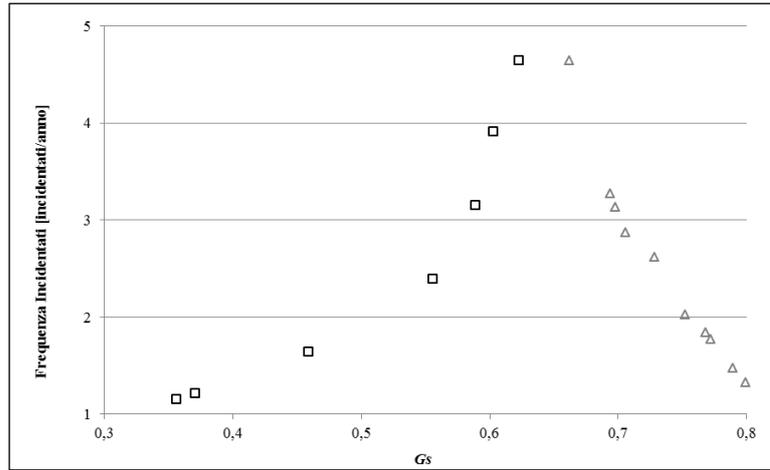


Figura 3.30-Frequenza degli incidentati in funzione di Gs

Il campione è stato così ripartito in due sottoinsiemi: uno comprende i tronchi stradali con  $G_s$  non superiore a 0,623 e l'altro i tronchi stradali con  $G_s$  variabile tra 0,623 e 0,8.

Specifiche relazioni bidimensionali sono state studiate per valutare l'incidenza della scorrevolezza sulla frequenza degli incidentati rilevata.

1)  $G_s < 0,623$

L'equazione che esprime la variazione della frequenza per valori di  $G_s$  non superiori a 0,623 (curva nera in Figura 3.30) è la seguente:

$$\text{Freq. Feriti}_{\text{Predetta}} = 0,022 * e^{(8,59 * G_s)} \tag{61}$$

I valori assunti dai coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  (Tabella 3.44) sono significativi ( $p$ -value  $\ll 5\%$ ). Il modello interpreta correttamente la variabilità del fenomeno di studio come evidenziato dal coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ), che assume valore prossimo all'unità, e dal diagramma di performance (Figura 3.31) in cui le frequenze si addensano intorno alla retta di identità, infatti non vi sono significative variazioni tra i valori della frequenza predetta e quelli rilevati ( $\Delta_{\text{min}} = 0,19$ ;  $\Delta_{\text{max}} = 0,58$ ;  $\Delta_{\text{med}} = 0,40$ ).

Tabella 3.44-Coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  per  $G_s \leq 0,623$

<i>Stima</i>	$\sigma$	<i>p-value</i>	<i>Limite superiore intervallo di confidenza</i>	<i>Limite inferiore intervallo di confidenza</i>	$\rho^2$
$A_0$	0,022	0,001	0,0407	-0,003	0,99
$A_1$	8,59	2,004	0,0024	19,192	

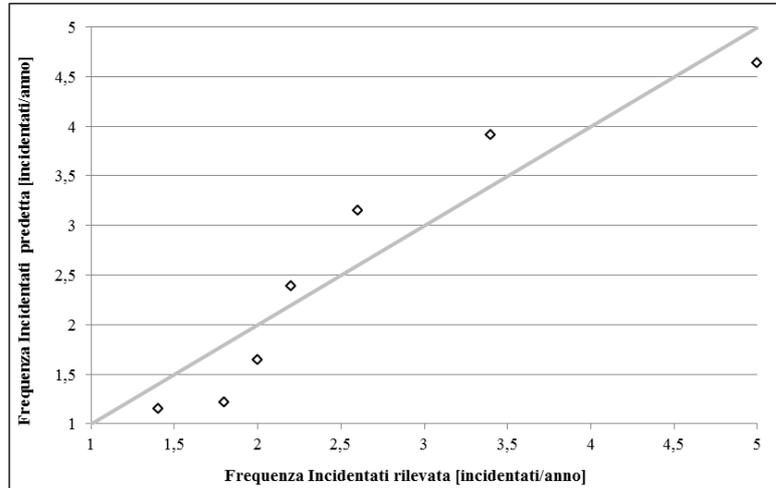


Figura 3.31-Diagramma di Performance per  $G_s \leq 0,623$

2)  $0,623 < G_s < 0,8$

L'equazione che esprime la variazione della frequenza per valori di  $G_s$  compresi nell'intervallo  $]0,623; 0,8[$  (curva grigia in Figura 3.30) è la seguente:

$$\text{Freq. Feriti}_{\text{Predetta}} = 6089 * e^{(-10,55 * G_s)} \quad (62)$$

Anche per il secondo sottoinsieme i valori assunti dai coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  (cfr. Tabella 3.45) sono significativi ed il modello interpreta correttamente il fenomeno di studio come evidenziato dal coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ) e dal diagramma di performance (cfr. Figura 3.32) in cui non si riscontrano significative variazioni tra i valori della variabile analizzata, predetti dal modello, ed i valori rilevati nella realtà ( $\Delta_{\min} = 0,03$ ;  $\Delta_{\max} = 0,64$ ;  $\Delta_{\text{med}} = 0,32$ ).

Tabella 3.45-Coefficienti  $A_0$  e  $A_1$  per  $0,543 < G_s < 0,8$

	<i>Stima</i>	$\sigma$	<i>p-value</i>	<i>Limite superiore intervallo di confidenza</i>	<i>Limite inferiore intervallo di confidenza</i>	$\rho^2$
$A_0$	6089	16662,99	0,0579	52491,360	-26312,100	0,96
$A_1$	-10,55	1,85	0,0005	-6,600	-15,400	

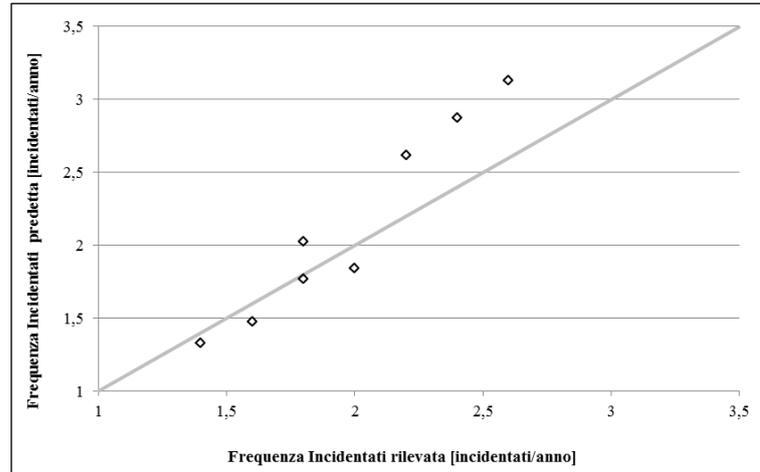


Figura 3.32-Diagramma di Performance per  $0,623 < G_s < 0,8$

Le statistiche descrittive della frequenza degli incidentati per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.46.

Tabella 3.46-Statistiche descrittive della frequenza degli incidentati al variare del grado di scorrevolezza

$G_s \leq 0,623$	$0,623 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
$\mu = 2,62$	$\mu = 2,36$	$\mu = 1,45$
$\sigma = 2,88$	$\sigma = 2,71$	$\sigma = 1,78$
C.V. = 1,10	C.V. = 1,15	C.V. = 1,23

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.47) come rapporto tra la frequenza media degli incidentati stimata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.47-FMI<sub>G<sub>s</sub></sub>

$G_s \leq 0,623$	$0,623 < G_s < 0,8$	$G_s \geq 0,8$
FMI=1,81	FMI=1,63	FMI=1,00

I valori degli FMI decrescono all'aumentare di  $G_s$ , inoltre, essi sono sempre maggiori dell'unità; ciò implica che al crescere della scorrevolezza corrisponde una riduzione della frequenza media degli incidentati rispetto a quella stimata in condizioni base.

### 3.5.2.3 Fattore di Modifica degli Incidenti per la pendenza (FMI<sub>i</sub>)

Il fattore di modifica (FMI<sub>i</sub>) della FPS deve essere calibrato per la previsione della frequenza degli incidentati sui tronchi omogenei che non sono in condizioni base ( $i \leq 1\%$ ).

Per definire degli intervalli di pendenza omogenei rispetto alla frequenza degli incidentati è stato analizzato il campione costituito dai tronchi omogenei in altre condizioni geometriche su cui sono stati registrati incidentati. Dopo una attenta analisi dei dati, il campo di variazione delle frequenze degli incidentati, ossia l'intervallo ]0,01; 0,07], è stato suddiviso in cinque intervalli di ampiezza unitaria, per

ciascuno dei quali sono state calcolate le frequenze medie degli incidentati (cfr. Figura 3.33).

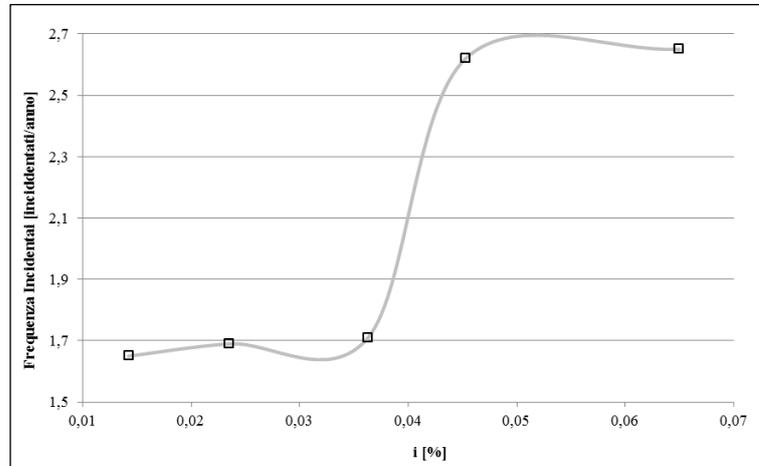


Figura 3.33-Frequenza degli incidentati in funzione della pendenza

Dalla Tabella 3.48 si evince che le frequenze medie stimate assumono valori quasi costanti in due intervalli di pendenza: ]0,01-0,04] e ]0,04-0,07].

Tabella 3.48-Frequenza media degli incidentati stimata per la definizione di classi omogenee di pendenza

Pendenza media [%]	Frequenza media stimata [incidentati/anno]
0,014	1,65
0,023	1,69
0,036	1,71
0,045	2,62
0,065	2,65

Dunque il campione è stato ripartito in due sottoinsiemi: il primo comprende i tronchi stradali con pendenza variabile tra 0,01 e 0,04; il secondo comprende i tronchi con pendenza maggiore di 0,04. Le statistiche descrittive della frequenza degli incidentati per ciascun sottoinsieme sono consegnate nella Tabella 3.49.

Tabella 3.49-Statistiche descrittive della frequenza degli incidentati al variare della pendenza

$i \leq 1\%$	$1\% < i \leq 4\%$	$i > 4\%$
$\mu = 1,45$	$\mu = 1,70$	$\mu = 2,51$
$\sigma = 1,78$	$\sigma = 2,01$	$\sigma = 2,79$
C.V. = 1,23	C.V. = 1,18	C.V. = 1,11

Per ciascun sottoinsieme sono stati definiti gli FMI (cfr. Tabella 3.50) come rapporto tra la frequenza media degli incidentati stimata in condizioni diverse da quelle base e la stessa rilevata in condizioni base.

Tabella 3.50-FMI<sub>i</sub>

$i \leq 1\%$	$1\% < i \leq 4\%$	$i > 4\%$
FMI=1,00	FMI=1,17	FMI=1,73

I valori degli FMI crescono all'aumentare della pendenza e ciò implica che ad un incremento della pendenza corrisponde un incremento della frequenza media degli incidentati rispetto a quella stimata in condizioni base.

### 3.5.3 Coefficiente di calibrazione della FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati

Per considerare l'influenza che le diverse specificità locali hanno non solo sul numero di incidentati attesi, ma anche sul legame tra questi e ciascuno specifico fattore considerato, la FPS è stata, ulteriormente, corretta mediante un fattore di calibrazione ( $C_x$ ). Tale fattore si definisce come rapporto tra la sommatoria del numero di incidentati rilevati sui tronchi in altre condizioni geometriche e la sommatoria del numero di incidentati rilevato sui tronchi in condizioni geometriche di base. Il valore del coefficiente di calibrazione restituito è pari a 0,248.

In definitiva l'equazione che consente di stimare la frequenza media degli incidentati in un anno su tronchi di strada extraurbana ad unica carreggiata e doppio senso di marcia è la seguente:

$$I = 0,248 * I_{base} * (FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i) \quad (63)$$

Per la misura dell'adeguatezza della FPS (cfr. Equazione 63) si è ricorso al metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma consente di rappresentare un processo statistico caratterizzato dall'indipendenza di ogni osservazione di un serie storica da quelle che la precedono. Per riprodurre un siffatto diagramma, in relazione ad una variabile, bisogna calcolare il residuo per ogni osservazione, ordinare i residui in senso crescente, relativamente alla variabile, quindi cumularli. Un salto verticale nel grafico rappresenta un residuo insolitamente elevato e può indicare la presenza di una osservazione molto distante dal resto dei dati disponibili.

Dalla Figura 3.34 non sono evidenti salti verticali, ciò conferma l'adeguatezza della FPS nell'interpretare correttamente i dati rilevati.

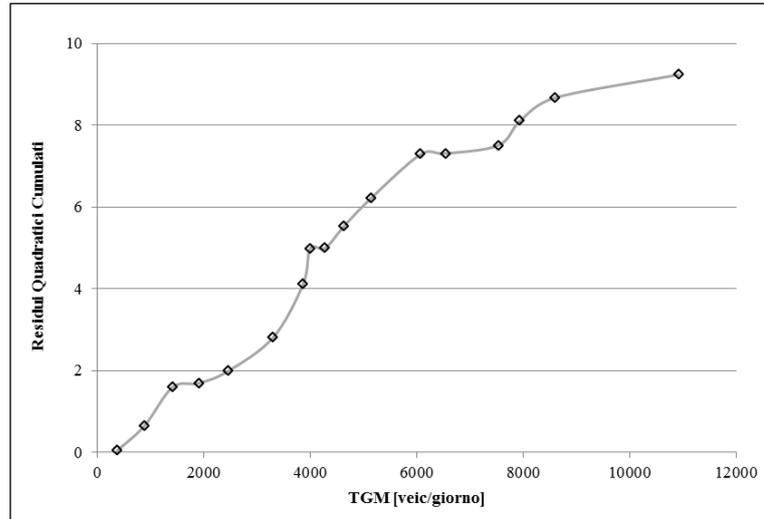


Figura 3.34-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza del numero di incidentati

### 3.6 Calibrazione di FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti attraverso il modello unico per gli incidentati

#### 3.6.1 FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base

La FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati in condizioni base (cfr. Equazione 59, §3.5.1) è stata adoperata per prevedere la frequenza del numero di feriti e di morti mediante fattori di ponderazione su base percentuale. Tali fattori sono stati calcolati come descritto di seguito:

- %morti = percentuale dei decessi sul totale degli incidentati, ottenuta come rapporto tra il numero totale dei morti ed il numero totale degli incidentati registrati sui tronchi in condizione base su cui sono stati registrati incidentati durante il periodo di osservazione (pari a 5 anni). Il fattore di ponderazione per la previsione della frequenza dei morti è pari al 21%.
- %feriti = percentuale dei feriti sul totale degli incidentati, ricavata come rapporto tra il numero totale dei feriti ed il numero totale degli incidentati registrati sui tronchi in condizione base su cui sono stati registrati incidentati durante il periodo di osservazione (pari a 5 anni). Il fattore di ponderazione per la previsione della frequenza dei morti è pari al 79%.

In definitiva le FPS per la previsione dei feriti e dei morti sui tronchi ricadenti in condizioni base hanno le seguenti forme funzionali (cfr. Equazioni 64 e 65):

$$F_{\text{base}}^{(\text{da inc})} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-1,75)} * 0,79 \quad (64)$$

$$M_{\text{base}}^{(\text{da inc})} = \text{TGM} * L * 365 * 10^{-6} * e^{(-1,75)} * 0,21 \quad (65)$$

in cui:

$F_{\text{base}}^{(\text{da inc})}$ ,  $M_{\text{base}}^{(\text{da inc})}$ : frequenza media prevista in un anno su un tronco stradale in condizioni base, relativa ai feriti ed ai morti;

TGM: traffico giornaliero medio, espresso in veicoli/giorno;

L: lunghezza del tronco stradale, espresso in chilometri.

Le FPS calibrate possono essere applicate anche ai tronchi stradali in condizioni differenti rispetto a quelle di base correggendo le stesse mediante i fattori di modifica degli incidenti (FMI), che portano in conto le differenze esistenti tra le caratteristiche geometriche base e quelle specifiche del sito in esame. In particolare si adopereranno i fattori di modifica calcolati per la FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua degli incidentati (cfr. §3.5.2), corretti mediante fattori di ponderazione su base percentuale, calcolati come in precedenza, relativi ai tronchi stradali in condizioni diverse da quelle base.

