Università degli studi ROMA TRE

Dottorato di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile
XX Ciclo

Tesi di Dottorato

Studio, proposta e validazione di metodologie atte a verificare la qualità del progetto stradale sotto il profilo della sicurezza

Dottorando: Ing. Luigivalerio Sant'Andrea

Docente guida: Prof. Carlo Benedetto

Coordinatore del dottorato: Prof. Leopoldo Franco

Roma, Febbraio 2008

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Scienze dell'Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 19

Sommario

L'obiettivo perseguito col presente studio è quello di rendere agevolmente fruibili i più avanzati metodi di previsione dell'incidentalità attesa. Metodi che, come noto, richiedono verifiche ripetitive in funzione dei diversi fattori che influenzano i rapporti di causa ed effetto da cui derivano gli eventi incidentali.

La dinamica di tali rapporti è suscettibile, infatti, di modifiche a seconda delle caratteristiche della strada e delle relative condizioni di funzionalità; varia in funzione dei carichi di traffico che le interessano, della loro variabilità nel tempo, nonché delle componenti tipologiche dei flussi che le attraversano, riferite sia alla tipologia dei vettori che le percorrono, che alla natura degli spostamenti; infine i rapporti di causa ed effetto che inducono gli eventi incidentali sono influenzati anche dall'ambiente climatico in cui si sviluppa la strada, ambiente che può favorire o meno la probabilità di una pavimentazione asciutta piuttosto che bagnata.

In sede di progettazione sarebbe opportuno verificare tra le alternative prese in considerazione, quella più idonea a garantire la minor probabilità di un accadimento incidentale. A tal fine si rende necessario calcolarne la probabilità per un numero di volte pari al prodotto numerico delle categorie in cui sono state classificate le variabili tipologiche sia di traffico che ambientali, relative a un determinato tracciato. Diventa quindi essenziale la disponibilità di un attendibile metodo che consenta di ripetere gli sviluppi di calcolo con la maggiore agevolezza possibile.

A tal fine, si è proceduto ad :

- Analizzare le procedure di previsione dell'incidentalità attesa, in base ai più recenti avanzamenti della ricerca scientifica;

- Verificare la criticità delle variabili in modo da valutare la praticabilità o meno delle approssimazioni di calcolo, per l'applicazione del metodo;

- Esplicitare i modelli basati sull'hazard analysis nei modi e nelle forme più operative per la gestione di un programma di calcolo automatico;

- Predisporre un software per il calcolo automatico verificandone la possibilità di una semplificazione attraverso le sperimentazioni di laboratorio virtuale così da aggregare alcuni processi che l'albero degli eventi analizza come elementi di dettaglio.

- Verificare e tarare il software in termini operativi.

La tesi di dottorato illustra le fasi del processo dando ragione delle attività effettuate e delle conclusioni cui si è pervenuti.

Dapprima si è proceduto ad una ricognizione storica di tutti i metodi elaborati nel corso di questo mezzo secolo in tema di analisi qualitativa dei tracciati stradali, al fine di comprendere le basi dell'evoluzione teorica, i profili di criticità dei diversi metodi, l'evoluzione dell'approccio scientifico fino alla individuazione di quel metodo alternativo ed innovativo, capace di prendere in considerazione tutti gli elementi significativi, al contorno e non, che incidono sulla valutazione qualitativa di un tracciato stradale.

Infatti la prima domanda che è sorta spontanea è stata: "quando possiamo dire che un progetto od una strada è sicura?" e la risposta altrettanto immediata è stata: "quando si verificano pochi incidenti", in rapporto al carico di traffico che vi grava.

Una delle fasi più importanti è stata quella dell'individuazione di un metodo per l'analisi dell'incidentalità di una strada, che fosse in grado di consentire l'individuazione delle tratte "omogenee" del tracciato, per metterne a confronto i rispettivi sinistri, selezionandoli in ragione delle sole condizioni di funzionalità della strada, senza considerare gli incidenti relativi a comportamenti non riconducibili all'utente mediamente prudente, ecc.

A valle dell'analisi dei dati incidentali si è posto il quesito di come analizzarli per poter dedurre le giuste considerazioni di tipo qualitativo.

La teoria che più ha soddisfatto l'interpretazione dei complessi fenomeni incidentali relativi al sistema Uomo-Veicolo-Strada è stata l'Hazard Analysis, un metodo mirato all'identificazione dei legami di causa/effetto tramite un processo di natura deduttiva, all'interno del quale è stato possibile pervenire ad una stima probabilistica valutando le probabilità di accadimento delle alternative intercettate dai percorsi critici.

Relativamente alla determinazione delle probabilità si è condotta un'ampia ricognizione dell'intero insieme delle variabili coinvolte nell'intero processo: dalle variabili direttamente correlate alle caratteristiche geometriche della strada, alle condizioni ambientali a quelle della viabilità, alle variabili correlate al comportamento dell'utente.

L'unico elemento di indeterminatezza legato alla teoria dell'Hazard Analysis quindi era relativo alla determinazione delle variabili dipendenti dal comportamento dell'utente.
Il problema è stato risolto con l'ausilio della sperimentazione in realtà virtuale, attraverso la quale è stato possibile non solo studiare il comportamento dell'utente in diverse condizioni di funzionalità della strada, ma anche calibrare le procedure interpretative di complessi processi previsionali quali ad esempio sono quelli che motivano il sorpasso in debito di sicurezza.

Questa fase dell'indagine ha messo in evidenza come sia possibile analizzare correttamente i rapporti di causa/effetto che regolano il fenomeno incidentale solo nell'ambito di una omogeneità di condizioni che devono essere garantite per interpretare opportunamente le anomalie statistiche risultanti dalle banche dati a disposizione.
Tale esigenza di omogeneità investe i caratteri fisici della strada, le condizioni ambientali e soprattutto le condizioni di servizio derivanti dall'entità e dalla composizione del carico di traffico. Inoltre, dopo aver accertato che il comportamento degli utenti dipende dalla variabilità di un soggettivo grado di sicurezza conseguente al rapporto che si determina tra offerta e aspettative di servizio, l'ulteriore omogeneità da garantire investe le motivazioni degli spostamenti, imponendo quantomeno la necessità di considerare separatamente la componente di domanda di lunga percorrenza, rispetto a quella motivata da esigenze di spostamento di breve raggio.

Per interpretare correttamente lo scenario incidentale adottando le tecniche dell'Hazard Analysis, s'impone necessariamente una reiterazione dei processi di analisi al fine di considerare la totalità dei sinistri imputabili alla strada come il risultato di una media ponderale estesa ad ogni condizione "omogenea" valutata nella sua durata temporale.

Pertanto, al fine di tarare e rendere operativo il modello teorico è stato quindi necessario elaborare un software che consentisse di reiterare il calcolo nelle diverse situazioni che, di volta in volta, devono essere considerate.

Nel caso specifico di questo studio si è approfondito il primo livello di interesse della manovra del sorpasso, relativo alla probabilità che questo venga effettuato in debito di sicurezza. Gli ulteriori sviluppi della ricerca potranno sviluppare i processi relativi alle altre tre cause prevalenti di incidentalità, come il tamponamento, l'urto con ostacoli e l'uscita di strada, per definire compiutamente un metodo in grado di fornire una valutazione complessiva di un tracciato sotto il profilo della qualità.

Indice

ELENCO DELLE FIGURE **6**
ELENCO DELLE TABELLE **8**

1. LE VERIFICHE PRESTAZIONALI **9**
1.1 LO STATO DELL'ARTE – GLI INDICATORI E LORO LIMITI 15
1.2 GLI OBIETTIVI DELLA RICERCA – PREVISIONE DELL'INCIDENTALITÀ ATTESA IN REALTÀ VIRTUALE 22
2. LA METODOLOGIA DELLO STUDIO **27**
2.1 L'ANALISI DEL FENOMENO INCIDENTALE FINALIZZATA AD INDIVIDUARE LA RESPONSABILITÀ DELLA STRADA E LE CAUSE CHE DETERMINANO GLI INCIDENTI 28
2.2 LA VERIFICA DELL'INCIDENTALITÀ ATTESA 32
4. GLI ALBERI DEGLI EVENTI **40**
4.1 L'ALBERO DEL TAMPONAMENTO 41
4.2 L'ALBERO DELLA MARCIA CON VELOCITÀ NON ADEGUATA ALLE CARATTERISTICHE LOCALI (USCITA DI STRADA) 43
4.3 L'ALBERO DEL CONFLITTO CON OSTACOLI 46
4.4 L'ALBERO DEL SORPASSO 47
5. I MODELLI INTERPRETATIVI **50**
5.1 ANALISI E SEMPLIFICAZIONE DELL'ALBERO DEL SORPASSO 51
5.2 L'ANALISI "QUANTITATIVA" DELLE PROBABILITÀ – LE TRE TIPOLOGIE 54
5.3 - P1 - PROBABILITÀ CHE SI DETERMINANO INTERFERENZE CON I VEICOLI LENTI 60
5.4 - P2 - PROBABILITÀ CHE LE INTERFERENZE NON SIANO TOLLERATE 66
5.5 - Q3 - PROBABILITÀ CHE LA VISUALE LIBERA SIA SUFFICIENTE A COMPIERE IL SORPASSO 73
5.6 - P4 – PROBABILITÀ CHE L'UTENTE COMPIA LA MANOVRA DI SORPASSO ANCHE CON VISUALE LIBERA INSUFFICIENTE 78
5.7 - Q5 - PROBABILITÀ CHE LA CORSIA OPPOSTA RISULTI OCCUPATA 82
5.8 - P6 - PROBABILITÀ CHE L'UTENTE, NONOSTANTE LA CORSIA "ILLEGALE" RISULTI OCCUPATA, ESEGUA LA MANOVRA DI SORPASSO 85
6. IL SOFTWARE **88**
6.1 IL RANGE DI VARIABILITÀ DELLE P 96
7. LA CALIBRAZIONE DEL PROCESSO COMPLETO **114**
8. L'APPLICAZIONE DEL SOFTWARE ALLA S.S. ROMEA **120**
9. CONCLUSIONI **131**

REFERENCES **133**

Elenco delle figure

Figura 1 - Confronto tra Quality of Service (QS) e Class of Stress (CS) riferito al tradizionale indicatore CCR 24
Figura 2 - Correlazione tra Incidentalità specifica dell A24 e SS148 e l'indicatore PD 25
Figura 3 - L'albero del tamponamento 41
Figura 4 - Modello teorico dell'albero del tamponamento 42
Figura 5 - Modello teorico dell'albero della marcia con velocità non adeguata alle caratteristiche locali 43
Figura 6 - L'albero relativo all'uscita di strada dei veicoli. 44
Figura 7 - L'Albero del conflitto con ostacoli 46
Figura 8 - L'albero del sorpasso 47
Figura 9 - Articolazione livelli probabilistici 48
Figura 10 - La P del sorpasso in debito di sicurezza in funzione di N/C 52
Figura 11 - Il primo livello probabilistico dell'albero del sorpasso 53
Figura 12 - Numero dei giorni di pioggia di una stazione meteorologica anno 2006 (Udine) 54
Figura 13 - Attribuzione del peso probabilistico ai tre livelli dell'albero del sorpasso 59
Figura 14 - la curva di deflusso 60
Figura 15 - distribuzione delle velocità dei veicoli del flusso 61
Figura 16 - ipotesi della legge di distribuzione delle v 61
Figura 17 - Legge di distribuzione delle v secondo Poisson 62
Figura 18 - Probabilità cumulata relativa alla P1 63
Figura 19 - Legge di distribuzione delle Frequenze della s.s. 156 Monti Lepini 64
Figura 20 - distribuzione della probabilità P1 rilevata sul campo 65
Figura 21 – distribuzioni della velocità di diverse componenti del flusso veicolare 68
Figura 22- legge della tolleranza dell'utente sottoposto ad interferenze veicolari 68
Figura 23 - relazione tra tolleranza, ritardo accumulato e tempo di percorrenza programmato 69
Figura 24 - Distribuzione delle velocità relative alla P2 71
Figura 25 - Modello teorico del sorpasso in velocità 73
Figura 26 - modello teorico del sorpasso in accelerazione 74
Figura 27 - Relazione tra Visuale libera e Velocità del veicolo 74
Figura 28 - Diagramma delle visuali libere 75

Figura 29 - Legge di distribuzione delle V relativo alla Q3 76
Figura 30 - Confronto tra Visuale disponibile e Visibilità necessaria ... 78
Figura 31 - Legge comportamentale degli utenti relativa alla P4 80
Figura 32 - Legge di distribuzione delle V relativa alla P4 80
Figura 33 - rappresentazione marcia fluida 83
Figura 34 - rappresentazione marcia a pacchetti 83
Figura 35 - distribuzione delle V secondo Q5 84
Figura 36 - riduzione del grado di rischio indotta dalla presenza di un veicolo sulla propria traiettoria 86
Figura 37 - Curve caratteristiche norme svizzere (USS) 89
Figura 38 - Censimento ANAS 89
Figura 39 - Software Form per inserimento dati e calcolo 95
Figura 40 - Software Form di calcolo per la P2 98
Figura 41 - Variazione della P2 in funzione del Delta di tolleranza e la V_{base} 99
Figura 42 - P2 in funzione di L (percorso in m) e N/C 100
Figura 43 - la P2 in funzione di N/C e %Dv per condizioni di Ritardo Basso ed Alto 102
Figura 45 - Software Form per il calcolo della Q3 103
Figura 46 - Andamento della Q3 in funzione di $D_{visuale\ libera}$ 104
Figura 47 - Software Form per il calcolo della P4 105
Figura 48 - Software Form per calcolo della Q5 109
Figura 49 - Software Form per il calcolo di P6 112
Figura 50 - Variabilità di P6 in funzione di N (numero di veicoli) 113
Figura 51 - Output sperimentazione in realtà virtuale dei sorpassi in debito di sicurezza 115
Figura 52 - Indicatore di sicurezza al variare di N/C 116
Figura 53 - Grado soggettivo di sicurezza per il sorpasso al variare di N/C 117
Figura 54 - Correlazione tra l'indicatore derivato dalla sperimentazione e le P dei modelli analitici 119
Figura 55 - Analisi incidentale relativamente alla S.S. 309 Romea 121
Figura 56 - curve di deflusso relative alle tratte scelte 123
Figura 57 - Tracciato di variante con sezione de IV tipo 126
Figura 58 - Confronto tra situazione attuale e scenario ipotizzato 130

Elenco delle tabelle

Tabella 1 - indicatori orizzontali di Design Consistency 18
Tabella 2 - Indicatori verticali principali di Design Consistency 20
Tabella 3 - Modelli dipendenti dalla riduzione della velocità tra due elementi geometrici 21
Tabella 4 - Le variabili riconducibili alla specificità della condizione viaria considerata 56
Tabella 6 - le vaiabili riconducibili alle caratteristiche tecniche della strada 57
Tabella 5 - Le variabili riconducibili al comportamento dell'utente 58
Tabella 7 - Variabilità della P2 in funzione di N/C e Dv 99
Tabella 8 - Andamento Probabilità Q3 in funzione di D $_{visuale\ libera}$ 105
Tabella 9 - Valori di P4 per Basse densità veicolari 106
Tabella 10 - Valori di P4 per Medie densità veicolari 106
Tabella 11 - Valori di P4 per Alte densità veicolari 107
Tabella 12 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato pianeggiante 109
Tabella 13 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato collinare 110
Tabella 14 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato montagnoso 111
Tabella 15 - Valori di P6 in funzione del numero di veicoli 113
Tabella 16 - Valori di Output di sperimentazione 116
Tabella 17 - output i sperimentazione 118
Tabella 18 - Output del Software relativamente alle sei probabilità per le cinque prove sperimentali 118
Tabella 19 - Distribuzione degli incidenti per stagione e tipologia di cause (anni 1991/92) 122
Tabella 20 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione attuale 128
Tabella 21 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione di progetto per il tracciato esistente 129
Tabella 22 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione di progetto per il tracciato di nuova realizzazione 129

1. Le verifiche prestazionali

La sicurezza stradale, al giorno d'oggi, è uno degli argomenti più discussi sia nelle nazioni in via di sviluppo che nelle nazioni industrializzate. I dati statistici sono impressionanti: se nel 1990 gli incidenti stradali erano classificati, tra le cause di decesso, intorno all'undicesimo posto, si prevede di raggiungere facilmente il terzo posto nel 2020, stimando ovunque un aumento percentuale del 67%. [1,2]

Negli Stati Uniti d'America, nell'anno solare 2001, si sono registrati 42.116 decessi e 3 milioni di feriti ed in Europa la Commissione dell'Unione Europea ha dichiarato, nel rapporto finale COM(2003) che: "ogni anno, più di 40.000 persone perdono la vita nell'Unione Europea (EUR-15) come effetto dell'incidentalità stradale e 1.700.000 rimangono gravemente feriti. Tali incidenti sono la prima causa di morte sotto i 45 anni, addirittura un numero maggiore delle morti causate dalle malattie infettive o dal cancro. Il costo totale che deve sostenere la società è stimato a più di 160 bilioni di euro ogni anno, corrispondenti al 2% dell'EU GNP *(gross national product)*". A fronte di un costo sociale, riconducibile alle vittime della strada, tanto elevato da corrispondere al 160% del budget annuale dell'Unione Europea [3], gli stati membri hanno adottato dei piani specifici con l'obiettivo di contrastare il trend crescente, in analogia alle iniziative adottate anche oltremare [i.e. 4,5,6,7,8].

La sensibilizzazione ai problemi della sicurezza stradale ha raggiunto un livello così elevato nei paesi dell'Unione da far sì che si prevedano interventi di un milione di euro per salvare anche solo una vita e sono state altresì individuate, ai fini della riduzione degli eventi incidentali, soluzioni di sicurezza passiva rivolte tanto alle case produttrici degli autoveicoli, quanto agli utenti della strada, quali l'obbligo di dotare gli autoveicoli di airbags, di ABS, di equipaggiamenti elettronici al servizio della guida ed anche le campagne per sensibilizzare la collettività degli utenti della strada ad indossare la cintura di sicurezza e la repressione del comportamento illegale degli utenti. [9-13]

Viceversa, il campo della sicurezza attiva non è stato sufficientemente investigato e le misure adottate sono state sporadiche e non coordinate, rispetto ad un programma compiuto di interventi.

Alcuni sforzi sono stati impiegati al fine di realizzare sistemi omogenei per la segnaletica stradale con il concetto della "self-explaining road". Tale concetto è stato assunto come principio base per classificare le infrastrutture cosiddette sicure ma, una corretta segnaletica stradale non è sufficiente ad ottenere una strada più sicura, la geometria, la sezione stradale e le condizioni di guida *(traffico,e condizioni ambientali etc.)* giocano infatti un ruolo almeno altrettanto importante nel processo della percezione e della comprensione dell'utente.

Questa la ragione per cui si assume che la previsione incidentale è da considerare come un indicatore che interviene sulla sicurezza. Una nuova direttiva europea [14] che è attualmente in fase di valutazione, propone l'impiego di provvedimenti di sicurezza attiva per tutte le infrastrutture in cui si evidenzia un alto livello di incidentalità; tale visione è da considerare come una sorta di approccio rivoluzionario sotto diversi punti di vista.

Si ricorda, infatti, che:

1. l'approccio tradizionale per la progettazione delle infrastrutture, è sempre stato orientato a raggiungere livelli di funzionalità ed efficienza;

2. i provvedimenti di sicurezza sono sempre stati finalizzati alla riduzione degli effetti;

3. la messa in sicurezza delle infrastrutture ha sempre preso a riferimento la teoria dei "punti neri" e delle anomalie locali, spesso non considerando l'analisi sistematica di tutta la geometria della strada;

E' dunque necessario elaborare nuove tecnologie e modelli avanzati per definire compiutamente "self-explaning" standards di sicurezza stradale.

Il numero di incidenti in valore assoluto è sempre stato considerato in ambito sia di sicurezza stradale che di sicurezza industriale, un indicatore di primaria importanza per la determinazione del livello di sicurezza di un sistema.

Nel contesto stradale però, non è corretto affermare che un'infrastruttura con un basso numero di incidenti non sia a rischio, poiché è necessario valutare il flusso di traffico che grava sulla stessa.

Un indicatore significativo di sicurezza che però non è mai stato considerato come tale è, il rapporto tra il numero di incidenti verificati ed il numero dei possibili eventi critici, con riferimento alla strada. Questo rapporto è chiamato frequenza incidentale o incidentalità specifica e si calcola con la seguente relazione:

$$RA = \frac{N_a}{\Phi_v \cdot L}$$

dove RA è la incidentalità specifica [numero di incidenti/numero di veicoli per ora per Km], N_a è il numero di incidenti [numero di eventi], Φ_v è il flusso di traffico [veicoli/ora] ed L è la lunghezza del tracciato stradale considerato [Km].

Le variabili che insistono sulla variazione del livello di sicurezza di una strada sono moltissime, e molto spesso non dipendono dalla strada stessa ma da condizionamenti esterni che possono, in alcuni casi, comportare delle condizioni di guida non in sicurezza.

Casi del genere sono frequenti, poiché molte strade possono risultare sicure in presenza di specifiche condizioni ambientali (stagione, condizioni meteo, visibilità, giorno, notte, umidità della pavimentazione, etc.) o con particolari condizioni di traffico (alto o basso flusso di traffico correlato alla capacità della strada, alta velocità, anomale distribuzioni di velocità) e non sicure in caso contrario.

Infatti una strada non è un sistema omogeneo in termini di elementi geometrici, condizioni di traffico e condizioni ambientali, in quanto la stessa strada può assumere condizioni di sicurezza e di insicurezza al variare di queste variabili. Ricerche avanzate condotte su tale argomento

hanno fatto emergere delle tecniche in grado di ridurre la variabilità degli indicatori, attraverso lo studio dell'analisi incidentale operato per tratte omogenee dello stesso tracciato.

Lo scopo dell'analisi incidentale è la ricerca della sicurezza stradale attraverso la previsione e la prevenzione di tutti gli eventi quali collisioni e potenziali condizioni di rischio. La previsione del livello incidentale è basata sull'analisi dei dati rilevati ed osservati, e questo approccio innovativo caratterizza la scienza moderna. Contrariamente l'approccio scientifico tradizionale ha sempre assunto a priori ipotesi di progetto, senza prendere in esame le analisi storiche.

C'è da dire che il tema della previsione dell'incidentalità non risale ai tempi moderni, ma è stato oggetto di interesse degli studiosi sin dal diciottesimo secolo. Le teorie elaborate nel corso degli anni sono state condizionate logicamente dalla natura degli incidenti, dalla cultura dei tempi e dal luogo in cui venivano elaborate. [15]

La prima teoria ed i primi modelli sono stati elaborati per l'analisi di peculiari eventi critici, pertanto l'approccio teorico ed il modo di interpretare il rispettivo fenomeno reale, la genesi, l'evoluzione ed il suo compimento, sono state pesantemente condizionate dal contesto oggettivo in cui venivano elaborate.

La prima applicazione di analisi di incidentalità, risale a più di 100 anni fa, quando si contarono numerosissime morti dei soldati Prussiani causate dai calci dei cavalli. Il ricercatore che studiò per primo questo problema, sotto il profilo della previsione e prevenzione dell'incidentalità, fu Bortkiewicz il quale pubblicò la teoria casuale nel 1898. [16]

In breve, egli propose l'approccio della casualità random. Secondo quanto previsto dal modello, il verificarsi di un evento dipende dalla sua probabilità ed il modello stocastico sinteticamente rappresentava la distribuzione delle probabilità previste.

Tale modello basato sulla teoria della casualità random, presupponeva implicitamente il concetto di uguaglianza tra le persone della comunità, rispetto all'esposizione alla morte. È incredibilmente interessante

considerare che la formulazione di tale teoria itervenne circa due anni prima della rivoluzione francese, a valle della quale il valore culturale di uguaglianza si diffuse in tutta l'Europa. Qualche decennio più tardi, è stato osservato che la probabilità di decesso non era la stessa per tutte le persone, ma fu osservato che in un gruppo che lavorava con materiali esplosivi, durante la prima guerra mondiale, le persone morivano con una frequenza maggiore. Fu evidente che le circostanze e le caratteristiche delle persone, influenzassero la probabilità degli eventi: fu così che la teoria del caso probabilistico applicato uniformemente alla popolazione, decadde.

Fu formulata una nuova teoria, in base alla quale si riteneva che alcune persone o persone in condizioni specifiche potessero essere esposte maggiormente agli eventi incidentali. La teoria dell'esposizione incidentale fu pubblicata sulla rivista "Journal of the Royal Statistical Society", da Greenwood & Yule, nel 1920. [17]

Anche in questo caso, è molto interessante osservare come l'evoluzione e la comprensione delle teoria è in stretta coerenza con la crescita culturale del tempo, infatti, non è un caso che durante lo stesso anno Sigmund Freud pose le basi della Psicoanalisi. Per la prima volta si parlava di personalità, individualità e differenze tra gli individui.

Dopo la Prima grande Guerra il settore dei trasporti ebbe una forte crescita grazie anche all'evento bellico, nel corso del quale i trasporti erano considerati un elemento di forte valenza strategica. In particolare i trasporti pubblici ebbero una grande crescita in tutto il mondo industrializzato e comportarono un notevole decremento del livello di incidentalità collettivo. Studiando questo fenomeno, nel 1939, Forbes propose la teoria del caso, pubblicata sul "Journal of General Psychology". [18]

Tale teoria variò il punto di vista del tempo proponendo aspetti innovativi, apprezzabili anche ai giorni nostri. Molto semplicemente assumeva che ogni incidente stradale avesse la propria causa. Tale causa è unica e specifica di quel incidente. Questa visione scientifica era influenzata dalle nuove e rivoluzionarie teorie microbiologiche del tempo con le quali si affermava che un particolare virus ed esclusivamente quello, era il diretto responsabile di una malattia specifica.

Più recentemente anche questa teoria decadde a ragione di vari motivi, complessivamente riconducibili ad un assunto: gli eventi incidentali sono frequentemente generati da una serie di cause che interagiscono tra loro; eventi incidentali similari sono spesso conseguenza di una serie di interazioni tra diverse altre cause. Sulla base di queste osservazioni venne formulata la teoria dei sistemi e nel 1963 Cresswell & Froggatt pubblicarono "The causation of bus driver accidents. An epidemiological study". [19]

Un rivoluzionario ed innovativo approccio fu finalmente proposto verso la fine degli anni '90. Sempre attraverso l'osservazione delle dinamiche della società e dei relativi cambiamenti, si arrivò a teorizzare che gli incidenti sono fortemente dipendenti dal comportamento dell'uomo.
Wilde pubblicò la sua rivoluzionaria teoria nel 1994. [20]

L'aumento della popolazione urbanizzata- si pensi che più del 60% della popolazione dell'Unione Europea vive in ambito urbano- il conseguente aumento del traffico nei centri cittadini, la commistione del traffico pubblico con quello privato, provocano un fenomeno di congestione cronica determinando maggiori situazioni di rischio, tanto che oggi un incidente mortale su tre si verifica in zona urbana, senza considerare gli ulteriori effetti nefasti relativi all'inquinamento acustico, atmosferico e non da ultimo al danno economico, considerato che ogni anno l'Unione europea perde circa 100 miliardi di euro, ossia l'1% PIL dell'UE, a causa di questo fenomeno.

Allo stesso tempo, la rapida evoluzione tecnologica mette a disposizione dei ricercatori nuovi mezzi investigativi ed inoltre talune tecnologie sono particolarmente versatili ed applicabili a diversi campi della ricerca. Nell'ambito delle nuove tecnologie, si è determinata una nuova corrente di pensiero che diversamente dal passato non si basa sui condizionamenti socio-culturali del tempo ma evolve rapidamente con il progresso tecnologico, confidando in questo.

1.1 Lo stato dell'arte – gli indicatori e loro limiti

All'inizio degli anni '80 l'ingegneria stradale passò da un approccio basato sull'analisi ed il dimensionamento dei singoli elementi geometrici (archi di curva, tangenti, pendenza, etc.), ad un approccio basato sull'analisi di coerenza dell'insieme degli elementi geometrici costituenti il tracciato stradale, più comunemente chiamata: "design consistency".

La visione del sistema strada nel suo complesso ha consentito e consentirà una progettazione più mirata al miglioramento del livello di sicurezza e di performance del tracciato stradale, dando grande importanza all'utente. Il concetto di questa nuova interpretazione è quello di progettare strade facilmente interpretabili dagli utenti, vale a dire "self explaining road".
In letteratura molti ricercatori hanno fornito dei contributi con definizioni complementari, di seguito si segnalano alcuni punti nodali:

- "La Design Consistency comporta che il progetto e la geometria della strada non devono in alcun modo violare le aspettative o le capacità dell'utente che guida una vettura o motociclo in condizioni di sicurezza" (J.C. Glennon and D.W. Harwood, 1978). [21]

- "Una inconsistenza del progetto può essere definita come: una soluzione geometrica o combinazione di geometrie adiacenti che trasmettono inaspettatamente un alto carico di lavoro mentale all'utente, comportando condizioni inaspettate e conseguentemente una guida non sicura" (C.J. Messer, 1980). [22]

- "Un tracciato Consistente è importante proprio per la relazione che esiste tra consistenza e sicurezza. Le inconsistenze che esistono su una strada comportano un cambiamento delle caratteristiche della strada, le quali possono prendere di sorpresa gli utenti e condurre ad alte velocità di percorrenza. Un tracciato consistente dovrebbe consentire al maggior numero di utenti di percorrere in sicurezza, alla velocità desiderata, l'intero

tracciato". (R. Lamm, E.M. Choueiri, B. Psarianos, and G. Soilemezoglou, 1995). [23]

Infatti, soluzioni geometriche del tracciato che violano le aspettative di guida degli utenti, determinano una inconsistenza di questo, circostanza che potrebbe comportare errori di guida in riferimento al tempo di reazione, alla velocità di avanzamento e condizioni generali di manovre da eseguire in mancanza di sicurezza con un alto livello di rischio di evento incidentale. [24]

In ricerca, si è scritto molto sull'argomento ed un riferimento bibliografico importante è la: "the transportation association of Canada's design guide states" [25] nel quale è quantificata la relazione tra misure di consistenza ed i benefici in termini di sicurezza attesa. L'approccio scientifico per definire la consistenza geometrica si basa sulla definizione dei parametri dipendenti primariamente dalle scelte del progettista come: la velocità operativa, la stabilità del veicolo, gli indicatori di tracciato, la realtà virtuale e, secondariamente, il carico di lavoro mentale dell'utente.

Gli indicatori di Rischio del tracciato

Gli indicatori del tracciato sono "misure quantitative" di caratteristiche geometriche di una porzione di tracciato stradale e sono funzione della dimensione degli elementi verticali ed orizzontali di questo. È importante sottolineare come tali indicatori sono stati verificati esclusivamente su strade di tipo extraurbano a due corsie, una per senso di marcia, con bassi volumi di traffico.

Il database più usato per testare la relazione tra qualità, sicurezza e collisioni degli indicatori di tracciato è fornita dalla FHWA Hightway Safety Information System (HSIS) realizzato per la manutenzione delle strade a due corsie, una per senso di marcia, dello stato di Washington, usando un criterio basato sull'analisi di 291 tracciati e sulla selezione per ognuna di queste di intervalli da un minimo di 6.4 Km ad un massimo di 32 Km di estensione, con limite di velocità pari a 88,5 km/h o più, senza considerare gli intervalli di tracciato non coerenti con l'analisi. L'analisi ha considerato esclusivamente gli incidenti stradali tra il 1993 ed il 1995 escludendo gli incidenti alle intersezioni ed individuando tre tipologie incidentali:

- Fuoriuscita del veicolo dalla sede stradale;
- Collisione tra più veicoli marcianti in senso opposto;
- Collisione tra più veicoli marcianti nello stesso verso;

inoltre sono stati eliminati dall'analisi tutti gli incidenti avvenuti nei parcheggi, per causa di animali sulla sede stradale, biciclette, motociclette. [26]

Gli Indici di tracciato Orizzontali dipendenti da caratteristiche geometriche

Gli indicatori di tracciato orizzontali dipendono principalmente dalla misura dei raggi planimetrici, dall'estensione delle tangenti e dagli angoli di deviazione tra le tangenti. Tali indicatori forniscono una misura della variazione della curvatura della strada ed aiutano a determinare la necessità di riduzione della velocità di un utente in prossimità di una curva orizzontale.

Nella tabella 1 sono riportati gli autori, l'anno e gli indici trovati in letteratura. È chiaramente evidente che molti di questi indicatori sono stati elaborati più di quaranta anni fa, tempo in cui i vincoli di progetto erano enormemente differenti da oggi, sarà quindi possibile individuare alcune incongruenze rispetto all'approccio moderno.

Gli indicatori basati sull'analisi dei valori dei raggi planimetrici forniscono delle indicazioni di quanto si discostano i raggi in esame rispetto alla media delle curvature del tracciato, mentre quelli basati sulle tangenti, valutano la velocità operativa dei veicoli sui rettifili.

Tabella 1 - indicatori orizzontali di Design Consistency

Name	Relation	Author	Year	Quality Assessment		Correlation to Safety		Correlation to Collision	
Averege Radius	$AR = \sum R_i / n$	Taragin	1954	NO	Homogenize different characteristics	YES	NO	NO	NO
Ratio of an individual Ri to AR	$R_p = \frac{R_i}{AR}$	Taragin	1954	NO	Homogenize different characteristics	NO	NO	NO	NO
Curvature Change Rate	$CCR = \sum \omega_i / \sum L_i$	McLean	1978	YES	No relation to percent of curvature	-	YES	-	Good approximation
Max/Min Radius	$RR = R_{max} / R_{min}$	Polus & Daglas	1980	YES	Just as preliminary assessment	YES	YES	NO	NO
Degree of curvature	$DC = \sum \left(1 / R_i\right) / \sum L_i$	Morral Talarico	1994	NO	No relation to turn's extension	NO	NO	NO	NO
Curvature Lenght	$CL = \sum L_{turn} / \sum L_i$	Krammers	1995	NO	No relation to turn's quantity	NO	NO	NO	NO
Average Tangent Lenght	$ATL = \sum L_{length_i} / n$	Masaeid	1995	YES	Just as preliminary assessment	YES	YES	NO	NO

Literature's outcome
Simulation's outcome

Il rapporto tra il raggio massimo ed il raggio minimo esprime: "la consistenza del progetto stradale in termini di uniformità dei raggi

planimetrici che dalle sperimentazioni condotte è correlata con la previsione del livello incidentale". [27]

Come indicazione preliminare tale rapporto fornisce una valutazione qualitativa del tracciato stradale: infatti, se il raggio massimo è estremamente diverso dagli altri raggi, tale curva potrebbe risultare "inconsistente". Al contrario, se i rapporti di ogni raggio con il raggio massimo dovessero essere simili, ciò significherebbe che c'è coerenza e consistenza tra i raggi del tracciato in esame.