La frequenza dei feriti e dei morti sui tronchi stradali in altre condizioni è definita, rispettivamente dalle Equazioni 66 e 67:

$$F_{\text{altre}}^{(\text{da inc})} = I_{\text{base}} * \text{FMI}_l * \text{FMI}_{\text{Gs}} * \text{FMI}_i * \% \text{ Feriti media} \quad (66)$$

$$M_{\text{altre}}^{(\text{da inc})} = I_{\text{base}} * \text{FMI}_l * \text{FMI}_{\text{Gs}} * \text{FMI}_i * \% \text{ Morti media} \quad (67)$$

in cui:

$F_{\text{altre}}^{(\text{da inc})}$ ,  $M_{\text{altre}}^{(\text{da inc})}$ : frequenza media prevista in un anno su un tronco stradale in altre condizioni geometriche, relativa ai feriti ed ai morti;

$I_{\text{base}}$ : frequenza media annua degli incidentati in condizioni base, calcolata attraverso l'Equazione 59, §3.5.1;

$\text{FMI}_l$ ,  $\text{FMI}_{\text{Gs}}$  e  $\text{FMI}_i$ : fattori correttivi delle FPS relativi, rispettivamente, alla larghezza della corsia, al grado di scorrevolezza ed alla pendenza;

$\% \text{ Feriti media}$ ,  $\% \text{ Morti media}$ : media dei fattori di ponderazione, relativi ai feriti e ai morti, associati agli FMI.

Nelle tabelle a seguire si riportano i fattori di ponderazione per gli FMI individuati in fase di calibrazione della FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati.

Tabella 3.51-Fattori di ponderazione per FMI<sub>l</sub>

Larghezza corsia [m]	TGM [veic/giorno]		
	≤ 3000	3000 < TGM ≤ 7500	> 7500
≤ 3,2	X	FMI=1,42 %feriti = 87,8% %morti = 12,2%	X
3,2 < l ≤ 4,5	X	FMI=1,35 %feriti = 84,6% %morti = 15,4%	FMI=1,28 %feriti = 95,5% %morti = 4,5%
> 4,5	X	X	FMI=1,07 %feriti = 96,6% %morti = 3,4%

Tabella 3.52-Fattori di ponderazione per FMI<sub>Gs</sub>

Gs ≤ 0,623	0,623 < Gs < 0,8	Gs ≥ 0,8
FMI=1,81	FMI=1,63	FMI=1,00
%feriti = 88,7%	%feriti = 92,8%	%feriti = 79%
%morti = 11,3%	%morti = 7,2%	%morti = 21%

Tabella 3.53-Fattori di ponderazione per FMI<sub>i</sub>

i ≤ 1%	1% < i ≤ 4%	i > 4%
FMI=1,00	FMI=1,17	FMI=1,73
%feriti = 79%	%feriti = 90%	%feriti = 83,6%
%morti = 21%	%morti = 10%	%morti = 16,4%

### 3.6.2 Coefficienti di calibrazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti

Per considerare l'influenza che le diverse specificità locali hanno non solo sul numero di feriti e di morti attesi, ma anche sul legame tra questi e ciascuno specifico fattore considerato, le FPS sono state, ulteriormente, corrette mediante un fattore di calibrazione ( $C_x$ ). Tale fattore si definisce come rapporto tra la sommatoria del numero di feriti (morti) rilevati sui tronchi in altre condizioni geometriche e la sommatoria del numero di feriti (morti) rilevati sui tronchi in condizioni geometriche di base. I valori restituiti dei coefficienti di calibrazione sono pari a 0,224 per la previsione dei feriti e 0,292 per la previsione dei morti.

In definitiva le equazioni che consentono di stimare la frequenza media dei feriti e dei morti in un anno su tronchi di strada extraurbana ad unica carreggiata e doppio senso di marcia sono le seguenti:

$$F_{da\ inc} = 0,224 * I_{base} * (FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i) * \% \text{ Feriti media} \quad (68)$$

$$M_{da\ inc} = 0,292 * I_{base} * (FMI_l * FMI_{Gs} * FMI_i) * \% \text{ Morti media} \quad (69)$$

Per la misura dell'adeguatezza delle FPS si è ricorso al metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma consente di rappresentare un processo statistico caratterizzato dall'indipendenza di ogni osservazione di una serie storica da quelle che la precedono. Per riprodurre un siffatto diagramma, in relazione ad una variabile, bisogna calcolare il residuo per ogni osservazione, ordinare i residui in senso crescente, relativamente alla variabile, quindi cumularli. Un salto verticale nel grafico rappresenta un residuo insolitamente elevato e può indicare la presenza di una osservazione molto distante dal resto dei dati disponibili.

Dalle Figure 3.35 e 3.36 non sono evidenti salti verticali, ciò conferma l'adeguatezza delle FPS nell'interpretare correttamente i dati rilevati.

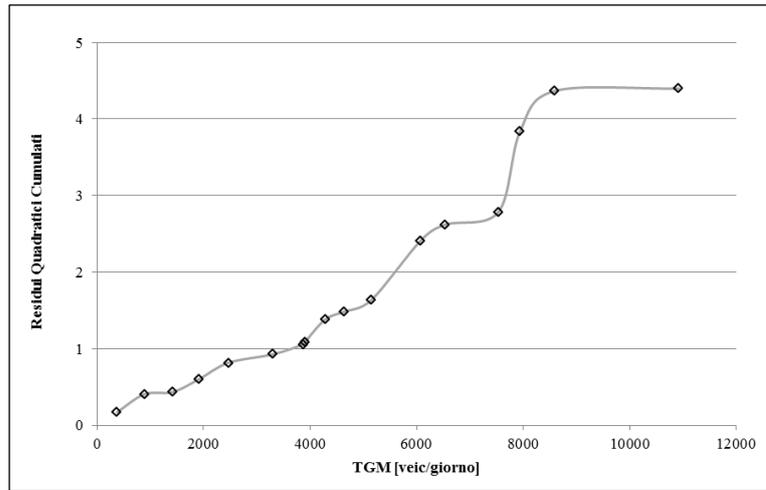


Figura 3.35-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei feriti

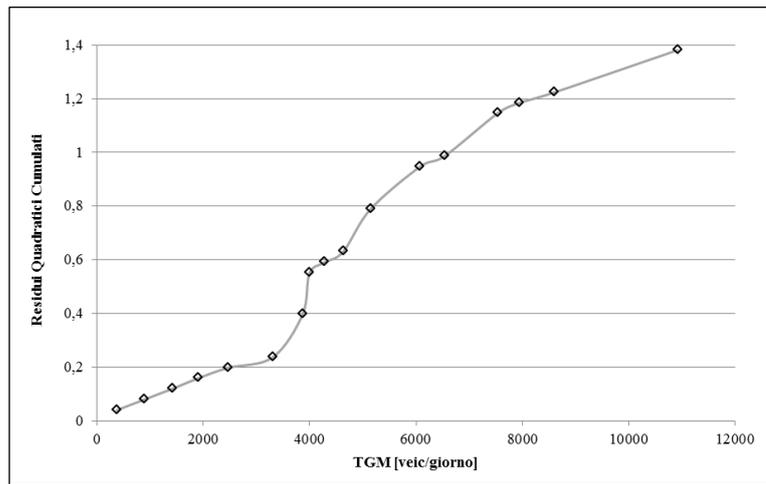


Figura 3.36-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei morti

### 3.7 Analisi della varianza

L'analisi della varianza permette di stabilire se è possibile utilizzare un modello unico per la previsione della frequenza dei feriti e dei morti attraverso dei fattori di ponderazione su base percentuale, rispetto ai due modelli ad hoc.

L'analisi della varianza (spesso indicata con l'acronimo ANOVA, *ANalysis Of VAriance*) è una tecnica che serve ad ottenere informazioni sugli effetti esercitati su di una variabile da determinati fattori.

Questa tecnica di analisi, infatti, consente di ripartire la varianza sperimentale in aliquote  $s$ -indipendenti al fine di isolare quella imputabile al fattore, o ai fattori, a  $n$  livelli, disponendo di  $m$  osservazioni sperimentali. Nel caso in esame gli  $n$  livelli sono rappresentati dai modelli "ad hoc" e dal modello unico, calibrati per la previsione delle frequenze dei feriti e dei morti; le  $m$  osservazioni sono rappresentate dal numero di tronchi stradali omogenei su cui sono stati rilevati incidentati.

L'ipotesi nulla ( $H_0$ ) è che i campioni siano rappresentativi di una stessa popolazione, pertanto le differenze osservate tra i gruppi sarebbero dovute solo al caso.

Le principali assunzioni della ANOVA sono:

1. tutti i gruppi seguono una distribuzione normale;
2. le varianze sono omogenee (omoscedasticità);

Sono stati definiti tre gruppi (A,B,C) caratterizzati ognuno dai valori delle frequenze predette con i modelli "ad hoc" e con il modello unico, e dai valori delle frequenze rilevate sui tronchi stradali omogenei su cui sono stati rilevati incidentati sia in condizioni base che non (cfr. Tabella 3.54).

*Tabella 3.54-Analisi della varianza*

<i>Gruppi</i>	<i>Feriti</i>	<i>Morti</i>
<b>A</b>	frequenza rilevata	frequenza rilevata
<b>B</b>	frequenza predetta con modello "ad hoc"	frequenza predetta con modello "ad hoc"
<b>C</b>	frequenza predetta con modello unico	frequenza predetta con modello unico

L'analisi preliminare dei dati ha messo in evidenza che la distribuzione delle frequenze è del tipo binomiale negativa (cfr. §3.1) pertanto la prima ipotesi è inefficace; ne consegue che l'omoscedasticità sia verificata attraverso un test non parametrico di verifica della omogeneità delle varianze. All'uopo è stato applicato il test di Levene non parametrico.

### 3.7.1 Test di Levene non parametrico

Il test di Levene [105-106] richiede la verifica dell'ipotesi nulla ( $H_0$ ) per cui date k serie di dati campionari (gruppi), queste appartengono alla stessa popolazione se hanno varianze statisticamente uguali.

Per confrontare la varianza di k gruppi la proposta di Levene consiste nel mettere a confronto gli scarti dei k gruppi, ed applicare quindi il test di Kruskal-Wallis sulle medie [107-108]. Se il test risulta significativo, vuol dire che le varianze dei k gruppi sono significativamente differenti.

Il procedimento è di seguito illustrato:

1. si calcolano gli scarti ( $d_i$ ) dei k gruppi a disposizione, ovvero le differenze delle singole osservazioni ( $x_i$ ) rispetto alle medie del gruppo considerato ( $\bar{x}$ ). Gli scarti sono espressi in valore assoluto per eliminare i segni negativi:

$$d_i = |x_i - \bar{x}| \quad (70)$$

2. gli scarti dei k gruppi devono essere considerati come una serie unica e convertiti in ranghi<sup>2</sup>

3. si calcola la somma dei ranghi di ogni gruppo ( $R_i$ ) e quella totale ( $R$ ), il numero di osservazioni di ogni gruppo ( $n_i$ ) e quello totale ( $N$ ), quindi si calcola la media di ogni gruppo ( $\bar{r}_i = R_i/n_i$ ) e la media generale ( $\bar{r} = R/n$ ).

Se l'ipotesi nulla è vera i ranghi di ogni gruppo dovrebbero essere distribuiti casualmente e quindi avere medie uguali, sia tra loro, sia alla media generale. Se l'ipotesi nulla è falsa, la media dei ranghi di almeno un gruppo dovrebbe essere significativamente differente da quella degli altri.

Da questo concetto è possibile pervenire alla definizione del parametro KW, calcolato a partire dalle somme dei ranghi di ogni gruppo e dal numero di osservazioni entro ogni gruppo (cfr. Equazione 71):

$$KW = \left( \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (71)$$

Il parametro KW si distribuisce approssimativamente come la distribuzione  $\chi^2$  con k-1 gradi di libertà quando le dimensioni del campione rispettano le condizioni minime richieste per la validità del chi quadrato, ovvero il numero totale di osservazioni N non è eccessivamente ridotto ed il numero minimo di dati per gruppo  $n_i$  non è inferiore a 5. L'approssimazione alla distribuzione chi quadrato è tanto migliore quanto maggiore è il numero k di gruppi ( $k > 2$ ) e il numero di osservazioni entro ogni gruppo è maggiore di 5.

---

<sup>2</sup> Il rango è il numero di posizione dei singoli dati nella lista dei dati ordinati in ordine numerico crescente. Quando due dati sono uguali, a ciascuno viene assegnato come numero di posizione la media dei numeri di posizione dei dati che risultano uguali.

Nella Tabella 3.55 si consegnano i risultati del test di Levene non parametrico applicato separatamente ai modelli di previsione dei feriti e dei morti, per un livello di significatività ( $\alpha$ ) fissato pari al 5%.

*Tabella 3.55-Test di omogeneità della varianza*

<i>Frequenza</i>	<i>Gradi di libertà</i>	<i>k</i>	<i>p-value</i>	<i>KW</i>	$\chi^2$
<i>Freq. Feriti</i> [feriti/anno]	2	3	0,405	1,809	5,99
<i>Freq. Morti</i> [morti/anno]	2	3	0,254	2,739	

Dalla tabella emerge che non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla: i gruppi considerati non hanno una variabilità significativamente differente. I parametri KW risultano essere inferiori al valore critico del  $\chi^2$  ed inoltre i p-value restituiti sono di gran lunga superiori al 5%.

In definitiva, la possibilità di utilizzare un modello unico per la previsione della frequenza dei feriti e dei morti attraverso dei fattori di ponderazione su base percentuale, rispetto ai due modelli “ad hoc”, è stata valutata con una ANOVA omoschedastica non parametrica, più nota come test di Kruskal-Wallis.

### 3.7.2 Test di Kruskal-Wallis

Il test di Kruskal-Wallis [107-108] è un test non parametrico tra i più potenti per verificare l'uguaglianza delle mediane di k gruppi indipendenti, cioè per verificare se k gruppi indipendenti provengano dalla stessa popolazione e/o da popolazioni che abbiano la medesima mediana (ipotesi nulla).

Il test proposto è l'equivalente non parametrico dell'analisi della varianza ad un criterio di classificazione. La quantità di informazione contenuta in ogni osservazione è superiore a quella utilizzata nel test della mediana, che si limita a classificare i valori in alti e bassi; di conseguenza, diviene più probabile verificare la significatività della differenza nella tendenza centrale, pure disponendo di un numero inferiori di dati.

Per verificare l'ipotesi nulla che tutti i campioni hanno la stessa mediana e con ipotesi alternativa, che almeno una è differente o non tutte le mediane sono uguali, tutte le osservazioni dei k gruppi devono essere considerate come una serie unica e convertite in ranghi. Se sono presenti misure uguali, a ciascuna di esse deve essere assegnato il loro rango medio.

Successivamente bisogna calcolare la somma dei ranghi di ogni gruppo ( $R_i$ ) e quella totale (R), il numero di osservazioni di ogni gruppo ( $n_i$ ) e quello totale (N), quindi si calcola la media di ogni gruppo ( $\bar{r}_i = R_i / n_i$ ) e la media generale ( $\bar{r} = R / n$ ).

Se i campioni provengono dalla stessa popolazione o da popolazioni con la stessa tendenza centrale, queste medie aritmetiche dei ranghi di ogni gruppo dovrebbero essere statisticamente simili sia tra loro, sia alla media generale. È, pertanto, possibile

derivare la formula per il calcolo di un indice (KW), che dipende dalle differenze tra le medie dei gruppi e la media generale:

$$KW = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k n_i \left[ \frac{\bar{r}_i - (N+1)}{2} \right]^2 \quad (72)$$

Nell'Equazione 72, la differenza tra la media di ogni gruppo e la media generale è nascosta dall'uso della somma totale dei ranghi, che ovviamente dipende da N. La quantità  $N(N+1)/12$  è la varianza che dipende solo da N, mentre la media degli  $n_i$  ranghi è:

$$\bar{r}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{m_i} r_{ij} \quad (73)$$

Il parametro KW può essere calcolato a partire dalle somme, con una formula abbreviata che offre anche il vantaggio di evitare le approssimazioni dovute alle medie (cfr. Equazione 74) e che è l'equivalente dell'Equazione 71 adottata per il test di Levene in precedenza:

$$KW = \left( \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (74)$$

Di conseguenza, con una formula che evidenzia in modo più evidente le sue componenti, l'ipotesi di uguaglianza fra mediane è basata sulla funzione seguente:

$$KW = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{r}_i - \bar{r})^2 = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k n_i \left( \bar{r}_i - \frac{N+1}{2} \right)^2 \quad (75)$$

Come precedentemente sostenuto, il parametro KW si distribuisce approssimativamente come la distribuzione  $\chi^2$  con k-1 gradi di libertà quando le dimensioni del campione rispettano le condizioni minime richieste per la validità del chi quadrato, ovvero il numero totale di osservazioni N non è eccessivamente ridotto ed il numero minimo di dati per gruppo  $n_i$  non è inferiore a 5. L'approssimazione alla distribuzione chi quadrato è tanto migliore quanto maggiore è il numero k di gruppi e il numero di osservazioni entro ogni gruppo è maggiore di 5. Quando il numero di gruppi a confronto è ridotto (uguale a 3) ed il numero di osservazioni entro ogni gruppo è inferiore a 5 la distorsione dalla distribuzione  $\chi^2$  è elevata; di conseguenza, per la significatività di KW si fa ricorso a tabelle specifiche predisposte da Kruskal e Wallis (si veda l'Appendice).

Nella Tabella 3.56 si consegnano i risultati del test di Kruskal-Wallis applicato separatamente ai modelli di previsione dei feriti e dei morti, per un livello di significatività ( $\alpha$ ) pari al 5%.

*Tabella 3.56-Test di Kruskal-Wallis*

<i>Frequenza</i>	<i>Gradi di libertà</i>	<i>k</i>	<i>p-value</i>	<i>KW</i>	$\chi^2$
<i>Freq. Feriti</i> [feriti/anno]	2	3	0,919	0,169	5,99
<i>Freq. Morti</i> [morti/anno]	2	3	0,881	0,253	

Dalla tabella emerge che non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla poiché ciascun parametro KW risulta essere inferiore al valore critico del  $\chi^2$  ed inoltre i p-value restituiti sono di gran lunga superiori al 5%.

Concludendo, la possibilità di utilizzare un modello unico per la previsione della frequenza dei feriti e dei morti attraverso dei fattori di ponderazione su base percentuale, rispetto ai due modelli ad hoc, è consistente.

## Capitolo 4 - Validazione delle Funzioni di Prestazione della Sicurezza per la previsione della lesività degli incidenti

### 4.1 Rete di validazione

La rete di validazione si estende per circa 1.000 km cui sono associati 602 incidenti di cui 417 hanno determinato feriti, 185 hanno determinato incidentati; i dati adottati si riferiscono al quinquennio 2006-10.

Sono state adottate le stesse condizioni base definite per il campione di calibrazione, ovvero se contemporaneamente risulta:

$$\begin{cases} G_s \geq 0,8 \\ i \leq 1\% \end{cases} \quad (76)$$

Tutti i tronchi che non soddisfano entrambe le condizioni suddette sono indicati come tronchi in condizioni non ideali.

Il campione è stato frazionato come segue:

1. tronchi stradali omogenei in condizioni base, su cui sono stati registrati solo feriti; per una estensione complessiva di 128 km;
2. altri tronchi omogenei su cui sono stati registrati solo feriti, per una estensione complessiva di circa 660 km;
3. tronchi omogenei in condizioni base su cui si sono registrati sia feriti che morti, per una estensione complessiva di 23 km;
4. altri tronchi omogenei su cui si sono registrati sia feriti che morti, per una estensione complessiva di 163 km.

I valori di numerosità, media e deviazione standard della frequenza dei feriti e degli incidentati, e del coefficiente di variazione, sono consegnati in Tabella 4.1.

Tabella 4.1-Statistiche descrittive del campione di validazione

<i>Campione Feriti</i>				
Condizioni	Totale	$\mu$	$\sigma$	C.V.
Base	137	0,67	0,78	1,16
Altre	443	0,90	0,98	1,09
<i>Campione Incidentati</i>				
Condizioni	Totale	$\mu$	$\sigma$	CV
Base	157	1,40	1,58	1,13
Altre	380	2,22	2,33	1,15

L'eventuale presenza di frequenze anomale è stata valutata adottando il metodo grafico della carta di controllo [102] ed il criterio di Chauvenet [103-104].

In riferimento alla Figura 4.1 e Tabella 4.2 si osserva che il campione è costituito da 28 tronchi omogenei in condizioni base cui sono associati valori di frequenza dei feriti tali che il 75% del campione è compreso nella fascia di attenzione  $[0,67 \pm 1,56]$ ; il

4% ricade nella fascia di controllo  $[0,67 \pm 2,34]$ ; mentre il restante 21% ricade al di fuori della fascia di controllo  $[0,67 \pm 2,34]$ .

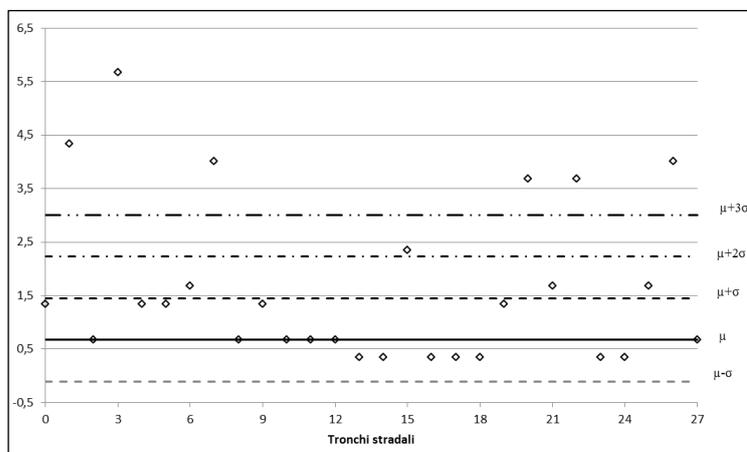


Figura 4.1-Carta di Controllo della Frequenze dei Feriti per il campione in condizioni base

Tabella 4.2-Sintesi della Frequenze dei Feriti per il campione in condizioni base

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
18	3	1	6
64%	11%	4%	21%

Dalla Tabella 4.2 risulta che vi sono sei valori di frequenza anomali. Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i valori della frequenza dei feriti rilevata sui tronchi omogenei in condizioni base per testare l'affidabilità della carta di controllo utilizzata. Dalla Tabella 4.3 emerge che almeno un valore di frequenza è anomalo, in particolare sono risultati anomali i valori che ricadono al di fuori della fascia di controllo (cfr. Figura 4.1). In definitiva sei misure saranno escluse dalle analisi successive.

Tabella 4.3-Criterio di Chauvenet per il campione in altre condizioni

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,004	0,003	
$\mu$	1,450	0,527	0,0179
<b>Max</b>	6,406	1,000	

In riferimento alla Figura 4.2 e Tabella 4.4 si osserva che il campione è costituito da 108 tronchi omogenei in altre condizioni geometriche a cui sono associati valori di frequenza dei feriti tali che il 98% del campione ricade nella fascia di attenzione  $[0,90 \pm 1,96]$ ; l'1% ricade nella fascia di attenzione  $[0,90 \pm 2,94]$ ; mentre il restante 1% ricade fuori della fascia di controllo.

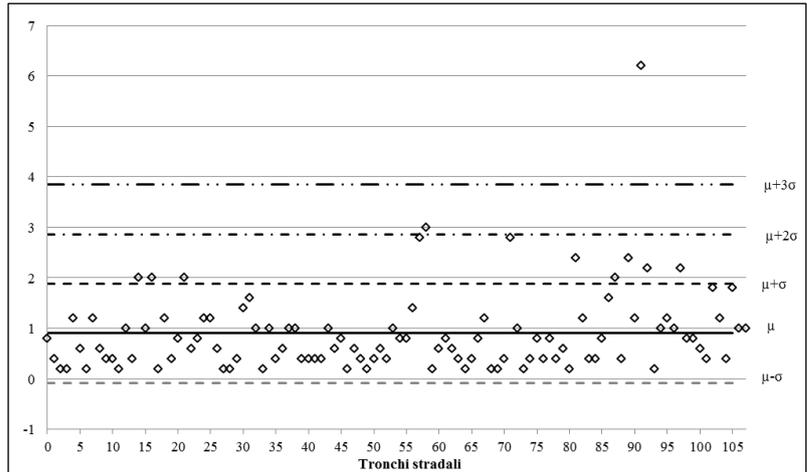


Figura 4.2-Carta di Controllo della Frequenze dei Feriti per il campione in altre condizioni

Tabella 4.4-Sintesi della Frequenze dei Feriti per il campione in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
96	10	1	1
89%	9%	1%	1%

Dalla Tabella 4.4 risulta che esiste un valore di frequenza anomalo. Il criterio di Chauvenet conferma l'anomalia (cfr. Tabella 4.5); dunque la misura sarà esclusa dalle analisi successive.

Tabella 4.5-Criterio di Chauvenet per il campione in altre condizioni

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,098	0,000	
$\mu$	0,558	0,634	0,005
<b>Max</b>	5,404	0,922	

In riferimento alla Figura 4.3 e Tabella 4.6 si osserva che il campione è costituito da 7 tronchi omogenei in condizioni base a cui sono associati valori di frequenza degli incidentati tali che l'intero campione è compreso nella fascia  $[1,40 \pm 1,58]$ . Giacché non vi sono dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet al campione in esame.

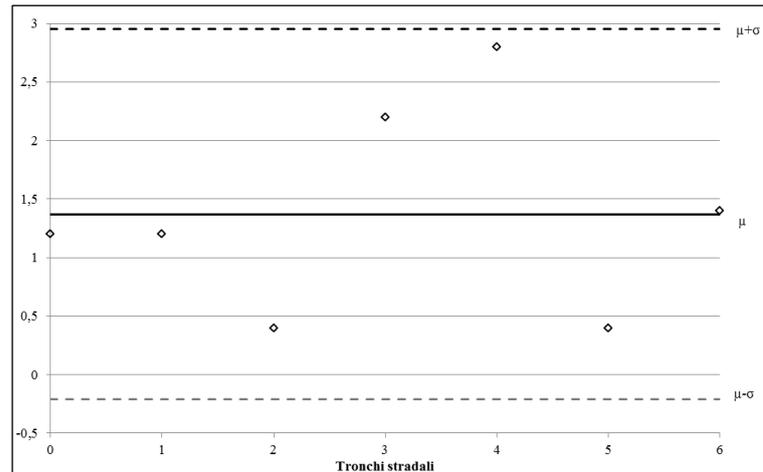


Figura 4.3-Carta di Controllo della Frequenze degli Incidentati per il campione in condizioni base

Tabella 4.6-Sintesi delle Frequenze degli Incidentati per il campione in condizioni base

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
7	0	0	0
100%	0%	0%	0%

In riferimento alla Figura 4.4 e Tabella 4.7 si osserva che il campione è costituito da 20 tronchi omogenei in altre condizioni geometriche a cui sono associati valori di frequenza degli incidentati tali che tutto il campione è compreso nella fascia di attenzione  $[2,22 \pm 4,66]$ .

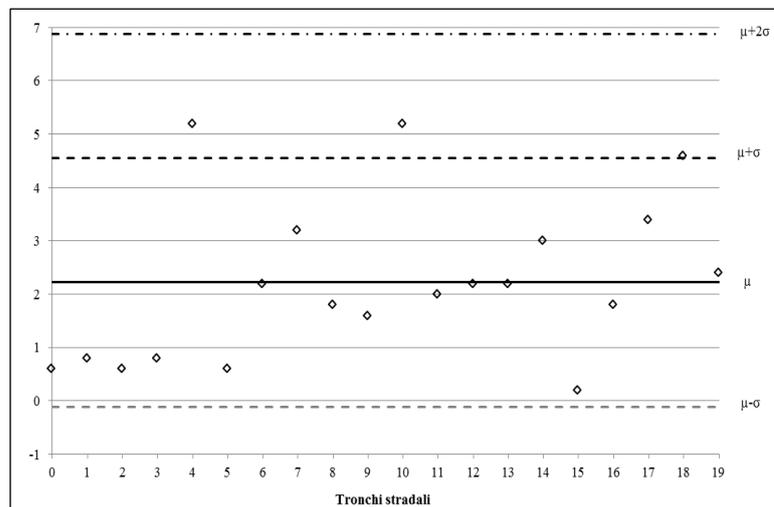


Figura 4.4- Carta di Controllo della Frequenze degli Incidentati per il campione in altre condizioni

Tabella 4.7-Sintesi della Frequenze degli Incidentati per il campione in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
17	3	0	0
85%	15%	0%	0%

Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i valori della frequenza degli incidentati rilevata sui tronchi omogenei in altre condizioni geometriche. Dalla Tabella 4.8 emerge che nessuna misura deve essere scartata.

Tabella 4.8-Criterio di Chauvenet per il campione in altre condizioni

	$d/\sigma$	$1-erf(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,005	0,051	
$\mu$	0,690	0,533	0,025
<b>Max</b>	1,951	0,960	

## 4.2 Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti

### 4.2.1 Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in condizioni base

La FPS calibrata per la rete con caratteristiche infrastrutturali di base (cfr. Equazione 45, §3.3.1) è stata applicata al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni base su cui sono stati rilevati feriti, trattati in fase di validazione. La differenza tra la frequenza predetta e quella rilevata restituisce i residui. La carta di controllo statistico dei residui (cfr. Figura 4.5) permette di individuare la presenza di eventuali valori anomali. I residui ricadono tutti nella fascia di attenzione  $[-0,45 \pm 1,30]$  (cfr. Tabella 4.9).

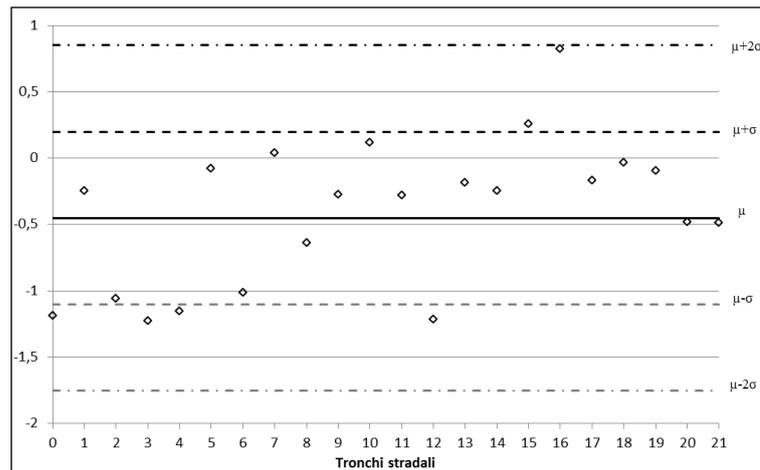


Figura 4.5-Carta di Controllo dei residui per il campione in condizioni base

Tabella 4.9-Sintesi dei residui per il campione in condizione base

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
16	6	0	0
73%	27%	0%	0%

Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i valori della frequenza dei feriti rilevata sui tronchi omogenei in altre condizioni geometriche. Dalla Tabella 4.10 emerge che nessun valore è da scartare (cfr. Figura 4.5).

Tabella 4.10-Criterio di Chauvenet per il campione in condizioni base

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
Min	0,050	0,007	
$\mu$	0,760	0,522	0,023
Max	2,715	0,960	

Il diagramma dei residui quadratici cumulati (cfr. Figura 4.6) evidenzia che la FPS calibrata interpreta adeguatamente il fenomeno investigato, non sono infatti presenti elevati salti verticali.

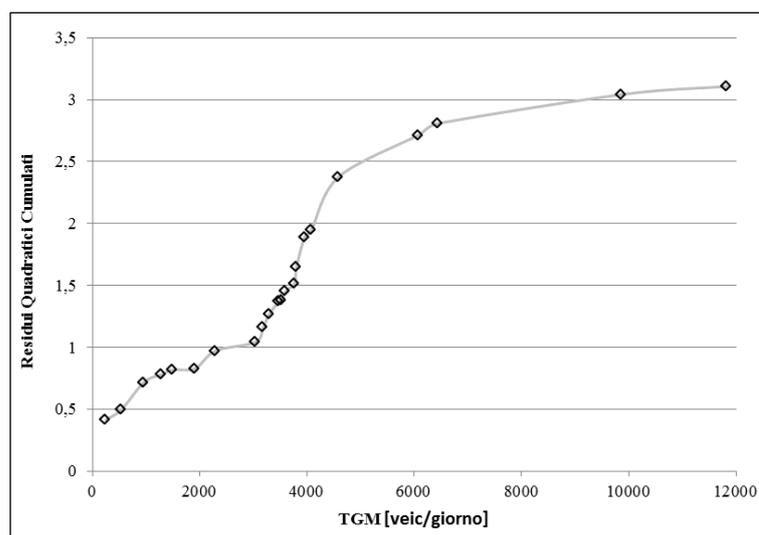


Figura 4.6-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per condizioni base

#### 4.2.2 Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di feriti in altre condizioni geometriche

La FPS calibrata per la rete stradale con caratteristiche geometriche diverse da quelle base, e corretta con i valori del coefficiente di calibrazione ( $C_x$ ) e di FMI individuati nella fase di calibrazione (cfr. Equazione 47, §3.3.3), è stata applicata al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni non base trattato in fase di validazione. La differenza tra la frequenza dei feriti così predetta e quella rilevata restituisce i residui per ciascun tronco stradale. Anche in tal caso si è costruita la carta

di controllo dei residui (cfr. Figura 4.7), che rappresenta un primo strumento utile per valutare la presenza di eventuali anomalie nel campione considerato. Dalla Tabella 4.11 si evince che il 96% dei residui ricade nella fascia di attenzione  $[0,61 \pm 3,64]$ ; il 3% dei residui ricade nella fascia di controllo  $[0,61 \pm 5,46]$ ; mentre il restante 1% ricade fuori della fascia di controllo  $[0,61 \pm 5,46]$ .

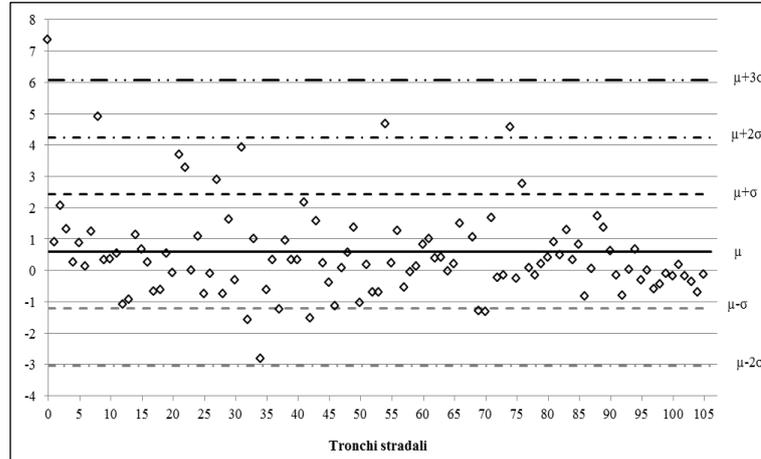


Figura 4.7-Carta di Controllo Statistico dei residui

Tabella 4.11-Sintesi dei residui

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
94	9	3	1
88%	8%	3%	1%

Il valore dei residui che ricade al di fuori della fascia di controllo è stato escluso dalle analisi successive. Ai valori restanti è stato applicato il criterio di Chauvenet, in particolare è stato verificato che i valori compresi nella fascia di controllo non risultassero anomali. Dalla Tabella 4.12 emerge che nessuna misura deve essere scartata.