Con gli indici basati sulle tangenti è possibile valutare la velocità desiderata, la quale è definita come: "la velocità con la quale ogni utente sceglie di percorrere il tracciato in condizioni di flusso libero e senza condizionamenti esterni". [28]

Per l'appunto se l'utente percorre la tangente ad alta velocità ed avesse necessità di una notevole riduzione di questa per imboccare la curva seguente, probabilmente non sarà in grado di raggiungere la velocità necessaria.

L'indicatore chiamato "Curvature Change Rate", ovvero il rapporto tra i delta di due curve consecutive, attualmente è accreditato come il migliore indicatore di Design Consistency ed ha una buona correlazione con gli eventi incidentali presi in considerazione nella sperimentazione, ma non esplicita il significato di "percentuale di curvatura", ovvero, è dimostrato che due tracciati con stessa estensione ma differenti numero di curve possono avere lo stesso valore di CCR.

Indicatori di tracciato verticali dipendenti da caratteristiche geometriche

Gli indicatori che fanno riferimento ai raccordi verticali dei tracciati stradali, valutano la quantità delle variazioni verticali lungo un tracciato, le quali, secondo i proponenti, hanno diretta corrispondenza con la velocità media di percorrenza, la distanza di visibilità per il sorpasso ed il numero di eventi incidentali.

In particolare viene riportata la tabella riassuntiva delle analisi elaborate per la verifica di ogni indicatore riguardo la valutazione della qualità, la

correlazione alla sicurezza e la correlazione agli eventi incidentali. Come è chiaramente riportato o in tabella nessuno degli indicatori ha correlazione tra l'incidentalità attesa e quella verificata.

Tabella 2 - Indicatori verticali principali di Design Consistency

Name	Relation	Author	Year	Quality Assessment		Correlation to Safety		Correlation to Collision	
Averege rate of vertical curvature	$AVRC = (\sum L_i/\lvert\Delta_i\rvert)/n$	Gibreel	2001	YES	Correlated towards road user's vertical acceleration	YES	YES	NO	NO
Vertical curvature change rate	$VCCR = \sum \Delta_i / \sum L_i$	Gibreel	2001	NO	No relation to change rate amount	NO	NO	NO	NO

Literature's outcome
Simulation's outcome

Gli indicatori di tracciato orizzontali dipendenti dalla velocità

Il confronto tra la riduzione di velocità su una curva planimetrica e la velocità tenuta dal veicolo sul rettifilo o curva precedente, ha una forte correlazione con l'incidentalità specifica.
Nella tabella 3 è riportato l'esempio dell'indicatore che pone a confronto la riduzione di velocità con elementi geometrici successivi ed incidentalità specifica. [29]
L'indicatore è formulato ipotizzando condizioni di flusso libero e massima velocità di percorrenza del tracciato in funzione delle seguenti ipotesi: condizione diurna, con buona visibilità pari a circa 150 m, condizioni di flusso libero, pavimentazione asciutta o bagnata, senza incroci, senza limiti di velocità e considerando la velocità all'85° percentile come velocità operativa.
La metodologia della "Designe Consistency", basata sul modello di riduzione di velocità, provvede a migliorare le potenzialità dei tracciati stradali sotto il profilo della sicurezza e della performance, ancora meglio dell'analisi delle singole curve dell'intervallo preso in esame.

Tabella 3 - Modelli dipendenti dalla riduzione della velocità tra due elementi geometrici

Name	Relation	Author	Year	Quality Assessment		Correlation to Safety		Correlation to Collision	
Averege rate of vertical curvature	$AVRC = (\sum L_i / \lvert \Delta i_i \rvert)/n$	Gibreel	2001	YES	Correlated towards road user's vertical acceleration	YES	YES	NO	NO
Vertical curvature change rate	$VCCR = \sum \Delta i_i / \sum L_i$	Gibreel	2001	NO	No relation to change rate amount	NO	NO	NO	NO

Literature's outcome
Simulation's outcome

Tab. 3 – Speed reduction between successive geometric elements and accident rate

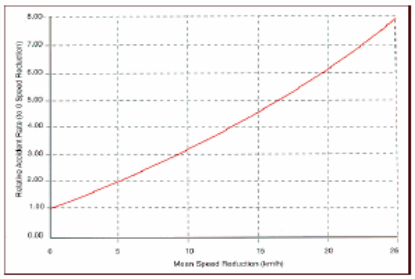
Name	Relation	Author	Year	Quality Assessment		Correlation to Safety		Correlation to Collision	
Speed reduction on horizontal curve	Table 1	Fitzpatick	2000	YES	Relation towards road's user behaviour	YES	YES	YES	Good approximation

Literature's outcome
Simulation's outcome

Table 1. Accident Rates at Horizontal Curves by Design Safety Level

Design Safety Level*	Number of Horizontal Curves	3-Yr Accident Frequency	Exposure (million veh-km)	Accident Rate (accidents/ million veh-km)
Good: $\Delta V_{85} \leq 10$km/h	4,518	1,483	3,206.06	0.46
Fair: 10km/h < $\Delta V_{85} \leq 20$km/h	622	217	150.46	1.44
Poor: $\Delta V_{85} > 20$km/h	147	47	17.08	2.76
Combined	5,287	1,747	3,373.57	0.52

* ΔV_{85} = Difference in 85th percentile speed between successive geometric elements (km/h)



A fronte di una ricognizione in letteratura si è constatato come l'ingegneria stradale, dagli anni '50 sino ad epoca recente, non abbia trovato una risposta soddisfacente per la verifica della qualità del progetto.

Il problema è riconducibile al tipo di approccio utilizzato per affrontare lo studio, basato sulle teorie della progettazione Ferroviaria, ha sollecitato l'approfondimento di indicatori teorici, correlati esclusivamente alle geometrie d'asse, che si sono dimostrati ben poco significativi ogni volta che si è cercato di correlarli allo scenario incidentale di una infrastruttura.

Diversamente è l'approccio di studio di indicatori estrapolati da sperimentazioni effettuate in realtà virtuale, su cui è stato possibile determinare consistenti correlazioni con scenari incidentali esistenti.

1.2 Gli obiettivi della ricerca – previsione dell'incidentalità attesa in realtà virtuale

Numerose applicazioni di ricerca hanno dimostrato le potenzialità dello strumento di simulazione di guida applicato alla valutazione della sicurezza di un'infrastruttura stradale. Di seguito si descriveranno alcune applicazioni elaborate con questo potente strumento.

Le applicazioni riguardano indagini teoriche in cui si è tarato l'impianto in funzione dei principali fondamenti dell'ingegneria stradale. Le applicazioni sono state focalizzate principalmente sul comportamento dell'utente, sulle leggi che regolano la teoria del traffico, sugli storici assunti della progettazione stradale.

Il secondo passo dello studio è focalizzato sulla validazione del progetto stradale, infatti con l'utilizzo della simulazione in realtà virtuale è stato possibile caricare diversi scenari di strade e percorrerle con programmati condizionamenti esterni. Tale procedura ha reso possibile evidenziare carenze progettuali che altrimenti con l'ausilio dei metodi tradizionali non sarebbero emerse, causa la mancata considerazione del comportamento dell'utente.

Il terzo passo dello studio si riferisce alla procedura di analisi e previsione degli interventi di sicurezza. La procedura si applica di consueto su infrastrutture esistenti, al fine di valutare il livello di sicurezza ed individuare i provvedimenti che devono essere presi per ridurre la probabilità dell'incidente e la relativa gravità.

Queste applicazioni sono state elaborate nel Laboratorio di Realtà Virtuale del CRISS, dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre. L'equipaggiamento consiste in un simulatore di guida interattivo (STI technology) basato su VDANL (Vehicle Dynamics Analysis Non Linear). Attualmente è configurato con n°5 schermi al plasma, per una visione prospettica ottimale, cambio automatico, volante con servo assistito ed impianto pedali, acceleratore e freno. L'impianto è installato nell'abitacolo di una vera e propria autovettura, al fine di trasmettere all'utente sensazioni quanto più reali possibile.

Indicatori per la validazione del progetto stradale

Come si è accennato nei paragrafi precedenti, l'approccio alla progettazione tradizionale è fondato su corrette assunzioni prese in particolari condizioni che, ove venissero a mancare determinerebbero delle incongruenze teoriche.

Tali incongruenze si manifestano perchè è possibile che la strada non sia costantemente "self-explaining" e l'utente potrebbe incorrere in comportamenti non adeguati alla situazione, con alte velocità di percorrenza, errori di traiettoria, accelerazioni improvvise, ecc.

A livello internazionale, le campagne informative volte all' incremento della sicurezza stradale sono focalizzate sul concetto della strada "self-explaining" e correntemente la più avanzata tecnologia che consente di valutare e validare il progetto è la simulazione di guida in ambiente virtuale.

Infatti, attraverso questo strumento è possibile valutare la sicurezza della strada, considerando contestualmente il comportamento dell'utente, differenti condizioni di traffico od ambientali. Con l'ausilio di questa tecnologia sono stati sviluppati e validati degli indicatori coerenti con il principio di strada "self-explaining".

Il principio di questo indicatore si basa sull'osservazione del comportamento dell'utente nel caso di inaspettate variazioni della velocità longitudinale ricondotte a condizioni non facilmente interpretabili della strada.

Si presenta quindi un indicatore che valuti il livello di qualità dell'infrastruttura chiamato "Qualità of Service" (QS) ovvero, l'integrale delle variazioni della velocità locale rispetto al valore medio della velocità, calcolato nell'intervallo omogeneo.

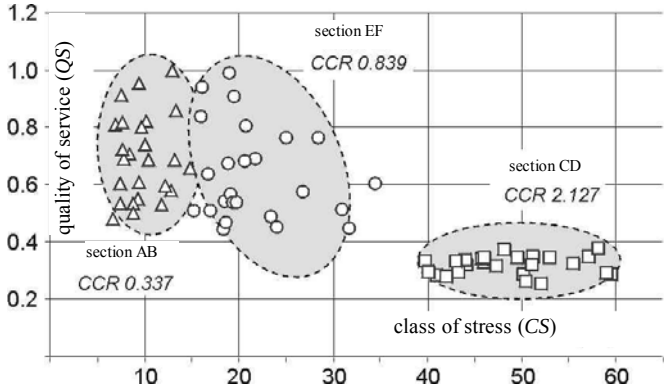


Figura 1 - Confronto tra Quality of Service (QS) e Class of Stress (CS) riferito al tradizionale indicatore CCR

Inoltre, viene proposto un secondo indicatore che valuta lo stress e la fatica dell'utente analizzando l'accelerazione trasversale a cui è sottoposto l'utente durante la guida. L'indicatore prende il nome di "Class of Stress" (CS) e corrisponde analiticamente all'integrale delle accelerazioni trasversali locali. [42]

Dalle sperimentazioni condotte i risultati hanno evidenziato una forte correlazione con gli indicatori tradizionali di letteratura basati sulla geometria in particolare con il CCR. Di seguito si riporta una tabella in cui si mettono a confronto i tre indicatori, due di sperimentazione "QS e CS" ed il "CCR" di letteratura.

La definizione a livello internazionale di Road Safety Audit (RSA) assume un significato ben preciso come l'esame formale di una strada o di un traffico di progetto, in cui degli esaminatori indipendenti assegnano un valore di potenziale performance e sicurezza. [43]

La domanda è presto formulata, con che mezzo gli esaminatori valutano questi parametri? E su quali approcci si basano? È certamente vero che si possono apprezzare delle migliorie conseguite da tale approccio ma è necessario valutare quanto siano positive e la loro durata nel tempo. In accordo con quanto detto da Kanellaidis (1999) [44] è necessario approfondire le potenzialità di studio del comportamento degli utenti come riportato nelle linee guida del RSA.

L'obiettivo prevalente è la validazione di nuovi indicatori dipendenti dal comportamento degli utenti che siano fortemente correlati all'incidentalità specifica.

Studi recenti hanno validato un indicatore di sicurezza basato sull'osservazione del comportamento degli utenti alla guida del veicolo, in ambiente di simulazione, l'indicatore prende il nome di "Pathologic Discomfort" (PD). [45]

Il prcesso di validazione dell'indicatore è stato condotto correlando i valori ottenuti con i valori dell'incidentalità specifica rilevata su l'autostrada A24 Roma-Teramo e sulla strada statale Pontina SS148 Roma-Terracina.

Le infrastrutture in esame sono tra le due infrastrutture viarie più importanti del centro italia, caratterizzate entrambe da un analogo traffico medio giornaliero ed un alto numero di incidenti.

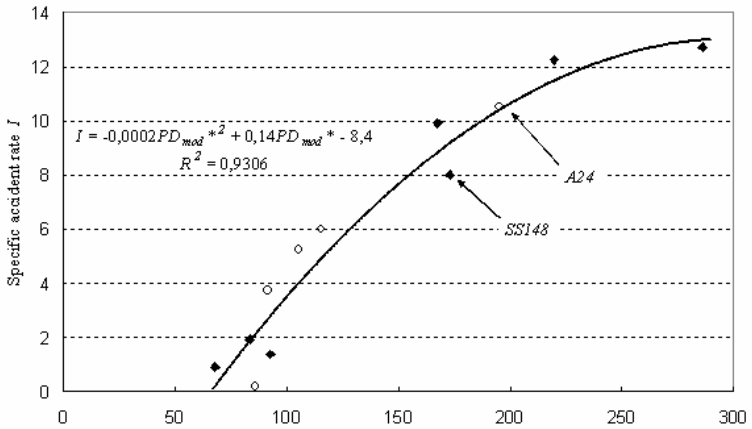


Figura 2 - Correlazione tra Incidentalità specifica dell A24 e SS148 e l'indicatore PD

L'A24 è classificata come strada di tipo A (autostrada) con una velocità operativa pari a 130 Km/h, mentre la SS148 è classificata come strada di tipo B (strada extraurbana) con velocità operativa pari a 100 Km/h e limiti di velocità intorno ai 90 Km/h. L'indagine incidentale utilizzata copre un arco temporale di cinque anni dal 1998 al 2002 nel corso dei quali gli incidenti sono stati registrati per Km di strada.

Un passaggio importante è stato quello di individuare quali fossero gli incidenti imputabili alla strada, trascurando tutti gli altri incidenti occasionali, riconducibili ad interpretazioni errate del tracciato stradale o da imprudenza del utente.

Il Pathological Disconfort corrisponde all'integrale locale delle accelerazioni trasversali assunte dall'utente per correggere la propria traiettoria. Ad un alto valore dell'indicatore corrisponde una consistente correzione della traiettoria dell'utente. In figura 5 sono riportati i risultati della correlazione tra l'indicatore PD e l'incidentalità specifica rilevata sulle infrastrutture esaminate. Si può osservare come l'indicatore in oggetto riesca ad interpretare in maniera ottimale l'andamento dell'incidentalità specifica delle due infrastrutture prese in esame.

2. La metodologia dello studio

Dallo studio del fenomeno incidentale che si è configurato in questi ultimi anni sul sistema viario italiano, emerge che l'attribuzione della ripetitività degli eventi, la loro localizzazione e tipologia, è riconducibile alla strada ed alle sue condizione di fruizione.

Il problema da affrontare è particolarmente complesso e si può riassumere schematicamente secondo l'ideogramma in figura.

Per gestire progettualmente un reale controllo dei livelli di rischio è oggi necessario considerare la strada come una delle componenti di un più complesso sistema "uomo/veicolo/strada", caratterizzato da molteplici variabili che si condizionano reciprocamente.

Un esempio è riconducibile allo sviluppo delle tecnologie meccaniche che hanno consentito alle grandi aziende di produrre veicoli con sempre più alte prestazioni anche a favore della sicurezza dell'utente. Nel contempo però ha prodotto autovetture capaci di prestazioni che inducono nel conducente un senso di sicurezza che è spesso incompatibile con le caratteristiche tecniche e funzionali del sistema stradale italiano.
L'elemento cardine di questo sistema è proprio il comportamento "dell'utente mediamente prudente" a cui si dovrà far riferimento per una progettazione "intrinsecamente sicura" della strada.

A tale scopo, un valido contributo è offerto dalle nuove tecniche sperimentali di simulazione in realtà virtuale, che consentono di verificare le relazioni che intercorrono tra la geometria della strada, le sue condizioni di fruizione ed i comportamenti indotti negli utenti.

2.1 L'analisi del fenomeno incidentale finalizzata ad individuare la responsabilità della strada e le cause che determinano gli incidenti

L'esercizio della mobilità su strada è regolato da molti fattori, che possono essere riconducibili a tre categorie principali:

- La meccanica della locomozione, nell'ambito della quale vanno considerate le prestazioni ed i condizionamenti che ne regolano, la cinematica, gli equilibri statici e dinamici in relazione alle condizioni di fruizione della strada;

- Le condizioni ambientali, tra cui rientrano numerosi fattori (gli eventi climatici, l'entità e la composizione del traffico, le interferenze interne ed esterne alla strada) la cui incidenza, oltre ad essere fortemente variabile in funzione delle circostanze, influenza in modo determinante il comportamento di guida;

- Il comportamento di guida, regolato dalla fisiologia degli utenti, dal loro stato emotivo, dal loro "affaticamento" e dai parametri psicofisiologici che influenzano i meccanismi automatici della conduzione del veicolo.

Nell'ambito della moderna progettazione stradale, l'analisi e l'approfondimento dei fenomeni derivanti dalle interazioni tra queste tre componenti, in diverse condizioni di fruizione, assume un'importanza primaria, per una progettazione a favore della sicurezza.

Per interpretare tali fenomeni è necessario porre in relazione gli eventi incidentali con le attuali condizioni di circolazione e verificare se, quanto ed in che modo i carichi di traffico, la composizione del parco veicolare ed i comportamenti indotti dalla strada influenzano il fenomeno incidentale, inoltre è necessario adattare le scelte progettuali alle esigenze degli utenti, tenendo conto del contributo dato dalla psicologia, oltre che dalle regole note dell'ingegneria civile.

Dall'analisi incidentale emergono le tre cause principali dei sinistri: l'imperizia, imprudenza o stati patologici del conducente; anomalie strutturali dell'infrastruttura che inducono insidia ed infine, anomalie funzionali che inducono possibili comportamenti a rischio.

L'effetto della prima è del tutto causale, mentre le altre due comportano la manifestazione di una anomalia statistica riconoscibile per la concentrazione spaziale, temporale e tipologica degli eventi incidentali.
Ne consegue che il processo d'indagine deve essere articolato in una successione di passi obbligati che prevedono nell'ordine:

- L'individuazione dei sinistri che, per la loro ripetitività nelle stesse tratte chilometriche, hanno elevata probabilità di doversi imputare alla strada;

- L'accertamento sul campo, con specifico riferimento ai chilometri incriminati, per verificare se gli incidenti imputabili alla strada siano motivati da anomalie locali di carattere strutturale;

- L'individuazione, per esclusione, dei sinistri imputabili alla strada che, non potendosi ricondurre ad anomalie strutturali, sono da ritenere che siano causati da anomalie funzionali.

Le anomalie vengono considerate tali, se e solo se, si manifestano analizzando scenari incidentali in situazioni omogenee. I caratteri di omogeneità che ci interessano sono quelli che influenzano direttamente o indirettamente la probabilità che si determini un evento incidentale.

Nell'ordine è quindi necessario tener conto delle condizioni climatiche prevalenti, delle geometrie d'asse e di piattaforma, nonché delle condizioni funzionali che hanno effetto diretto o indiretto sul comportamento degli utenti.

Queste ultime, in particolare, sono quelle di più difficile determinazione in quanto, oltre a variare sensibilmente in funzione della variabilità dei traffici, ci impongono di prendere in considerazioni variabili "non tradizionali" dell'ingegneria stradale, quali sono ad esempio quelle che regolano le motivazioni degli spostamenti.

Per individuare le cause dei sinistri è necessario, come primo passo, selezionare le tratte omogenee, tenendo conto delle diverse componenti del flusso veicolare come utenza che utilizza la strada per lunghe percorrenze o brevi spostamenti, considerando separatamente il comportamento delle due utenze. I caratteri climatici che caratterizzano gli itinerari soggetti a forte variabilità dei traffici nel periodo estivo ed invernale e per itinerari che si sviluppano in versanti con diversa esposizione che possono essere interessati da eventi climatici di diverso tipo ed entità.

Le geometrie d'asse e di piattaforma caratteristiche della tratta considerata, devono mantenersi costanti affinché possa essere selezionata come tratta omogenea. Nel caso specifico è sufficiente individuare l'orografia dei luoghi distinguendo tra le tratte pianeggianti, collinari o montagnose.

I carichi di traffico sono fondamentali, poiché il tasso incidentale di una strada è misurato dal rapporto tra i sinistri che si registrano in un prefissato arco temporale ed il numero dei veicoli transitati nello stesso periodo, inoltre a parità di altre condizioni sono essi a determinare la variabilità di quella soglia di rischio che è strettamente correlata al disagio indotto dalle interferenze veicolari.

Altro elemento non trascurabile è l'entità e la composizione dei flussi veicolari, poiché sono proprio le interferenze veicolari a rappresentare la variabile primaria che influenza il tasso incidentale di un infrastruttura.
La variazione temporale dei traffici, con l'individuazione dei carichi di punta, è fondamentale per un'attenta analisi dello scenario incidentale.

Inoltre particolare rilevo assumono le aspettative di servizio dell'utente che in funzione della loro variazione lungo l'itinerario caratterizzano l'omogeneità di questo. In particolare, misure effettuate sul campo dimostrano, quanto maggiore è la differenza tra le aspettative di servizio e la qualità dell'offerta, tanto più frequenti sono le manovre effettuate in debito di sicurezza.

In termini generali si può affermare che lo scenario incidentale è stabile quando, analizzando il fenomeno per due o più annualità consecutive, si constata una variazione limitata del numero totale di incidenti attestata

intorno al $\pm 20\%$, ed una variazione di qualche punto percentuale per tipologia di eventi, preliminarmente aggregati secondo le quattro manovre elementari riferite alla classificazione ISTAT:

- Sorpasso, che determina lo scontro frontale e frontale laterale;
- La marcia con distanza in debito di sicurezza, responsabile dei tamponamenti e dell'urto con veicolo in frenata;
- Accesso dalle immissioni, che possono determinare lo scontro laterale;
- Transito a velocità incompatibili con la geometria d'asse, responsabili dell'uscita di strada;

Come si è visto l'analisi incidentale consente di risalire alle cause dell'evento, che al contrario delle affermazioni consolidate dai media, sono riconducibili in minima parte all'imprudenza ed all'imperizia degli utenti, mentre dipendono fortemente dalle anomalie dell'infrastruttura e dalla qualità del servizio offerto dalla strada.

2.2 La verifica dell'incidentalità attesa

Metodi innovativi – Le reti Neurali

Nella metà degli anni ottanta venne elaborato un calcolo che consentiva l'elaborazione dell'informazione come risposta alternativa ad un ambiente informativo, quello creato dal problema da risolvere, senza peraltro codificare a priori alcuna regola di analisi inerente il problema stesso. Tale metodo prese il nome di "Calcolo Neurale".

Infatti esso trae sostanziale spunto ed ispirazione dal modo di funzionare del cervello umano che, senza istruzioni esplicite, interpreta informazioni imprecise fornite dai sensi, "imparando" a creare rappresentazioni interne dei fenomeni che condizionano l'ambiente al suo contorno.
La particolarità del metodo è quella di apprendere ed interpretare relazioni input/output anche particolarmente complesse.

La rete si presenta come una funzione che interpreta rapporti di causa/effetto associando ad un ingresso x (sistema di input) un'uscita y (sistema di output), coerente con la legge sperimentale del fenomeno analizzato.

Pertanto, una volta che essa sia stata opportunamente configurata e collaudata, per il fruitore può essere utilizzata come un simulatore del fenomeno appreso sulla base di una preventiva fase di istruzione.
Tale funzionamento è del tutto identico a quello proprio dell'intelligenza biologica che apprende anch'essa le relazioni di causa/effetto in base all'esperienza.

Ma c'è da considerare che le reti neurali esplicano le loro potenzialità solo quando si realizzano tre condizioni fondamentali che riguardano la corretta definizione dell'apprendimento e l'esaustività dell'informazione.

In particolare è necessario che:

- sia correttamente definito il sistema degli input e degli output da mettere in relazione tra loro (la rete interpreta, non inventa);

- l'architettura di rete sia idonea a gestire la complessità del fenomeno indagato (le capacità intellettive devono essere adeguate ai termini del problema);

- la fase di apprendimento utilizzi una banca dati di dimensione proporzionale ai gradi di libertà della rete (l'esperienza dei fenomeni deve essere consolidata e non episodica).

Il soddisfacimento di tali condizioni si accerta verificando se la rete "generalizza"; se fornisce cioè risposte corrette quando elabora un sistema di input che non è stato utilizzato per la fase di apprendimento. Se ciò non si dovesse realizzare vuol dire che la rete ha imparato a memoria una correlazione tra input e output che non può essere assunta come legge generale del fenomeno. In tal caso si può al più configurare come un "compattatore di informazioni", utilizzabile solo per gestire celermente, con l'ausilio del calcolo automatico, i dati (e solo quelli) su cui si è basato
l'apprendimento.

L'applicazione dell'intelligenza artificiale allo studio del fenomeno incidentale induce rilevanti difficoltà: alcune di metodo, altre solo procedurali.

Tra le prime assume particolare rilievo la selezione degli input da prendere in considerazione, è necessario infatti tener conto di tutte le variabili che concorrono nel determinare il sinistro. Pertanto, per assicurare la completezza degli input è opportuno far riferimento ad una check-list disaggregata per componenti primarie, secondarie e variabili elementari.

Prescindendo dall'elencazione delle variabili elementari, se anche solo consideriamo le componenti primarie e secondarie ne risulta un quadro molto articolato.

In sostanza, anche se è possibile utilizzare le tecniche dell'intelligenza artificiale come strumento idoneo alla previsione dei sinistri, il metodo si configura tuttavia come una sorta di "*scatola nera*" capace di esprimere un giudizio attendibile, ma non motivato. Si ritiene quindi, che tale metodo non rappresenta un punto d'arrivo coerente con le esigenze

dettate dalla necessità di interpretare compiutamente il fenomeno incidentale per le ricadute che esso determina in fase di progettazione.

Tali considerazioni, hanno sollecitato ulteriori sviluppi della ricerca in una direzione che si è dimostrata altrettanto promettente, qual è quella che si fonda sulle applicazioni dell'Hazard Analysis allo studio dell'incidentalità stradale. Questa metodologia, nata per ottimizzare la progettazione e la gestione di impianti ad alto rischio, ha trovato numerose applicazioni in campi diversi dimostrando una particolare versatilità.

Essa definisce la gravità di un evento tenendo conto della probabilità del suo manifestarsi posta in relazione alle sue conseguenze. Nel caso dell'incidentalità stradale, poiché queste ultime non sono univocamente determinabili, il metodo fa ovviamente riferimento alla sola componente probabilistica.

Metodi innovativi – L'Hazard Analysis come metodo diagnostico

Partendo dalla definizione di rischio, fornita dalla norma UNI EN 292/1, come "combinazione di probabilità e gravità di possibili lesioni o danni alla salute in una situazione pericolosa", l'analisi del rischio può essere definita come: il processo di valutazione della possibilità di incidenti, delle loro probabilità di accadimento e dell'analisi delle possibili conseguenze. In base a questa definizione, la sua applicazione, prevede:
la definizione delle principali caratteristiche fisiche e funzionali del sistema in esame, l'individuazione di tutti gli eventi incidentali possibili (Hazard identification) e la determinazione delle loro cause.

La valutazione del rischio, stimata tenendo conto della probabilità di accadimento degli eventi incidentali e della gravità delle loro conseguenze (Hazard assessment) e realizzata tramite tecniche analitiche (l'albero degli eventi) che permettono di identificare i legami di causa/effetto esistenti tra gli eventi in questione; il controllo del rischio stesso (Follow-up) rappresentato dalla definizione delle procedure destinate a monitorare nel tempo l'efficacia delle misure adottate, oltre a controllare in maniera continua l'insorgere di eventuali pericoli inattesi.

All'interno di questo processo il punto centrale è rappresentato dalla costruzione della metodologia basata sull'analisi probabilistica correlata alla successione degli eventi che determinano il sinistro. Un approccio di questo tipo fu inizialmente suggerito da quelle analisi di rischio di tipo deduttivo che hanno trovato larga applicazione nel settore industriale. Tra esse, in particolare, si concentrò l'attenzione su uno dei metodi più diffusi e conosciuti: il Fault Tree Analysis (FTA) o "albero dei guasti" che, partendo da un analisi "generale" e complessiva dell'evento indesiderato, arriva ad individuare i guasti sui componenti.

Tuttavia risultò subito evidente che non era possibile una banale trasposizione della metodologia FTA per la previsione dell'incidentalità stradale in quanto l'albero dei guasti descrive una situazione specifica e una qualunque modifica del sistema comporta un'automatica modifica dell'albero stesso. Pertanto, tenuto conto della varietà delle situazioni che inducono i malfunzionamenti delle componenti di processo, non era pensabile di pervenire per questa via alla definizione di un metodo generalizzabile, anche se riferito ad una singola tipologia di sinistro.

Partendo da tali considerazioni si è trovata la soluzione invertendo il procedimento, considerando cioè il sinistro come la conclusione di una successione di cause che lo determinano.

In buona sostanza, il metodo mira all'identificazione dei legami di causa/effetto tramite un processo di natura deduttiva, all'interno del quale si può pervenire ad una stima probabilistica valutando le probabilità di accadimento (si/no) delle alternative intercettate dai percorsi critici.

Tale tecnica di valutazione del rischio viene generalmente impiegata in forma qualitativa, spesso ricorrendo a degli indicatori di sicurezza, ma può anche essere usata in forma quantitativa, associando alle cause individuate la frequenza con cui in passato si sono prodotte. Inoltre, dalla lettura stessa dell'albero si può risalire ad una stima della probabilità di accadimento dei vari eventi intermedi.

La definizione quantitativa convenzionalmente adottata per il rischio è espressa dal prodotto

$$R = P \times G$$

dove p è la probabilità di accadimento dell'evento incidentale (probability), G la gravità dei suoi effetti (severity) ed R l'indice di rischio.

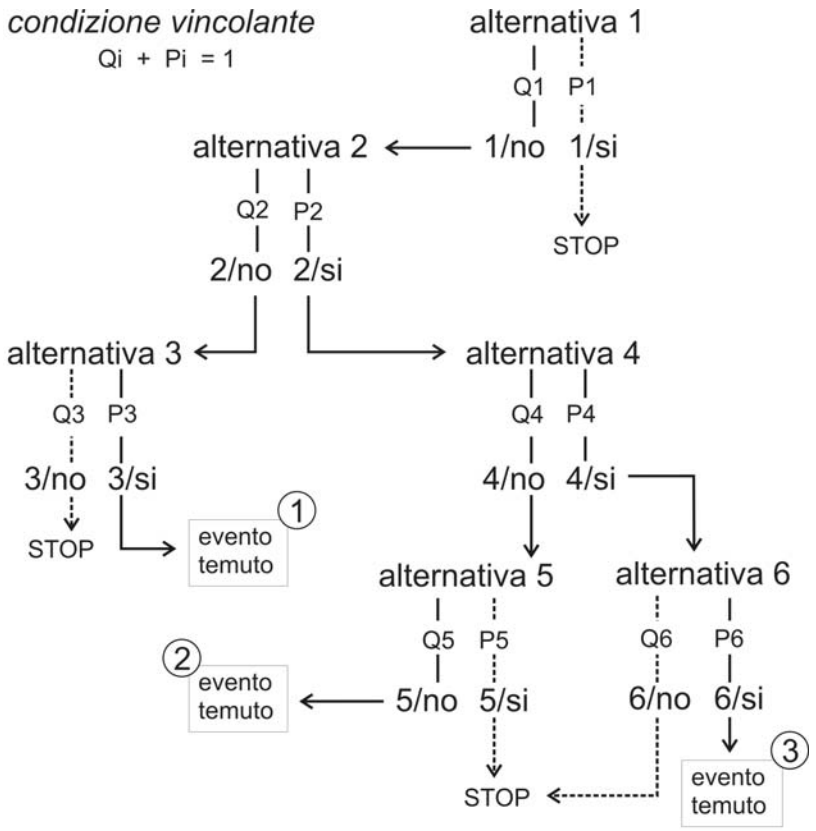
Per l'applicazione dell'Hazard Analysis al caso specifico della diagnostica dell'incidentalità stradale, poichè non è possibile stabilire un legame diretto tra l'evento incidentale e la gravità delle sue conseguenze, è necessario assumere il rischio direttamente proporzionale alla probabilità dell'evento *(G=1)*.

Il primo passo della procedura si basa su una ricostruzione schematica delle alternative possibili, mano a mano che si presentano, di un percorso logico che conduce all'esito finale (*albero degli eventi*) e, di questo, calcola la probabilità di manifestarsi tramite l'analisi probabilistica di tutte le alternative di percorso. Poiché tali probabilità dipendono dalla configurazione della strada nel suo complesso, dal traffico, dal comportamento degli utenti e dalle condizioni ambientali al contorno, anche questo metodo soddisfa i principi base di un'analisi sistemica,

meno integrata di quella gestita dalle reti neurali ma certamente più esplicita.

Oltre alle probabilità l'hazard analysis valuta la gravità degli eventi, ma, per quanto riguarda l'incidentalità stradale, di ciò è possibile non tener conto in quanto le conseguenze dei sinistri non dipendono, di norma, dalle cause che li hanno prodotti. L'uscita di strada, ad esempio, può condurre ad esito mortale o può risolversi senza danni se il veicolo non incontra ostacoli lungo la sua traiettoria.

Lo schema in figura, individua i percorsi critici, ovvero la successione delle alternative che si devono verificare perché si manifesti l'evento temuto.



Tali percorsi critici convergono in alcuni nodi dell'albero che consentono di selezionare successivi livelli d'analisi.

L'individuazione dei nodi e dei diversi livelli d'analisi è di particolare interesse per l'applicazione in quanto, essendo ogni alternativa dell'albero descritta da una probabilità compresa tra 0 ed 1, è evidente che ai fini del calcolo si riduce sensibilmente il contributo dei livelli d'analisi gerarchicamente subordinati.
Ciò consente di modulare la complessità delle elaborazioni in funzione delle approssimazioni che si ritengono ammissibili.

Con riferimento all'esempio, la probabilità del top event 1 per un singolo veicolo è pari alla somma delle produttorie che conducono agli eventi finali previsti dai diversi percorsi critici. Sarà quindi:

$$\textit{Rischio dell'evento} = \Sigma_i E_i$$

dove E_i è pari alla produttoria (Π_i) delle probabilità intercettate dal percorso critico che conduce al relativo evento.