Tabella 4.12-Criterio di Chauvenet per il campione in altre condizioni

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,083	0,024	
<b>μ</b>	0,498	0,642	0,005
<b>Max</b>	2,25	0,933	

Il modello si può ritenere statisticamente valido in quanto i residui stimati rientrano in un campo di variabilità limitato intorno al valore medio ed inoltre dal diagramma dei residui quadratici cumulati (cfr. Figura 4.8) non emergono evidenti salti verticali.

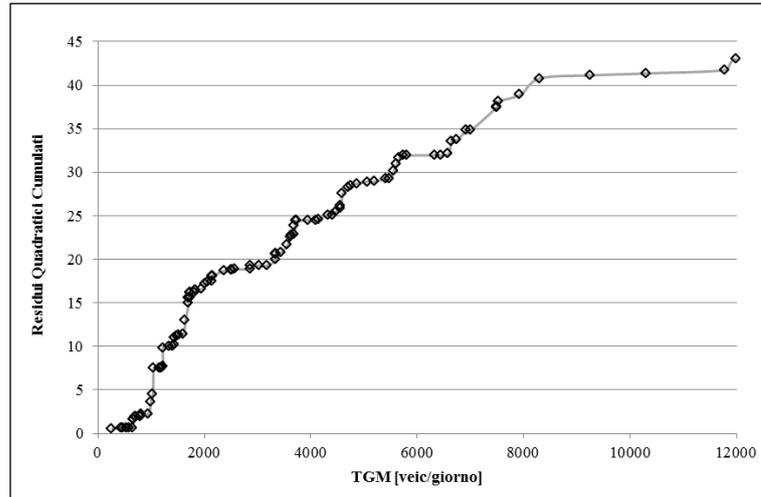


Figura 4.8-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per condizioni non base

L'accuratezza delle FPS calibrate è stata valutata attraverso la stima di tre indicatori statistici sintetici:

–MAD (Mean Absolute Deviation) = rapporto tra il valore assoluto della somma dei residui ( $D_i$ ) e il numero  $n$  di tronchi investigati

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |D_i|}{n} \quad (77)$$

–MSE (Mean Squared Error) = rapporto tra la somma del quadrato dei residui ( $D_i$ ) e il numero  $n$  di tronchi analizzati

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^2}{n} \quad (78)$$

- I = rapporto tra lo scarto quadratico medio dei residui e la media delle frequenze predette ( $N_{feriti}$ )

$$I = \sqrt{MSE} \left/ \left( \frac{\sum_{i=1}^n |N_{feriti}|}{n} \right) \right. \quad (79)$$

I valori dei tre indicatori statistici sintetici sono consegnati in Tabella 4.13.

*Tabella 4.13-Indicatori statistici sintetici*

	<i>Condizioni base</i>	<i>Altre Condizioni</i>
<b>MAD</b>	0,34	0,47
<b>MSE</b>	0,14	0,30
<b>I</b>	0,79	0,88

Si può concludere che le FPS determinate sono statisticamente significative ed accurate, infatti sia in condizioni base che non i residui mostrano uno scarto modesto

tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all'unità.

### 4.3 Validazione delle FPS ad hoc per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti

#### 4.3.2 Validazione delle FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base

Le FPS calibrate per la rete con caratteristiche infrastrutturali di base (cfr. Equazioni 50 e 51, §3.4.1) sono state applicate al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni base su cui sono stati rilevati incidentati, trattati in fase di validazione. La differenza tra la frequenza predetta e quella rilevata restituisce i residui. L'analisi della carta di controllo statistico dei residui calcolati per i feriti e per i morti, hanno evidenziato l'assenza di valori anomali di questi ultimi. In riferimento alla Figura 4.9 e alla Tabella 4.14 risulta che i residui calcolati per i feriti ricadono entro la fascia di attenzione  $[-0,87 \pm 1,96]$ ; in riferimento alla Figura 4.10 e alla Tabella 4.15 risulta che i residui calcolati per i morti sono compresi nella fascia di attenzione  $[-0,16 \pm 0,56]$ . Siccome non risultano dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet.

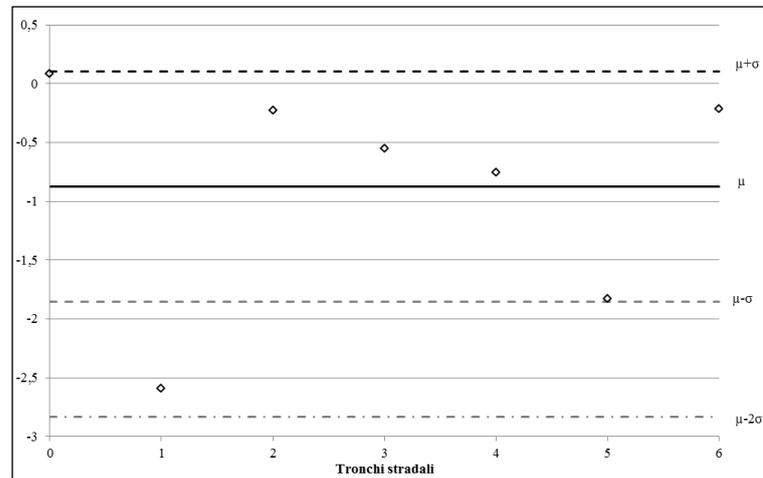


Figura 4.9-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei feriti condizioni base

Tabella 4.14-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
6	1	0	0
86%	14%	0%	0%

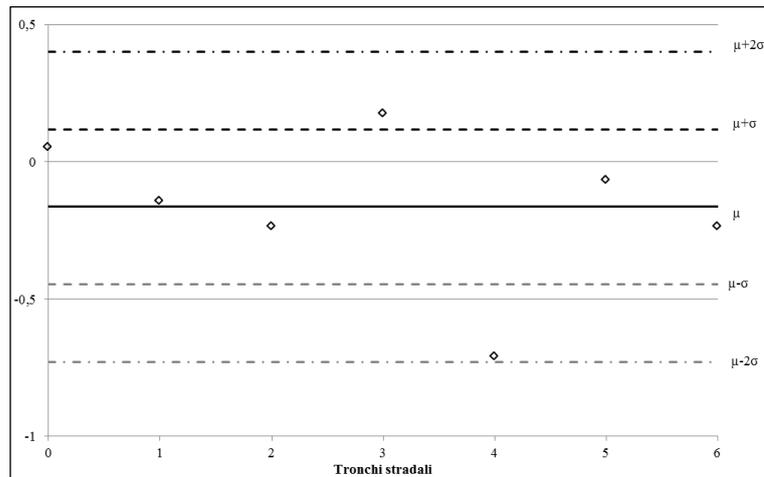


Figura 4.10-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei morti condizioni base

Tabella 4.15-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
5	2	0	0
71%	29%	0%	0%

L'adeguatezza delle FPS è stata valutata mediante il metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma (cfr. Figure 4.11 e 4.12) evidenzia che le FPS calibrate interpretano adeguatamente il fenomeno investigato, non evidenziando elevati salti verticali.

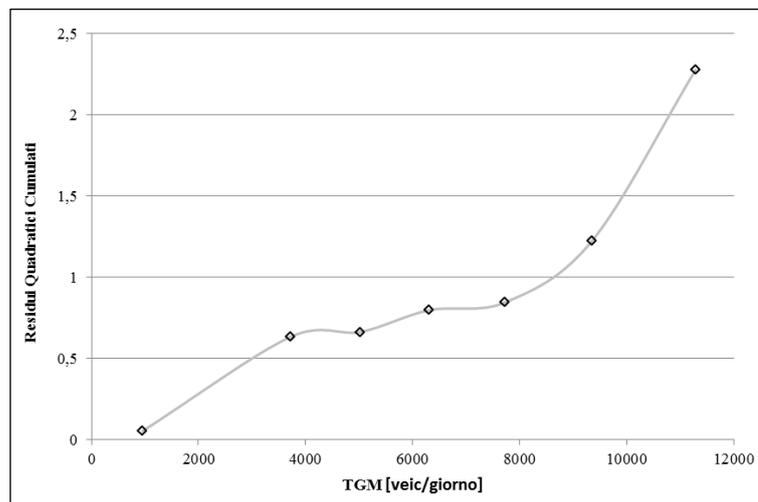


Figura 4.11-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei feriti in condizioni base

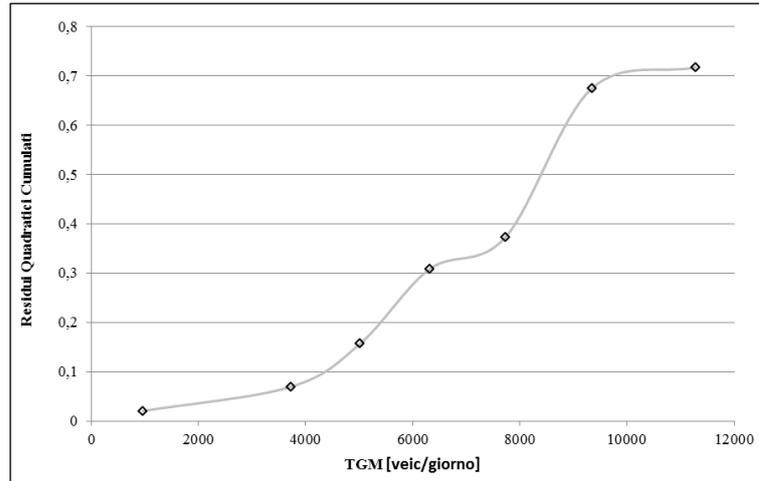


Figura 4.12–Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei morti in condizioni base

Sono stati calcolati i tre indicatori statistici sintetici (cfr. Equazioni 77, 78 e 79); i risultati sono consegnati in Tabella 4.16.

Tabella 4.16–Indicatori statistici sintetici

	<i>Feriti</i>	<i>Morti</i>
<b>MAD</b>	0,48	0,31
<b>MSE</b>	0,32	0,10
<b>I</b>	0,12	0,82

Le FPS determinate in condizioni base risultano statisticamente significative ed accurate, infatti i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all’unità.

#### 4.3.3 Validazione delle FPS ad hoc per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in altre condizioni geometriche

Le FPS calibrate per la rete stradale con caratteristiche geometriche diverse da quelle base, e corrette con i valori dei coefficienti di calibrazione ( $C_v$ ) e degli FMI individuati nella fase di calibrazione (cfr. Equazioni 56 e 57, §3.4.3), sono state applicate al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni non base trattato in fase di validazione. L’analisi della carta di controllo statistico dei residui, calcolati per i feriti e per i morti, ha evidenziato l’assenza di valori anomali di questi ultimi. In riferimento alla Figura 4.13 e alla Tabella 4.17 risulta che i residui calcolati per i feriti ricadono nella fascia di attenzione  $[-0,26 \pm 1,90]$ .

In riferimento alla Figura 4.14 e alla Tabella 4.18 risulta che i residui calcolati per i morti sono compresi nella fascia di attenzione  $[-0,21 \pm 1,68]$ .

Siccome non risultano dati compresi nella fascia di controllo, sia nel caso delle frequenze dei feriti che dei morti, non è stato applicato il criterio di Chauvenet.

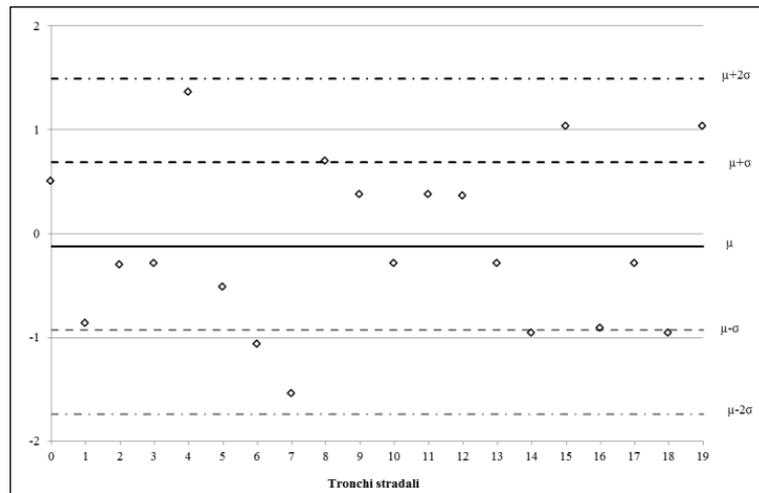


Figura 4.13-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

Tabella 4.17-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
12	8	0	0
60%	40%	0%	0%

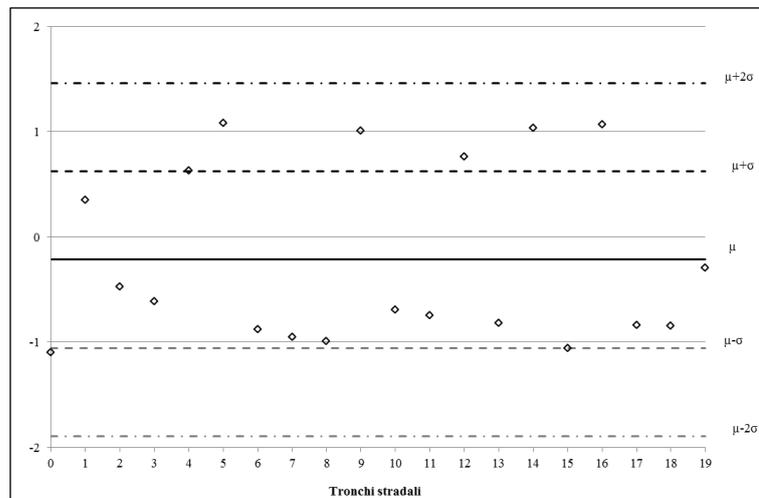


Figura 4.14-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

Tabella 4.18-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
13	7	0	0
65%	35%	0%	0%

L'adeguatezza delle FPS è stata valutata mediante il metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma (cfr. Figure 4.15 e 4.16) evidenzia

che le FPS calibrate interpretano adeguatamente il fenomeno investigato, non evidenziando elevati salti verticali.

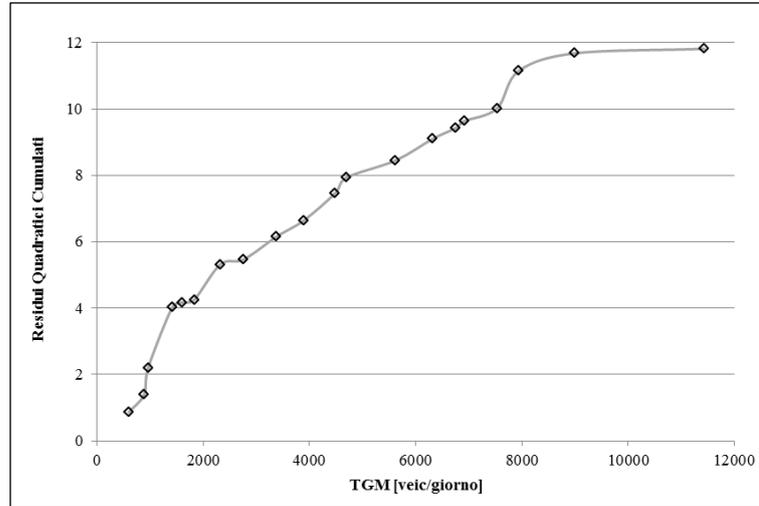


Figura 4.15-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

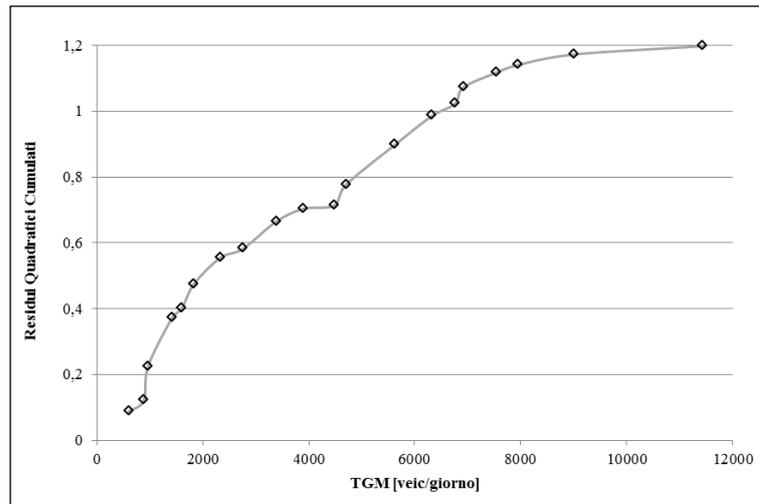


Figura 4.16-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

In ultimo sono stati calcolati i tre indicatori statistici sintetici (cfr. Equazioni 77, 78 e 79); i risultati sono consegnati in Tabella 4.19.

Tabella 4.19-Indicatori statistici sintetici

	<i>Feriti</i>	<i>Morti</i>
<b>MAD</b>	0,72	0,81
<b>MSE</b>	0,59	0,06
<b>I</b>	0,43	0,85

Si può concludere che le FPS determinate sono statisticamente significative ed accurate, infatti sia in condizioni base che non i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all'unità.

#### 4.4 Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di incidentati

##### 4.4.1 Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di incidentati in condizioni base

La FPS calibrata per la rete con caratteristiche infrastrutturali di base (cfr. Equazione 59, §3.5.1) è stata applicata al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni base su cui sono stati rilevati incidentati, trattati in fase di validazione. La differenza tra la frequenza predetta e quella rilevata restituisce i residui. La carta di controllo statistico dei residui (cfr. Figura 4.17) permette di individuare la presenza di eventuali valori anomali. I residui ricadono tutti nella fascia di attenzione  $[-1,05 \pm 2,20]$  (cfr. Tabella 4.20). Siccome non risultano dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet.

Il diagramma dei residui quadratici cumulati (cfr. Figura 4.18) evidenzia che la FPS calibrata interpreta adeguatamente il fenomeno investigato, non evidenziando elevati salti verticali.

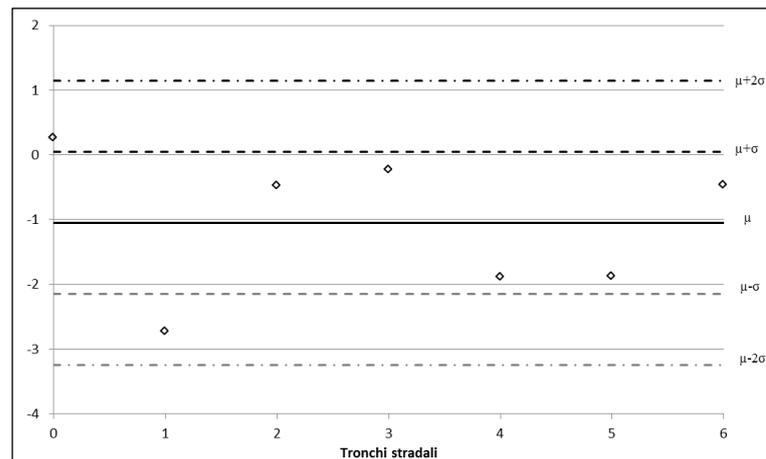


Figura 4.17-Carta di Controllo dei residui per il campione in condizioni base

Tabella 4.20-Sintesi dei residui per il campione in condizion base

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
5	2	0	0
71%	29%	0%	0%

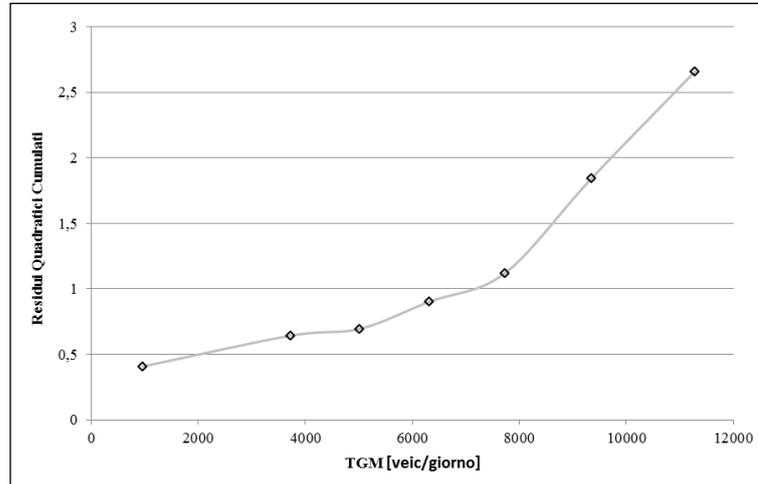


Figura 4.18-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza degli incidentati in condizioni base

#### 4.4.2 Validazione della FPS per la frequenza media annua del numero di incidentati in altre condizioni geometriche

La FPS calibrata per la rete stradale con caratteristiche geometriche diverse da quelle base, e corretta con i valori del coefficiente di calibrazione ( $C_c$ ) e di FMI individuati nella fase di calibrazione (cfr. Equazione 63, §3.5.3), è stata applicata al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni non base trattato in fase di validazione. La differenza tra la frequenza degli incidentati così predetta e quella rilevata restituisce i residui per ciascun tronco stradale. Anche in tal caso si è costruita la carta di controllo dei residui (cfr. Figura 4.19), che rappresenta un primo strumento utile per valutare la presenza di eventuali anomalie nel campione considerato. Tutti i residui ricadono nella fascia di attenzione  $[-0,43 \pm 2,02]$  (cfr. Tabella 4.21).

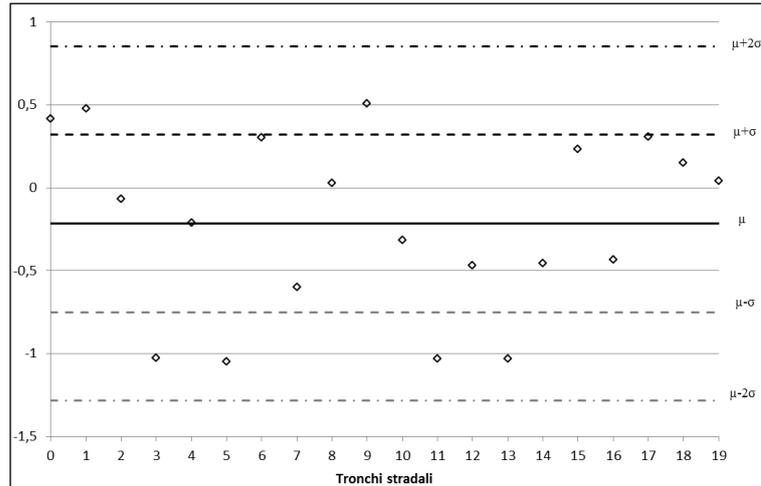


Figura 4.19-Carta di Controllo dei residui per il campione in altre condizioni

*Tabella 4.21-Sintesi dei residui in altre condizioni*

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
16	4	0	0
80%	20%	0%	0%

Per l'assenza di dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet al campione in esame.

Il modello si può ritenere statisticamente valido in quanto i residui stimati rientrano in un campo di variabilità limitato intorno al valore medio ed inoltre dal diagramma dei residui quadratici cumulati (cfr. Figura 4.20) non emergono evidenti salti verticali.

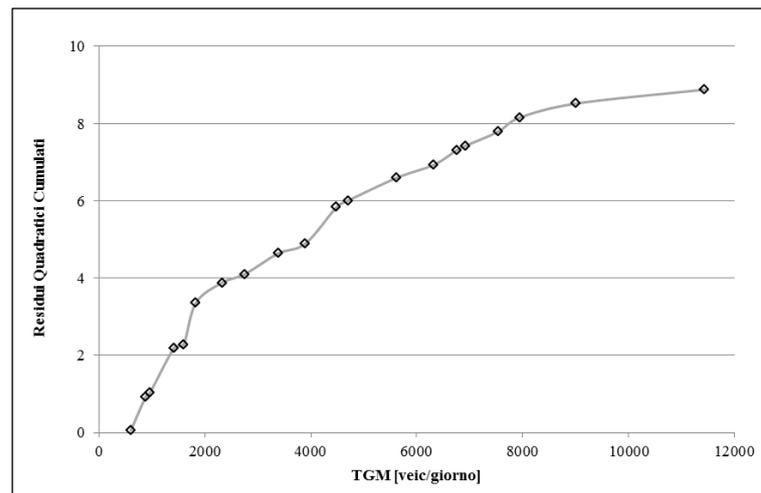


Figura 4.20-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza degli incidentati in altre condizioni

In ultimo sono stati calcolati i tre indicatori statistici sintetici (cfr. Equazioni 77, 78 e 79); i risultati sono consegnati in Tabella 4.22.

*Tabella 4.22-Indicatori statistici sintetici*

	<i>Condizioni base</i>	<i>Altre Condizioni</i>
<b>MAD</b>	0,38	0,62
<b>MSE</b>	0,57	0,44
<b>I</b>	0,10	0,26

Si può concludere che le FPS determinate sono statisticamente significative ed accurate, infatti sia in condizioni base che non i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all'unità.

#### 4.5 Validazione di FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti attraverso il modello unico per gli incidentati

##### 4.5.1 Validazione delle FPS per la previsione della frequenza media annua del numero di feriti e di morti in condizioni base

Le FPS calibrata per la rete con caratteristiche infrastrutturali di base (cfr. Equazioni 64 e 65, §3.6.1) sono state applicate al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni base su cui sono stati rilevati incidentati, trattati in fase di validazione. Calcolati i residui come differenza tra la frequenza predetta e quella rilevata è stata verificata l'assenza di eventuali valori anomali degli stessi attraverso la carta di controllo statistico. In riferimento alla Figura 4.21 ed alla Tabella 4.23 risulta che i residui calcolati per i feriti ricadono entro la fascia di attenzione  $[-0,29 \pm 0,54]$ , in riferimento alla Figura 4.22 e alla Tabella 4.24 risulta che i residui calcolati per i morti sono compresi nella fascia di attenzione  $[-0,03 \pm 0,56]$ .

Siccome non risultano dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet.

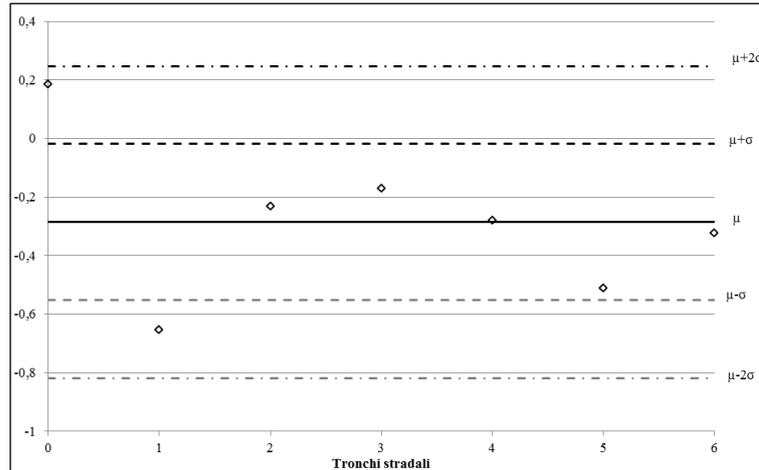


Figura 4.21-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei feriti condizioni base

Tabella 4.23-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
5	2	0	0
71%	29%	0%	0%

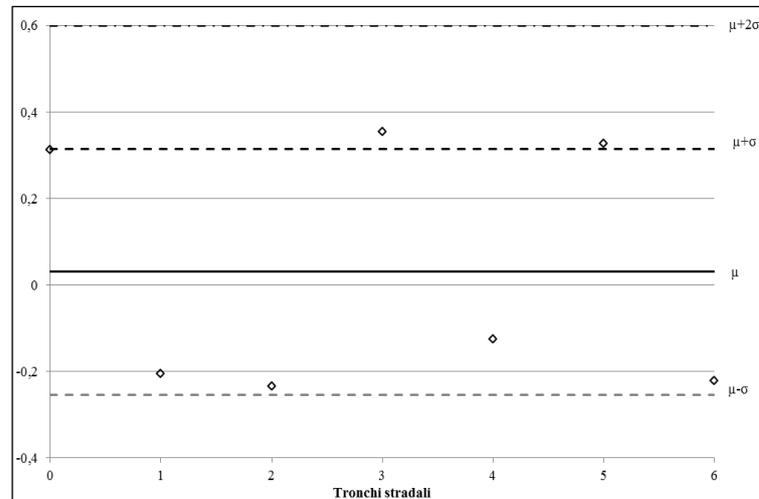


Figura 4.22-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei morti condizioni base

Tabella 4.24-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
5	2	0	0
71%	29%	0%	0%

L'adeguatezza delle FPS è stata valutata mediante il metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma (cfr. Figure 4.23 e 4.24) evidenzia che le FPS calibrate interpretano adeguatamente il fenomeno investigato, non evidenziando elevati salti verticali.

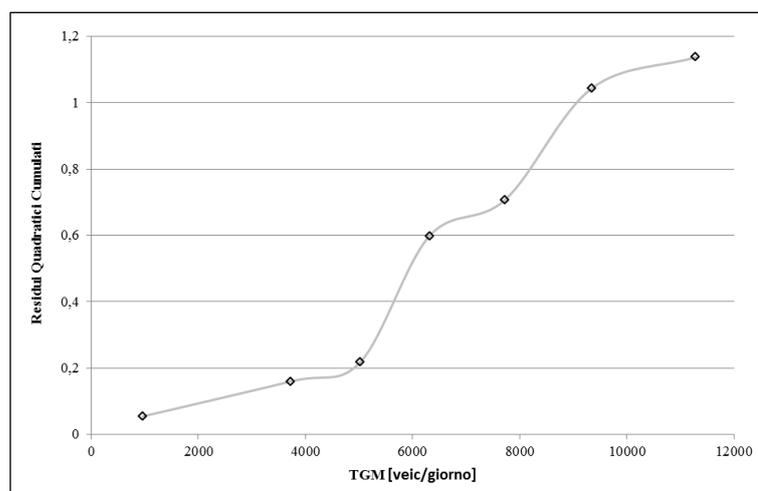


Figura 4.23-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei feriti in condizioni base

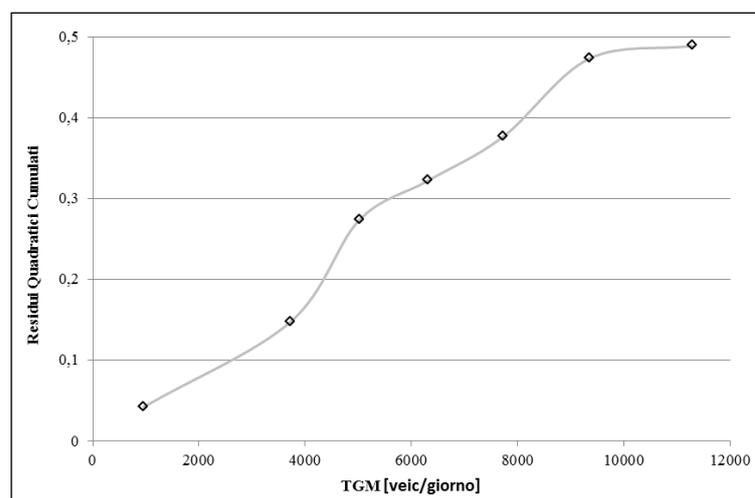


Figura 4.24-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei morti in condizioni base

Sono stati calcolati i tre indicatori statistici sintetici (cfr. Equazioni 77, 78 e 79); i risultati sono consegnati in Tabella 4.25.

Tabella 4.25-Indicatori statistici sintetici

	<i>Feriti</i>	<i>Morti</i>
<b>MAD</b>	0,38	0,25
<b>MSE</b>	0,16	0,07
<b>I</b>	0,09	0,67

Le FPS determinate in condizioni base risultano statisticamente significative ed accurate, infatti i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all'unità.

#### 4.5.2 Validazione delle FPS per la frequenza media annua del numero di feriti e di morti in altre condizioni geometriche

Le FPS calibrate per la rete stradale con caratteristiche geometriche diverse da quelle base e corrette con i valori dei coefficienti di calibrazione ( $C_x$ ) e degli FMI individuati nella fase di calibrazione (cfr. Equazioni 68 e 69, §3.6.2), sono state applicate al campione costituito dai tronchi omogenei in condizioni non base trattato in fase di validazione. Anche in tali condizioni l'analisi della carta di controllo statistico dei residui, calcolati per i feriti e per i morti, ha evidenziato l'assenza di valori anomali di questi ultimi. In riferimento alla Figura 4.25 e alla Tabella 4.26 risulta che il 95% dei residui calcolati per i feriti ricadono nella fascia di attenzione  $[-0,08 \pm 0,94]$ ; mentre il restante 5% ricade nella fascia di controllo  $[-0,08 \pm 1,41]$ .

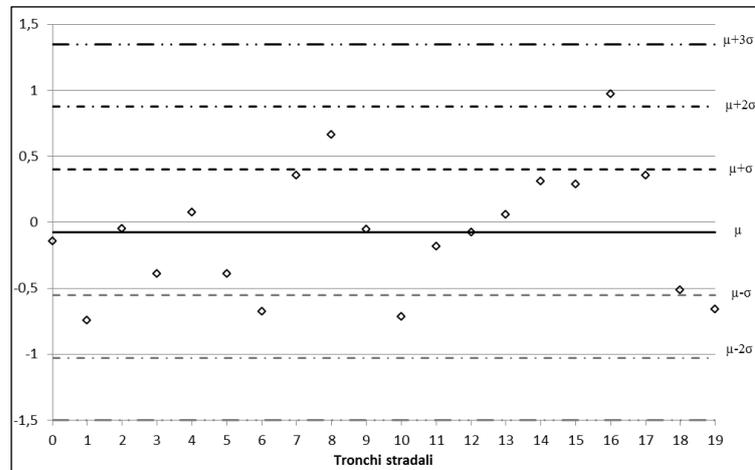


Figura 4.25-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

Tabella 4.26-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$	$\mu \pm 2\sigma$	$\mu \pm 3\sigma$	$> \mu \pm 3\sigma$
[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]	[feriti/anno]
14	5	1	0
70%	25%	5%	0%

Il criterio di Chauvenet è stato applicato a tutti i residui, in particolare è stato verificato che i valori compresi nella fascia di controllo non risultassero anomali. Dalla Tabella 4.27 emerge che nessuna misura deve essere scartata.

Tabella 4.27- Criterio di Chauvenet per il campione in altre condizioni

	$d/\sigma$	$1-\text{erf}(d/\sigma)$	$1/2N$
<b>Min</b>	0,001	0,028	
$\mu$	0,785	0,501	0,025
<b>Max</b>	2,199	0,999	

In riferimento alla Figura 4.26 e alla Tabella 4.28 risulta che i residui calcolati per i morti sono compresi nella fascia di attenzione  $[0,46 \pm 0,74]$ . Siccome non risultano dati compresi nella fascia di controllo non è stato applicato il criterio di Chauvenet.