L'ordine di successione degli eventi, quale descritta dall'architettura dell'albero, consente di valutare l'efficacia delle scelte progettuali ai fini della sicurezza d'esercizio, tenendo conto del livello gerarchico delle probabilità elementari su cui producono i loro effetti.

Metodi sperimentali – La Verifica in realtà virtuale

Dai risultati che emergono dall'analisi incidentale si evince che la progettazione "sicura" della strada deve necessariamente tener conto del comportamento dell'utente, ne consegue la necessità di accertare preventivamente quali siano le regole che presiedono all'esercizio della guida nelle diverse condizioni di circolazione e come queste possano variare in funzione dello stato psicofisico del conducente.

Con l'ausilio della realtà virtuale questo è possibile, ricostruendo ambiti simili a quelli reali, tali da determinare reazioni psicomotorie analoghe a quelle che il soggetto in prova manifesterebbe al vero, nelle stesse condizioni di simulazione.

L'ausilio delle sperimentazioni in realtà virtuale consente di risalire alle variabili maggiormente responsabili di comportamenti, manovre e dinamiche che si instaurano nella guida in diverse condizioni al contorno, come condizioni atmosferiche, di deflusso veicolare ecc.

4. Gli Alberi degli eventi

Si ribadisce che il rischio è definito come prodotto della probabilità dell'evento incidentale per la sua prevedibile gravità.

In altre applicazioni quest'ultima può essere quantificata con riferimento alle conseguenze dell'evento, sia valutate sotto il profilo sociale (morti e feriti), sia in relazione ai costi finanziari del danno subito. Nel caso particolare dell'incidentalità stradale si prescinde dalla considerazione della gravità in quanto di norma le conseguenze dell'evento non dipendono dalle circostanze con cui questo si verifica (numero di occupanti del veicolo, presenza di ostacoli ai margini della carreggiata, ...ecc).

Limitando quindi l'analisi alla sola componente probabilistica, il rischio può essere assunto proporzionale alla produttoria delle probabilità elementari intercettate dai percorsi critici dell'albero degli eventi.

Faremo quindi riferimento a queste per analizzare l'evoluzione dello scenario di rischio in funzione dei carichi di traffico, considerando le quattro tipologie incidentali prevalenti (tamponamento, urto con ostacolo, uscita di strada e sorpasso in debito di sicurezza).

4.1 L'Albero del tamponamento

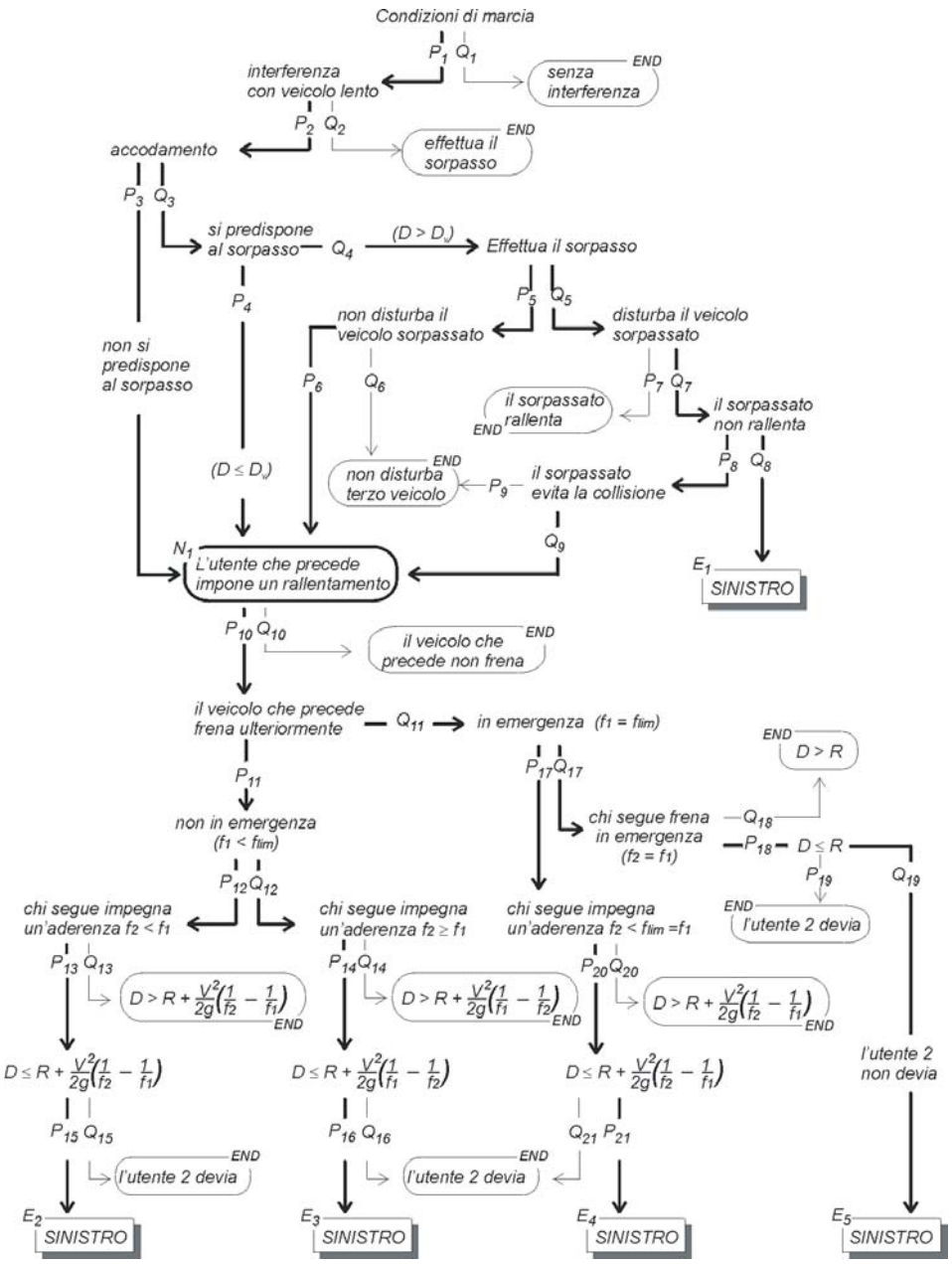


Figura 3 - L'albero del tamponamento

Il modello logico considera che un utente, che sia costretto ad accodarsi ad un altro veicolo, si potrà disporre a una distanza da chi lo precede tale da potersi considerare al riparo dal rischio di tamponarlo.
Qualora ciò avvenisse, va analizzato come possa evolversi la situazione in caso di frenata dell'utente precedente.

In particolare, perché si riesca ad evitare il tamponamento dovrà essere $\Delta > 0$, ovvero, con riferimento alla figura sottostante:

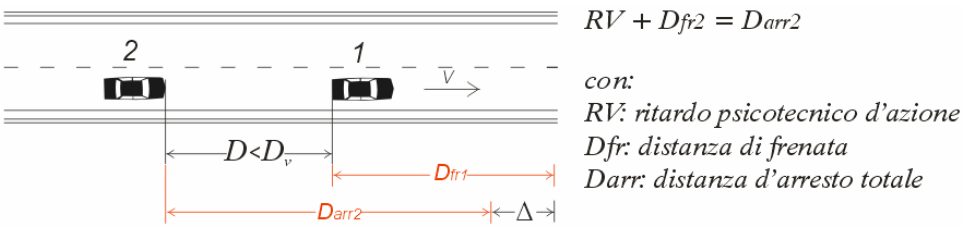


Figura 4 - Modello teorico dell'albero del tamponamento

Per quanto riguarda il tamponamento l'albero degli eventi individua cinque percorsi critici di cui quattro hanno origine dal nodo che caratterizza le condizioni di marcia che prevedono l'esigenza di rallentamento dell'utente in avvicinamento.

La probabilità dell'evento incidentale dovuto a marcia con distanziamenti ridotti è pari alla somma delle probabilità per essa imputabili ad ogni singolo evento incidentale.
A sua volta ciascuna di queste probabilità si ottiene come produttoria delle probabilità elementari intercettate dai percorsi critici.

Probabilità a livello del nodo N_1

$$\text{nodo 1} \quad P(N_1) = P_1P_2(P_3+Q_3(P_4+Q_4((P_5P_6)+Q_5Q_7P_8Q_9))) =$$

Probabilità degli eventi incidentali

$$\text{evento 1} \quad P(E_1) = P_1P_2Q_3Q_4Q_5Q_7Q_8$$
$$\text{evento 2} \quad P(E_2) = P(N_1)P_{10}P_{11}P_{12}P_{13}P_{15}$$
$$\text{evento 3} \quad P(E_3) = P(N_1)P_{10}P_{11}P_{12}P_{14}P_{16}$$
$$\text{evento 4} \quad P(E_4) = P(N_1)P_{10}Q_{11}P_{17}P_{20}P_{21}$$
$$\text{evento 5} \quad P(E_5) = P(N_1)P_{10}P_{11}Q_{17}P_{18}Q_{19}$$

La probabilità del tamponamento è pari alla somma delle probabilità elementari imputabili ad ogni singolo evento incidentale, ne risulta pertanto:

$$P(sorpasso) = \Sigma_i P(E_i)$$

4.2 L'albero della marcia con velocità non adeguata alle caratteristiche locali (uscita di strada)

In questo albero si fa riferimento ai sinistri derivanti dalla marcia di un veicolo non adeguata alle caratteristiche locali (geometrie, pavimentazione, particolarità puntuali).

La tipologia incidentale a cui si arriva è l'uscita di strada, unica tra quelle esaminate nella quale non siano coinvolti più veicoli.
La marcia d'un veicolo può, o per la velocità eccessiva sostenuta o per il tipo di manovra effettuata, non essere adatta alle caratteristiche locali dell'arteria.

I rischi che si corrono in tal senso sono di due tipi:

- sbandamento, in caso di superamento dell'aderenza massima;
- ribaltamento, se il momento dovuto alla forza centrifuga non è bilanciata dal momento della forza peso.

Dal punto di vista fisico dovrà essere soddisfatta la seguente relazione:

$$\frac{V^2}{R} \leq g A^* + g^* tg\alpha$$

dove sarà: $A^* = \begin{cases} ft_{max} \; (= \text{Aderenza trasversale massima}) \\ \frac{S}{2h} \end{cases}$

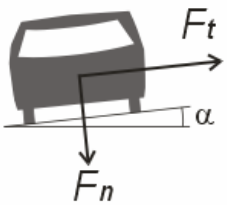


Figura 5 - Modello teorico dell'albero della marcia con velocità non adeguata alle caratteristiche locali

Nella costruzione dell'albero, il primo passo consiste nella divisione tra i casi di marcia in curva e marcia in rettilineo.
Nel primo caso la velocità dovrà essere adeguata al raggio di curvatura locale. Qualora essa risultasse maggiore della velocità di progetto,

l'utente potrebbe arrivare ad impegnare in modo significativo l'aderenza (oltre una certa soglia percentuale dell'aderenza massima) correndo i rischi sopra accennati.
Trovandosi, invece, in rettifilo o in curva a velocità adeguate al raggio di curvatura, l'unica situazione nella quale l'utente può assumere una marcia non adeguata alle caratteristiche locali è quella in cui egli si trovi nella necessità di effettuare una manovra d'emergenza.

Questa può portare ad un impegno particolarmente gravoso dell'aderenza o comunque ad una perdita di controllo del veicolo da parte del conducente e la conseguente uscita di strada.
Nel caso di marcia ai limiti d'aderenza, si è visto che l'utente corre il rischio di ribaltamento o slittamento, a seconda che il fattore d'aderenza trasversale massima $Ft_{\max}$ sia rispettivamente maggiore o minore della grandezza $\frac{S}{2h}$.

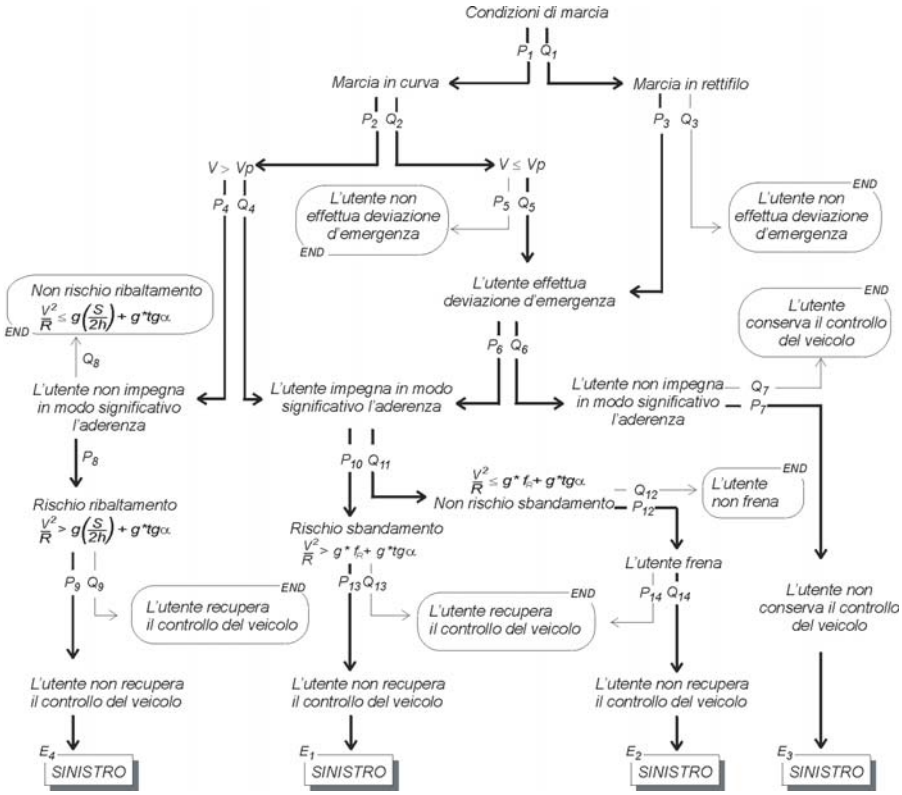


Figura 6 - L'albero relativo all'uscita di strada dei veicoli.

Sia nel caso di rischio di ribaltamento che nel caso di sbandamento, bisognerà considerare l'eventualità che, tenuto conto del coefficiente d'aderenza reale locale F_r e della pendenza trasversale, la relazione di base non sia soddisfatta e, infine, la possibilità che l'utente riesca o meno a recuperare il controllo del veicolo.

Inoltre, bisogna considerare il caso in cui l'utente che marci in maniera tale da impegnare significativamente l'aderenza, pur non avendo una velocità tale da far sì che la relazione di base non sia soddisfatta, possa arrivare allo slittamento e all'uscita di strada per effetto d'una frenata.

Seguendo la stessa procedura adottata per il tamponamento, si è pervenuti anche per gli incidenti derivanti da una velocità non adeguata alle caratteristiche della strada al calcolo delle produttorie e alla rappresentazione dell'andamento futuro del rischio in funzione degli scenari di traffico considerati.

Probabilità degli eventi incidentali

evento 1 $P(E_1) = (P_1P_2Q_4+P_6(P_1Q_2Q_5+Q_1P_3)))P_{11}P_{13}$

evento 2 $P(E_2) = (P_1P_2Q_4+P_6(P_1Q_2Q_5+Q_1P_3)))Q_{11}P_{12}Q_{14}$

evento 3 $P(E_3) = (P_1Q_2Q_5+Q_1P_3)Q_6P_7$

evento 4 $P(E_4) = P_1P_2P_4P_8P_9$

4.3 L'Albero del conflitto con ostacoli

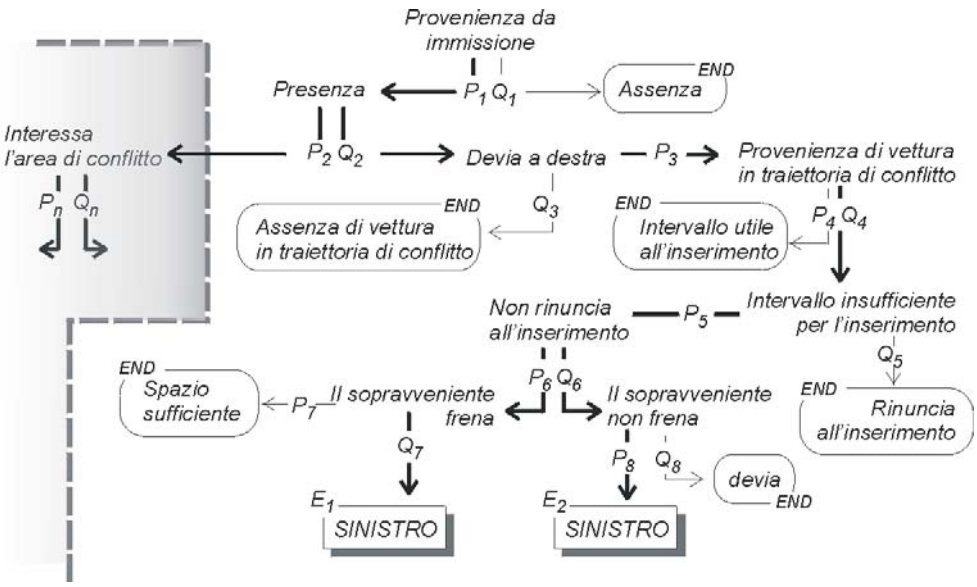


Figura 7 - L'Albero del conflitto con ostacoli

La probabilità dell'evento incidentale dovuto alla marcia in conflitto con ostacoli è pari alla somma delle probabilità per essa imputabili ad ogni singolo evento incidentale.

A sua volta ciascuna di queste probabilità si ottiene come produttoria delle probabilità intercettate dai percorsi critici.

Probabilità degli eventi incidentali

evento 1 $\quad P(E_1) = P_1Q_2P_3Q_4P_5P_6Q_7$

evento 2 $\quad P(E_2) = P_1Q_2P_3Q_4P_5Q_6P_8$

Anche in questo caso la probabilità derivate dall'analisi dell'albero è pari alla sommatoria delle produttorie di ogni singolo evento.

4.4 L'albero del sorpasso

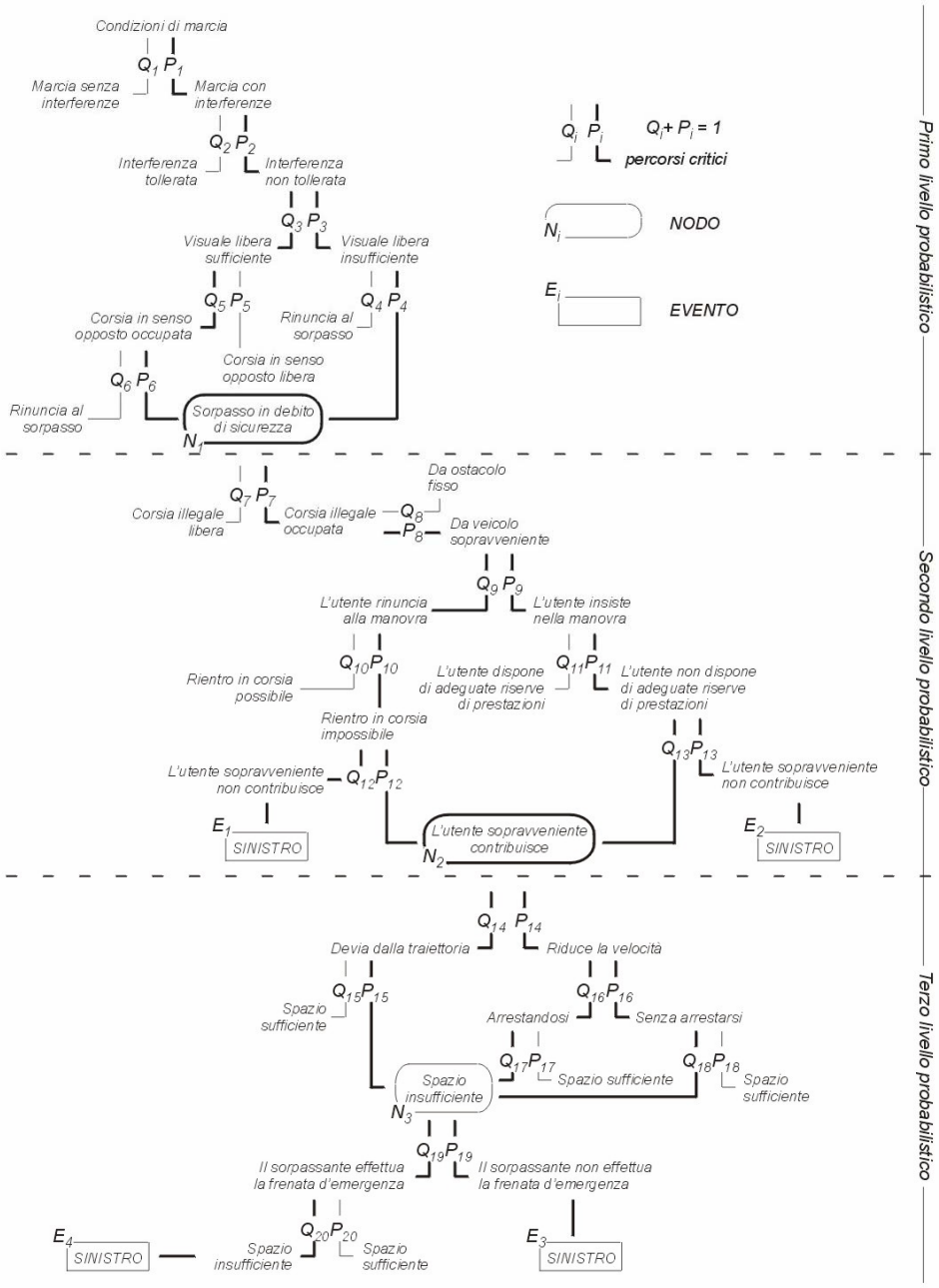


Figura 8 - L'albero del sorpasso

Analizzando più in dettaglio l'architettura dell'albero si nota come la prima variabile significativa sia rappresentata dalla densità veicolare, da essa dipende infatti la probabilità che si produca l'esigenza stessa della manovra di sorpasso.

Solo successivamente assume interesse valutare il comportamento dell'utente, quale determinato dalla tollerabilità o meno dell'interferenza subita; e, ancora dopo, interviene nel calcolo la visuale libera offerta dalla strada per stimare la probabilità che egli effettui la manovra in debito di sicurezza.

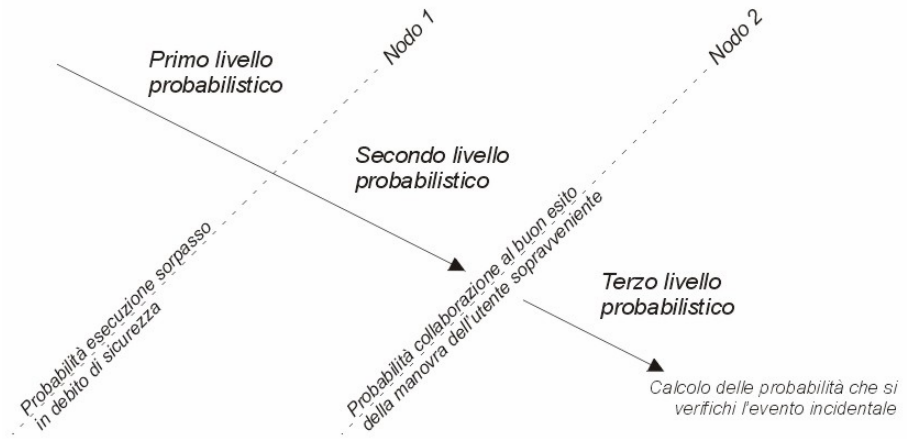


Figura 9 - Articolazione livelli probabilistici

L'individuazione dei percorsi critici permette di determinare quelli che sono i nodi critici della struttura, fondamentali per sezionare l'albero in livelli probabilistici consecutivi: in particolare l'architettura dell'albero è stata articolata su tre soli livelli, a fronte dei quattro possibili in considerazione della prossimità del terzo ed ultimo nodo agli eventi terminali dell'albero che non si ritiene di assumere come significativo.

Descritti gli aspetti fondamentali e caratteristici dell'albero degli eventi del sorpasso, il passo successivo consiste nell'interpretazione dei risultati probabilstici restituiti. Con riferimento sempre alla concatenazione formulata, risulta:

Probabilità a livello dei nodi

Nodo 1 $P(N_1) = P_1*P_2*(P_3*P_4+Q_3*Q_5*P_6)$
Nodo 2 $P(N_2) = P(N_1)*P_7*(P_8*P_{10}*Q_{12}+Q_8*P_9*P_{11})$
Nodo 3 $P(N_3) = P(N_2)*[Q_{13}*P_{14}+P_{13}*(Q_{15}*Q_{16}+P_{15}*Q_{17})]$

Probabilità dei sinistri elementari

Evento 1 $P(E_1) = P(N_1)*(P_7*P_8*P_9*Q_{11})$
Evento 2 $P(E_2) = P(N_1)*(P_7*P_8*P_{10}*P_{12})$
Evento 3 $P(E_3) = P(N_3)*Q_{18}$
Evento 4 $P(E_3) = P(N_3)*P_{18}*P_{19}$

La probabilità dello scontro frontale e frontale-laterale imputabile alla manovra di sorpasso per un singolo veicolo è ovviamente pari alla somma delle probabilità elementari imputabili ad ogni singolo evento incidentale. Ne risulta pertanto:

$P(sorpasso) = \Sigma_i P(E_i)$

Sviluppando quest'ultima relazione e verificando come la probabilità di un evento elementare influenza la probabilità globale del sinistro, è possibile stimarne l'importanza ai fini della sicurezza dell'esercizio.

Un calcolo esatto è possibile solo se sono noti i valori numerici delle singole probabilità in quanto ognuna di esse concorre alla probabilità del sinistro sia per quante volte ricorre nei prodotti che compongono la sommatoria, sia per il numero dei fattori dei prodotti stessi. Tuttavia è interessante sviluppare la sommatoria, tenendo conto dell'equazione di congruità ($P_i + Q_i = 1$), per rendersi conto di un aspetto interessante:

$P(sorpasso) = \Sigma_i P(E_i) = P_1*P_2*P_7*(P_3*P_4-P_3*Q_5*P_6+Q_5*P_6)+[\ldots]$

Il fattore comune della sommatoria è composto dal prodotto delle probabilità P_1, P_2 e P_7 alle quali è imputabile la maggiore importanza ai fini della sicurezza; ma altrettanto vincolanti sono le probabilità che compaiono nel secondo termine, anche se concorrono alla somma finale con segni diversi e i prodotti in cui intervengono presentano un maggior numero di fattori inferiori all'unità.

5. I modelli interpretativi

Come espresso nei paragrafi precedenti, la teoria dell'Hazard Analysis, prevede che ogni singolo incidente può essere rappresentato analiticamente come una successione di eventi concatenati, elementari ed indipendenti.

Il tema centrale del processo, rimane la valutazione quantitativa delle probabilità che caratterizzano gli eventi concatenati, in particolare la valutazione di quelle probabilità che dipendo da fattori umani.

L'unico strumento, ad oggi, utile per l'analisi di fenomeni determinati dai fattori umani che gode di proprietà di ripetibilità ed affidabilità necessarie all'analisi scientifica è l'ambiente di guida in realtà virtuale.

Infatti, si sono sviluppati modelli analitici per tutte quelle probabilità che dipendevano unicamente da variabili interpretabili statisticamente o secondo le leggi dell'ingegneria stradale, mentre per altre probabilità si sono costruiti dei modelli teorici sulla base dei risultati ottenuti con l'ausilio delle sperimentazioni tenute in ambiente virtuale.

Per assicurare una migliore qualità dei progetti è necessario adottare quindi, un approccio più articolato, rispetto a quello usuale che non riesce ad interpretare correttamente la complessità dei fenomeni legati al comportamento dell'uomo.

Per quanto detto sin qui, l'analisi probabilistica si propone come una metodologia di sicuro interesse e per verificarne la praticabilità se ne sono esplorate le potenzialità proprio in relazione alla manovra di sorpasso.

5.1 Analisi e semplificazione dell'albero del sorpasso

L'ordine di successione degli eventi, descritto dall'architettura dell'albero, consente di valutare l'efficacia delle scelte progettuali ai fini della sicurezza d'esercizio, tenendo conto del livello gerarchico delle probabilità elementari su cui producono i loro effetti.

A titolo di esempio, prescindendo dalla quantificazione numerica delle probabilità, possiamo valutare di quanto si riducano i sorpassi in debito di sicurezza (nodo N_1 dell'albero) adottando interventi diversi finalizzati rispettivamente a ridurre le interferenze veicolari (P_1), o ad incrementare lo sviluppo del tracciato ove sono presenti idonee visibilità per il sorpasso (P_3).

Allo scopo, indicando con α la riduzione delle probabilità elementari (α = 0 assenza di intervento, α = 1 intervento con massimo effetto), tali probabilità sono pari a:

senza provvedimenti:

$$N_1 = P_1 P_2 \left[P_3 P_4 P_5 + (1 - P_3) P_5 P_6 \right]$$

caso A con P_1^A = (1-α) P1

N_1^A = (1-α) P1 P2 [P3 P4 P5 + (1-P3) P5 P6]

caso B con P_3^B = (1-α) P3

N_1^B =P1 P2 [(1-α) P3 P4 P5 + (1- (1-α) P3) P5 P6]

ove per α = 0 $N_1 = N_1^A = N_1^B$

per α = 1 $N_1^A = 0$ $N_1^B = P_1 P_2 P_5 P_6$

Rappresentando quindi gli andamenti di N1 nei due casi ipotizzati si ricava il grafico in figura che si presta ad alcune interessanti considerazioni.

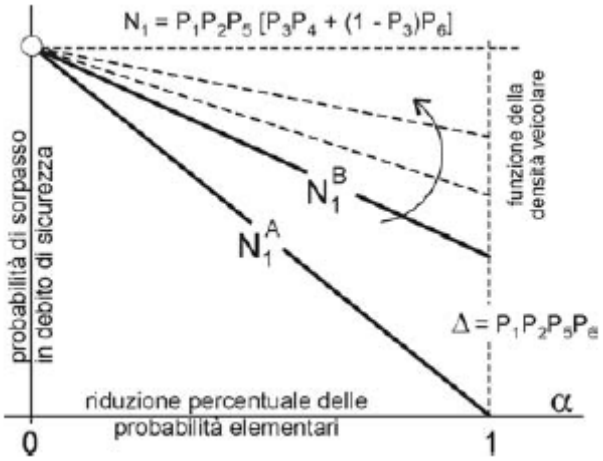


Figura 10 - La P del sorpasso in debito di sicurezza in funzione di N/C

Si nota infatti come a parità di α, prescindendo da ogni considerazione in ordine all'entità della spesa, sia sempre da preferire un intervento finalizzato a ridurre l'interferenza veicolare piuttosto che ad incrementare le tratte con visuale libera uguale o superiore alla distanza di visibilità per il sorpasso.
Dopo aver stimato la probabilità che la manovra di sorpasso venga effettuata in debito di sicurezza, è facile constatare come siano ancora il flusso veicolare, le condizioni di circolazione e il comportamento dell'utente a risultare determinanti per valutare la probabilità ultima dell'evento incidentale a cui l'albero si riferisce.
Questi aspetti emersi dalla relazione globale consentono di adottare una limitazione importante ai fini dello svolgimento dell'analisi stessa: ovvero lo studio dell'albero degli eventi della manovra di sorpasso può essere circoscritto esclusivamente al primo livello probabilistico.

Circoscrivere l'analisi alle prime sei probabilità consente di stimare adeguamente la probabilità cumulata dell'evento temuto, alleggerendo notevolmente lo studio, in quanto:

- definire il comportamento ed il valore del nodo 1 significa controllare in maniera agevole la probabilità cumulata del sinistro, visto che tale nodo entra, in maniera diretta e non, nel calcolo della probabilità di ciascun evento elementare;

- il contributo, in termini di risultato finale, delle probabilità appartenenti al secondo e terzo livello probabilistico è senza dubbio infinitesimale rispetto al peso delle probabilità di primo livello.

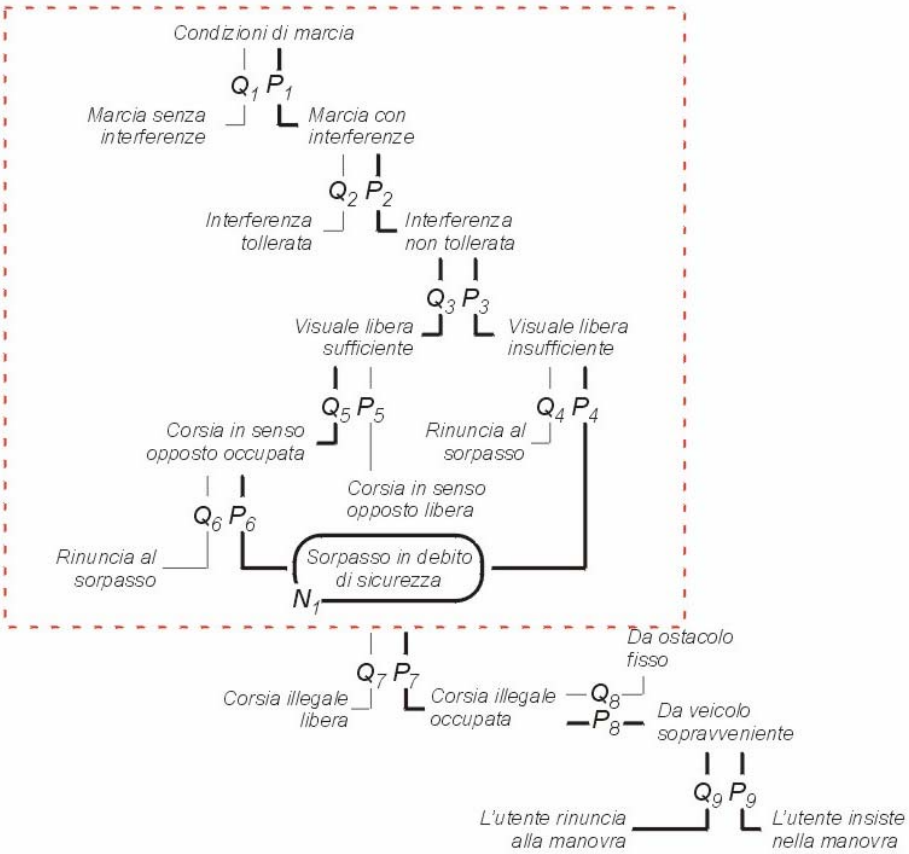


Figura 11 - Il primo livello probabilistico dell'albero del sorpasso

Pertanto, se le finalità primarie dell'ingegneria stradale sono quelle di realizzare delle opere che devono garantire adeguati gradi di sicurezza dell'esercizio viario, pur limitandoci all'esempio a cui si è fatto riferimento, è sin troppo evidente che il buon esito della manovra non può affidarsi al solo dimensionamento delle visuali libere, comunque esse siano calcolate.

5.2 L'analisi "quantitativa" delle probabilità – le tre tipologie

Per procedere con la costruzione dei modelli è stato necessario individuare quali fossero le variabili significative che incidessero prevalentemente sulle singole probabilità.

Al riguardo, sono state individuate tre tipologie di probabilità che devono essere valutate per tratte omogenee con riferimento a:

- Tipo A – probabilità funzione delle condizioni ambientali o di situazioni ricorrenti di cui sia comunque noto il calendario di massima, l'entità della manifestazione e la loro frequenza temporale. La determinazione di tali probabilità non presenta significative difficoltà se si escludono i limiti derivanti da un'eventuale carenza delle banche dati, molte delle quali sono consultabili in internet.

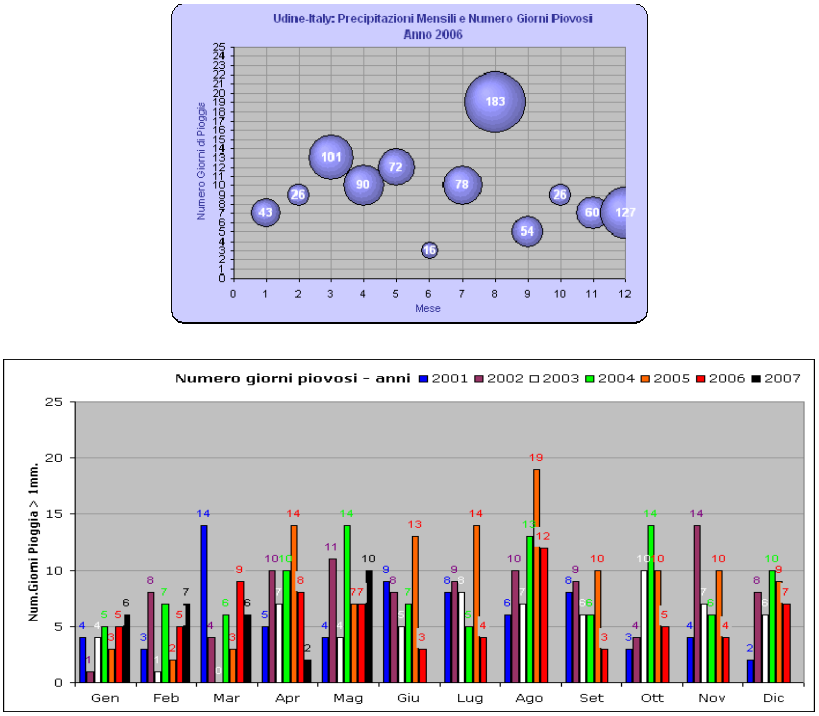


Figura 12 - Numero dei giorni di pioggia di una stazione meteorologica anno 2006 (Udine)

Si riportano a puro titolo esemplificativo i dati di una stazione meteorologica (Udine) relativi al numero dei giorni di pioggia nell'anno 2006 e all'entità delle precipitazioni mensili e annuali per più anni.

- Tipo B – fanno riferimento ai modelli ormai consolidati della teoria della circolazione veicolare (HCM) per l'analisi delle interferenze. Le probabilità dipendenti dalle interferenze veicolari possono essere stimate tramite la verifica e l'elaborazione numerica dei tradizionali modelli su cui si basa la teoria del traffico e della circolazione veicolare.

- Tipo C – fanno riferimento agli studi di psicologia del traffico ed alla simulazione in realtà virtuale per la previsione del comportamento degli utenti. Le probabilità dipendenti dal comportamento degli utenti, indotto dalla strada e dalle sue condizioni di funzionalità sono ovviamente le più difficili a determinarsi e la loro stima rappresenta in questo ambito l'attuale frontiera della ricerca.

A valle della classificazione si è proceduto ad individuare le variabili significative secondo un ordine di dettaglio, come riportato di seguito.

Tabella 4 - Le variabili riconducibili alla specificità della condizione viaria considerata

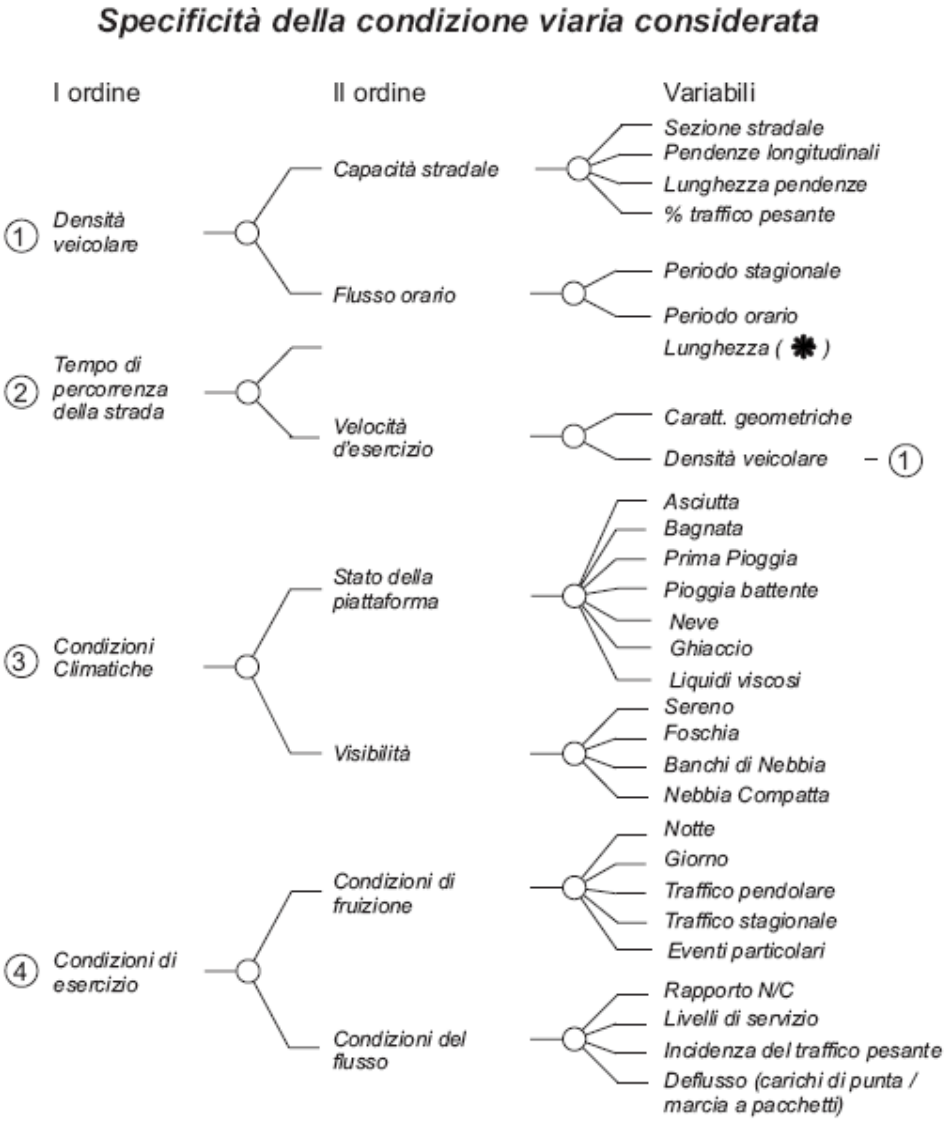


Tabella 5 - le vaiabili riconducibili alle caratteristiche tecniche della strada

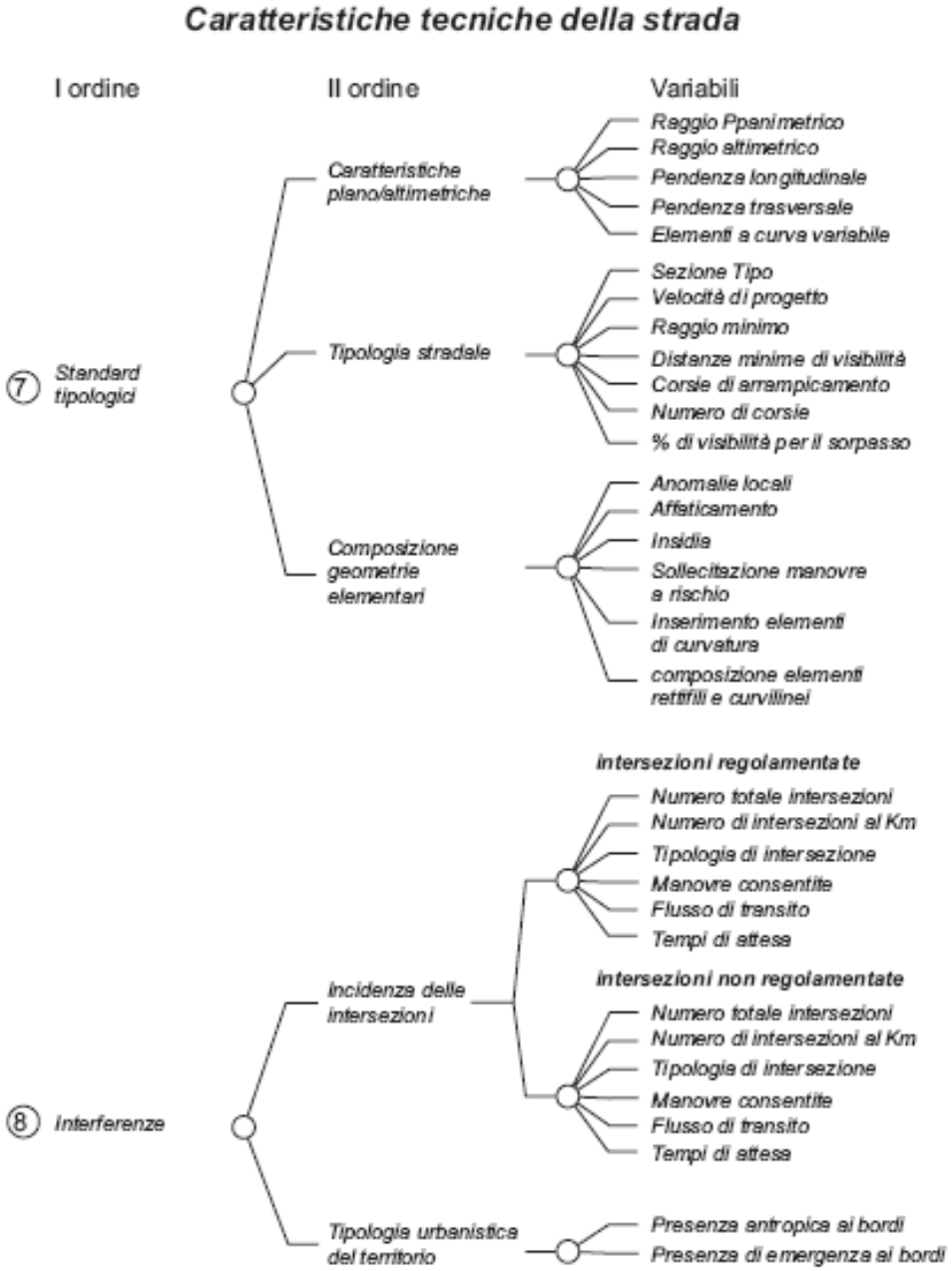
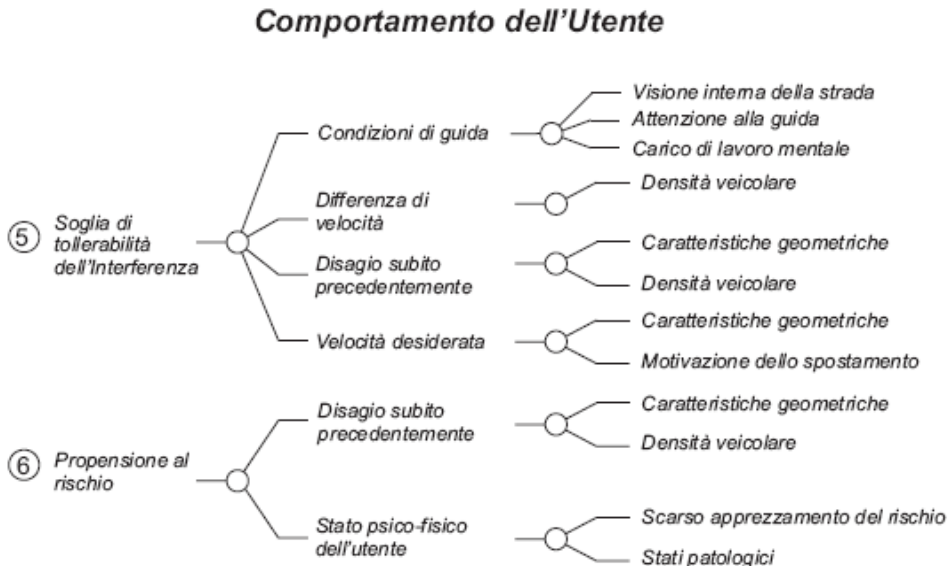


Tabella 6 - Le variabili riconducibili al comportamento dell'utente



Come si è visto le variabili sono state classificate secondo tre ordini diversi dal più generale alla variabile di dettaglio. L'estrema complessità nella definizione dei fenomeni è confermata dalla presenza di variabili di dettaglio nelle diverse variabili di primo ordine, come riportato nell'elenco in figura.

Il secondo passo è quello dell'identificazione delle classi di variabili di ogni probabilità intercettata sull'albero in esame.

Dalla figura si evince come sia stata eseguita una prima iterazione per focalizzare le famiglie di dipendenza delle variabili. Questa analisi ha esplicitato gli obiettivi da perseguire per la formulazione dei modelli teorici previsionali.

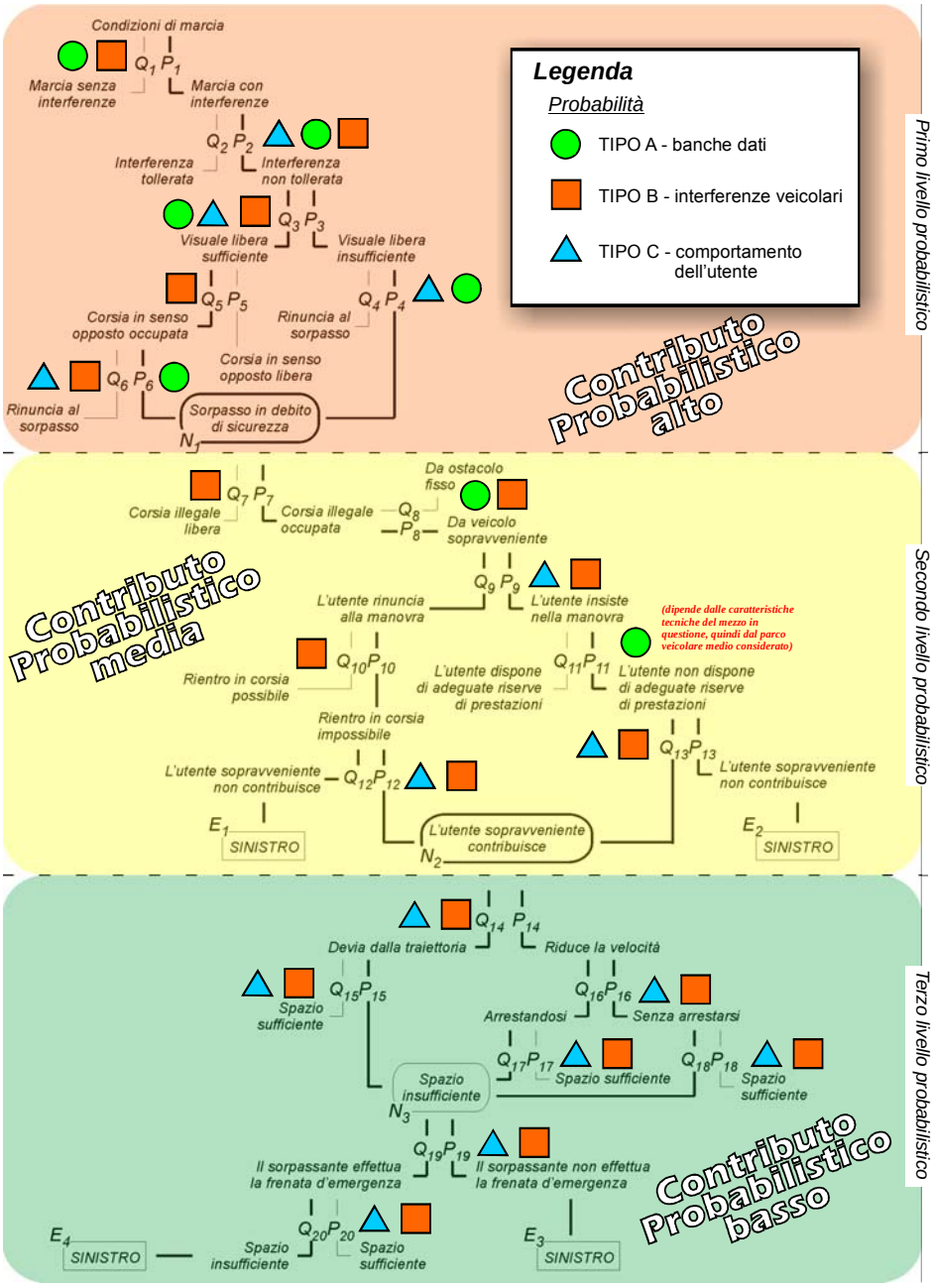


Figura 13 - Attribuzione del peso probabilistico ai tre livelli dell'albero del sorpasso

5.3 - P1 - Probabilità che si determinano interferenze con i veicoli lenti

La prima probabilità che si deve affrontare nell'analisi dell'albero degli eventi è quella relativa alla possibilità che il generico utente dell'infrastruttura viaria incontri durante la sua marcia un veicolo più lento. Per poter elaborare un metodo teorico che consegni il valore di tale grandezza, è necessario sottolineare le condizioni che regolano il fenomeno circolatorio.

In particolare l'esercizio viario è ben rappresentato dalla *curva di deflusso*, che sintetizza gli effetti connessi alla mutua interferenza dei veicoli al crescere della domanda oraria.

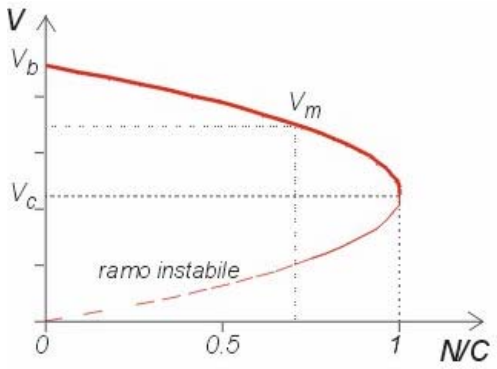


Figura 14 - la curva di deflusso

La velocità intercettata sulla curva di deflusso per un valore particolare della densità veicolare individua la velocità media del flusso stesso.
La distribuzione delle velocità dei veicoli del flusso nell'intorno del valore medio è funzione delle condizioni di deflusso che caratterizzano l'esercizio viario.

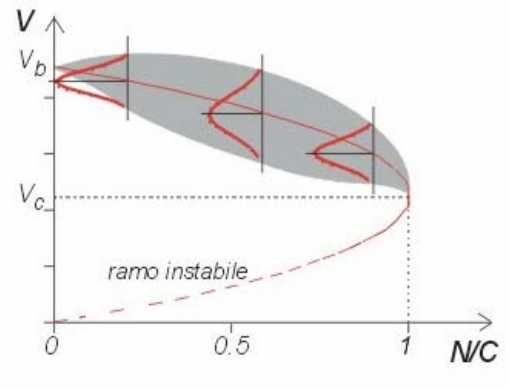


Figura 15 - distribuzione delle velocità dei veicoli del flusso

Per valori della densità veicolare prossimi a 0 e 1 la "gaussiana" è stretta attorno alla media; viceversa per valori di densità medi.

Infine le percentuali dei veicoli che transitano su una sezione con un valore noto di velocità si distribuiscono secondo una legge caratterizzata da una moda V' di norma non coincidente con la velocità media V_m

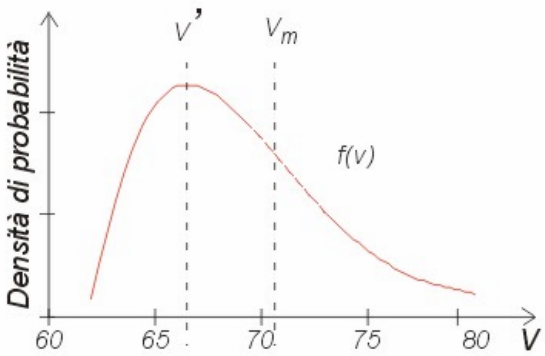


Figura 16 - ipotesi della legge di distribuzione delle v

Naturalmente la distribuzione delle velocità deriva da opportuni rilevamenti effettuati sul campo.

Nell'ipotesi teorica di una distribuzione "asimmetrica" delle velocità (Poisson), la definizione della probabilità P_1 per un tempo unitario (t = 1h) prevede il modello seguente.

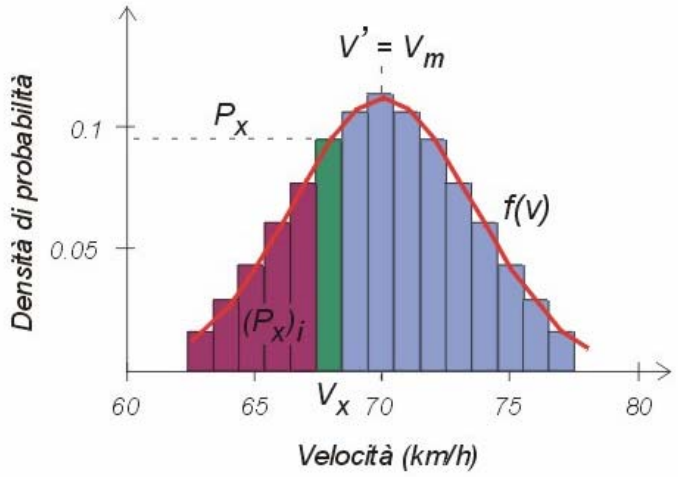


Figura 17 - Legge di distribuzione delle v secondo Poisson

Il veicolo marciante a velocità V_x ha la probabilità di incontrare veicoli che marciano ad una velocità inferiore pari alla percentuale di veicoli più lenti rispetto al totale:

$$(p_x)_i = \frac{\int_0^{V_x} f(v)dv}{\int_0^{V_{max}} f(v)dv} = \int_0^{V_x} f(v)dv$$

I veicoli del flusso che subiscono un'interferenza da un veicolo più lento di V_x sono pari alla percentuale del flusso totale che viaggia alla velocità V_x stessa:

$$p_x = N_{V_x} / N = f(V_x)$$

La probabilità delle interferenze per il generico veicolo x è pertanto:

$$\left[(p_x)_i\right]_{V_x} = p_x * (p_x)_i = f(V_x) * \int_0^{V_x} f(v)dv$$

La probabilità cumulata che i veicoli del flusso N incontrino nell'arco temporale di un'ora veicoli più lenti, tali da determinare interferenze, è pari a:

$$(p_1)_{t=1} = \int_0^{V_{max}} [(p_x)_i]_V dv$$

L'espressione per V<Vmax fornisce il diagramma in figura.

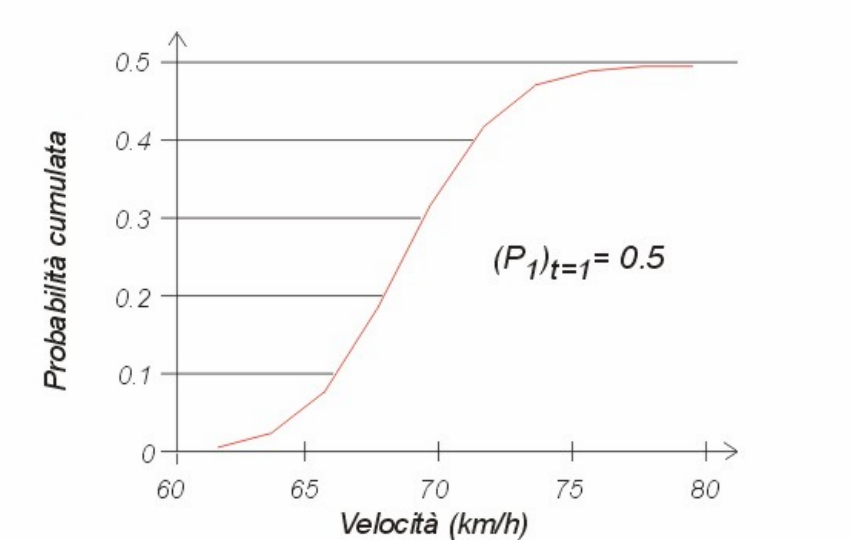


Figura 18 - Probabilità cumulata relativa alla P1

Parallelamente al modello teorico formulato procede il metodo numerico, valido strumento qualora si tiene conto di una distribuzione generica.

L'esempio riportato fa riferimento ad un rilevamento effettuato sulla s.s. 156 Monti Lepini, appartenente al IV tipo delle norme C.N.R., al km 13,5 in condizioni di flusso equilibrato nelle due direzioni e fondo asciutto.

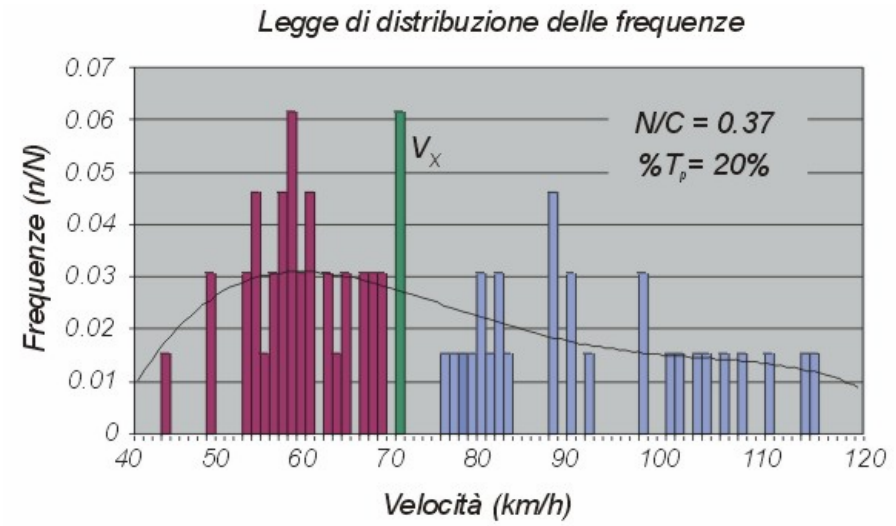


Figura 19 - Legge di distribuzione delle Frequenze della s.s. 156 Monti Lepini

Disponendo di un numero finito di rilievi, la probabilità di incontrare un veicolo più lento di V_x è definita attraverso la sommatoria estesa alla porzione di istogramma compresa tra V_{min} e V_x:

$$(p_x)_i = \sum_{j=V_{\min}}^{V_x} (\Delta V * F_j) = \sum_{j=V_{\min}}^{V_x} F_j$$

dove il Δv è stimato sulla base della sensibilità dello strumento di rilevamento (genericamente 1 km/h).
Analogamente al modello teorico, i veicoli del flusso N che viaggiano alla velocità V_x sono definiti come:

$$p_x = \Delta V * F_x = F_x$$

La probabilità di interferenze per la generica velocità V_x è pertanto:

$$\left[(p_x)_i\right]_{V_x} = p_x * (p_x)_i = F_x * \sum_{j=V_{\min}}^{V_x} F_j$$

Estendendo il calcolo delle interferenze subite all'intero range di velocità si determina la probabilità cumulata:

$$(p_1)_{t=1} = \sum_{j=V_{\min}}^{V_{\max}} \left[(p_j)_i \right]_V dv$$

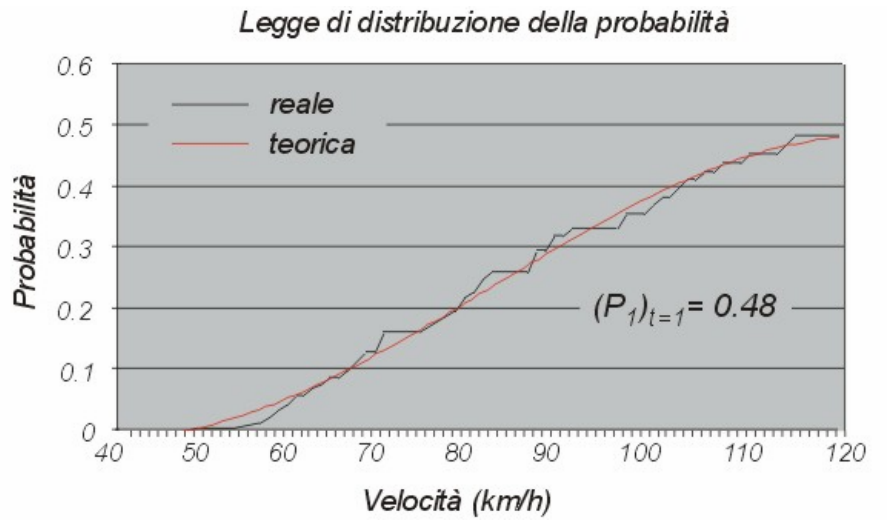
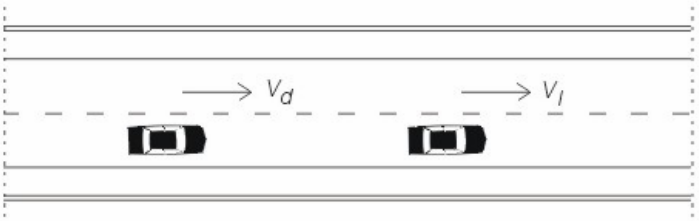


Figura 20 - distribuzione della probabilità P1 rilevata sul campo

5.4 - P2 - Probabilità che le interferenze non siano tollerate

Nel momento in cui un utente subisce, sulla sua traiettoria, un'interferenza veicolare può tollerare il rallentamento conseguente oppure mostrare una "vocazione al sorpasso". Il comportamento del veicolo sopravveniente può essere così simulato.

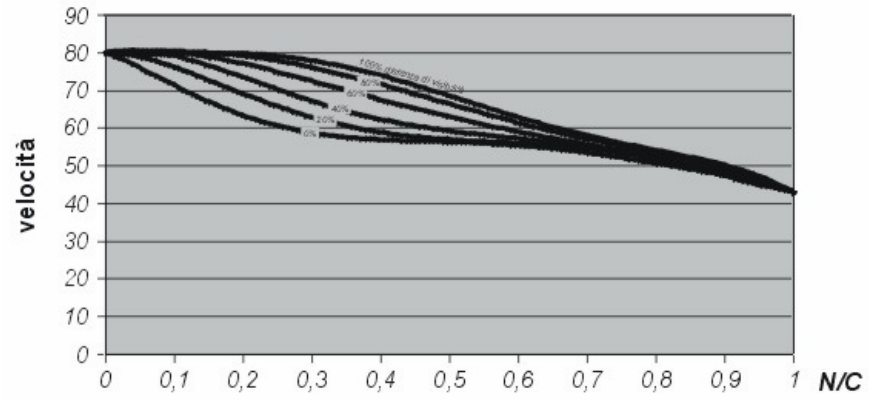


L'utente rinuncia ad effettuare il sorpasso se la sua velocità desiderata V_d è prossima a quella del veicolo che lo precede V_f. Quest'ultima può essere ragionevolmente rappresentata dalla velocità media del flusso, individuabile per una particolare densità veicolare (D =N/C).

$V_d - V_f \leq \Delta$ interferenza "tollerata"

$V_d - V_f > \Delta$ interferenza "non tollerata"

Da tutto ciò si deduce che la densità veicolare gioca un ruolo fondamentale nella definizione della probabilità in esame; per una completezza di indagine si è fatto riferimento alle curve di deflusso caratteristiche di una strada extraurbana a due corsie con velocità di base di 80 km/h, rappresentate al variare della percentuale di distanza di visibilità per il sorpasso garantita dal tracciato (% dv,).



Per quel che concerne la velocità desiderata media V_d la si può considerare funzione della motivazione dello spostamento; il relativo valore è quindi ottenuto come media ponderata delle velocità medie desiderate delle diverse componenti di flusso. Al riguardo prevalgono le differenze tra gli spostamenti di breve e lunga percorrenza; per il contesto stradale nel quale ci si muove (viabilità ordinaria extraurbana) è lecito ipotizzare:

V_1 = 60 km/h (breve percorrenza);

V_2 = 90 km/h (lunga percorrenza).

Sommando opportunamente le due curve teoriche relative agli spostamenti suddetti, si arriva a determinare la distribuzione, anch'essa teorica, delle velocità desiderate all'interno del flusso (figura 18); in particolare la curva si individua ponendo :

$$\alpha * \int f_1 + (1-\alpha) * \int f_2 = 1$$

dove α esprime la percentuale dei flussi di breve percorrenza sul totale.

Da tutto ciò discende:

$$\overline{V_d} = \alpha * \overline{V_1} + (1-\alpha) * \overline{V_2}$$

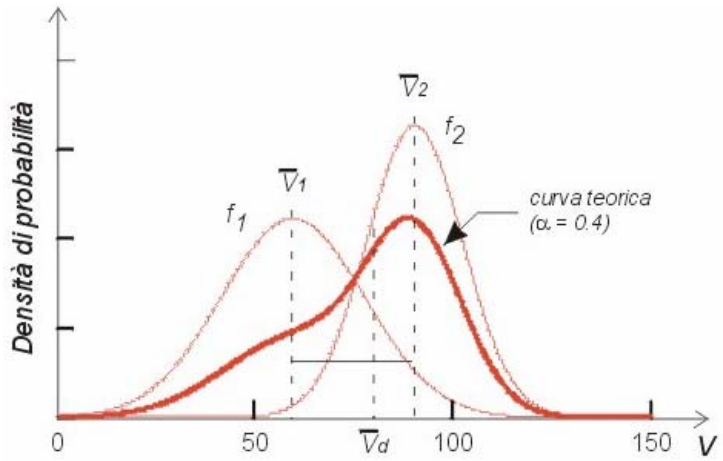


Figura 21 – distribuzioni della velocità di diverse componenti del flusso veicolare

La collocazione della strada in ambito metropolitano o a bassa densità abitativa comporta una distribuzione delle componenti dei flussi diversa, dalla quale:

V_d = 70km/h in ambito metropolitano
V_d = 80km/h per bassa densità abitativa

Per quel che concerne la disponibilità a tollerare l'interferenza da parte dell'utente, si è ipotizzato inizialmente che la soglia di tolleranza massima Δ_{max} vari al variare della velocità media desiderata V_d con la legge rappresentata in figura. Tale legge è stata verificata anche in realtà virtuale per mezzo della sperimentazione dei sorpassi in debito di sicurezza, che verrà discussa in seguito.