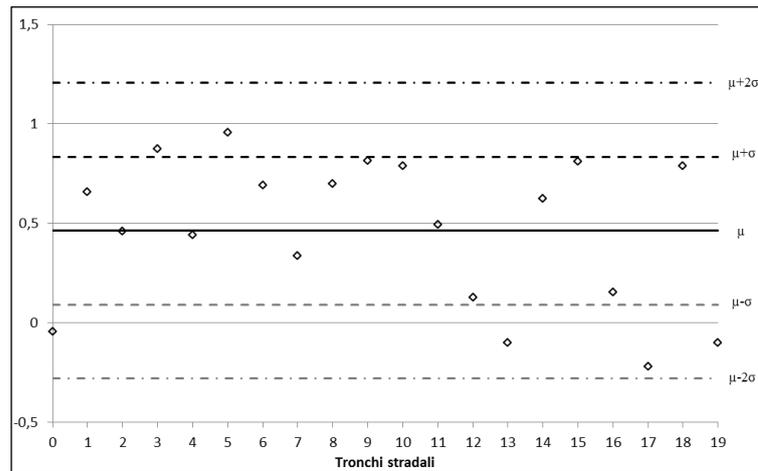


Figura 4.26-Carta di Controllo dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

Tabella 4.28-Sintesi dei residui per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

$\mu \pm \sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 2\sigma$ [feriti/anno]	$\mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]	$> \mu \pm 3\sigma$ [feriti/anno]
14	6	0	0
70%	30%	0%	0%

L'adeguatezza delle FPS è stata valutata mediante il metodo grafico del diagramma dei residui cumulati. Tale diagramma (cfr. Figure 4.27 e 4.28) evidenzia che le FPS calibrate interpretano adeguatamente il fenomeno investigato, non evidenziando elevati salti verticali.

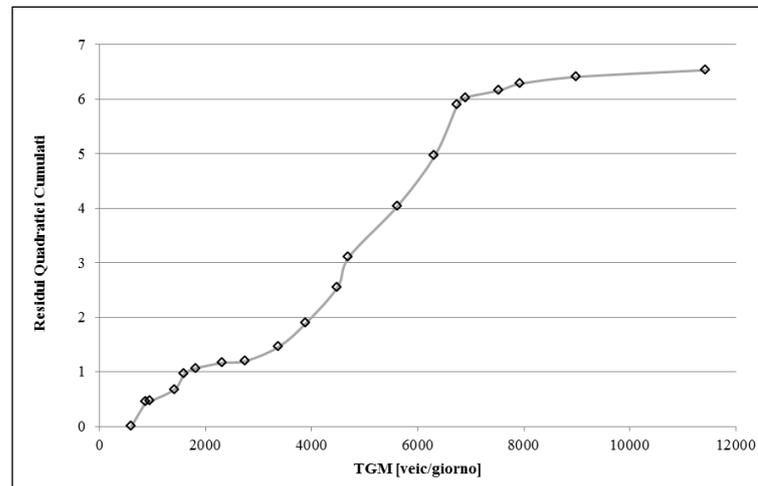


Figura 4.27-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei feriti in altre condizioni

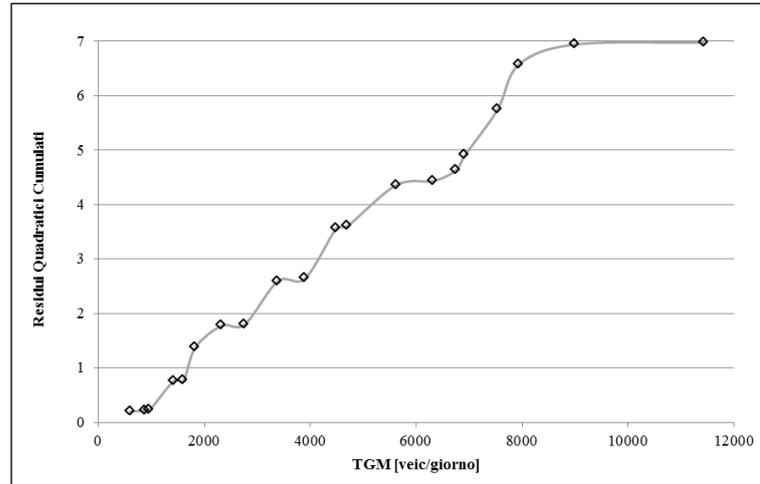


Figura 4.28-Diagramma dei Residui quadratici Cumulati per la previsione della frequenza dei morti in altre condizioni

In ultimo sono stati calcolati i tre indicatori statistici sintetici (cfr. Equazioni 79, 80 e 81); i risultati sono consegnati in Tabella 4.29.

Tabella 4.29-Indicatori statistici sintetici

	<i>Feriti</i>	<i>Morti</i>
<b>MAD</b>	0,50	0,50
<b>MSE</b>	0,33	0,35
<b>I</b>	0,24	0,20

Si può concludere che le FPS determinate sono statisticamente significative ed accurate, infatti i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata e gli stimatori statistici sintetici assumono valori non elevati, in particolare il parametro I è sempre inferiore all'unità.

## Capitolo 5 - Conclusioni e Sviluppi futuri

### 5.1 Conclusioni

L'analisi preventiva di sicurezza mira ad esaminare specificatamente gli aspetti legati alla sicurezza della circolazione delle strade in esercizio e potrebbe costituire, una volta introdotta in un approccio sistematico di verifica della sicurezza del patrimonio stradale esistente, la prima fase di un processo articolato in livelli di approfondimento successivi.

Negli ultimi anni, in Italia, si è sviluppata maggiore attenzione per l'analisi degli incidenti e per lo sviluppo di valutazioni in grado di orientare concretamente ed efficacemente la programmazione e la definizione degli interventi di messa in sicurezza.

I risultati della ricerca prodotti nel corso di Dottorato rappresentano un contributo in questo contesto, sono state, infatti, calibrate funzioni di prestazione della sicurezza stradale (FPS) per la previsione della frequenza media annua del numero dei feriti, dei morti e del totale degli incidentati su strade extraurbane a carreggiata unica e doppio senso di circolazione, che consentono di assegnare, ai diversi tratti omogenei della rete, un ordine di priorità che permetta di individuare i tratti in cui l'efficacia attesa dalla realizzazione degli interventi di adeguamento è potenzialmente maggiore.

Per reti stradali extraurbane l'Highway Safety Manual contiene un modello di previsione della frequenza media degli incidenti che non ne contempla la severità. Tuttavia nel manuale è presente un modello per la previsione della severità dei segmenti di strada urbana, il che avvalorava l'esigenza di trovare un modello per la previsione del numero dei feriti, dei morti e degli incidentati, a seguito di un incidente in ambito extraurbano, che, come noto dalle statistiche ISTAT, fornite in relazione agli ultimi 10 anni, presenta un'elevata concentrazione di incidenti con lesioni a persone. Nello stesso manuale si pone l'accento proprio su tale argomento, ossia sull'importanza di calibrare delle funzioni di prestazione che consentano sia di prevedere la frequenza al variare del tipo di dinamica, che la severità di incidente. La necessità di questa analisi è fortemente sentita in ambito scientifico come dimostrano alcune ricerche in atto da parte del National Cooperative Highway Research Program per competenza del Transportation Research Board [111], sostenute anche dall'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e dalla Federal Highway Administration (FHWA).

La rete di indagine è stata suddivisa in tronchi omogenei sui quali è stato rilevato almeno un ferito; i tronchi stradali sono omogenei rispetto al tasso medio di variazione della curvatura. I dati di incidentalità, acquisiti dai rapporti di incidente, stilati dagli organi competenti, fanno riferimento ad un periodo di osservazione di cinque anni (2006–10).

È stata verificata l'esistenza di specifiche condizioni geometriche per le quali è opportuno separare i tronchi sui quali sono stati registrati solo feriti da quelli sui quali sono stati registrati incidentati. Quindi sono state calibrate quattro distinte FPS; la prima per la previsione della frequenza media annua di feriti; ulteriori due per la previsione della frequenza media annua dei feriti e per la previsione della frequenza media annua dei morti; una quarta per la previsione della frequenza media annua degli incidentati; la frequenza media di feriti e di morti viene successivamente determinata mediante fattori di ponderazione in quota percentuale sul totale del numero di incidentati.

Nella tesi sono state definite le cosiddette condizioni geometriche di base, ovvero le caratteristiche geometriche dei tronchi stradali omogenei in corrispondenza dei quali si registrano valori minimi di frequenza feriti e incidentati; diversamente si parla di "altre condizioni geometriche". Individuate le condizioni base le FPS sono state calibrate nell'ipotesi di distribuzione binomiale negativa della frequenza e sono state corrette mediante fattori di modifica degli incidenti. Dall'esame delle condizioni base e dei dati associati a ciascun tronco stradale investigato, è emerso che i parametri per i quali è necessaria una correzione sono: la larghezza della corsia, il grado di scorrevolezza del tronco omogeneo e la pendenza longitudinale. Dai risultati ottenuti a seguito della validazione, si evince che le FPS determinate sono statisticamente significative, infatti sia in condizioni base che non i residui mostrano uno scarto modesto tra i valori di frequenza predetta ed osservata; dal diagramma dei residui quadratici cumulati non emergono evidenti salti verticali, perciò le FPS calibrate interpretano adeguatamente il fenomeno investigato ed i valori assunti dagli stimatori statistici sintetici ne dimostrano anche l'accuratezza.

Applicando, infine, il test di Kruskal-Wallis, è stato dimostrato che è possibile utilizzare un modello unico per la previsione della frequenza dei feriti e dei morti attraverso dei fattori di ponderazione su base percentuale, rispetto ai due modelli ad hoc.

In conclusione lo studio ha portato all'implementazione di una serie di modelli matematici che, oltre a risultare affidabili dal punto di vista delle stime offerte, mostrano un'adeguata robustezza in termini di struttura e di variabili considerate (tutte di facile determinazione), garantendo la loro applicabilità nella pratica.

I risultati dello studio teorico-sperimentale rappresentano un contributo utile nelle fasi di pianificazione e valutazione degli interventi di miglioramento della sicurezza stradale. I modelli sono poi un utile strumento di analisi, per stabilire priorità di intervento, sia nel caso del progetto di una nuova infrastruttura stradale che nel caso dell'adeguamento di una strada esistente; possono rivelarsi inoltre un valido strumento di supporto alle decisioni per confrontare i benefici ottenibili realizzando diverse ipotesi progettuali ed i costi di realizzazione necessari.

## 5.2 Sviluppi Futuri

### 5.2.1 Analisi preliminare della dinamica di incidente

Nell'ambito dello studio sperimentale condotto, è stata formulata una prima ipotesi di correlazione tra dinamica dell'incidente e geometria del tracciato, con successiva analisi introduttiva degli effetti scaturenti in termini di lesività.

Analizzando la variazione percentuale della distribuzione degli incidenti per dinamica al mutare della pendenza longitudinale, nell'ambito del campione sperimentale dei tronchi omogenei con solo feriti registrati nella fascia temporale di studio, è stato osservato come un aumento del valore percentuale della pendenza determini un incremento del numero di incidenti lesivi per scontro; viceversa al suo decrescere, si attesta un aumento del numero di incidenti lesivi per urto e tamponamento. (cfr. Figura 5.1).

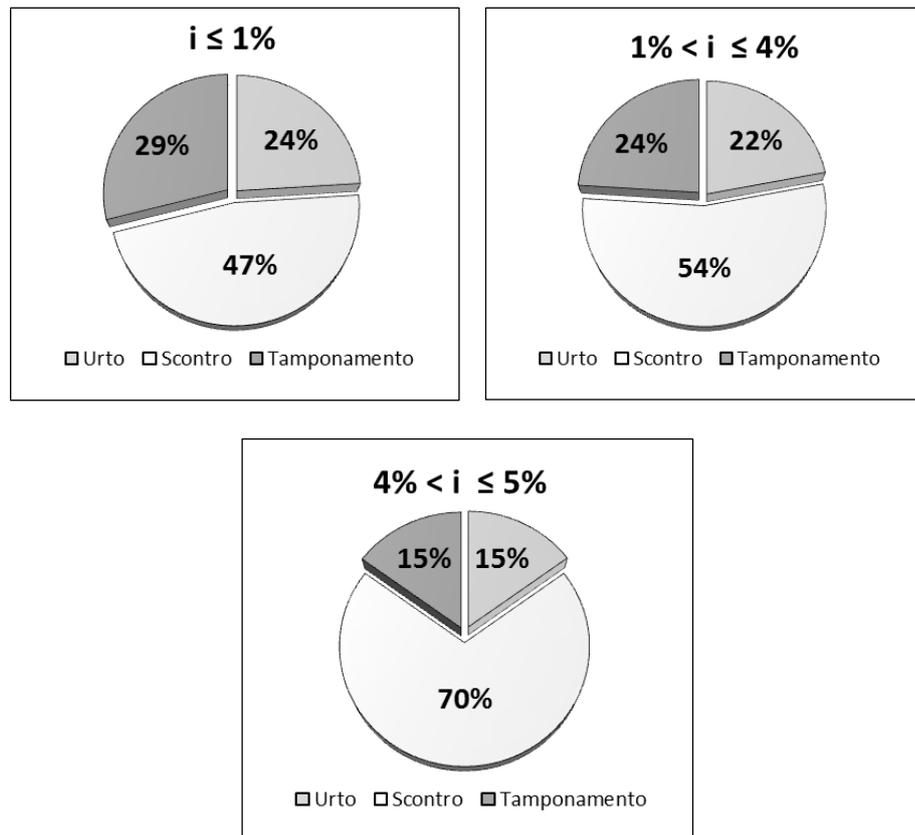


Figura 5.1-Ripartizione percentuale delle dinamiche di incidente per il campione con solo feriti al variare della pendenza longitudinale

L'incremento percentuale di incidenti lesivi per la dinamica "scontro" potrebbe essere associato ad un non coerente coordinamento plano-altimetrico del tracciato che incide negativamente sulle condizioni generali di visibilità e, conseguentemente, sulle condizioni di sicurezza durante la marcia; così come, potrebbe essere associato

ad un dimensionamento della piattaforma stradale non corrispondente ai requisiti minimi da Norma [26, 30].

Una riduzione percentuale del valore della pendenza longitudinale determina, contrariamente a quanto osservato in precedenza, un incremento del numero di incidenti lesivi per le dinamiche “urto” e “tamponamento”. Ciò può essere attribuito ad anomalie riscontrabili lungo il tracciato geometrico stradale che inducono l’utente ad un eccesso di velocità e, di conseguenza, ad arresti improvvisi ed inattesi, così come possono essere imposte a perdite di visibilità del tracciato o disturbi ottici provocati da elementi al margine della carreggiata [30].

Analogamente, l’analisi della distribuzione delle dinamiche, per il solo campione di tronchi omogenei con incidentati, al variare del parametro “grado di scorrevolezza del tracciato”  $G_s$  (cfr. Figura 5.2) ha evidenziato come un aumento della linearità del tracciato determina un incremento percentuale del numero di incidenti lesivi per urto e tamponamento da attribuirsi alle medesime ragioni per cui si registra un aumento di incidenti per urto e tamponamento al decrescere del valore della pendenza longitudinale; viceversa si attesta un aumento del numero di incidenti per scontro da attribuirsi alle stesse irregolarità geometriche del tracciato per cui si registra un aumento di incidenti per scontro al crescere del valore della pendenza longitudinale.

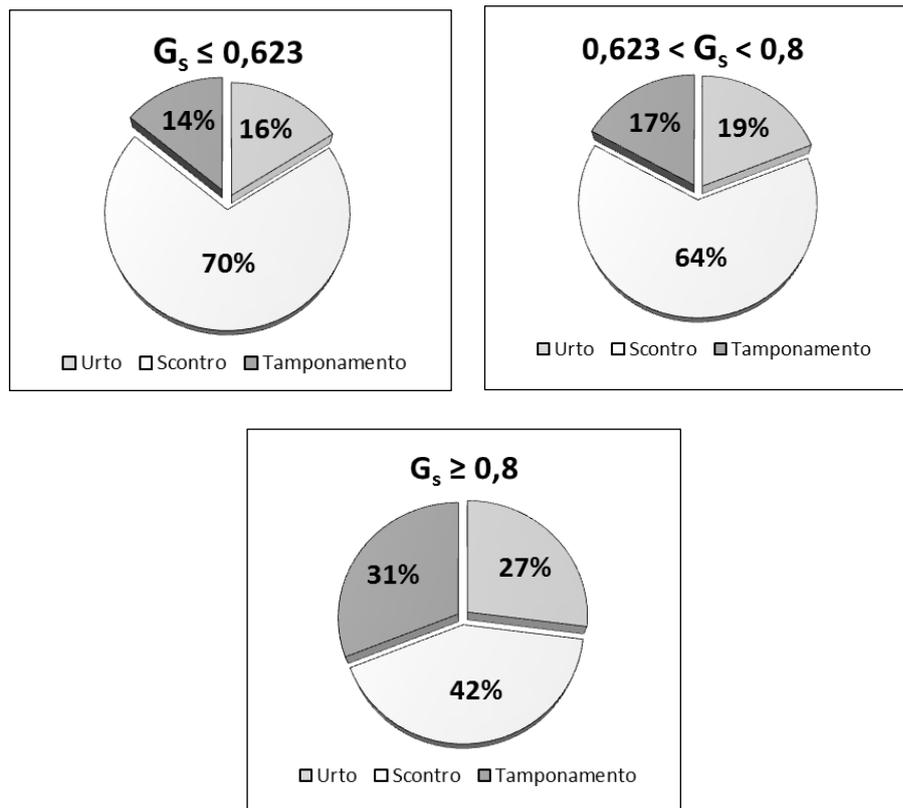


Figura 5.2-Ripartizione percentuale delle dinamiche di incidente per gli incidentati al variare del grado di scorrevolezza

Ulteriori osservazioni sono state formulate, come la fig.5.3 illustra schematicamente, sulle ripartizioni percentuali delle dinamiche con riferimento alla fase di calibrazione dei modelli per il solo campione dei tronchi omogenei con incidentati. Analoghe considerazioni al caso del campione con solo feriti possono essere fatte.