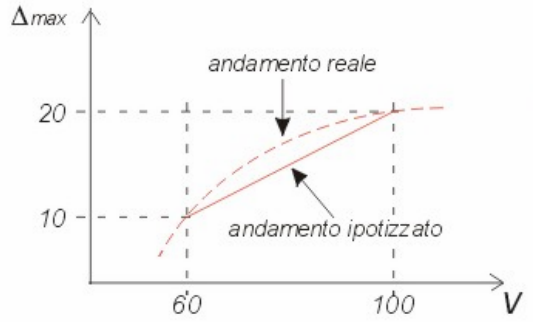


Figura 22- legge della tolleranza dell'utente sottoposto ad interferenze veicolari

Noto il valore massimo, la tolleranza dell'utente si riduce in funzione del ritardo accumulato rispetto al tempo di percorrenza programmato.

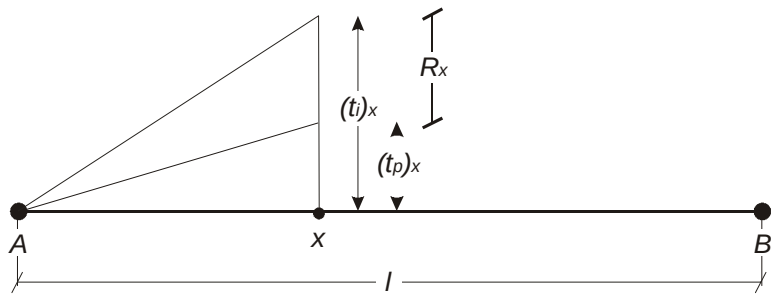


Figura 23 - relazione tra tolleranza, ritardo accumulato e tempo di percorrenza programmato

Per lo spostamento dal nodo A al nodo B l'utente programma un tempo:

$$(t_p)_x = \frac{x}{\overline{V}_d}$$

in realtà esso ne impiega un altro che non è funzione della velocità desiderata, ma della condizione di circolazione che incontra sull'infrastruttura:

$$(t_i)_x = \frac{x}{\overline{V}}$$

il che significa che l'utente accumula un ritardo, rispetto alle sue previsioni, pari a:

$$R_x = x * \left(\frac{1}{\overline{V}} - \frac{1}{\overline{V}_d} \right)$$

La legge di variazione della soglia di tolleranza Δ con il ritardo accumulato R_x viene definita ipotizzando una dipendenza lineare tra le due variabili. Partendo dalle seguenti condizioni estreme:

per $R_x = 0$ $\qquad \Delta = \Delta_{max}$

per $R_x = l/V_d$ $\Delta = 0$

si arriva a definire la relazione:

$$\Delta = \Delta_{\max} * \left(1 + \frac{x}{l} - \frac{x}{l} * \frac{\overline{V}_d}{\overline{V}} \right)$$

Definito lo scenario delle variabili, lo schema logico di calcolo è di immediata messa a punto. Esso si articola su un numero ristretto di passaggi:

- per prima cosa va definita la velocità di base V_b della strada, in funzione delle sole caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, e si calcola la velocità media V_f del flusso veicolare, sulla base della curva di deflusso entrando con valori di densità (D) e percentuale di distanza di visibilità per il sorpasso garantita;

- quindi si colloca l'infrastruttura viaria nel contesto territoriale, al fine di determinare la velocità desiderata media V_d caratteristica;

- infine si valuta la lunghezza del collegamento e, per ogni sezione x del tracciato, è possibile stimare il ritardo accumulato dal singolo utente

A questo punto si è in grado di definire la soglia di tolleranza Δ che caratterizza ciascun utente della specifica infrastruttura viaria nelle condizioni di esercizio ipotizzate e procedere così al calcolo della probabilità.

Il generico veicolo marciante a velocità V_x ha la probabilità di incontrare veicoli che marciano ad una velocità inferiore alla propria di un Δ predeterminato pari a:

$$(p_x)_{i-\Delta} = \int_0^{V_x-\Delta} f(v)dv \Big/ \int_0^{V_x} f(v)dv$$

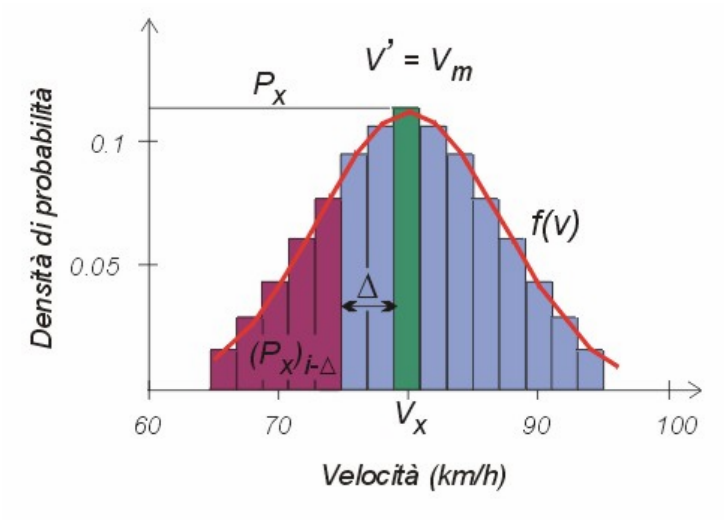


Figura 24 - Distribuzione delle velocità relative alla P2

I veicoli del flusso N che non tollerano l'interferenza generata dagli utenti suddetti sono pari alla percentuale del flusso totale che viaggia alla velocità V_x:

$$p_x = \frac{N_{V_x}}{N} = f(V_x)$$

Pertanto la probabilità che tali veicoli non tollerino le interferenze risulta:

$$\left[(p_x)_{i-\Delta}\right]_{V_x} = p_x * (p_x)_{i-\Delta}$$

La probabilità cumulata che il generico veicolo del flusso N non tolleri

nell'arco temporale di un'ora le interferenze subite così da determinare domanda di sorpasso è:

$$\left(p_2\right)_{t=1} = \int_0^{V_{\max}} \left[\left(p_x\right)_{i-\Delta}\right]_V dv$$

5.5 - Q3 - Probabilità che la visuale libera sia sufficiente a compiere il sorpasso

Nel momento in cui il generico utente dell'infrastruttura viaria subisce un'interferenza veicolare e non la tollera, si genera una "domanda di sorpasso".
Al fine di soddisfare tale esigenza l'utente deve valutare se la visuale libera offerta dalla strada è sufficiente o meno alla realizzazione "in sicurezza" della manovra di sorpasso, ovvero se garantisce almeno la distanza di visibilità completa per il sorpasso.

L'ANAS determina la percentuale di distanza di visibilità per il sorpasso garantita dal tracciato, semplicemente come la percentuale della lunghezza della strada con visuale libera che deve esere pari almeno a 460 m. Tale modello, a prescindere dal valore numerico che assume a riferimento, presta il fianco a forti critiche a causa dei presupposti logici sui quali è costruito:

- La distanza necessaria all'esecuzione della manovra di sorpasso viene valutata sulla base del "modello in velocità", oramai inattuale e sostituito dal "modello in accelerazione";

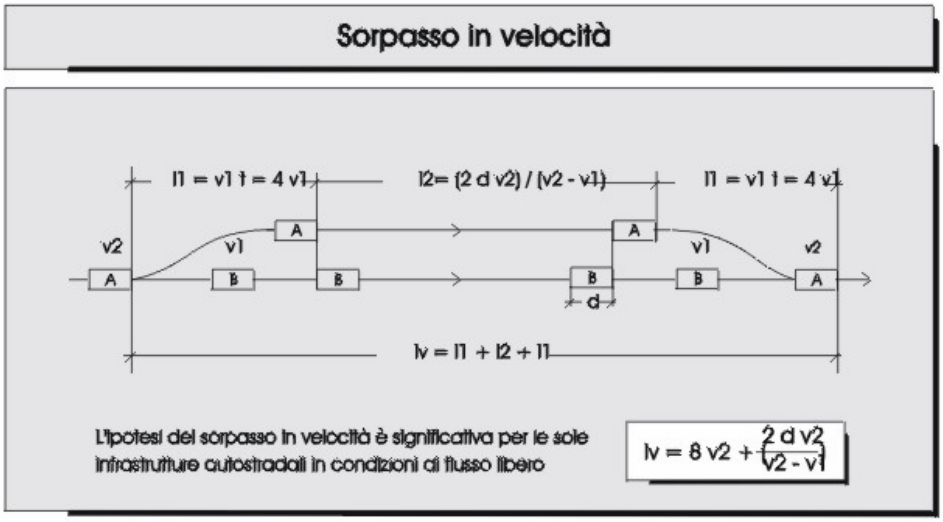


Figura 25 - Modello teorico del sorpasso in velocità

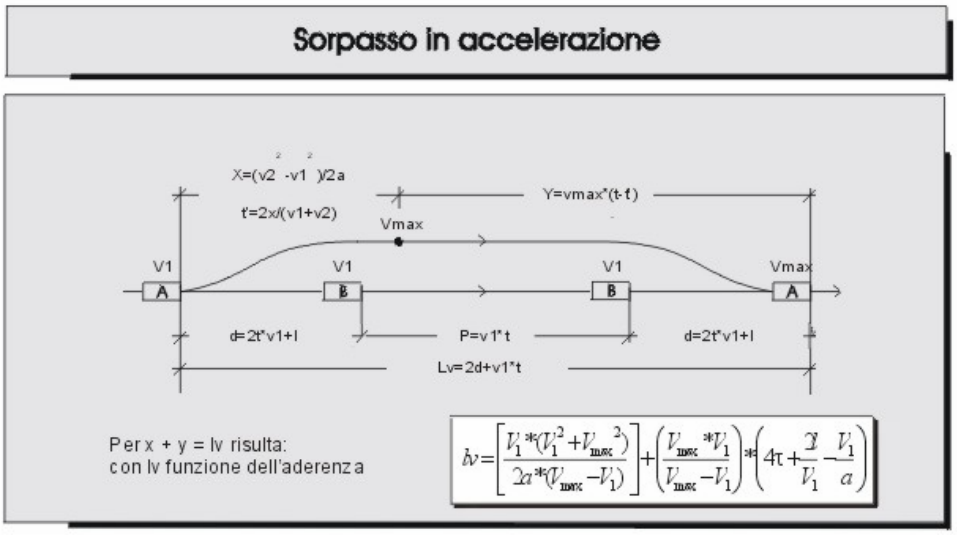


Figura 26 - modello teorico del sorpasso in accelerazione

- la distanza di visibilità è funzione della velocità del veicolo sorpassato, se si ipotizza che l'utente sopravveniente ricorre alla velocità massima compatibile con l'infrastruttura viaria per l'esecuzione della manovra, e ciò non giustifica assolutamente una sua assunzione costante.

Tali critiche avanzate trovano conferma nel grafico in figura.

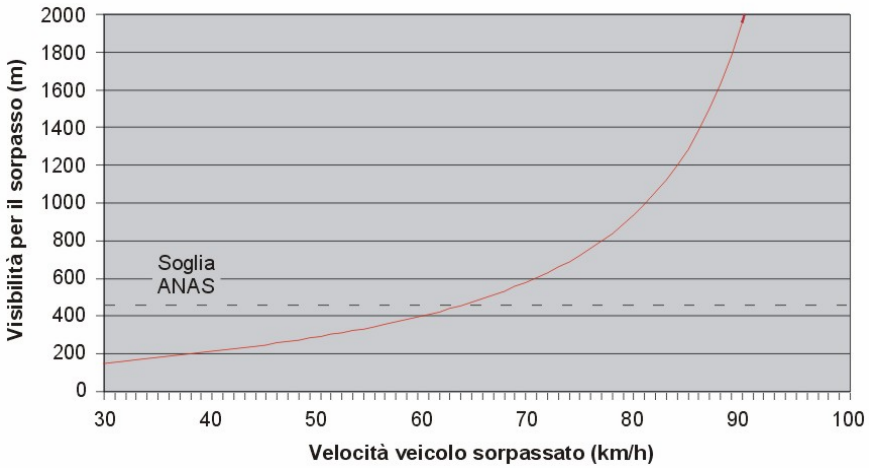


Figura 27 - Relazione tra Visuale libera e Velocità del veicolo

Il confronto illustrato mostra chiaramente come il modello in uso non costituisca un valido riferimento. Il valore numerico fissato dalla normativa rappresenta, in termini di sicurezza, una dimensione della visibilità per il sorpasso adeguata solo per una parte del range di velocità che caratterizza lo scenario stradale di riferimento; al contrario non garantisce una soluzione adeguata per le velocità più elevate dell'intervallo suddetto.
Questi difetti evidenti supportano la scelta di formulare un nuovo modello.

La probabilità Q_3 viene definita come la possibilità che "localmente", in una sezione stradale, la visuale libera dispobibile garantisca al singolo utente del generico flusso veicolare almeno la doppia distanza di sorpasso (ovvero la distanza di visibilità completa per il sorpasso).

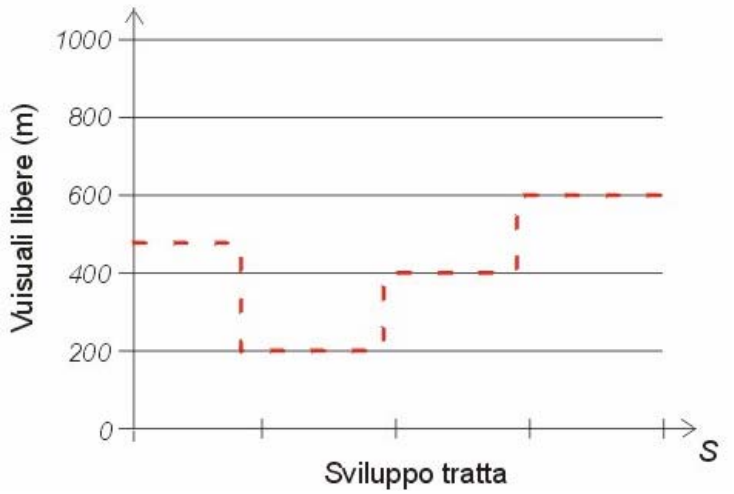


Figura 28 - Diagramma delle visuali libere

Il calcolo teorico della probabilià si basa sulla costruzione del diagramma delle visuali libere garantite dalla geometria del tracciato (figura 28). Sulla base di tale diagramma si individua il valore "locale" della visuale libera V_{li} e per ciascuna sezione si procede al calcolo della Q_3 ne l modo che segue.

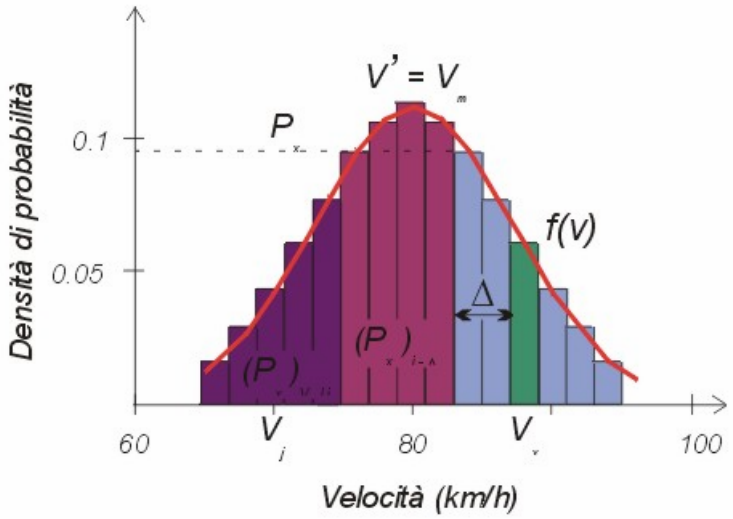


Figura 29 - Legge di distribuzione delle V relativo alla Q3

Assumendo l'ipotesi di distribuzione gaussiana delle velocità intorno al valore medio, il generico veicolo marciante a velocità V_x è in grado di sorpassare la quota parte di veicoli "non tollerati" che marciano ad una velocità inferiore o uguale alla velocità V_j tale che:

$$2*\left\{\left[\frac{V_j*(V_j^{\,2}+V_{\max}^{\,2})}{2a*(V_{\max}-V_j)}\right]+\left(\frac{V_{\max}*V_j}{V_{\max}-V_j}\right)*\left(4\tau+\frac{2l}{V_j}-\frac{V_j}{a}\right)\right\}=V_{li}$$

La velocità V_j così definita rappresenta la massima velocità "sorpassabile" dalla velocità V_x; quindi, per tale generica velocità, la percentuale di veicoli non tollerati "superabili" risulta essere:

$$(P_x)_{V_{li}}=\frac{\int_0^{V_j} f(v)dv}{\int_0^{V_x-\Delta} f(v)dv}$$

Il prodotto di tale grandezza per la percentuale di veicoli del flusso totale che viaggia alla velocità V_x restituisce il valore specifico della probabilità Q_3:

$$(Q_3)_{V_x,V_{li}} = \frac{\int_0^{V_j} f(v)dv}{\int_0^{V_x-\Delta} f(v)dv} * f(V_x)$$

La probabilità cumulata che i veicoli del flusso orario N dispongano di una visuale libera sufficiente a completare "in sicurezza" la manovra di sorpasso è:

$$(Q_3)_{V_{li},t=1} = \int_0^{V_{\max}} [(Q_3)_x]dv$$

5.6 - P4 – Probabilità che l'utente compia la manovra di sorpasso anche con visuale libera insufficiente

Constatato che lo sviluppo geometrico del tracciato dell'infrastruttura viaria non garantisce una visuale libera "locale" tale da completare la manovra di sorpasso in assoluta sicurezza, il generico automobilista non rinuncia in maniera assoluta e drastica a soddisfare la propria "esigenza" ma accetta un grado di rischio variabile da soggetto a soggetto.

Le situazioni reali nelle quali si può presentare una situazione di carenza di visuale libera sono differenti; senza dubbio la situazione più classica e diffusa è quella relativa ad una curva planimetrica realizzata in trincea o mezzacosta (figura 31); l'assenza di un banchettone di visibilità compromette la vista dell'automobilista.

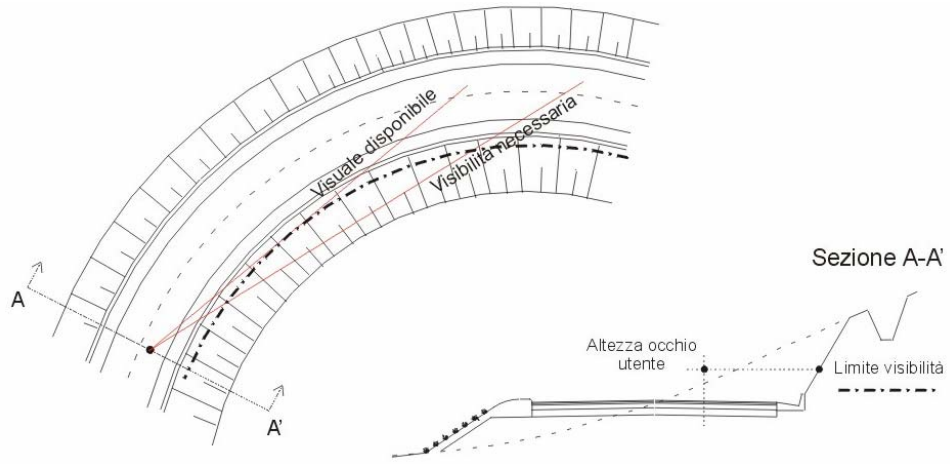
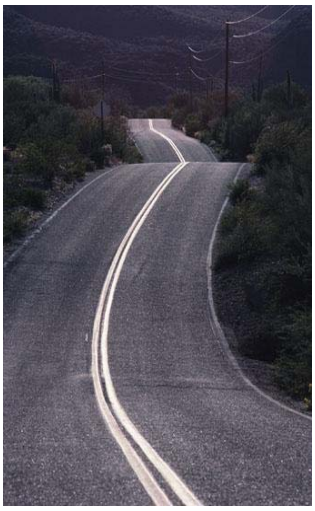


Figura 30 - Confronto tra Visuale disponibile e Visibilità necessaria



Altre situazioni diffuse in cui l'articolazione del tracciato preclude all'utente la possibilità di usufruire di un'adeguata visuale libera sono:
raccordo altimetrico convesso;
raccordo altimetrico concavo in condizioni di marcia notturna;
curva planimetrica con piattaforma a piano campagna e presenze antropiche a bordo strada.
Gli esempi dimostrano come l'evento discusso sia in realtà piuttosto frequente.

La "propensione al rischio" dell'automobilista può essere ricondotta a due aspetti fondamentali:

- il disagio subito precedentemente dall'utente;
- lo stato psico-fisico dell'individuo.

Tenendo conto di tali fattori, è possibile costruire una legge matematica che sia in grado di simulare l'attitudine al rischio degli utenti della strada; per conseguire l'obiettivo possono ritenersi lecite le seguenti ipotesi:

- sensibili componenti del flusso veicolare sono caratterizzate da comportamenti "estremi", individuabili sia negli eccessi di prudenza che nella mancanza di buon senso;
- una notevole percentuale di utenti , in debito di visuale e quindi di sicurezza, è disposta a compiere la manovra di sorpasso purché gli sia garantita una visuale pari almeno alla semplice distanza di sorpasso.

I presupposti avanzati consentono di fissare due condizioni necessarie alla formalizzazione analitica del comportamento degli utenti:

- una minima parte di automobilisti (5%) è disposta a compiere la manovra anche con una visuale libera pari ad un quarto della distanza di visibilità completa per il sorpasso;
- garantendo almeno la metà della distanza di visibilità completa (ovvero la distanza per il sorpasso semplice), la gran parte degli

utenti (80%) non rinuncia a soddisfare la propria esigenza di sorpasso.

Tenendo fissi a priori tali valori, la "legge comportamentale" che ne scaturisce consente di simulare la vocazione degli utenti:

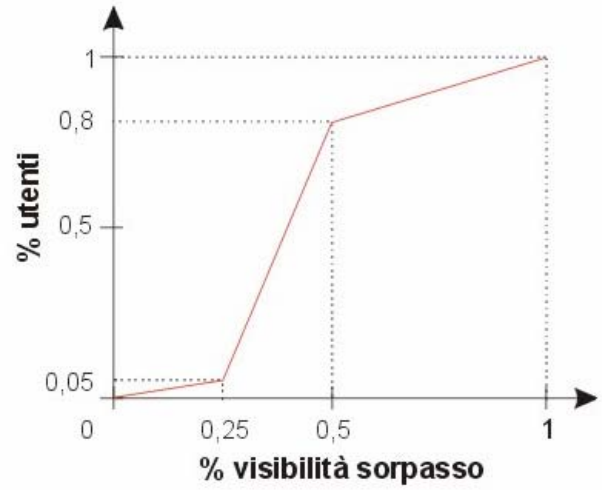


Figura 31 - Legge comportamentale degli utenti relativa alla P4

La probabilità di esecuzione del sorpasso in debito di sicurezza viene valutata per il singolo utente del flusso veicolare, in maniera "puntuale".

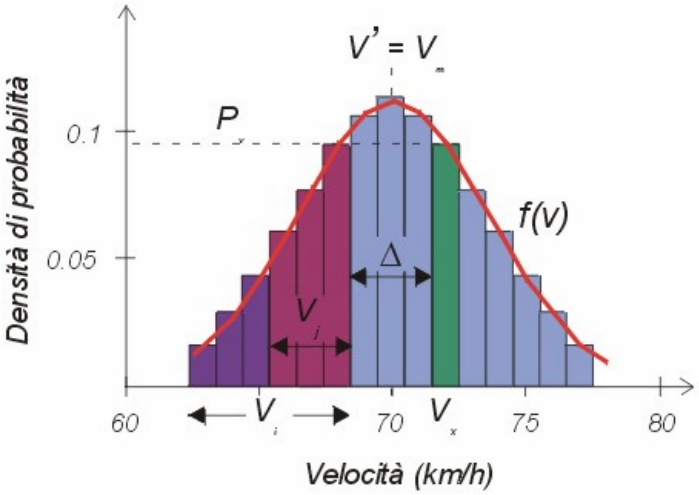


Figura 32 - Legge di distribuzione delle V relativa alla P4

Ipotizzando una distribuzione gaussiana delle velocità intorno al valor medio, il generico veicolo che marcia alla velocità V_x non tollera tutte le i-esime interferenze prodotte da veicoli marcianti a velocità tali che:

$$V_i \leq V_x - \Delta$$

Per il sorpasso di tali elementi l'utente x necessita di determinate distanze di visibilità $D_{s,j}$ ("modello in accelerazione") che tuttavia la geometria del tracciato, nella sua generica sezione k, può non garantire nella loro totalità. In particolare la quota parte j di veicoli non tollerati per i quali la visuale libera locale $D_{l,k}$ non assicura la visibilità completa per il sorpasso viene definita accertando che sia:

$$\%D_{s,j} = \frac{D_{l,k}}{D_{s,j}} < 1$$

Per queste interferenze, e solo per esse, la legge comportamentale formulata restituisce la percentuale di utenti disposta comunque ad eseguire la manovra:

$$L(\%D_{s,j}) = U_j$$

La probabilità P_4 per la generica velocità V_x viene valutata come:

$$P_4(V_x) = f(V_x) * \left[\sum_j U_j * f(V_j) \right]$$

Integrando la relazione sull'intero range di velocità individuato dalla gaussiana, si ottiene il valore della P_4 per il singolo utente che transita nella sezione k:

$$P_{4,k,t=1} = \int_0^{V_{\max}} P_4(v)dv$$

5.7 - Q5 - Probabilità che la corsia opposta risulti occupata

Nel momento in cui l'utente valuta che la visuale libera offerta localmente dal tracciato sia sufficiente ad eseguire la manovra di sorpasso, si affianca al veicolo che genera l'interferenza non tollerata e "apprezza" se la corsia invasa sia impegnata o meno; in base a questa verifica, l'automobilista prosegue nella propria azione oppure vi rinuncia, accodandosi nuovamente al veicolo non tollerato.
Il fatto che l'automobilista sopravveniente incontri, una volta invasa la corsia illegale, un altro veicolo sulla propria traiettoria dipende da diversi fattori:

- innanzitutto dall'intensità del traffico monodirezionale incrociato (N_m) e dalla sua composizione (traffico pesante, $\%T_p$);

- quindi dallo sviluppo altimetrico del tracciato (pendenze longitudinali, i_l).

Le diverse combinazioni dei fattori descritti portano alla determinazione di due distinte condizioni di marcia dei veicoli all'interno della corsia; ciascuna situazione comporta una precisa distanza media (D_m) tra due generici componenti del flusso monodirezionale: Vediamone il dettaglio.

Marcia fluida (flusso laminare):
i veicoli camminano distanziati l'uno dall'altro, senza subire interferenze.

$$D_m = \frac{V_m - N_m * (L + \tau * V_m)}{N_m}$$

Il termine che compare tra le parentesi, al numeratore, rappresenta l'occupazione "cinematica" del veicolo, costituita solo parzialmente dall'occupazione "fisica" (L).

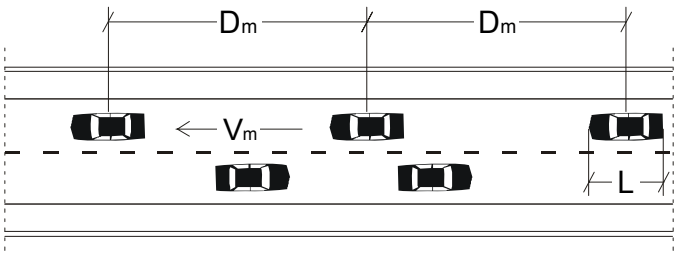


Figura 33 - rappresentazione marcia fluida

Marcia "a pacchetti"
i veicoli marciano in plotoncini (la cui composizione è variabile in funzione della densità veicolare) trattabili come semplici veicoli distanziati gli uni dagli altri.

$$D_m = \frac{V_m - (N_m / n_p)*(3*l + 2*d_a)}{(N_m / n_{p)}}$$

Anche in questo caso la lunghezza del pacchetto viene valutata portando in conto l'occupazione cinematica dei veicoli.

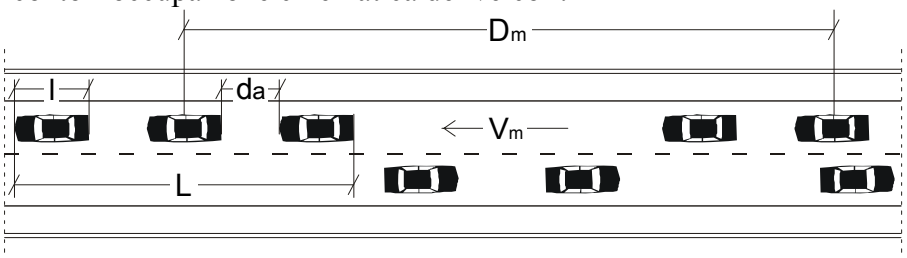


Figura 34 - rappresentazione marcia a pacchetti

Partendo dal presupposto ormai consueto di una distribuzione gaussiana delle velocità intorno al valore medio, il modello adottato restituisce il valore della probabilità Q_5 per il singolo veicolo del generico flusso veicolare.

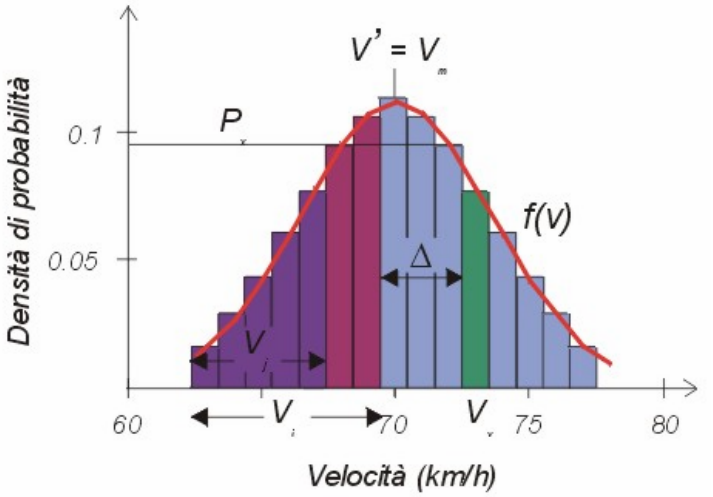


Figura 35 - distribuzione delle V secondo Q5

Il veicolo marciante a velocità Vx, incontrando nel proprio senso di marcia un veicolo non tollerato i, decide di affiancarlo qualora la visuale libera locale gli garantisce la distanza di visibilità completa per il sorpasso $D_{s,i}$; in base alle condizioni di marcia esistenti nella corsia invasa, l'utente dispone di uno spazio Dm che consente di definire la grandezza:

$$S_i = D_m - D_{s,i}$$

Qualora lo scarto S così definito risulti negativo, l'utente considera la corsia "illegale occupata"; al contrario per ciascuna automobile della quota parte j di veicoli non tollerati per i quali lo scarto è positivo, la percentuale di tempo utilizzabile di corsia opposta libera è pari a:

$$\%t_j = \frac{t_{libero,j}}{t_{incrocio}} = \frac{S_j / V_x}{D_m / V_m} \cong \frac{S_j}{D_m}$$

dove:
$t_{libero,j}$ = tempo durante il quale la corsia è da ritenersi libera;
$t_{incrocio}$ = tempo necessario all'incrocio con il successivo veicolo marciante in senso opposto.

Pertanto la probabilità che il generico veicolo x incontri la corsia opposta risulta essere:

$$Q_5(V_x) = \sum_j f(V_j) * \%t_j$$

La probabilità cumulata che il generico veicolo del flusso, in fase di sorpasso, incorra in un utente sopravveniente è pari a:

$$(Q_5)_{t=1} = \int_0^{V_{max}} Q_5(V)dv$$

5.8 - P6 - Probabilità che l'utente, nonostante la corsia "illegale" risulti occupata, esegua la manovra di sorpasso

La definizione dell'ultima probabilità che costituisce il primo livello probabilistico dell'albero degli eventi della manovra di sorpasso deve tener conto delle ipotesi adottate per l'analisi della P_4 e farle proprie. Infatti anche nel momento in cui l'utente, eseguendo la manovra di affiancamento al veicolo lento, giudica la corsia illegale occupata da un veicolo sopravveniente non rinuncia in maniera categorica a soddisfare l'esigenza di sorpasso ma accetta un certo grado di rischio. Tuttavia la "propensione al rischio" manifestata dall'automobilista nella situazione descritta deve ritenersi senza dubbio ridotta rispetto a quella esibita nel caso di visuale libera locale insufficiente, in quanto la possibilità che avvenga l'evento temuto (scontro) è più elevata e ciò funziona da deterrente per il comportamento dell'utente.

Sintetizzando la probabilità P_6 è influenzata dai seguenti fattori:

- disagio subito precedentemente;
- stato psico-fisico dell'utente;
- effetto psicologico indotto dall'occupazione della corsia;

L'ultimo termine caratterizza tale probabilità rispetto alla precedente e gioca un ruolo fondamentale nella definizione del grado di rischio assunto dall'individuo generico. La presenza di un altro veicolo sulla propria traiettoria induce una riduzione nella disponibilità dell'utente a completare il sorpasso, riduzione tanto maggiore quanto più probabile è stimato l'evento incidentale. Partendo da tali ipotesi e tenendo conto dell'espressione adottata per la prima legge comportamentale formulata, è possibile definirne una seconda.

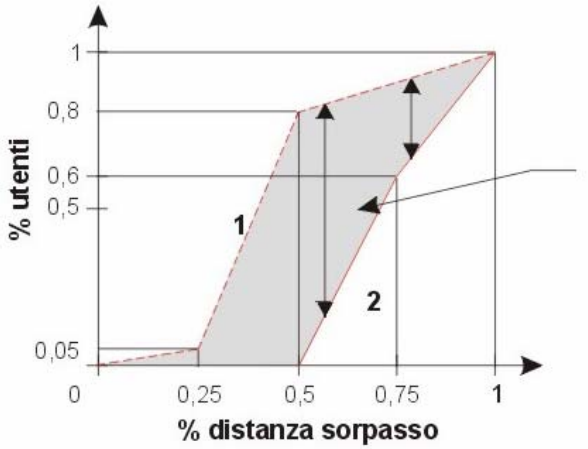
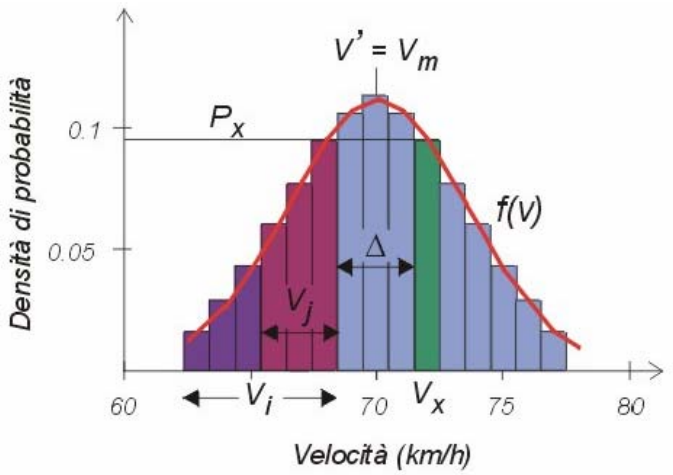


Figura 36 - riduzione del grado di rischio indotta dalla presenza di un veicolo sulla propria traiettoria

La nuova legge comportamentale è stata costruita, come è ben visibile nel grafico, incrementando la riduzione al diminuire della percentuale di spazio per il sorpasso garantita.



Il riferimento comportamentale è stato dedotto da sperimentazioni tenute in simulazione in realtà virtuale.

Il metodo di calcolo introdotto per la probabilità P_4 può essere adottato tale e quale per la P_6.
Per ciascuna interferenza j tra quelle non tollerate che il generico utente che marcia alla velocità V_x non è in grado di superare a causa dei veicoli provenienti in senso opposto, la legge comportamentale formulata

restituisce la percentuale di utenti disposta comunque ad eseguire la manovra:

$$L_2(\%D_{s,j}) = U_j$$

La probabilità P_6 per la generica velocità V_x viene valutata come:

$$P_6(V_x) = f(V_x) * \left[\sum_j U_j * f(V_j) \right]$$

Estendendo la relazione all'intera distribuzione di velocità si ottiene la probabilità per il singolo utente del flusso:

$$(P_6)_{t=1} = \int_0^{V_{\max}} P_6(V) dv$$

6. Il software

La prima considerazione che emerge alla fine della modellazione delle probabilità è relativa alla infinità di dati da gestire su processo iterativo.
Infatti l'obiettivo perseguito di individuare un metodo, di facile utilizzo e capace di consentire una compiuta valutazione qualitativa della sicurezza di una infrastruttura stradale, rende necessario, come abbiamo detto nei paragrafi precedenti, suddividere l'infrastruttura in tratte omogenee al fine di valutare per ogni tratta, tutte le differenti condizioni di esercizio della strada in ordine alle:

- condizioni di traffico;
- motivazione della domanda;
- condizioni ambientali;
- periodi stagionali;
- ecc;

quindi per applicare lo schema alle tratte omogenee è necessario effettuare tante iterazioni quante sono le condizioni previste.

Brevemente a titolo esemplificativo se volessimo determinare le interferenze totali annue di una strada sarebbe necessario calcolare:

$$I_{totali} = P_1 * \frac{L_{(km)}}{\overline{V}_{(km/h)}} * N_{totali}$$

La relazione mostra chiaramente come la grandezza definita dipende da due variabili:

- il flusso veicolare;
- la velocità media;

Per quel che concerne la prima variabile, il volume di veicoli che transita su di una infrastruttura viaria, varia nel corso dell'anno in funzione del periodo stagionale e dell'ora del giorno. La sua definizione, quindi, non può prescindere da indagini condotte sul campo, le quali devono restituire

variazioni del traffico orario per giorno e tipologie di spostamenti e distribuzioni del Traffico Giornaliero Medio (TGM) nell'anno (figura __);

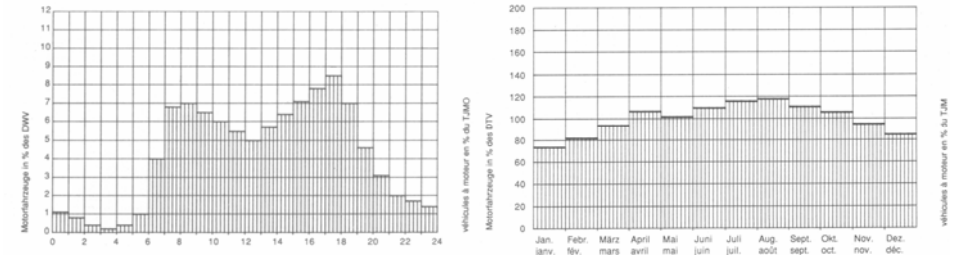


Figura 37 - Curve caratteristiche norme svizzere (USS)

È altresì possibile definire valori medi del TGM (figura __).

S.S./A. : n 18 TIRRENA INFERIORE
progr. : Km 255 + 010
località : CANAL GRANDE

comune : S. NICOLA ARCELLA
prov. : COSENZA
comp.to : CATANZARO

formula calcolo : ECE
itiner. intern. :
tipo rilevamen. : CSEM

tipo posto : CEE
gruppo : II
posto : n 3000

TRAFFICO GIORNALIERO MEDIO (T G M)

TIPI T G M / CAT. VEICOLI	0 MOTO	1 AUTO	2 A.<30q	3 A.>30q	4 A.TRENI	5 ARTIC.	6 BUS	7 T.ECC.	8 V.AGR.	PER 1+6	TIPO 1+2	TRAFFICO 3-8	TOTALE 1-8
TGM DIURNO PRIMAV.-EST.		3608	474	279	24	8	20	0	0	3628	4082	331	4413
TGM DIURNO AUTUNNO-INV.		2469	356	209	33	9	19	0	3	2488	2825	273	3098
TGM NOTTURNO PRIMAV.-EST.		1273	146	163	47	23	10	0	0	1283	1421	243	1664
TGM NOTTURNO AUTUNNO-INV.		980	317	288	114	56	3	0	0	983	1297	461	1758
TGM ANNUALE DIURNO		3039	415	244	29	9	20	0	2	3059	3454	304	3758
TGM ANNUALE NOTTURNO		1127	233	226	81	40	7	0	0	1134	1360	354	1714
TGM ANNUALE TOTALE		4166	648	470	110	49	27	0	2	4193	4814	658	5472

S.S./A. : n 18 TIRRENA INFERIORE
progr. : Km 316 + 690
località : S. FRANCESCO

comune : PAOLA
prov. : COSENZA
comp.to : CATANZARO

formula calcolo : ECE
itiner. intern. :
tipo rilevamen. : CSEM

tipo posto : CEE
gruppo : XIV
posto : n 3386

TRAFFICO GIORNALIERO MEDIO (T G M)

TIPI T G M / CAT. VEICOLI	0 MOTO	1 AUTO	2 A.<30q	3 A.>30q	4 A.TRENI	5 ARTIC.	6 BUS	7 T.ECC.	8 V.AGR.	PER 1+6	TIPO 1+2	TRAFFICO 3-8	TOTALE 1-8
TGM DIURNO PRIMAV.-EST.		8678	474	247	18	12	76	0	1	8754	9152	354	9506
TGM DIURNO AUTUNNO-INV.		6204	656	303	44	21	102	1	1	6306	6860	472	7332
TGM NOTTURNO PRIMAV.-EST.		1741	101	105	29	20	15	0	0	1756	1842	169	2011
TGM NOTTURNO AUTUNNO-INV.		971	142	127	111	35	15	0	0	986	1113	288	1401
TGM ANNUALE DIURNO		7441	565	275	31	17	89	1	1	7530	8006	414	8420
TGM ANNUALE NOTTURNO		1356	122	116	70	28	15	0	0	1371	1478	229	1707
TGM ANNUALE TOTALE		8797	687	391	101	45	104	1	1	8901	9484	643	10127

Figura 38 - Censimento ANAS

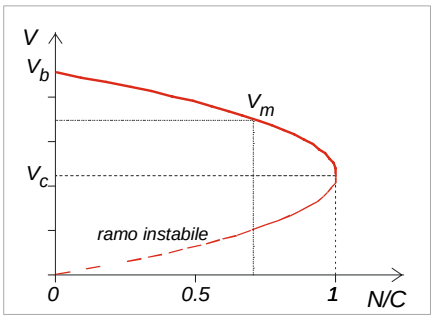
Disponendo di queste informazioni, è necessario elaborare una casistica generale delle disgregazioni temporali più indicative, che può essere generalizzata nel modo seguente:

Primavera Estate	Giorno	Punta
		Media
		Morbida
	Notte	Costante
Autunno Inverno	Giorno	Punta
		Media
		Morbida
	Notte	Costante

Il periodo temporale di riferimento (vale a dire l'anno) viene articolato su due periodi stagionali distinti, ognuno dei quali è poi strutturato su quattro fasce orarie giornaliere: tre diurne ed una notturna.

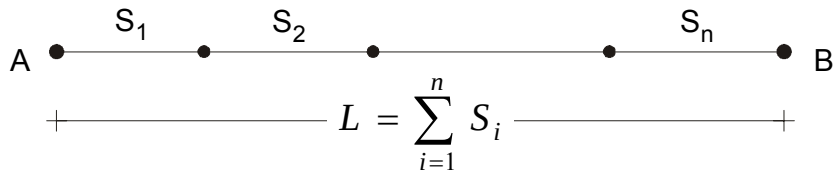
La definizione della velocità media deve tener conto del traffico e del carico di veicoli pesanti, ma si articola fondamentalmente su due operazioni:

- caratterizzazione dello scenario stradale (sezione, velocità di base, % distanza di visibilità per il sorpasso garantita);
- ricostruzione dell'articolazione delle pendenze longitudinali.



Ciò consente di determinare la curva di deflusso rappresentativa dell'infrastruttura.

Analizzando l'intero tracciato, questo si organizza su più tratte omogenee, dal punto di vista della curva di deflusso e della capacità della sezione, elaborando un'opportuna casistica:



Sulla base di tutte queste informazioni raccolte ed elaborate, si può calcolare il numero di interferenze che caratterizzano l'infrastruttura specifica, calcolando:

- selezione delle tratte omogenee (per curva di deflusso e capacità);
- stima dei flussi orari caratteristici e durata delle differenti disgregazioni temporali individuate nell'anno;
- calcolo delle interferenze totali annue per tratta:

$$I_{TA,i} = P_1 * L_i * \left[\left(t_{g,P/E} * \sum_{P/E} \frac{t_{h,\,fascia} * N_{h,\,fascia}}{\overline{V_{fascia}}} \right) + \left(t_{g,A/I} * \sum_{A/I} \frac{t_{h,\,fascia} * N_{h,\,fascia}}{\overline{V_{fascia}}} \right) \right]$$

- calcolo delle interferenze totali annue per l'infrastruttura:

$$I_{TA} = \sum_{i=1}^{n} I_{TA,i}$$

Per poter stimare il numero di sorpassi in debito di sicurezza che avvengono sull'infrastruttura specifica nell'arco temporale annuale è necessario moltiplicare le interferenze precedentemente calcolate per le probabilità che compongono il primo livello probabilistico dell'albero degli eventi.

Le strade che si aprono dinanzi al progettista sono due: la prima consiste nell'individuare un valore medio delle probabilità, in maniera da considerarlo caratteristico per l'intera infrastruttura viaria; la seconda, invece, prevede di applicare il calcolo dei sorpassi "a rischio" per ciascuna tratta e disgregazione temporale individuata, per poi procedere alla loro somma. Nel dettaglio i passaggi fondamentali delle procedure delineate.

1° procedura

Primavera Estate	Giorno	Punta	$P_{2,1}$	$P_{2,P/E} = \sum_{i=1}^{4} \frac{P_{2,i} * t_{h,i}}{24}$
		Media	$P_{2,2}$	
		Morbida	$P_{2,3}$	
	Notte	Costante	$P_{2,4}$	
Autunno Inverno	Giorno	Punta	$P_{2,5}$	$P_{2,P/E} = \sum_{i=1}^{4} \frac{P_{2,i} * t_{h,i}}{24}$
		Media	$P_{2,6}$	
		Morbida	$P_{2,7}$	
	Notte	Costante	$P_{2,8}$	

$$P_{2,tratta} = \frac{P_{2,P/E} + P_{2,A/I}}{2}$$

La procedura illustrata va ovviamente reiterata per tutte le probabilità in causa e per ciascuna tratta; alla fine i sorpassi in debito di sicurezza totali annui si determinano come:

$$S_{TA} = I_{TA} * \frac{\sum_{tratte} \Pi P * L}{L_{tot}}$$

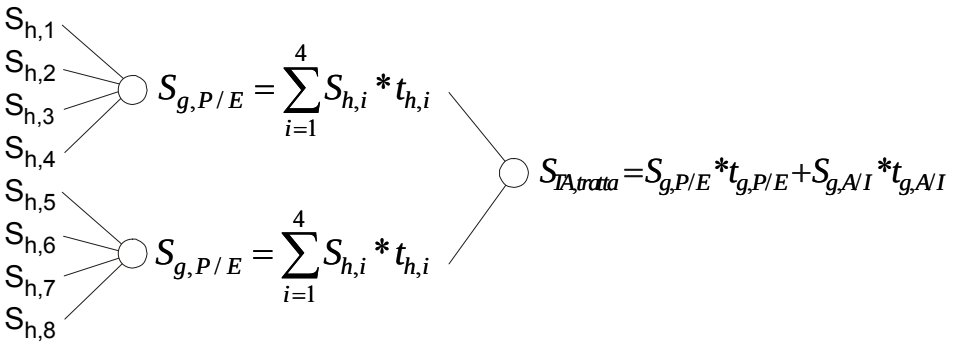
2° procedura

Primavera Estate	Giorno	Punta	$P_{1,1}..P_{6,1}$	$\longrightarrow \Pi P_1$
		Media	$P_{1,2}..P_{6,2}$	$\longrightarrow \Pi P_2$
		Morbida	$P_{1,3}..P_{6,3}$	$\longrightarrow \Pi P_3$
	Notte	Costante	$P_{1,4}..P_{6,4}$	$\longrightarrow \Pi P_4$
Autunno Inverno	Giorno	Punta	$P_{1,5}..P_{6,5}$	$\longrightarrow \Pi P_5$
		Media	$P_{1,6}..P_{6,6}$	$\longrightarrow \Pi P_6$
		Morbida	$P_{1,7}..P_{6,7}$	$\longrightarrow \Pi P_7$
	Notte	Costante	$P_{1,8}..P_{6,8}$	$\longrightarrow \Pi P_8$

Le produttorie così calcolate consentono di definire i sorpassi in debito di sicurezza per ciascuna disgregazione:

$$S_{h,1} = \Pi P_1 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,2} = \Pi P_2 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,3} = \Pi P_3 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,4} = \Pi P_4 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,5} = \Pi P_5 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,6} = \Pi P_6 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,7} = \Pi P_7 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$
$$S_{h,8} = \Pi P_8 * N_{h,fascia} * (L_{tratta} / \overline{V}_{fascia})$$

da cui si ottiene:



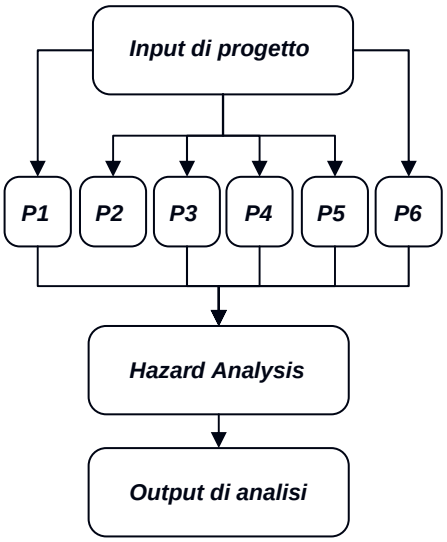
ed infine:

$$S_{TA} = \sum_{tratte} S_{TA,tratta}$$

La numerosità dei calcoli da eseguire evidenzia la necessità di elaborare un software che consenta di velocizzare e semplificare il complesso processo di computo.

Oltre a semplificare il calcolo il software deve essere in grado di agevolare l'inserimento dati e consentire un confronto tra le diverse iterazioni eseguite, al variare delle condizioni al contorno.

Si è pensato così di realizzare un codice di calcolo esclusivamente dedicato al primo livello probabilistico dell'albero del sorpasso in debito di sicurezza che permetta, a valle dell'inserimento degli input di progetto, di calcolare, indipendentemente e separatamente, le sei probabilità del detto primo livello probabilistico dell'albero.
A valle del calcolo delle probabilità, si ritiene di applicare il modulo di calcolo dell'hazard analysis che fornisce i dati di output archiviati per iterazione.
Di seguito si presenta il diagramma a blocchi del codice:



Il codice è stato progettato con Visual Basic, il quale consente di realizzare facilmente i Form per l'inserimento dei dati di input ed archiviare per ogni iterazione i risultati su fogli excel.
Il format generale è diviso in quattro sezioni principali:

- dati di input, in cui si inseriscono le variabili di carattere generale valide per ogni probabilità;

- sezione per l'intervento di mitigazione suddivisa in:
    - interventi strutturali, dove è possibile implementare il numero di corsie per una certa percentuale della tratta, inserendo anche il costo parametrico a metro lineare;

- interventi strutturali, in cui si prevede il miglioramento della visuale libera per mezzo della riduzione di ostacoli laterali in curva, del miglioramento dei raccordi verticali, avendo anche in questo caso la possibilità di inserire il costo parametrico per metro lineare;
- interventi gestionali, in cui si prevede la limitazione al transito dei veicoli pesanti inserendo la %Tp e la relativa valutazione dei costi o benefici indiretti;

- dati di output, in cui vengono archiviate le probabilità finali e le stesse a valle di un intervento di mitigazione, fino ad un numero massimo di cinque iterazioni. In questo modo è possibile effettuare dei confronti ed apportare delle modifiche per l'entità della mitigazione;

- l'ultima sezione invece è dedicata alla parte modellistica delle probabilità in oggetto; l'architettura della modellistica è articolata in sei cartelle, una per ogni probabilità in cui si ritiene necessario, nella fase di input, inserire le variabili sintetiche relative a ciascuna.

Si è pensato di distinguere tra le variabili generiche, valide per tutte le probabilità e le variabili di dettaglio, valide per ogni singola probabilità, al fine di semplificare ulteriormente la fase di caricamento dati.

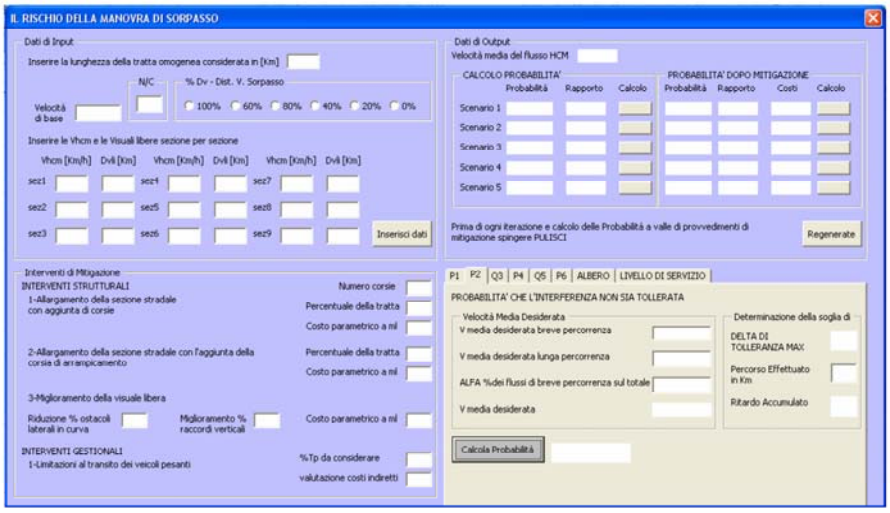


Figura 39 - Software Form per inserimento dati e calcolo

6.1 Il range di variabilità delle P

Una volta formulati i modelli si è proceduto a verificare il range di variabilità di ogni singola P al variare delle condizioni al contorno.
Questo tipo di verifica è stata necessaria per:

- comprendere come variano le Probabilità in funzione delle variabili in gioco;
- verificare il peso tra le variabili;
- individuare su quali variabili è necessario intervenire per la calibrazione del modello.

Per questa attività è stato di grande aiuto l'utilizzo del software progettato, che ha consentito la possibilità di formulare e verificare "n" ipotesi, con una consistente riduzione del tempo di analisi.
Di seguito l'analisi di variabilità delle Probabilità oggetto dello studio:

Range P1 – Probabilità che si determinano interferenze con i veicoli lenti

Per valutare il dominio di variazione della probabilità P_1 sono state ipotizzate differenti distribuzioni di velocità, cercando di rappresentare le situazioni reali più frequenti; per ciascuna distribuzione si è poi proceduto al calcolo della probabilità cumulata con metodi numerici.
Sono state trascurate distribuzioni normali delle velocità (media coincidente con moda, distribuzione teorica), in quanto qualunque siano i valori di media e scarto quadratico medio caratteristici, il modello restituisce sempre un valore di P_1 pari a 0,5 (valore teorico della probabilità).
Per una verifica corretta del comportamento della grandezza si sono considerate:

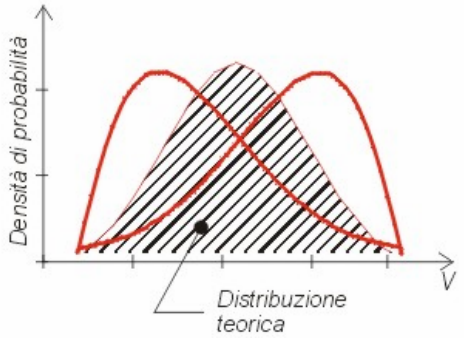
- distribuzioni compatibili con le velocità medie misurate sulla viabilità extraurbana ad una carreggiata;

- range di velocità variabili tra V_{min} e V_{max} atte a rappresentare livelli di interferenza sensibilmente diversi;

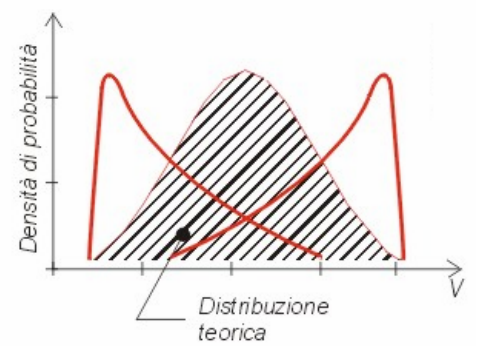
- distribuzioni di probabilità tali da simulare lo scenario completo espresso da diverse condizioni di circolazione.

In particolare sono state considerate tipologie caratteristiche di distribuzioni delle velocità:

1. distribuzioni di Poisson $P_m = \frac{a^m}{m!}e^{-a}$ (curva teorica), con media prossima alla moda.



2. distribuzioni fortemente squilibrate verso i valori minimi e massimi di velocità



Al variare della forma della curva e della differenza tra velocità media e velocità di moda, il valore di P_1 risulta sempre pari al valore teorico 0,50.

Range P2 – Probabilità che l'interferenza non sia tollerata

Al fine di valutare il campo di variabilità della P_2 e dovendo gestire allo stesso tempo quattro variabili indipendenti l'una dall'altra (D, % dv, x/l e V), si è ritenuto necessario fissarne una a priori. In particolare, su un tracciato di 10 Km di lunghezza, due corsie per senso di marcia, si sono eseguite le iterazioni fissando la velocità e facendo variare tutte le altre variabili. Le iterazioni sono state eseguite per classi di velocità ogni 15 km/h da 60 Km/h fino alla velocità di 120 Km.

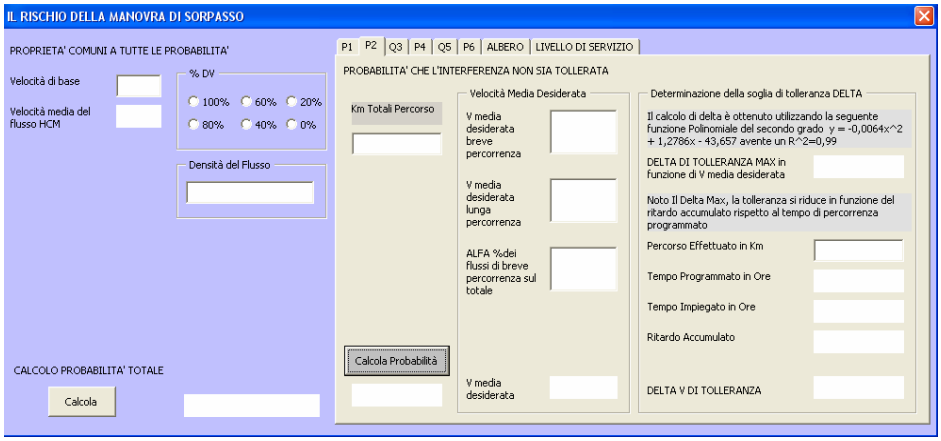


Figura 40 - Software Form di calcolo per la P2

Il form è stato progettato consentendo l'inserimento:

- della lunghezza in Km della tratta omogenea considerata;
- della percentuale dei flussi di breve e lunga percorrenza;
- ed il calcolo del delta di tolleranza in Km/h in funzione del ritardo accumulato rispetto al livello di servizio offerto;

I valori tabellati fanno riferimento ad un'unica direzione di marcia e al singolo utente del flusso veicolare; il campo di "variabilità medio" è abbastanza ampio e va da un valore minimo di 0,12 ad uno massimo pari a 0,57, distinto per classi di velocità.

V base	Fasce di Probabilità	*range di P2* min	max
60 km	bassa	*0,12*	*0,27*
75 km	medio bassa	*0,13*	*0,34*
90 km	media	*0,15*	*0,41*
105 km	medio alta	*0,18*	*0,51*
120 km	alta	*0,19*	*0,57*

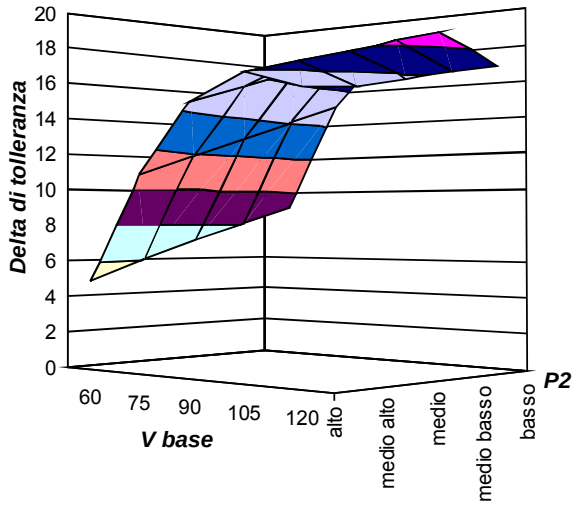


Figura 41 - Variazione della P2 in funzione del Delta di tolleranza e la V_{base}

Tabella 7 - Variabilità della P2 in funzione di N/C e Dv

		100% dv						80% dv						60% dv					
	x/L	0%	20%	40%	60%	80%	100%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Densità	0,1	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271	0,271
	0,2	0,364	0,365	0,366	0,367	0,368	0,369	0,364	0,365	0,366	0,367	0,368	0,369	0,364	0,368	0,371	0,375	0,378	0,382
	0,3	0,438	0,439	0,441	0,443	0,444	0,446	0,438	0,441	0,445	0,448	0,451	0,455	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,474
	0,4	0,364	0,370	0,375	0,381	0,386	0,392	0,364	0,374	0,383	0,393	0,403	0,413	0,364	0,380	0,397	0,414	0,432	0,450
	0,5	0,272	0,288	0,304	0,322	0,340	0,359	0,272	0,290	0,310	0,330	0,352	0,374	0,272	0,296	0,321	0,348	0,378	0,409
	0,6	0,159	0,181	0,204	0,230	0,258	0,289	0,159	0,183	0,210	0,239	0,272	0,309	0,159	0,186	0,216	0,250	0,288	0,331
	0,7	0,047	0,062	0,082	0,105	0,135	0,171	0,047	0,063	0,084	0,110	0,142	0,181	0,047	0,066	0,091	0,124	0,166	0,219
	0,8	0,007	0,013	0,024	0,042	0,072	0,118	0,007	0,013	0,025	0,045	0,079	0,131	0,006	0,013	0,026	0,049	0,087	0,146
	0,9	0,000	0,001	0,004	0,015	0,043	0,111	0,000	0,001	0,005	0,017	0,051	0,133	0,000	0,001	0,005	0,020	0,061	0,160
	1	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485

		40% dv						20% dv						0% dv					
	x/L	0%	20%	40%	60%	80%	100%	0%	20%	40%	60%	80%	100%	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Densità	0,1	0,272	0,272	0,273	0,274	0,275	0,276	0,272	0,275	0,278	0,282	0,285	0,289	0,271	0,281	0,290	0,300	0,310	0,320
	0,2	0,364	0,372	0,379	0,387	0,394	0,402	0,364	0,378	0,392	0,407	0,422	0,437	0,364	0,388	0,414	0,440	0,468	0,497
	0,3	0,438	0,453	0,469	0,485	0,502	0,519	0,438	0,461	0,485	0,510	0,535	0,562	0,438	0,467	0,497	0,529	0,562	0,597
	0,4	0,364	0,388	0,414	0,440	0,468	0,497	0,364	0,394	0,426	0,460	0,496	0,534	0,364	0,398	0,433	0,472	0,512	0,556
	0,5	0,272	0,302	0,334	0,370	0,408	0,449	0,272	0,305	0,342	0,382	0,425	0,473	0,271	0,309	0,349	0,395	0,444	0,498
	0,6	0,159	0,189	0,223	0,262	0,306	0,356	0,159	0,192	0,231	0,275	0,326	0,384	0,159	0,194	0,235	0,282	0,336	0,399
	0,7	0,047	0,067	0,094	0,130	0,175	0,233	0,047	0,068	0,097	0,135	0,185	0,249	0,047	0,070	0,100	0,142	0,196	0,267
	0,8	0,006	0,014	0,028	0,053	0,096	0,164	0,007	0,014	0,030	0,058	0,106	0,183	0,007	0,014	0,030	0,058	0,106	0,183
	0,9	0,000	0,001	0,005	0,020	0,061	0,160	0,000	0,001	0,005	0,020	0,061	0,160	0,000	0,001	0,006	0,023	0,073	0,193
	1	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485	0,000	0,002	0,012	0,051	0,177	0,485

Il comportamento della probabilità illustrato è interessante, ma una valutazione della P_2 più corretta ai fini della verifica del rischio per una strada in esercizio è chiaramente costituita dal mantenere costante la percentuale di distanza di visibilità per il sorpasso (cioè si fa riferimento ad un'unica curva di deflusso) e far variare quindi la densità veicolare e lo sviluppo percentuale del tracciato.

La rappresentazione grafica di tali tabelle evidenzia un comportamento, conseguenza anche delle ipotesi di calcolo formulate. Infatti si può notare come l'intolleranza raggiunga i suoi valori massimi in corrispondenza di una densità veicolare pari a 0,3 e questo è giustificabile col fatto che per tale valore è stata ipotizzata la distribuzione di velocità più ampia sull'intero range di densità; inoltre la probabilità cresce evidentemente con lo sviluppo percentuale del tracciato e, a parità di sviluppo, con la densità. Infine i valori della P_2 aumentano uniformemente con il diminuire della percentuale di distanza di visibilità per il sorpasso garantita.

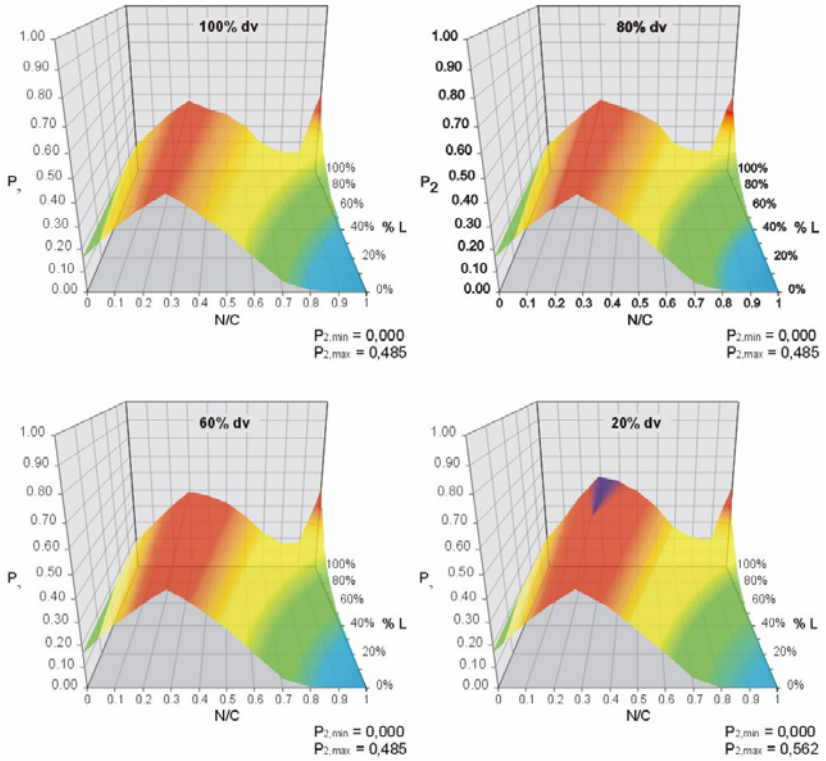
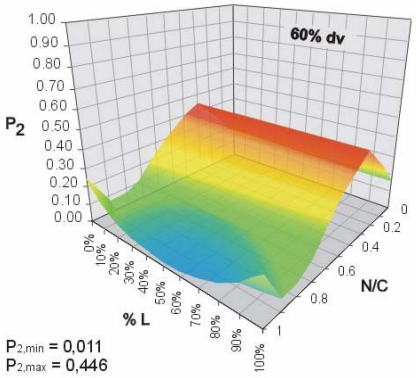


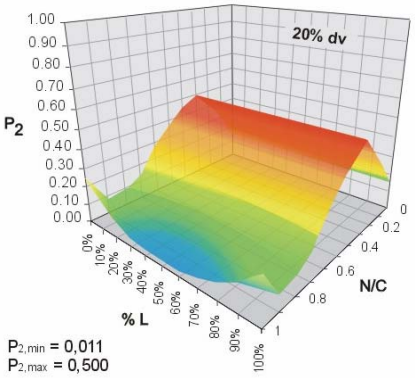
Figura 42 - P2 in funzione di L (percorso in m) e N/C

L'evidente variabilità di P_2 con la sezione pone dei rilevanti problemi nel momento in cui va determinato il valore di quest'ultima.
Infatti una stessa sezione stradale può rappresentare per una componente di utenti una percentuale dello sviluppo totale del tracciato, che essi devono coprire, minima rispetto ad un'altra quota parte di automobilisti. Tutto è funzione della tipologia di spostamento:

E' evidente come per un traffico locale (N_1) la sezione S-S' rappresenti una percentuale del proprio tracciato diversa rispetto ad un flusso di attraversamento (N2 e N3).
Tale problema di assegnazione del corretto valore della sezione è superabile se si ipotizza un traffico equilibrato nelle due direzioni di marcia di una infrastruttura, condizione questa frequente e quindi lecita per la viabilità ordinaria extraurbana che stiamo analizzando. In tal caso il valore di P_2 in S-S' risulterà dalla media dei valori calcolati nelle due direzioni.