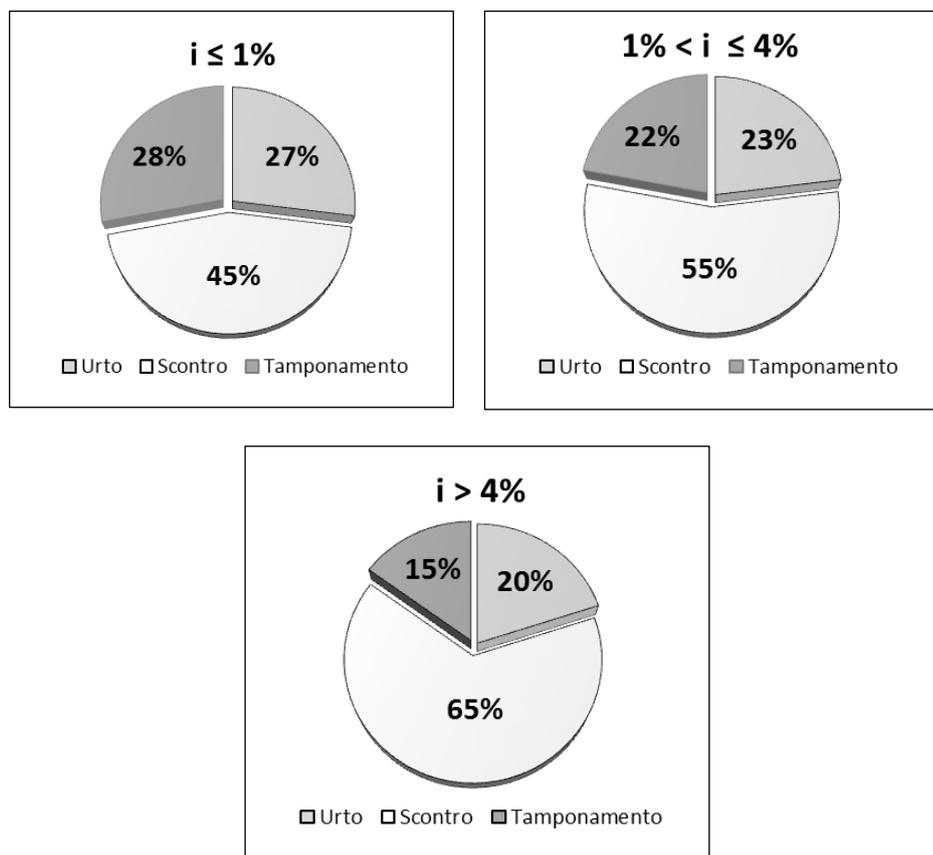


Figura 5.3- Ripartizione percentuale delle dinamiche di incidente per gli incidentati al variare della pendenza longitudinale

### 5.2.2 Geometria del tracciato

Ipotesi di intervento possono essere suggerite sulla base delle variabili indipendenti utilizzate nella fase di calibrazione dei modelli. L'effetto delle trasformazioni indotte dalle variazioni numeriche delle variabili studiate, consentono di quantificare il beneficio sulla rete di studio in termini di riduzione della frequenza media annua di feriti e morti. La stima di alcune variabili indipendenti, talvolta onerosa perché funzione di una scrupolosa e lunga campagna sperimentale, ha fornito i presupposti per la calibrazione di tali grandezze strettamente correlate a variabili geometriche di più immediato rilievo, sebbene non tanto raffinate come le prime. È stato studiato il legame tra il grado di scorrevolezza del tronco ( $G_s$ ) ed il tasso di variazione medio della curvatura ( $CCR_m$ ) la cui determinazione è ben più

faticosa. I due parametri risultano linearmente dipendenti; per migliorare la stima del legame individuato si è ricorso al metodo statistico Bootstrap.

Il Bootstrap è un metodo basato su una particolare forma di simulazione ottenuta campionando ripetutamente con rimessa da un unico insieme di dati sperimentali disponibili. Esso è utilizzato per studiare le proprietà di statistiche per le quali non sia possibile e/o conveniente impiegare metodi analitici, oppure per verificare le proprietà di metodi statistici noti ma applicati a dati con proprietà non ideali. Il ricampionamento non ricicla sempre la stessa informazione ma imita il reale processo di estrazione di campioni dall'intera popolazione. In tale maniera esso riesce a riprodurre una variabilità molto simile a quella vera e, soprattutto, esprime le specifiche condizioni sperimentali in cui si è osservato l'unico campione effettivamente disponibile. Pertanto uno studio basato sul bootstrap fornisce almeno un'idea delle proprietà statistiche della distribuzione di campionamento. Questo metodo è particolarmente utile nella ricerca sperimentale in cui, per esempio, studiando un coefficiente di determinazione ( $\rho^2$ ), è importante conoscere quanto elevato esso sia.

Il coefficiente di determinazione è una misura della bontà di adattamento ai dati sperimentali del modello statistico utilizzato; può attingere valori compresi nell'intervallo [0; 1].

Nel caso in esame 100 campioni sono stati estratti con rimessa dal campione sperimentale a disposizione. In Figura 5.4 sono rappresentate le rette di regressione (in grigio) relative ai primi 25 dei suddetti campioni, confrontate con la retta di regressione (in nero) relativa al campione di origine. La retta di regressione tratteggiata è quella che, rispetto a tutti i campioni estratti, presenta il più alto valore dell'indice di correlazione ( $\rho^2 = 0,90$ ).

Di seguito si consegnano le equazioni della retta rappresentativa del campione di origine (cfr. Equazione 80) e quella della retta con il più alto valore del coefficiente di determinazione (cfr. Equazione 81)

$$CCR_m = -930,43 * G_s + 940,15 \quad (80)$$

$$CCR_m = -118,190 * G_s + 1121 \quad (81)$$

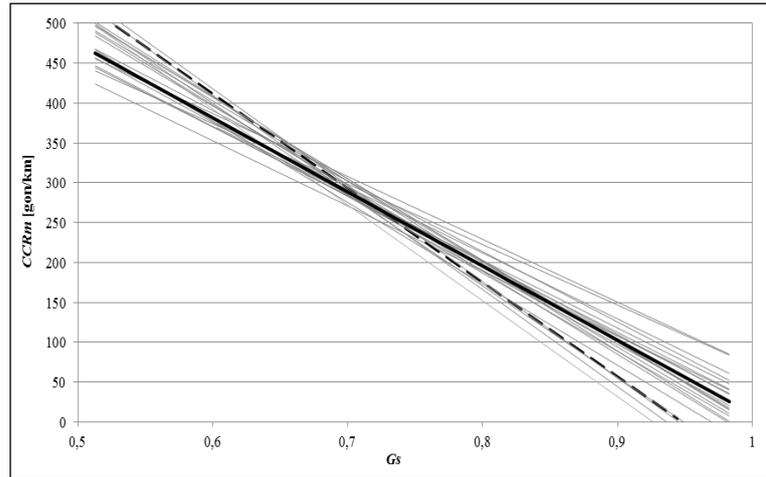


Figura 5.4-Risultati dell'applicazione del metodo Bootstrap

Il legame tra  $CCRm$  e  $G_s$  consentirà di realizzare interventi di modifica di un tracciato o parte di esso; infatti fissato il valore di  $G_s$  che consente di ottenere benefici in termini di riduzione del numero di feriti, morti o incidentati, con l'Equazione 81 si potrà ricavare il valore di  $CCRm$  corrispondente e quindi il relativo angolo di deviazione (cfr. §3.1) con cui suggerire nuove ipotesi di geometria del tracciato.

## Bibliografia

1. **Savolainen P. T., Mannering F. L., Lord D., Quddus M. A.** *The Statistical Analysis of Highway Crash-Injury Severities: A Review and Assessment of Methodological Alternatives*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 43, 2011, pp. 1666-1676.
2. **Elvik R., Høy A., Vaa T., Sørensen M.** *The Handbook of Road Safety Measures*. Oslo, Emerald, 2009.
3. **Zhang G., Yau K. K. W., Chena G.** *Risk factors associated with traffic violations and accident severity*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 59, 2013, pp 18-25.
4. **De Oña J., De Oña R., Eboli L., Forciniti C., Mazzulla G.** *How to identify the key factors that affect driver perception of accident risk. A comparison between Italian and Spanish driver behavior*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 73, 2014, pp 225-235.
5. **Campbell J., Richard C., Graham J.** *NCHRP Report 600A: Human Factors Guidelines for Road Systems*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2008.
6. **Campbell J., Richard C., Graham J.** *NCHRP Report 600C: Human Factors Guidelines for Road Systems*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2008.
7. **National Cooperative Highway Research Program.** *NCHRP Synthesis 432: Recent Roadway Geometric Design Research for Improved Safety and Operations. A Synthesis of Highway Practice*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2012.
8. **Weng J., Meng Q.** *Effects of environment, vehicle and driver characteristics on risky driving behavior at work zones*, in *Safety Science*, Vol. 50, 2012, pp 1034-1042.
9. **World Health Organization** *Global status report on road safety 2013: supporting a decade of action*. Ginevra, WHO, 2013.
10. **Bergel-Hayat R., Debarh M., Antoniou C., Yannis G.** *Explaining the road accident risk: Weather effects*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 60, 2013, pp. 456-465.
11. **Hossain M., Muromachi Y.** *Understanding crash mechanism on urban expressways using high-resolution traffic data*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol 57, 2013, pp. 17-29.
12. **Khan M., Abdel-Rahim A., Williams C. J.** *Potential crash reduction benefits of shoulder rumble strips in two-lane rural highways*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 75, 2015, pp. 35-42.
13. **Papadimitriou E., Yannis G.** *Needs and priorities of road safety stakeholders for evidence-based policy making*, in *Transport Policy*, Vol 35, 2014, pp. 286–294.
14. **Commissione delle Comunità Europee.** *Libro Bianco. La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte*. COM (2001) 307 definitivo, Bruxelles, 2001.

15. **Commissione delle Comunità Europee.** *Programma di azione europea. Dimezzare il numero di vittime della strada nell'Unione europea entro il 2010: una responsabilità condivisa.* COM (2003) 311 definitivo, Bruxelles, 2003.
16. **Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea.** *Direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.* Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, 19 novembre 2008.
17. **Organizzazione delle Nazioni Unite.** *Improving global road safety.* Delibera n. 64/255 del 2 Marzo 2010.
18. **World Health Organization** *World report on road traffic injury prevention.* Ginevra, 2004
19. **Commissione delle Comunità Europee.** *Europa 2020 – Una strategia per una crescita intelligente, sostenibile e inclusiva.* COM (2010) 2020, Bruxelles, 2010.
20. **Commissione delle Comunità Europee.** *Libro Bianco. Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile.* COM (2011) 144 definitivo, Bruxelles, 2011.
21. **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.** Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti. Anni 2012-2013.
22. **De Santi A, Zuccaro P, Filippini F, Minutillo A, Guerra R.** *La promozione della salute nelle scuole. Prevenzione degli incidenti stradali e domestici.* Roma: Istituto Superiore di Sanità; 2010. (Rapporti ISTISAN 10/3).
23. **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.** Piano Nazionale della Sicurezza Stradale, Azioni prioritarie – Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale. Marzo 2002.
24. **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti** PNSS – Orizzonte 2020. Roma, 2013.
25. **Bozza al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.** *Norme per interventi di adeguamento delle strade esistenti.* Commissione per la predisposizione di nuove norme per gli interventi di adeguamento delle strade esistenti, Italia, 21 Marzo 2006.
26. **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.** *Modifica del Decreto 5 novembre 2001, n. 6792, recante «Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade»,* (Gazzetta ufficiale n. 147 del 25/06/2004), Decreto del 22/04/2004.
27. **Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.** *Allegato al D.M. previsto dall'art. 8 del Decreto Legislativo n. 35 del 15 Marzo 2011* recante «Linee Guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali», (supplemento ordinario n°182 alla Gazzetta Ufficiale, n°209 del 7 Settembre 2012) Decreto del 2 Maggio 2012.
28. **La Torre F.** *L'analisi del fenomeno incidentale come base di partenza per il miglioramento della sicurezza delle strade esistenti,* in Bollettino Ingegneri, N.3, 2007.
29. **Esposito M, Mauro R.** *La progettazione funzionale delle strade.* Fondamenti di infrastrutture viarie, Vol. 2. Prima edizione. Hevelius Edizioni. 2003

30. **Consiglio Nazionale delle ricerche.** *Criteri per la classificazione della rete delle strade esistenti ai sensi dell'art.13, comma 4 e 5 del Nuovo Codice della Strada – Commissione di studio per le norme relative ai materiali stradali e progettazione, costruzione e manutenzione strade - D.P. CNR n.13465 del 11/09/95. Rapporto finale. Roma 13 marzo 1998.*
31. **Lord D., Mannering F.** *The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives*, in *Transportation Research Part A*, Vol. 44, 2010, pp 291-305.
32. **Lord D., Washington S. P., Ivan J. N.** *Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 37, 2005, pp. 35-46.
33. **Aguero-Valverde J.** *Full Bayes Poisson gamma, Poisson lognormal, and zero inflated random effects models: Comparing the precision of crash frequency estimates*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 50, 2013, pp. 289-297.
34. **Hauer E.** *Statistical Road Safety Modeling*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1897, 2004, pp 81-87.
35. **Poch M., Mannering F.** *Negative Binomial Analysis of Intersection-Accident Frequencies*, in *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 122 (2), 1996, pp. 105-113.
36. **Vellaisamy P., Upadhye N. S.** *On the negative binomial distribution and its generalizations*, in *Statistics and Probability Letters*, Vol. 77, 2007, pp. 173-180.
37. **Mohammadi M. A., Samaranayake V. A., Bham G. H.** *Crash frequency modeling using negative binomial models: An application of generalized estimating equation to longitudinal data*, in *Analytic Methods in Accident Research*, Vol. 2, 2014, pp. 52-69.
38. **Cameron A. C., Trivedi P. K.** *Regression analysis of count data*. Seconda edizione. Cambridge University Press. 2013.
39. **Lambert D.** *Zero-inflated Poisson regression, with an application to defects in manufacturing*, in *Technometrics*, Vol. 34, 1992, pp. 1-14.
40. **Long J. S., Freese J.** *Regression models for categorical dependent variables using Stata*. Third edition. A Stata press publication, College station, Texas. 2014.
41. **Liang K. Y., Zeger S. L.** *Longitudinal data analysis using generalized linear models*, in *Biometrika*, Vol. 73, 1986, pp. 13-22.
42. **Ballinger G. A.** *Using Generalized Estimating Equations for Longitudinal Data Analysis*, in *Organizational Research Methods*, Vol. 7 (2), 2004, pp. 127-150.
43. **Hauer E.** *Observational Before-After Studies in Road Safety*, Pergamon 1996.
44. **Hauer E., Harwood D. W., Council F. M., Griffith M. S.** *Estimating Safety by the Empirical Bayes Method: a tutorial*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1784, 2002, pp. 126–131.
45. **Elvik, R.** *The Predictive Validity of Empirical Bayes Estimates of Road Safety* , in *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 40 (6), 2008, pp. 1964–1969.

46. **Persaud, B., Lan, B., Lyon, C., Bhim, R.** *Comparison of Empirical Bayes and Full Bayes Approaches for Before–After Road Safety Evaluations*, in *Accident Analysis & Prevention*. Vol. 42 (1), 2010, pp. 38–43.
47. **Donnell E. T., Gross F., Stodart B. P., Opiela K., S.** *Appraisal of the Interactive Highway Safety Design Model's Crash Prediction and Design Consistency Modules: Case Studies from Pennsylvania*, in *Journal of Transportation Engineering of ASCE*. Vol 135 (2), 2009, pp. 62-73.
48. **Harwood D. W., Council F. M., Hauer E., Hughes W. E., Vogt A.** *Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two-Lane Highways*, Report No. FHWA-RD-99-207, Federal Highway Administration, 2000.
49. **Chen, Y., Persaud, B., Sacchi, E.** *Improving Transferability of Safety Performance Functions by Bayesian Model Averaging*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2280, 2012, pp. 162–172.
50. **Tabatabaee, N., Ziyadi, M.** *Bayesian Approach to Updating Markov-Based Models for Predicting Pavement Performance*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2366, 2013, pp. 34–42.
51. *Transportation Research Circular E 151 - Modeling Operating Speed: Synthesis Report*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2011.
52. **Polus, A., and C. Mattar-Habib.** *New Consistency Model for Rural Highways and Its Relationship to Safety*, in *Journal Of Transportation Engineering of ASCE*, No.3, 2004, pp.286–297.
53. **Russo F. , Mauro F., Dell'Acqua G.** *Rural highway design consistency evaluation model*, in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53, 2012, pp. 952–960.
54. **Morcillo L. G., Calvo Poyo F. J., Fernández M. P, de Oña J** *Measurement of Road Consistency on Two-Lane Rural Highways in Granada (Spain)*, in *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 162, 2014, pp. 237–242.
55. **Breen J.** *High-Level Group on Road Safety. Consultation on the development of the injuries strategy*. Secondo documento di lavoro. Novembre 2012.
56. **Aarts L., van Schagen I.** *Driving speed and the risk of road crashes: A review*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 38, 2006, pp. 215-224.
57. **Hauer E.** *Speed and Safety*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2103, 2009, pp. 10–17.
58. **Fuller R., McHugh C., Pender S.** *Task difficulty and risk in the determination of driver behaviour*, in *Revue européenne de psychologie appliquée*, Vol. 58, 2008, pp. 13–21.
59. **Tarko A. P.** *Modeling drivers' speed selection as a trade-off behavior*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 41, 2009, pp. 608-616.
60. **Žilionienė D., Vorobjovas V.** *Correspondence of Horizontal and Vertical Alignment with Safe Driving Conditions on Low-Volume Roads*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, 2011, pp. 49–56.