E' possibile constatare come per valori di densità veicolari che escludono la congestione (vale a dire inferiori al 70% della capacità), la variabilità di P_2 in funzione della sezione è praticamente trascurabile a parità di ogni altra condizione.





Spostandosi lungo una direttrice individuata da un valore particolare della densità veicolare si può notare come la P_2 conservi un valore costante, se si eccettuano le situazioni critiche (N/C=0,8-0,9-1).
Questo comportamento consente di ovviare alla difficoltà suddetta, visto che consente di stimare la probabilità in funzione della sola densità, indipendentemente dal valore della sezione.

Un'altra osservazione interessante è relativa alla variazione della Probabilità legata al concetto di ritardo dell'utente.

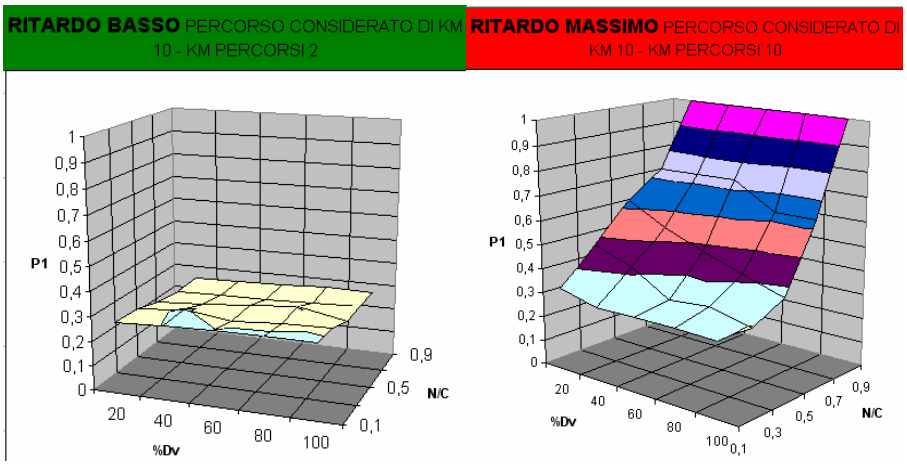


Figura 43 - la P2 in funzione di N/C e %Dv per condizioni di Ritardo Basso ed Alto

In condizioni di assenza di ritardo si nota come al variare di N/C e %Dv la variazione della P sia tra 0,2 e 0,3, ma se l'esposizione dell'interferenza si protrae nel tempo, la variazione torna ad essere pari alla condizione di massimo ritardo.

Nasce quindi la necessità di considerare la combinazione tra le variabili, infatti in condizioni di ritardo massimo l'utente non tollera l'interferenza e si predispone al sorpasso.

Range Q3 – Probabilità che la visuale libera non sia sufficiente a compiere la manovra di sorpasso.

L'elevato numero di variabili coinvolte nel computo della probabilità e l'altrettanto ampio campo di variabilità di ciascuna grandezza non ha comportato grosse complicazioni grazie all'utilizzo del programma.
Per l'analisi della probabilità è stato comunque necessario effettuare le verifiche mantenendo fisse alcune variabili e facendone variare altre.

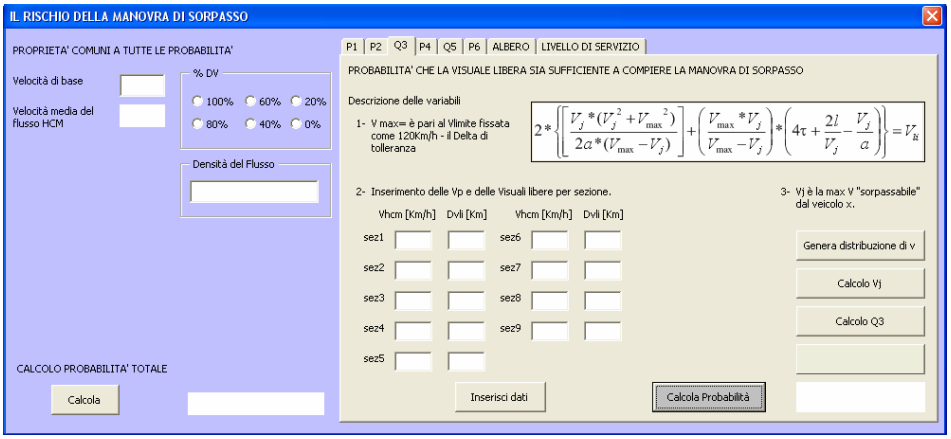


Figura 44 - Software Form per il calcolo della Q3

Il format progettato consente anche di inserire per un massimo di 10 sezioni, nel caso in cui ci siano dei rilevamenti, la velocità V_{hcm} (velocità del flusso) e la distanza di visuale libera D_{vli}. Nel caso invece di nuova progettazione si può inserire la V85% e le D_{vli} come calcolato da progetto.

È importante sottolineare che il delta di tolleranza non è stato preso costante ma calcolato ogni volta in funzione delle curve di deflusso scelte, il rapporto N/C e la distanza di visibilità per il sorpasso.

Le grandezze presenti nel "modello in accelerazione" possono essere così stimate:

- l = 4 m (tenendo conto del parco veicolare circolante in Italia);

- t = 1 sec (valore ritenuto opportuno nonostante la normativa abbia alzato il tempo psicotecnico di reazione a 2 sec, in quanto si sta analizzando una manovra che l'utente ha già preparato);

- a = 5 m/sec^2 (ottenuto come prodotto tra l'accelerazione di gravità e l'aderenza longitudinale, posta pari a 0,5 tenendo conto dei valori sperimentali che l'aderenza stessa manifesta in condizioni di asfalto asciutto e bagnato);

- V_{max} = 100 km/h (95a percentile della distribuzione di velocità relativa alla condizione di marcia isolata):

Partendo da questi presupposti il modello teorico formulato restituisce dei valori che, va ricordato, sono grandezze "puntuali", valide cioè nella generica sezione stradale in funzione della visibilità locale garantita.

Si riporta esclusivamente l'analisi relativa alla condizione più rischiosa in cui il ritardo è massimo e l'utente ha un delta di tolleranza molto limitato. In questo caso il calcolo corrisponde a condizioni di deflusso prossime alla criticità con alti valori di N/C e basse velocità Vhcm.
In questo caso la Q3 raggiunge valori massimi pari a 25%.

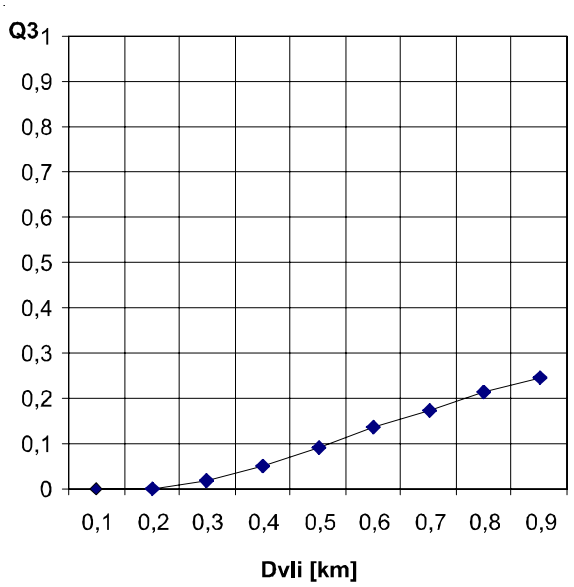


Figura 45 - Andamento della Q3 in funzione di D $_{visuale\ libera}$

Tabella 8 - Andamento Probabilità Q3 in funzione di D $_{visuale\ libera}$

Q3	RITARDO MASSIMO	Visuale libera [Km]								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Vhcm[Km/h]	45	0,00%	0,21%	1,84%	5,16%	9,24%	13,51%	17,25%	21,29%	24,33%

Questo risultato si riferisce al valore globale della Q3, calcolato effettuando la media pesata dei valori di visuale libera relativi all'intero sviluppo del tracciato considerato. (tracciato di progetto).

Range P4 – Probabilità che l'utente compia la manovra di sorpasso anche con visuale libera insufficiente.

Le condizioni che governano la probabilità in questione, sono le stesse che controllano la P_3 e per questo motivo le ipotesi adottate in precedenza trovano conferma anche in tale fase:

- il campo di variazione della densità veicolare è articolato su tre distinti livelli (basse, medie, alte probabilità);
- per ciascuna famiglia sono state individuate determinate distribuzioni di velocità, compatibili con le curve di deflusso.

L'introduzione di tre differenti tipologie di condizioni di servizio dell'infrastruttura consente di rappresentare i risultati (valori puntuali) forniti dal modello teorico secondo i suddetti scenari.

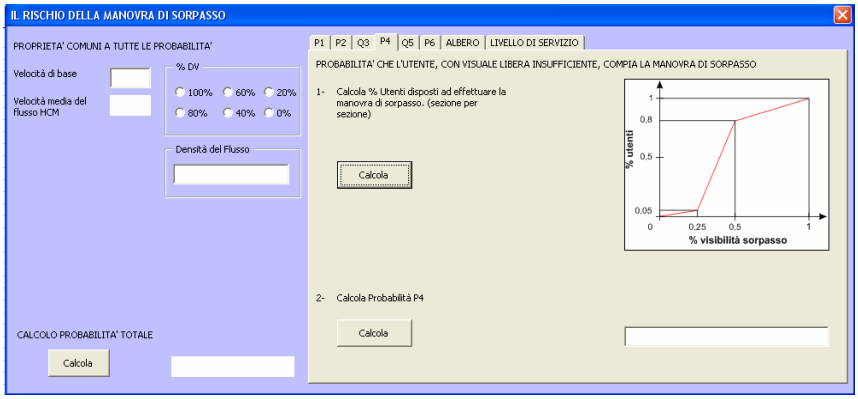
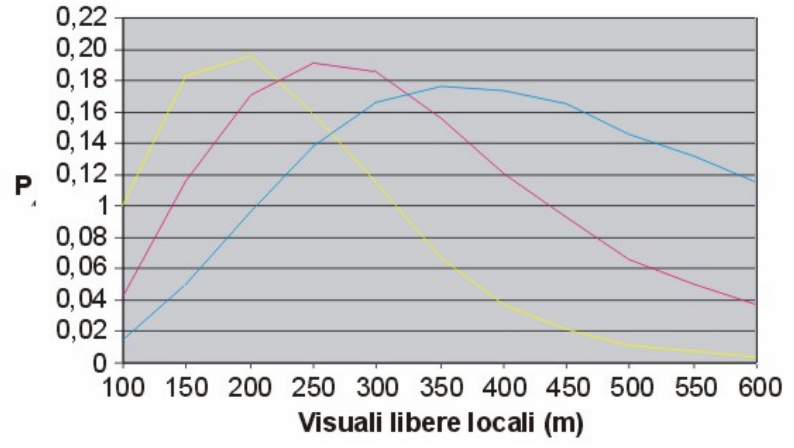


Figura 46 - Software Form per il calcolo della P4

Basse densità

Tabella 9 - Valori di P4 per Basse densità veicolari

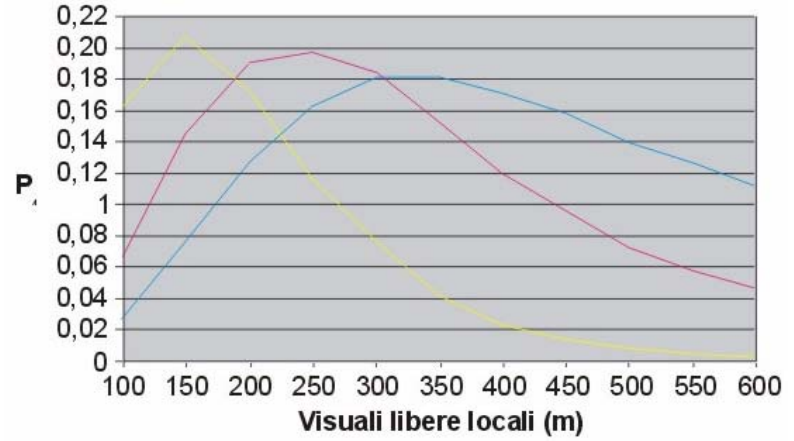
		Visuali libere										
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Velocità medie (km/h)	60	0,101	0,183	0,196	0,159	0,115	0,067	0,037	0,021	0,011	0,007	0,004
	70	0,043	0,116	0,171	0,191	0,186	0,156	0,121	0,093	0,066	0,05	0,037
	80	0,015	0,05	0,097	0,138	0,166	0,176	0,174	0,165	0,146	0,132	0,115



Medie densità

Tabella 10 - Valori di P4 per Medie densità veicolari

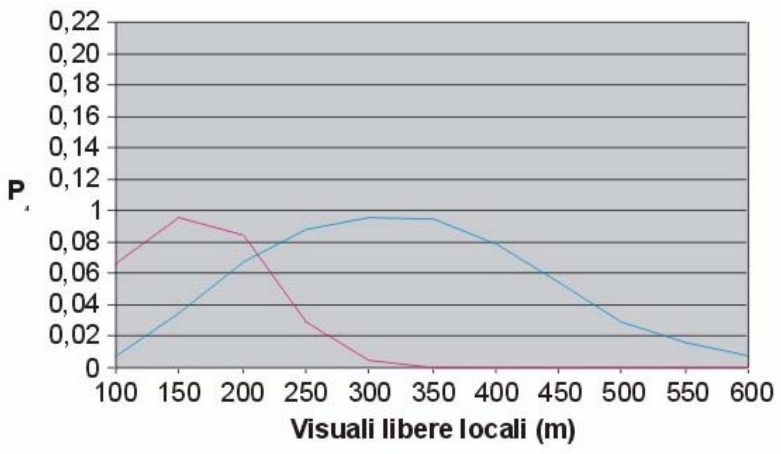
		Visuali libere										
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Velocità medie (km/h)	55	0,162	0,207	0,172	0,116	0,076	0,042	0,023	0,014	0,008	0,005	0,003
	70	0,067	0,145	0,19	0,197	0,184	0,152	0,12	0,096	0,072	0,058	0,046
	80	0,028	0,076	0,127	0,162	0,181	0,181	0,171	0,158	0,139	0,126	0,111



Alte densità

Tabella 11 - Valori di P4 per Alte densità veicolari

		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Vel. medie(km/h)	50	0,066	0,095	0,084	0,029	0,005	0	0	0	0	0	0
	70	0,007	0,034	0,067	0,087	0,095	0,094	0,078	0,054	0,029	0,016	0,007



Analogamente alla probabilità Q_3 il valore "globale" della P_4, vale a dire diffuso all'intera tratta elementare, si determina semplicemente come media pesata dei valori puntuali delle visuali libere lungo l'intero sviluppo del tracciato.

Range Q5 – Probabilità che la corsia opposta risulti occupata

La definizione della grandezza Q_5 non può non tener conto delle ipotesi che sorreggono le probabilità precedenti; in particolare la distinzione di tre tipologie di densità (basse, medie e alte) consente di adottare per ciascuna i seguenti valori medi caratteristici della densità veicolare:

Ritenendo legittimo il presupposto di flusso equilibrato per lo scenario viario isolato, il calcolo della capacità della sezione stradale consente di determinare l'entità del traffico monodirezionale. In particolare la capacità può essere stimata in funzione della presenza di veicoli pesanti e dell'altimetria del tracciato secondo la tabella:

Capacità sezione		**Sviluppo altimetrico**		
		Pianeggiante	**Collinare**	**Montagnoso**
% Tp	**5%**	1840	1610	1260
	10%	1760	1380	930
	20%	1610	1090	600

Per quel che concerne la dimensione dei "plotoni" di veicoli (con riferimento al flusso turbolento), si è ritenuto di assumerne la composizione media in una formazione di tre veicoli.

Con l'ultimo prospetto introdotto sono stati individuati tre distinti scenari di tracciato, in base allo sviluppo altimetrico dello stesso; è apparso opportuno, quindi, rappresentare i risultati restituiti dal modello teorico formulato secondo gli scenari suddetti.

Per ciascun contesto si mettono a disposizione due tabelle (una per ogni condizione di marcia definita) con indicazione dei valori della probabilità relativa a tutte le combinazioni di distribuzione di velocità e carico di veicoli pesanti; inoltre è presente un terzo prospetto che scaturisce da un'operazione di media aritmetica tra le diverse distribuzioni di velocità, a parità di densità veicolare e percentuale di traffico pesante (a seguire).

L'effetto indotto, in termini di variabilità della probabilità Q_5, dal verificarsi della condizione di marcia a pacchetti può ritenersi puramente teorico nel caso di basse densità in quanto costituisce una situazione

irrealizzabile. Al contrario il riflesso del flusso turbolento sulle possibilità di sorpasso deve ritenersi concreto e apprezzabile per gli altri valori di densità.

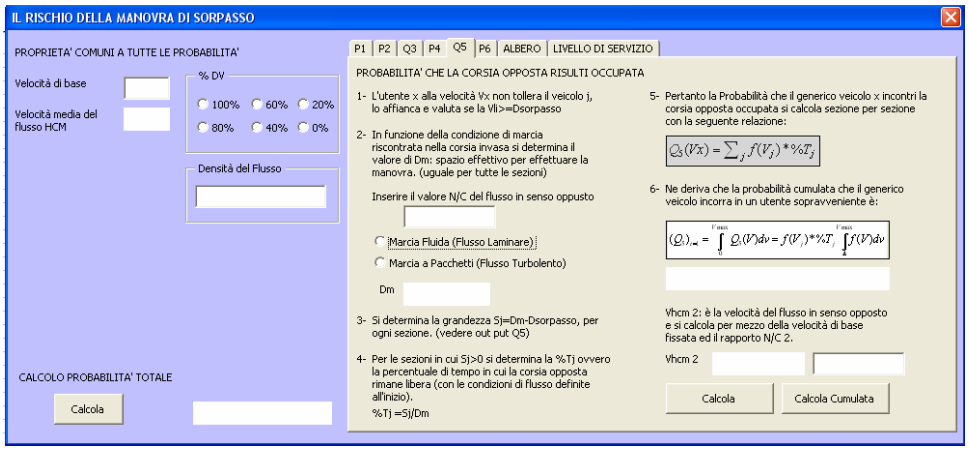


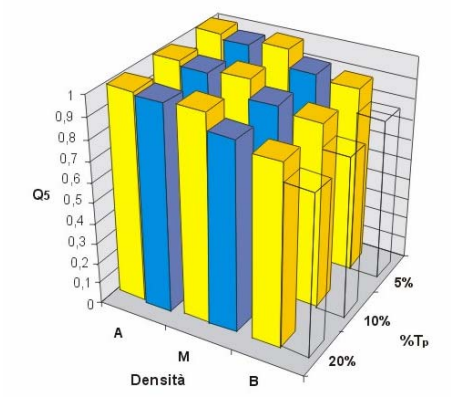
Figura 47 - Software Form per calcolo della Q5

Tracciato pianeggiante

Tabella 12 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato pianeggiante

			Laminare		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,86	0,854	0,843
		70	0,887	0,881	0,868
		80	0,924	0,918	0,906
	medie M	55	0,994	0,993	0,99
		70	0,999	0,999	0,997
		80	1	1	0,999
	alte A	50	1	1	1
		70	1	1	1

			Turbolento		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,774	0,772	0,769
		70	0,785	0,783	0,778
		80	0,806	0,803	0,796
	medie M	55	0,899	0,889	0,871
		70	0,944	0,936	0,919
		80	0,97	0,965	0,952
	alte A	50	1	1	1
		70	1	1	1



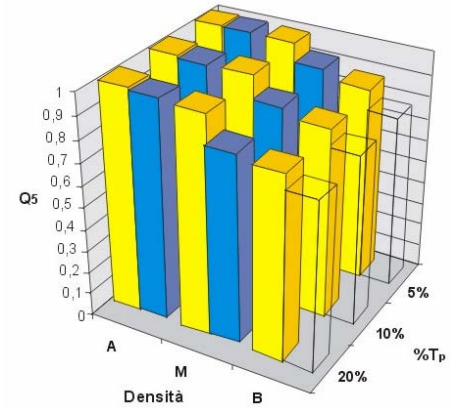
	Laminare			Turbolento		
	5%	10%	20%	5%	10%	20%
B	0,890	0,884	0,872	0,788	0,786	0,781
M	0,998	0,997	0,995	0,938	0,930	0,914
A	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tracciato collinare

Tabella 13 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato collinare

			Turbolento		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,769	0,763	0,756
		70	0,778	0,771	0,762
		80	0,796	0,787	0,774
	medie M	55	0,871	0,842	0,806
		70	0,919	0,889	0,846
		80	0,952	0,927	0,886
	alte A	50	1	0,995	0,973
		70	1	1	0,997

			Laminare		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,843	0,827	0,806
		70	0,868	0,849	0,824
		80	0,906	0,884	0,855
	medie M	55	0,99	0,982	0,959
		70	0,997	0,994	0,983
		80	0,999	0,998	0,992
	alte A	50	1	1	1
		70	1	1	1



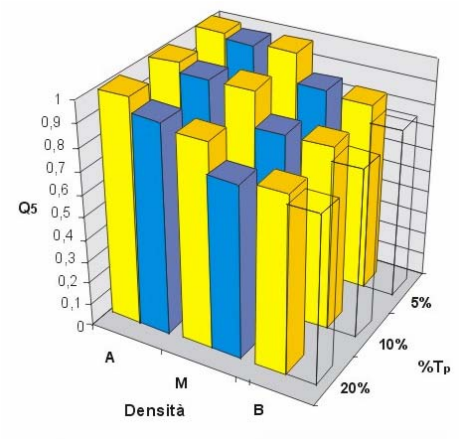
	Laminare			Turbolento		
	5%	10%	20%	5%	10%	20%
B	0,872	0,853	0,828	0,781	0,774	0,764
M	0,995	0,991	0,978	0,914	0,886	0,846
A	1	1	1	1	0,998	0,985

Tracciato montagnoso

Tabella 14 - Valori di Q5 per diverse tipologie di flusso su tracciato montagnoso

			Turbolento		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,76	0,752	0,744
		70	0,767	0,757	0,747
		80	0,782	0,768	0,754
	medie M	55	0,827	0,787	0,749
		70	0,872	0,822	0,772
		80	0,911	0,861	0,802
	alte A	50	0,988	0,958	0,93
		70	1	0,986	0,948

			Laminare		
			5%	10%	20%
Densità	basse B	60	0,818	0,795	0,772
		70	0,839	0,81	0,781
		80	0,873	0,838	0,801
	medie M	55	0,975	0,937	0,863
		70	0,991	0,969	0,906
		80	0,996	0,984	0,939
	alte A	50	1	1	0,996
		70	1	1	1



	Laminare			Turbolento		
	5%	10%	20%	5%	10%	20%
B	0,843	0,814	0,785	0,770	0,759	0,748
M	0,987	0,963	0,903	0,870	0,823	0,774
A	1	1	0,998	0,994	0,972	0,939

Range P6 – Probabilità che l'utente, nonostante la corsia opposta risulti occupata, esegua la manovra di sorpasso.

Il metodo proposto restituisce un valore della probabilità "specifico", vale a dire riferito alla disponibilità di spazio esistente in funzione della condizione di marcia che caratterizza la colonna di veicoli marcianti in senso opposto.

Il valore "complessivo" della P_6, esteso in pratica ad entrambe le condizioni di marcia possibili, si determina semplicemente come media pesata dei valori parziali; quindi è necessario conoscere la distribuzione delle differenti condizioni di marcia nell'arco temporale preso a riferimento.

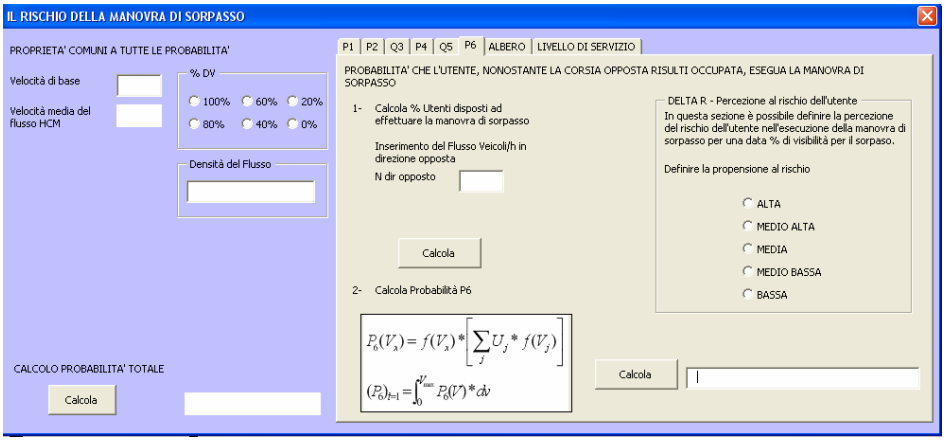


Figura 48 - Software Form per il calcolo di P6

Per verificare la sensibilità del modello sono stati semplicemente considerati i due casi limite in condizioni di massima e minima interferenza veicolare nel senso opposto.

Tabella 15 - Valori di P6 in funzione del numero di veicoli

Caso 1

Vbase: 80 Km/h

Vhcm: 47 Km/h

Dv %: 20 %

N/C corsia: 0,9

N/C opposta: 0,9

P6	N corsia opposta
0,79	200
0,26	600
0,15	1000
0,11	1400
0,08	2000

Caso 2

Vbase: 80 Km/h

Vhcm: 55 Km/h

Dv %: 20 %

N/C corsia: 0,6

N/C opposta: 0,6

P6	N corsia opposta
0,85	200
0,49	600
0,29	1000
0,21	1400
0,14	2000

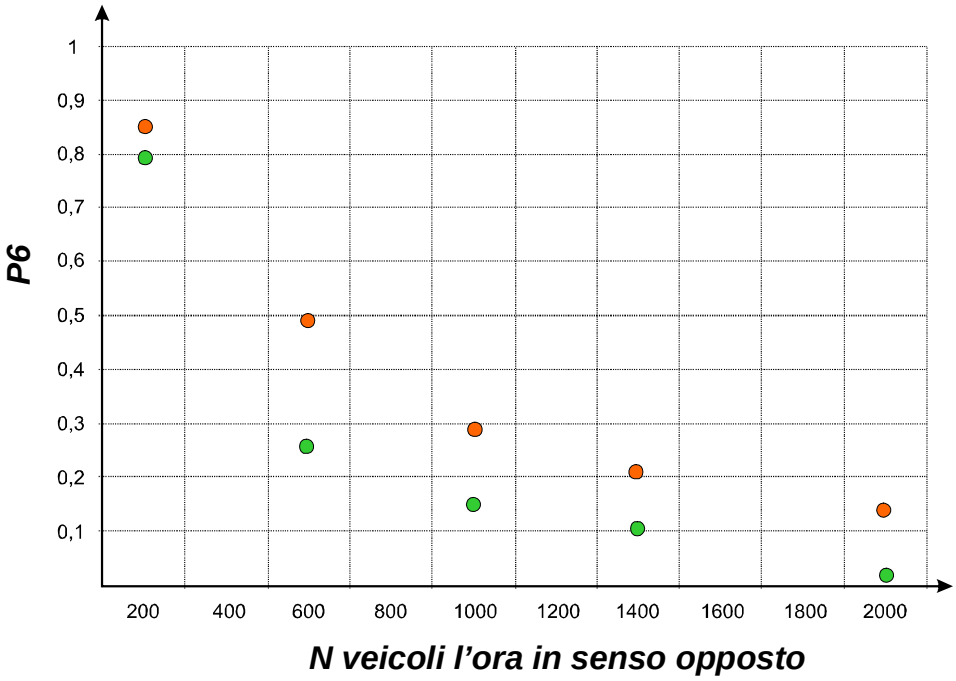


Figura 49 - Variabilità di P6 in funzione di N (numero di veicoli)

Dal grafico si evince come per bassi valori del flusso orario in senso opposto la probabilità che l'utente effettui il sorpasso è molto alta e viceversa per alti volumi di traffico.

7. La calibrazione del processo completo

Per la calibrazione del processo completo si è fatto riferimento ai dati di una sperimentazione condotta con il simulatore di guida virtuale presso il laboratorio del dipartimento di scienze dell'ingegneria civile dell'Università degli studi di Roma Tre. La sperimentazione verte sull'analisi delle traiettorie di un utente durante la manovra di sorpasso, in condizioni di flusso laminare.
In particolare:

- E' stato predisposto uno scenario di prova rappresentativo delle condizioni di funzionalità di una strada ad unica carreggiata (10,5m).
- La simulazione è stata effettuata in condizioni di velocità libera per diversi carichi di traffico (N/C = 0,2 ÷ 0,8) e per un numero adeguato di prove (150 misure in totale).
- Si sono considerati sicuri i sorpassi per i quali, in fase di manovra, la distanza tra il veicolo sorpassante e quello marciante in senso opposto non risultava mai inferiore al doppio dello spazio d'arresto.

Tenuto conto delle diverse velocità tenute dai drivers per ogni singola manovra di sorpasso, per imputare correttamente la loro condotta alla categoria "sicura" o "a rischio", si è reso necessario costruire i diagrammi spazio/tempo relativi ad ogni driver e per ogni rapporto N/C.

Tutto ciò ha richiesto una complessa elaborazione che ha consentito di valutare con ottima approssimazione la variabilità della soglia soggettiva del rischio accettato dall'utente per la manovra di sorpasso, al variare del disagio indotto dalle interferenze veicolari.

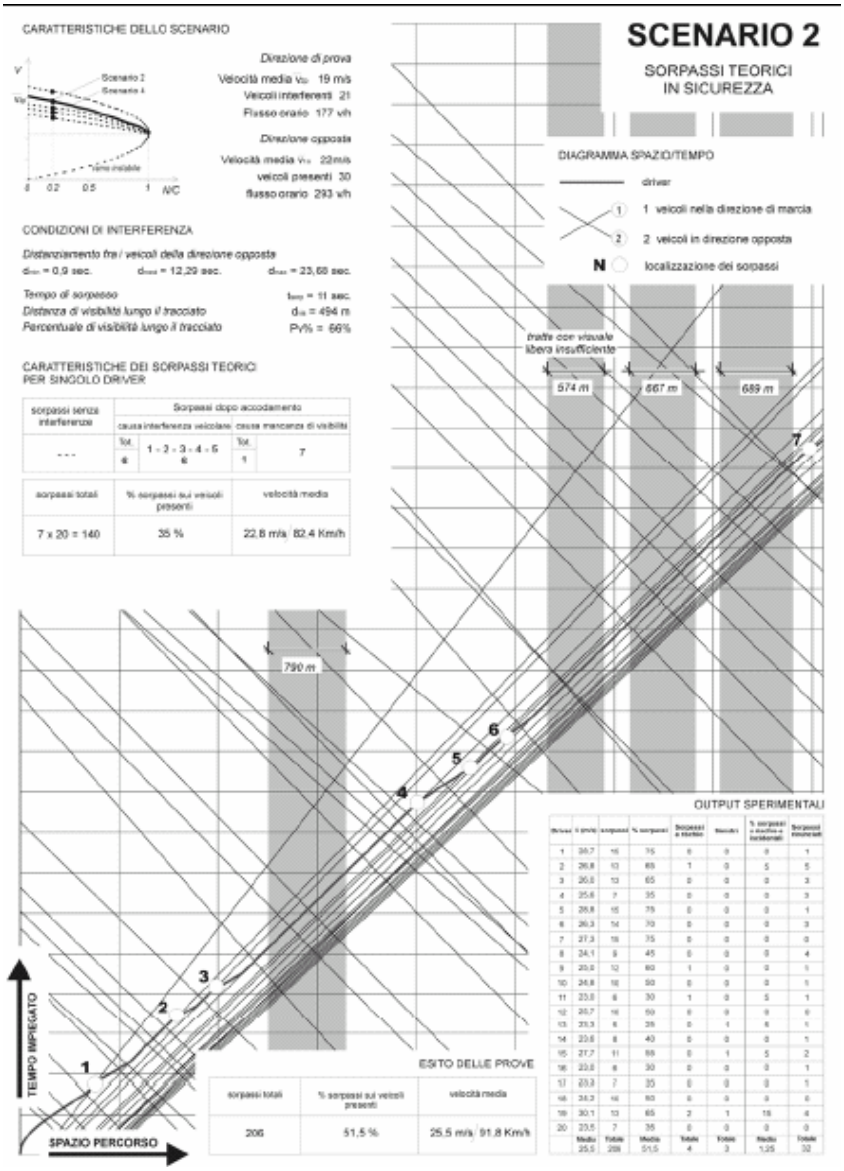


Figura 50 - Output sperimentazione in realtà virtuale dei sorpassi in debito di sicurezza

Tabella 16 - Valori di Output di sperimentazione

Output di prova

Scenari di traffico [autovetture]	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Densità veicolare [flusso/capacità]	*0.17*	*0.29*	*0.44*	*0.51*	*0.60*
Velocità media di deflusso [km/h]	*94*	*92*	*76*	*68*	*67*
Sorpassi effettuati nell'ora (*)	*98*	*117*	*132*	*140*	*138*
Sorpassi incidentati e/o a rischio (*)	*2*	*4*	*16*	*12*	*29*

(*) Valori arrotondati all'unità

Infatti, l'incidenza percentuale dei sorpassi a rischio (S_R) sul totale (S) in funzione della densità veicolare denuncia l'assunzione da parte dell'utente di un rischio fortemente crescente con la densità stessa.

Poiché il numero di sorpassi effettuati in debito di sicurezza è inversamente proporzionale al grado di sicurezza assunto dagli utenti sarà

$$(\eta_u)_S = S/(S_R).$$

Dalla sperimentazione risulta una corrispondenza biunivoca tra il rapporto $S/(S_R)$ e la densità veicolare, si può quindi ricavare l'andamento dei gradi di sicurezza in funzione del rapporto flusso/capacità e tale elaborazione conferma l'analisi qualitativa degli effetti del disagio sul comportamento degli utenti.

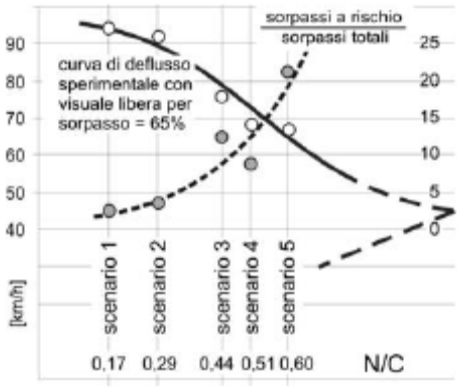


Figura 51 - Indicatore di sicurezza al variare di N/C

L'analisi del coefficiente di regressione della curva di interpolazione pari a (R_2 = 0.87) ha permesso di validare positivamente l'esito della sperimentazione.