61. **Török A.** *Investigation of road environment effects on choice of urban and interurban driving speed*, in International Journal for Traffic and Transport Engineering, Vol. 1 (1), 2011, pp. 1-9.
62. **Quddus, M.** *Exploring the Relationship between Average Speed, Speed Variation and Accident Rates Using Spatial Statistical Models and GIS*, in Journal of Transportation Safety & Security, Vol. 5 (1), 2013, pp. 27-45.
63. **Dell'Acqua G., Russo F.** *Speed Factors on Low-Volume Roads for Horizontal Curves and Tangents*, in The Baltic journal of Road and Bridge Engineering, Vol. 5 (2), 2010, pp. 89-97.
64. **Fitzpatrick K., Miaou S. P., Brewer M., Carlson P., Wooldridge M. D.** *Exploration of the Relationships between Operating Speed and Roadway Features on Tangent Sections*, in Journal of Transportation Engineering, Vol. 131 (4), 2005, pp. 261-269.
65. **Abbas S. K. S., Adnan M. A., Endut I. R.** *Exploration of 85th Percentile Operating Speed Model on Horizontal Curve: A Case Study for Two-Lane Rural Highways*, in Procedia Social and Behavioral Sciences, Vol. 16, 2011, pp. 352–363.
66. **National Cooperative Highway Research Program** *Guidelines for Selection of Speed Reduction Treatments at High-Speed Intersections*. Report 613, 2008.
67. **Richard C., Campbell J. L., Brown J. L., Lichty M. G., Chrysler S. T., Atkins R.** *Investigating Speeding Behavior with Naturalistic Approaches. Methodological Lessons Learned*, in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2365, 2013, pp. 58–65.
68. **Department for Transport** *Traffic calming in villages on major roads*. Traffic Advisory Leaflet 1/00, UK, 2000.
69. **Ewing R.** *Traffic Calming: State of the Practice*. Report FHWA-RD-99-135, Federal Highway Administration and Institute of Transportation Engineers, Washington D.C., 1999.
70. **Dell'Acqua G.** *Reducing Traffic Injuries Resulting from Excess Speed - Low-Cost Gateway Treatments in Italy*, in , in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2203, 2011, pp. 94–99.
71. **Corkle J., Giese J. L., Marti M. M.** *Investigating the effectiveness of traffic calming strategies on driver behavior, traffic flow and speed*. Final Report MN/RC –2002-02, Minnesota Local Road Research Board and Minnesota Department of Transportation, 2001.
72. **Porter, R., J., Donnell, E., T., Mason, J., M.** *Geometric Design, Speed, and Safety*, in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2309, 2012, pp. 39–47.
73. Highway Safety Manual. AASHTO, Washington, D.C., 2010.
74. **Zegeer, C. V., Deen R. C., Mayes J. G.** *Effect of Lane and Shoulder Width on Accident Reduction on Rural, Two-Lane Roads*, in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 806, 1981.

75. **Venkataraman N. S., Ulfarsson G. F., Shankar V.N.** *Extending the Highway Safety Manual (HSM) framework for traffic safety performance evaluation*, in *Safety Science*, Vol. 64, 2014, pp. 146–154.
76. **Usami D. S., Saporito M.** *Road Safety*, News - Magazine di approfondimento sulla sicurezza stradale, Vol. 3, Aprile 2014.
77. **Martinelli F., La Torre F., Vada P.** *Calibration of the Highway Safety Manual's Accident Prediction Model for Italian Secondary Road Network*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2103, 2009, pp. 1–9.
78. **Xie F., Gladhill K., Dixon K. M., Monsere C.** *Calibrating the highway safety manual predictive models for Oregon state highways*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2241, 2011, pp. 19-28.
79. **Sun X., Magri D. H., Shirazi H., Gillella S., Li L.** *Application of the highway safety manual: Louisiana experience with rural multilane highways*, presentato al 91° Annual Meeting del Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
80. **Howard L., Steven S.** *Calibration of highway safety manual prediction method for rural Kansas highways*, presentato al 91° Annual Meeting del Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
81. **Banihashemi M.** *Highway safety manual, new model parameters vs. Calibration of crash prediction models*, presentato al 90° Annual Meeting del Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
82. **Banihashemi M.** *Sensitivity Analysis of Data Set Sizes for Highway Safety Manual Calibration Factors*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2279, 2012, pp. 75-81.
83. **Brimley B. K., Saito M., Schultz G. G.** *Calibration of Highway Safety Manual Safety Performance Function*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2279, 2012, pp. 82-89.
84. **Zegeer C. A., Sundstrom C. E., Hummer J., Rasdorf W. J., Findley D.** *Suggestions on how agencies should apply the highway safety manual to two-lane road curves*, presentato al 91° Annual Meeting del Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.
85. **Russo F., Busiello M., Biancardo S. A., Dell'Acqua G.** *Assessing Transferability of Highway Safety Manual Crash Prediction Models to Data from Italy*, in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2433, 2014, pp. 129-135.
86. **Savolainen P. T., Mannering F. L., Lord D., Quddus M. A.** *The Statistical Analysis of Highway Crash-Injury Severities: A Review and Assessment of Methodological Alternatives*, in *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 43, 2011, pp. 1666-1676.
87. **Pardillo Mayora J. M., Manzo R. B., Orive A. C.** *Refinement of Accident Prediction Models for Spanish National Network*, in *Transportation Research*

- Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1950, 2006, pp. 65-72.
88. **Oh J. T.** *Development of Severity Models for Vehicle Accident Injuries for Signalized Intersections in Rural Areas*, in KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 10, No. 3, 2006, pp. 219-225.
  89. **Eboli L., Mazzulla G.** *A structural equation model for road accident analysis*, Atti di convegno del 4° Congresso Internazionale SIIV “Advances in Transport Infrastructures and Stakeholders Expectations” – Palermo, 2008.
  90. **Venkataraman N., Ulfarsson G. F., Shankar V. N.** *Random parameter models of interstate crash frequencies by severity, number of vehicles involved, collision and location type*, in Accident Analysis and Prevention, Vol 59, 2013, pp. 309-318.
  91. **Kim D.** *Joint Estimation of Fatal and Injury Crash Models with Controlling for Contemporaneous Correlation between the Disturbance Terms*, in KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 15, No. 3, 2011, pp. 581-588.
  92. **Kashani A. T., Mohaymany A. S.** *Analysis of the traffic injury severity on two-lane, two-way rural roads based on classification tree models*, in Safety Science, Vol. 49, 2011, pp. 1314–1320.
  93. **Kunt M. M., Aghayan I., Noii N.** *Prediction for traffic accident severity: comparing the artificial neural network, genetic algorithm, combined genetic algorithm and pattern search methods*, in Transport, Vol. 26 (4), 2011, pp. 353-366.
  94. **Bauer K. M., Harwood D. W.** *Safety Effects of Horizontal Curve and Grade Combinations on Rural Two-Lane Roads*, in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2398, 2013, pp. 37-49.
  95. **Lu J., Haleem K. M., Alluri P., Gan A.** *Full versus Simple Safety Performance Functions. Comparison Based on Urban Four-Lane Freeway Interchange Influence Areas in Florida*, in Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2398, 2013, pp. 83-92.
  96. **Bundesministers für Verkehr**, Überprüfung der Relationstrassierung für Straßen der Kategoriengruppe A, FA 02. 153 R93E, Zwischenbericht, Darmstadt, 1995
  97. **Provincia di Salerno**, Piano Provinciale dei Trasporti della Provincia di Salerno, 2000.
  98. **Sodi Scientifica S.p.a.**, Divisione Traffico, Conta traffico KV Laser – Rilevatore statistico dei veicoli. [www.sodi.com](http://www.sodi.com)
  99. **Electronic Integrated Systems Inc.**, Remote Traffic Microwave Sensor – A Simple Solution to Traffic Counting. [www.rtms-by-eis.com](http://www.rtms-by-eis.com)
  100. **Vezzoli M.** *Alberi di classificazione e formazione degli strati nel campionamento stratificato*. Quaderni di ricerca. Università degli studi di Brescia - Dipartimento di Metodi Quantitativi., 2009, Fascicolo n. 320
  101. **Chang L.-Y., Wang H. W.** *Analysis of traffic injury severity: An application of non-parametric classification tree techniques*, in Accident Analysis and Prevention, Vol. 38, 2006, pp. 1019-1027.

- 102.**Erto P.** *Probabilità e statistica per le scienze e l'ingegneria*. Terza edizione. McGraw-Hill. 2008.
- 103.**Pulci Doria G.** *Metodologie moderne di misure idrauliche e idrodinamiche*. CUEN. 2008.
- 104.**Cannelli G.** *Metodologie sperimentali in fisica. Introduzione al metodo scientifico*. Terza edizione. Edises. 2012.
- 105.**Hinkley D. V.** *Modified profile likelihood in transformed linear models*, in *Applied Statistics*, Vol. 38, 1989, pp. 495-506.
- 106.**Sprent P.** *Applied nonparametric statistical methods*. Seconda edizione, Chapman & Hall, London, 1993.
- 107.**Kruskal W.H.** e **Wallis W. A.** *Use of ranks in one criterion variance analysis*, in *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 47, 1952, pp. 583–621.
- 108.**Kruskal W. A.** *A non parametric test for the several sample problem*, in *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 23, 1952, pp. 525-540.

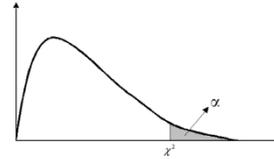
### Sitografia

- 109.<http://www.visionzeroinitiative.com/>
- 110.<http://www.erscharter.eu/it>
- 111.<http://apps.trb.org/cmsfeed/TRBNetProjectDisplay.asp?ProjectID=3420>

## APPENDICE

## Funzione di distribuzione Chi-Quadrato con $\nu$ gradi di libertà

$$\alpha = \int_x^{\infty} \frac{1}{2\Gamma(\nu/2)} \left(\frac{\kappa}{2}\right)^{(\nu/2)-1} e^{-\frac{\kappa}{2}} d\kappa = 1 - F_{\kappa}(x)$$



$\nu$	$\alpha$													
	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.75	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001
1	0.0000	0.0002	0.0010	0.0039	0.0158	0.102	0.455	1.323	2.706	3.841	5.024	6.635	7.879	10.827
2	0.0100	0.0201	0.0506	0.1026	0.211	0.575	1.386	2.773	4.605	5.991	7.378	9.210	10.597	13.815
3	0.0717	0.1148	0.2158	0.352	0.584	1.213	2.366	4.108	6.251	7.815	9.348	11.345	12.838	16.266
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	1.923	3.357	5.385	7.779	9.488	11.143	13.277	14.860	18.466
5	0.412	0.554	0.831	1.145	1.610	2.675	4.351	6.626	9.236	11.070	12.832	15.086	16.750	20.515
6	0.676	0.872	1.237	1.635	2.204	3.455	5.348	7.841	10.645	12.592	14.449	16.812	18.548	22.457
7	0.989	1.239	1.690	2.167	2.833	4.255	6.346	9.037	12.017	14.067	16.013	18.475	20.278	24.321
8	1.344	1.647	2.180	2.733	3.490	5.071	7.344	10.219	13.362	15.507	17.535	20.090	21.955	26.124
9	1.735	2.088	2.700	3.325	4.168	5.899	8.343	11.389	14.684	16.919	19.023	21.666	23.589	27.877
10	2.156	2.558	3.247	3.940	4.865	6.737	9.342	12.549	15.987	18.307	20.483	23.209	25.188	29.588
11	2.603	3.053	3.816	4.575	5.578	7.584	10.341	13.701	17.275	19.675	21.920	24.725	26.757	31.264
12	3.074	3.571	4.404	5.226	6.304	8.438	11.340	14.845	18.549	21.026	23.337	26.217	28.300	32.909
13	3.565	4.107	5.009	5.892	7.041	9.299	12.340	15.984	19.812	22.362	24.736	27.688	29.819	34.527
14	4.075	4.660	5.629	6.571	7.790	10.165	13.339	17.117	21.064	23.685	26.119	29.141	31.319	36.124
15	4.601	5.229	6.262	7.261	8.547	11.037	14.339	18.245	22.307	24.996	27.488	30.578	32.801	37.698
16	5.142	5.812	6.908	7.962	9.312	11.912	15.338	19.369	23.542	26.296	28.845	32.000	34.267	39.252
17	5.697	6.408	7.564	8.672	10.085	12.792	16.338	20.489	24.769	27.587	30.191	33.409	35.718	40.791
18	6.265	7.015	8.231	9.390	10.865	13.675	17.338	21.605	25.989	28.869	31.526	34.805	37.156	42.312
19	6.844	7.633	8.907	10.117	11.651	14.562	18.338	22.718	27.204	30.144	32.852	36.191	38.562	43.819
20	7.434	8.260	9.591	10.851	12.443	15.452	19.337	23.828	28.412	31.410	34.170	37.566	39.997	45.314
21	8.034	8.897	10.283	11.591	13.240	16.344	20.337	24.935	29.615	32.671	35.479	38.932	41.401	46.796
22	8.643	9.542	10.982	12.338	14.041	17.240	21.337	26.039	30.813	33.924	36.781	40.289	42.796	48.268
23	9.260	10.196	11.689	13.091	14.848	18.137	22.337	27.141	32.007	35.172	38.076	41.638	44.181	49.728
24	9.886	10.856	12.401	13.848	15.659	19.037	23.337	28.241	33.196	36.415	39.364	42.980	45.558	51.179
25	10.520	11.524	13.120	14.611	16.473	19.939	24.337	29.339	34.382	37.652	40.646	44.314	46.928	52.619
26	11.160	12.198	13.844	15.379	17.292	20.843	25.336	30.435	35.563	38.885	41.923	45.642	48.290	54.051
27	11.808	12.878	14.573	16.151	18.114	21.749	26.336	31.528	36.741	40.113	43.195	46.963	49.645	55.475
28	12.461	13.565	15.308	16.928	18.939	22.657	27.336	32.620	37.916	41.337	44.461	48.278	50.994	56.892
29	13.121	14.256	16.047	17.708	19.768	23.567	28.336	33.711	39.087	42.557	45.722	49.588	52.335	58.301
30	13.787	14.953	16.791	18.493	20.599	24.478	29.336	34.800	40.256	43.773	46.979	50.892	53.672	59.702
40	20.707	22.164	24.433	26.509	29.051	33.660	39.335	45.616	51.805	55.758	59.342	63.691	66.766	73.403
50	27.991	29.707	32.357	34.764	37.689	42.942	49.335	56.334	63.167	67.505	71.420	76.154	79.490	86.660
60	35.534	37.485	40.482	43.188	46.459	52.294	59.335	66.981	74.397	79.082	83.298	88.379	91.952	99.608
70	43.275	45.442	48.758	51.739	55.329	61.698	69.334	77.577	85.527	90.531	95.023	100.425	104.215	112.317
80	51.172	53.540	57.153	60.391	64.278	71.145	79.334	88.130	96.578	101.879	106.629	112.329	116.321	124.839
90	59.196	61.754	65.647	69.126	73.291	80.625	89.334	98.650	107.565	113.145	118.136	124.116	128.299	137.208
100	67.328	70.065	74.222	77.929	82.358	90.133	99.334	109.141	118.498	124.342	129.561	135.807	140.170	149.449

### Valori critici del test di Kruskal -Wallis

n <sub>i</sub> per campione			valori critici alle probabilità riportate				
n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	$\alpha = .10$	$\alpha = .05$	$\alpha = .01$	$\alpha = .005$	$\alpha = .001$
2	2	2	4,57				
3	2	2	4,50	4,71			
3	3	2	4,56	5,36			
3	3	3	4,63	5,60		7,20	
4	2	2	4,46	5,33			
4	3	2	4,51	5,45	6,45	7,00	
4	3	3	4,71	5,73	6,75	7,32	8,02
5	2	2	4,36	5,16	6,53		
5	3	2	4,65	5,25	6,82	7,18	
5	3	3	4,53	5,65	7,08	7,51	8,24
5	4	2	4,54	5,27	7,12	7,57	8,11
5	4	3	4,55	5,63	7,44	7,91	8,50
5	4	4	4,62	5,62	7,76	8,14	9,00
5	5	2	4,62	5,34	7,27	8,13	8,68
5	5	3	4,54	5,71	7,54	8,24	9,06
5	5	4	4,53	5,64	7,77	8,37	9,32
5	5	5	4,56	5,78	7,98	8,72	9,68
<b>N grande e k = 3</b>			<b>4,61</b>	<b>5,99</b>	<b>9,21</b>	<b>10,60</b>	<b>13,82</b>