Quindi si è ritenuto opportuno verificare entro che limiti fosse possibile generalizzare tali risultati ed assumere la funzione $(\eta_u)_S = f\,(N/C)$.
Allo scopo si è verificato l'andamento del grado di sicurezza assunto dall'utente in funzione del disagio indotto dall'interferenza veicolare tramite l'interpolazione di tutti gli output acquisiti in sede di sperimentazione.
La curva risultante rappresentata in figura è anch'essa caratterizzata da un coefficiente di regressione prossimo all'unità ($R^2 = 0.93$).

N/C	S/S_R
0.15	60.00
0.17	42.00
0.29	29.43
0.44	8.06
0.51	11.55
0.55	3.30
0.60	4.74
0.70	3.10
0.80	2.54
0.90	2.35

Figura 52 - Grado soggettivo di sicurezza per il sorpasso al variare di N/C

Con la interpolazione dei dati si è visto che all'aumentare del rapporto flusso /capacità si determina un'evidente diminuzione del grado di sicurezza.

In relazione a questi significativi risultati della sperimentazione in ambiente virtuale si è proceduto con l'analisi di calibrazione del processo relativo al primo livello probabilistico dell'albero del sorpasso in debito di sicurezza.
Di seguito sono riportati i dati di sperimentazione relativi ai cinque scenari elaborati in ambiente virtuale dove sono riportate nell'ordine:

- V del flusso nel senso di percorrenza;
- V del flusso in senso opposto;
- Distanza di visuale libera;

- % D per il sorpasso;
- N flusso nel senso di percorrenza;
- N flusso in senso opposto;
- C capacità;
- Il totale dei sorpassi;
- I sorpassi a rischio;

Tabella 17 - output i sperimentazione

	Vhom1	Vhom2	Dv libera1	%D sorpasso	flusso direzione di prova	flusso direzione di opposta
prova1	93,9	86,4	537	0,984566286	187	170
prova2	91,8	79,2	494	0,614987642	177	293
prova3	75,9	72	431	0,389833186	189	444
prova4	67,6	64,8	370	0,344873534	180	511
prova5	67,3	61,2	355	0,283444479	187	604

capacità	(NC)1	(NC)2	%Dv	n utenti	Sorpassi totali	sorpassi rischio	S/Sr	Sr/S	Prinuncia sperimentale
2000	0,0935	0,085	63	20	168	1	168,0000	0,0060	0,076923077
2000	0,0885	0,1465	66	20	206	4	51,5000	0,0194	0,134453782
2000	0,0945	0,222	70	20	282	27	10,4444	0,0957	0,168141593
2000	0,09	0,2555	73	20	335	17	19,7059	0,0507	0,182926829
2000	0,0935	0,302	75	20	332	64	5,1875	0,1928	0,180246914

I dati sono stati caricati nel software per un totale di 20 iterazioni per ognuno dei cinque scenari. I risultati poi sono stati mediati e tabellati.

Tabella 18 - Output del Software relativamente alle sei probabilità per le cinque prove sperimentali

	p1	p2	q3	p4	p5	p6	P model
test 1	0,5	0,10	0,02	0,03	1,00	0,92	4,41E-02
test 2	0,5	0,10	0,02	0,03	1,00	0,87	4,55E-02
test 3	0,5	0,13	0,01	0,09	1,00	0,83	1,01E-01
test 4	0,5	0,18	0,01	0,11	1,00	0,82	1,16E-01
test 5	0,5	0,25	0,02	0,16	1,00	0,82	1,70E-01

Quindi è stata correlata l'incidenza percentuale dei sorpassi a rischio (SR) sui sorpassi totali (S) con la probabilità del sorpasso in debito di sicurezza desunta dalla completa iterazione dei modelli proposti.

Di seguito i risultati della correlazione:

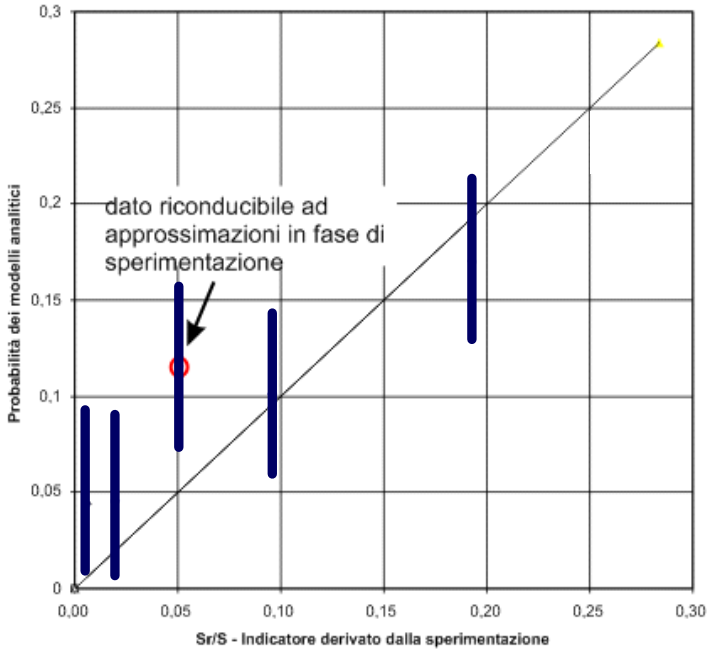


Figura 53 - Correlazione tra l'indicatore derivato dalla sperimentazione e le P dei modelli analitici

Come si può osservare dal grafico per ogni valore dell'indicatore di sperimentazione, sono rappresentati tanti valori della probabilità del modello quanti sono i drivers che hanno conseguito la sperimentazione.
La correlazione si considera sufficiente fatta eccezione per il terzo scenario che non rientra nel range di variabilità delle P.

Lo scostamento del risultato è stato attribuito a condizionamenti avuti in fase di sperimentazione in realtà virtuale.

8. L'applicazione del software alla S.S. Romea

Il lavoro fin qui sviluppato ha consentito di analizzare attentamente le probabilità che costituiscono il primo livello probabilistico dell'albero degli eventi della manovra di sorpasso e conseguentemente di mettere a punto una procedura di impiego del modello costruito.
Tuttavia lo studio non può dirsi completo se l'apparato teorico messo in piedi non trova una valida conferma nel momento della sua applicazione come strumento di verifica della qualità di un progetto.
A tal fine si è provveduto alla individuazione di un'infrastruttura viaria per la quale fossero disponibili tutti i dati necessari alla applicazione del modello ed è stata analizzata la realtà rappresentata dalla strada statale n° 309 (Romea), per il tratto che si snoda in territorio veneto:
ovviamente la scelta è dipesa oltre che dalla disponibilità dei dati, dalla compatibilità dell'infrastruttura con lo scenario stradale definito e circoscritto.

I dati statistici disponibili

Analizzando lo scenario incidentale che caratterizza la detta strada statale, con riferimento al quinquennio '91-'95 ed ai soli eventi localizzati, si evidenzia una sostanziale stabilità del dato statistico.

La composizione percentuale dei sinistri incorsi sull'infrastruttura (figura 39) mostra chiaramente come gli eventi imputabili alla manovra di sorpasso (scontro frontale e frontale-laterale) costituiscano circa i 2/5 degli eventi incidentali totali, contributo che è rimasto pressappoco lo stesso nell'arco temporale considerato.

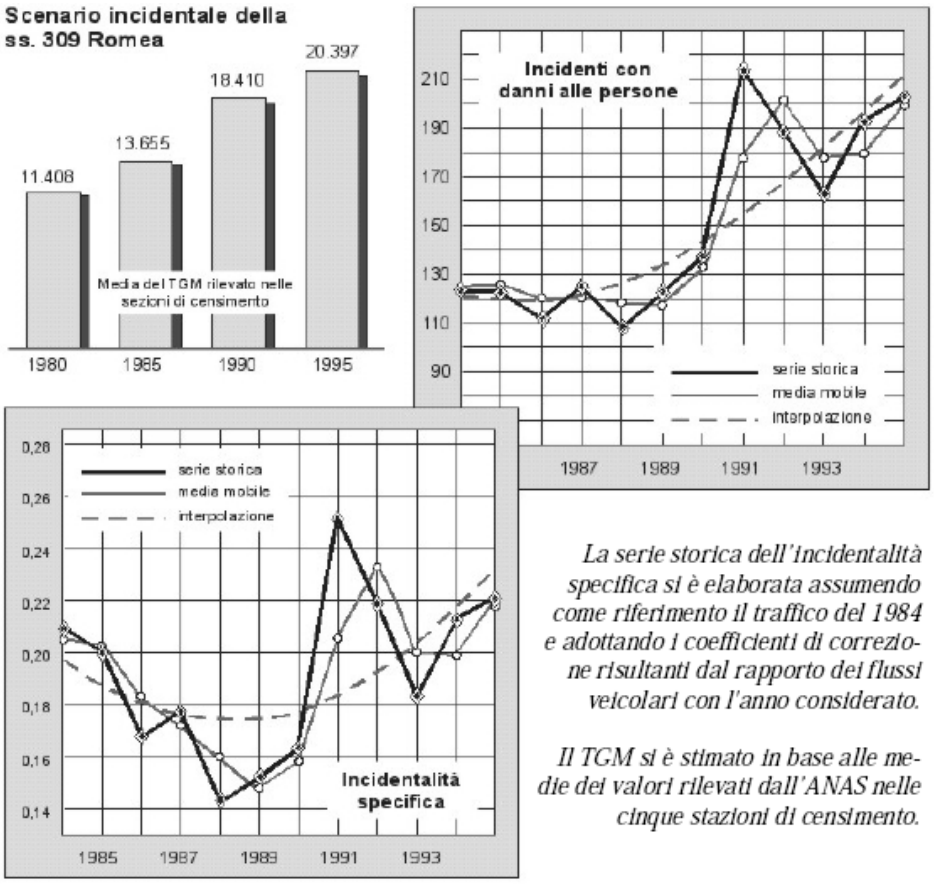
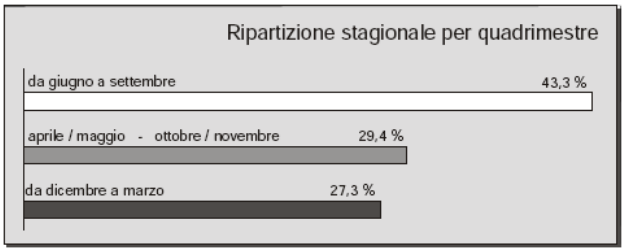


Figura 54 - Analisi incidentale relativamente alla S.S. 309 Romea

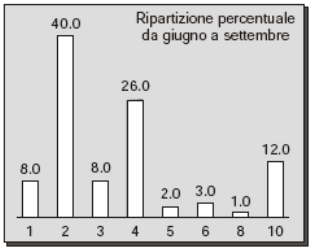
La distribuzione di tali eventi lungo lo sviluppo del tracciato costituisce un valido strumento per l'analisi della sicurezza dell'esercizio viario.

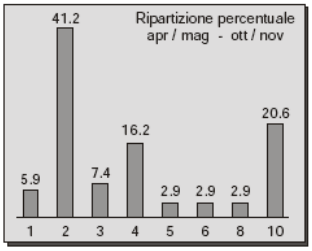
Tabella 19 - Distribuzione degli incidenti per stagione e tipologia di cause (anni 1991/92)

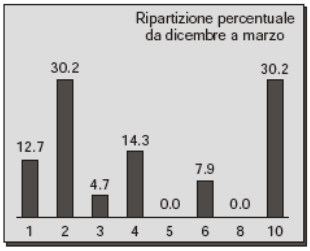
Distribuzione degli incidenti per stagione e tipologia di cause (anni 1991/92)

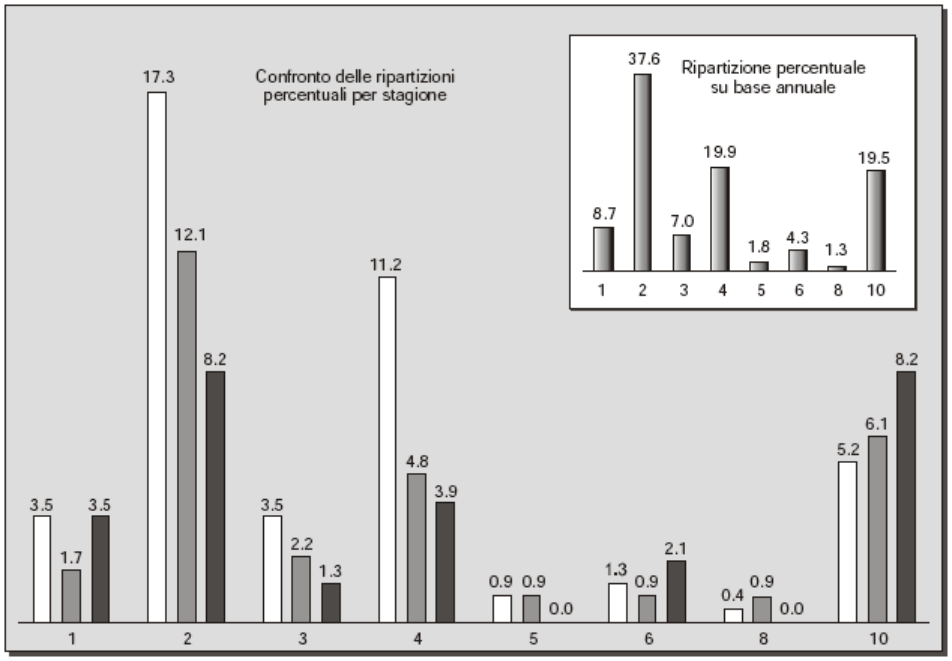


Tipologie di incidenti	cd. ISTAT
scontro frontale	1
scontro frontale laterale	2
scontro laterale	3
tamponamento	4
investimento pedoni	5
urto con veicolo frenante	6
urto con ostacolo	8
uscita di strada	10









Il primo passaggio obbligato per l'applicazione del modello probabilistico consiste nello stimare il valore delle variabili significative ai fini del calcolo dei sorpassi in debito di sicurezza.

Le tratte omogenee

L'ambito stradale a cui si è fatto riferimento può essere organizzato in tre tratte omogenee distinte in funzione della percentuale di distanza di visibilità garantita, visto che la sezione e la velocità di base coincidono.

- tratta del Delta del Po, sviluppo totale 24 km (dal km 57 al km 80) dei quali il 65% consente il sorpasso;
- tratta della Laguna veneta, sviluppo totale 26 km (dal km 81 al km 106) dei quali il 77,7% consente il sorpasso;
- tratta di Mestre, sviluppo totale 17 km (dal km 107 al km 123) dei quali l'80% consente il sorpasso.

I dati esposti consigliano di semplificare lo scenario considerando due sole situazioni distinte, relative rispettivamente alla prima tratta e alla seconda e terza accorpate.
I rilievi effettuati sul campo consentono di proporre per le tratte suddette le curve di deflusso a lato.

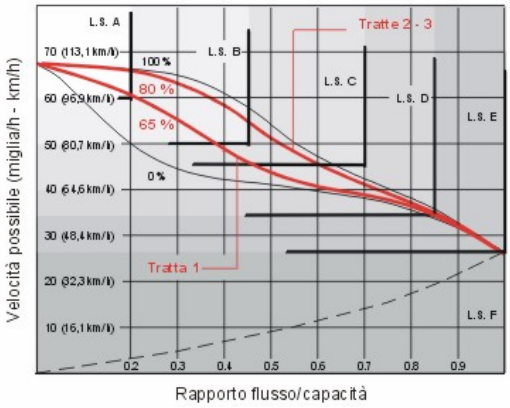


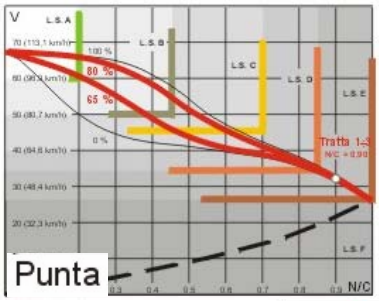
Figura 55 - curve di deflusso relative alle tratte scelte

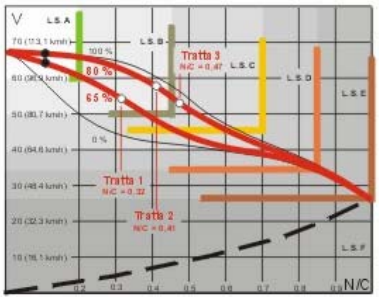
Flussi orari caratteristici

Dall'analisi dei rilievi di traffico si è riscontrata una capacità di 1600 veicoli/h, come conseguenza della articolazione altimetrica del tracciato

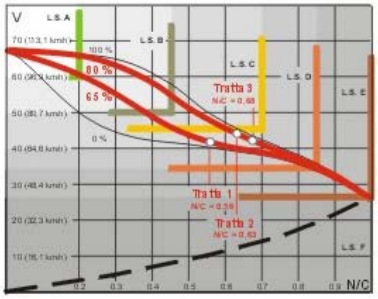
che risulta in larga misura pianeggiante e del carico dei veicoli pesanti risultante pari a circa il 20 % del traffico totale, conseguentemente è stato possibile ricostruire i diagrammi dei flussi orari che caratterizzano ciascuna tratta ed i valori di densità veicolare relativi.

La definizione delle curve di livello, infine, permette l'individuazione delle diverse velocità medie del flusso.





Media
Morbida ○
Notte •

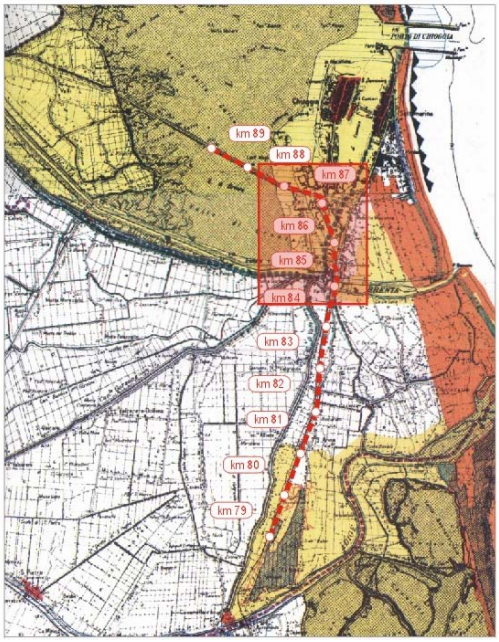


Visuale libera media

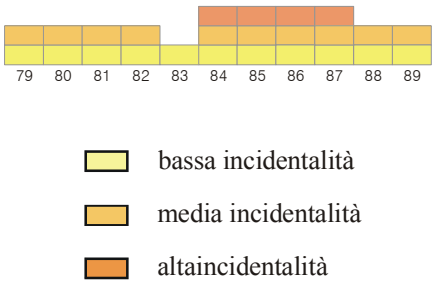
L'analisi del tracciato suggerisce di adottare una visuale libera caratteristica delle tre tratte, che si assume equivalente a 500m.

La proposta progettuale

Analizzando il tracciato dal punto di vista della sicurezza stradale (e in tal senso risulta estremamente utile la distribuzione degli eventi secondo le progressive chilometriche introdotta precedentemente), è possibile definire tre classi di incidentalità (alta, media o bassa, in base al valore medio di eventi al chilometro).



Tale parametro è fondamentale per individuare le tratte a rischio e valutare quali siano gli interventi progettuali più opportuni per assicurare localmente una riduzione dei livelli di incidentalità imputabili alla strada.



Emerge così che la tratta compresa tra S. Anna e Chioggia (dal km 79 al km 89) è caratterizzata da condizioni di rischio che si mantengono su valori elevati, con una preoccupante continuità di chilometri a rischio tra la progressiva 84 e 87.
Tale scenario d'incidentalità è imputabile alle caratteristiche locali dell'infrastruttura: alla vicinanza dei centri urbani ed alle viziosità planimetriche (visuali libere limitate dai raccordi altimetrici e dalla presenza di curve di raggio minimo) che concorrono alla "pericolosità" del segmento isolato.

La situazione "puntuale" individuata si presta bene all'applicazione del modello probabilistico quale strumento di verifica della qualità di un

progetto; quindi l'analisi del caso studio procederà con la proposta di un adeguamento dell'infrastruttura nell'area circoscritta e la conseguente valutazione dell'intervento attraverso l'Hazard Analysis.
La proposta progettuale prevede una variante dello sviluppo di circa 3.500 m, caratterizzata da una sezione del IV tipo delle norme CNR, con l'obiettivo di garantire l'abolizione delle interferenze e migliorare la geometria locale della Romea prevedendo raggi minimi non inferiori a 750 m.

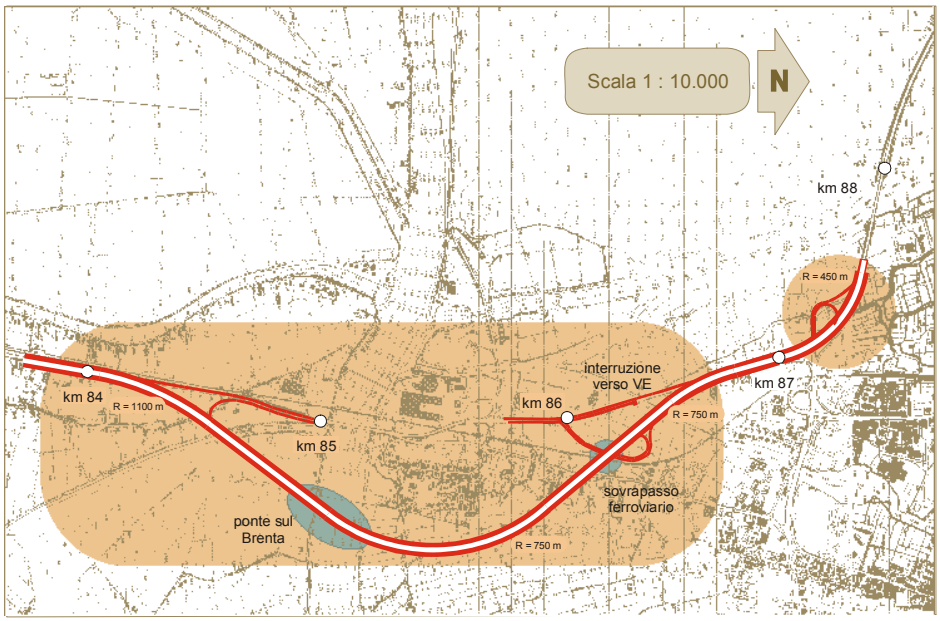


Figura 56 - Tracciato di variante con sezione de IV tipo

La variante risulta onerosa per la prevista realizzazione del ponte sul Brenta e del sovrappasso sulla ferrovia. Tuttavia l'esposizione economica trova giustificazione nell'eliminazione di gran parte delle interferenze con il centro abitato e con la previsione di idonee misure di mitigazione che assicurino una sensibile riduzione dell'impatto ambientale.

La nuova realizzazione dovrebbe comportare il seguente scenario di ripartizione dei flussi:

- sulla sede stradale attuale si prevede rimanga la sola componente di traffico locale (stimabile in un 40%), della quale solo un 5% è rappresentato dai veicoli pesanti;

- sull'infrastruttura di nuova realizzazione si prevede vengano smistati i flussi di attraversamento (60% del valore attuale), con un elevata componente di traffico pesante (praticamente il 75% di quello presente attualmente).

Valutazione dell'intervento progettuale sulla base della teoria del rischio

La validità o meno dell'adeguamento strutturale avanzato, in termini di sicurezza, si determina calcolando le nuove condizioni di servizio previste per le due strade e confrontando le uscite fornite dal modello probabilistico con quelle relative alla situazione in essere.
La situazione "puntuale" presa in esame appartiene alla seconda tratta individuata all'interno del tracciato della Romea veneta; come tale conosciamo sia la curva di deflusso che i carichi di traffico. Restano da definire solo le seguenti variabili:

- 20% di distanza di visibilità completa per il sorpasso garantita;
- 300 m di visuale libera media garantita dal tracciato.

Si ricorda il metodo di calcolo dell'interferenza stagionale per tratta calcolato con la seguente relazione:

$$I_{tratta} = \sum_{i=1}^{4} P_i \times \frac{N_{i(veicoli/h)} \times L_{i(Km)}}{V_{i(Km/h)} \times t_{i(h)}} \times T_{giornistagione}$$

Situazione attuale

Tabella 20 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione attuale

primavera-estate	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)	nodo1	sorpassi totali	
traffico di punta	4	1440	0.9	50	1.01E-06	0.000	
traffico di media	6	992	0.6	65	1.05E-02	3.839	
traffico di morbida	6	656	0.4	70	3.45E-02	7.757	
traffico notturno	8	160	0.1	95	1.91E-02	1.032	**stagionali**
						12.628	2311

autunno-inverno	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)	nodo1	sorpassi totali		
traffico di punta	4	1440	0.9	50	1.01E-06	0.000		
traffico di media	6	992	0.6	65	1.05E-02	3.839		
traffico di morbida	6	656	0.4	70	3.45E-02	7.757		
traffico notturno	8	160	0.1	95	1.91E-02	1.032	**stagionali**	**annui**
						12.628	2298	4609

Scenario progettuale

Tracciato esistente

Tabella 21 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione di progetto per il tracciato esistente

primavera-estate	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)	nodo1	sorpassi totali		
traffico di punta	4	533	0.3	75	2.59E-02	2.940		
traffico di media	6	368	0.2	85	9.74E-03	1.012		
traffico di morbida	6	243	0.1	90	1.32E-02	0.853		
traffico notturno	8	59	0.0	110	0.00E+00	0.000	stagionali	
						4.805	879	
autunno-inverno	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)	nodo1	sorpassi totali		
traffico di punta	4	533	0.3	75	2.59E-02	2.940		
traffico di media	6	368	0.2	85	9.74E-03	1.012		
traffico di morbida	6	243	0.1	90	1.32E-02	0.853		
traffico notturno	8	59	0.0	110	0.00E+00	0.000	stagionali	annui
						4.805	874	1754

Tracciato di nuova realizzazione

Tabella 22 - Numero dei sorpassi in debito di sicurezza calcolati rispetto alla condizione di progetto per il tracciato di nuova realizzazione

primavera-estate	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)	nodo1	sorpassi totali		
traffico di punta	4	907	0.5	85	6.52E-03	1.113		
traffico di media	6	624	0.4	100	1.59E-02	2.375		
traffico di morbida	6	413	0.2	105	1.04E-02	0.981		
traffico notturno	8	101	0.1	110	1.25E-02	0.367	stagionali	
						4.836	885	
autunno-inverno	durata (ore)	flusso (veic./h)	densità	vel. media (km/h)		sorpassi totali		
traffico di punta	4	907	0.5	85	6.52E-03	1.113		
traffico di media	6	624	0.4	100	1.59E-02	2.375		
traffico di morbida	6	413	0.2	105	1.04E-02	0.981		
traffico notturno	8	101	0.1	110	1.25E-02	0.367	stagionali	annui
						4.836	880	1765

Il confronto tra lo stato di fatto e lo scenario ipotizzato mostra chiaramente come la variante progettata comporti un considerevole miglioramento con riferimento al numero dei sorpassi da realizzare in assenza di sicurezza ed in tutte le situazioni temporali considerate.
L'unica che si sottrae a questa tendenza è l'ora di punta, che tuttavia ha un peso (dal punto di vista della ripetitività) minore rispetto alle altre suddivisioni.

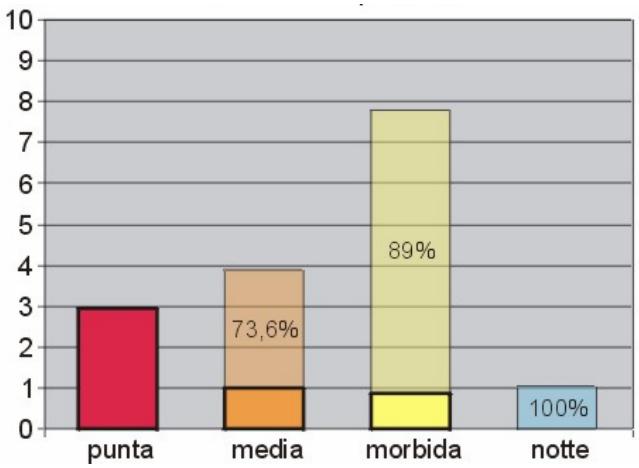


Figura 57 - Confronto tra situazione attuale e scenario ipotizzato

Globalmente si può affermare che sulla sede stradale attuale si instaura una riduzione di sorpassi in debito di sicurezza pari al 62%.

9. Conclusioni

Preso atto dei rilevanti costi sociali ed economici imputabili all'incidentalità stradale, si è ritenuto che fosse necessario affrontare con il metodo dell'analisi scientifica il problema al fine di proporre e verificare un metodo idoneo ad esprimere una valutazione oggettiva del rischio di esercizio per la circolazione veicolare.

Il perseguimento dell'obiettivo s'impone per consentire una valutazione di qualità del progetto stradale prima della sua realizzazione, sia esso relativo a nuove costruzioni, sia all'adeguamento della viabilità in esercizio. A questo riguardo l'indicatore più significativo è rappresentato dall'incidentalità "attesa" stimata in funzione delle caratteristiche della strada, delle sue condizioni di funzionalità e del comportamento degli utenti indotto dalle motivazioni degli spostamenti.

Preso atto che i metodi tradizionali di valutazione della qualità del progetto non appaiono adeguati alle necessità, *(cfr. cap 1.1)* tenuto conto che si sono ottenuti risultati particolarmente lusinghieri sviluppando le applicazioni dell'Hazard Analysis *(cfr. cap 4)*, si è rilevato come l'applicazione di questi ultimi sia possibile solo a valle di una caratterizzazione "omogenea" della strada, delle sue funzioni e del servizio offerto. Pertanto, vista la variabilità delle tipologie viarie e delle possibili situazioni di circolazione, un reale contributo allo sviluppo delle applicazioni dell'Hazard Analysis è possibile solo garantendo due esigenze fondamentali:

- la formazione di banche dati adeguate alle necessità che forniscano gli elementi necessari per selezionare e descrivere le "omogeneità" delle situazioni da considerare; *(cfr . Cap 2)*

- la predisposizione di un modello concettuale e del relativo software che, per la stessa strada consenta di reiterare il calcolo dell'incidentalità attesa nelle sue molteplici condizioni di funzionalità. *(cfr . Cap 6)*

Il primo punto può essere espresso in questa sede solo come un auspicio per realizzare quei programmi già previsti a livello legislativo ma che sono ben lungi dall'essere attuati, fatte salve sporadiche eccezioni.
La seconda questione è stata invece ampiamente sviluppata in questo studio giovandosi sia di un impianto teorico ormai consolidato anche a livello didattico, sia di sperimentazioni condotte in ambiente virtuale, sia infine dei contributi forniti dalla più recente letteratura scientifica.

Le conclusioni a cui è pervenuto la ricerca, pur limitate ad un caso studio dimostrano come sia possibile valutare la qualità del progetto stradale sotto il profilo della sicurezza.

Il procedimento, basato sull'analisi probabilistica applicata "all'albero degli eventi", risulta particolarmente affidabile in quanto le variabili che lo condizionano non risultano particolarmente "critiche", consentono infatti di accettare significative approssimazioni, qual è ad esempio quella che traduce la complessità delle motivazioni degli spostamenti nelle due componenti di mobilità locale e di lunga percorrenza.
Ciò trova conforto nelle verifiche condotte sia con riferimento a casi reali, sia in ambiente virtuale.

Questo studio, com'è proprio di ogni attività di ricerca, non può ritenersi esaustivo ai fini generali dell'applicazione. A questo scopo sarebbe necessario infatti, sviluppare analoghi processi di indagine per le tipologie incidentali che, in questa sede, non sono state prese in considerazione. Si ritiene tuttavia che i risultati a cui si è pervenuti possono rappresentare un valido punto di partenza per proseguire nella direzione intrapresa.

References

1. AASHTO; 2005; American Association of State Highway and Transportation Officials. Strategic Highway Safety Plan; Washington D.C., USA.
2. Psarianos, B. (2005) Strategic road safety policies and research needs in Europe and the United States of America, *Advances in Transportation Studies*, **VII(A)**, 5-22
3. European Road Safety Action Programme, COM (2003) 311 Final; 2003; Brusselles
4. European Transport Safety Council (1997). Transport accident costs and the value of safety, Brussels
5. European Transport Safety Council (2001). Transport accident and incident investigation in the EU, Brussels
6. Lam, T.I. (1999). A sectorial review of risks associated with major infrastructure projects. *International Journal of project management*, **17(2)**, 77-87
7. Lu, J.J., Q. Xiang, S. Dissanayake, J. Pernia. (2004). The Ways to Improve Highway Safety. *Advances in Transportation Studies*, **II(A)**, 3-14
8. NHTSA (2002). Traffic Safety Facts, Washington D. C., National Highway Traffic Safety Administration, U. S. Department of Transportation, Report No. DOT HS 809 620, 2002
9. Blincoe, L. J. (1994). The Economic Cost of Motor Vehicle Crashes, Washington D.C., National Highway Traffic Safety Administration, Report No. DOT HS 808 425, 1996
10. Jones-Lee, M.W. (1990). The value of transport safety, Oxford Review of Economic Policy
11. Viscusi, W.K. (1993). The value of risks to life and health. *Journal of Economic Literature*
12. Vrijiling, J.K., van Gelder, P.H.A.J.M. (2000) An analysis of the valuation of human life, Foresight and precaution ESREL
13. European Transport Safety Council (2003). Assessing Risk and Setting Targets in Transport Safety Programmes, Brussels
14. Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council on road infrastructure safety management (2005)
15. Elvik, R., T. Vaa (2004). The handbook of road safety measures. Elsevier. Amsterdam
16. Bortkiewicz, L. von. (1898). Das Gesetze der kleinen Zahlen. B.G. Teubner, Leipzig
17. Greenwood, M., G.U. Yule. (1920). An inquiry into the nature of frequency distributions representative of multiple happenings, with particular reference to the occurrence of multiple attacks of decease or repeated accidents. *Journal of the Royal Statistical Society*, **83**, 255-279
18. Forbes, T.W. (1939). The normal automobile driver as a traffic problem. *Journal of General Psychology*, **20**, 471-474
19. Cresswell, W.L., P. Froggatt. (1963). The causation of bus driver accidents. An epidemiological study. Oxford University Press. London
20. Wilde, G.J.S. (1994). Target risk. Dealing with the danger of death, disease and damage in everyday decisions. *PDE publications*, Toronto
21. J.C. Glennon and D.W. Harwood, 1978
22. C.J. Messer, 1980
23. R. Lamm, E.M. Choueiri, B. Psarianos, and G. Soilemezoglou, 1995ù
24. Fitzpatrick, K. (2000) Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways, executive summary." Report FHWA-RD-99-173, Federal Highway Administration, Springfield, VA.]
25. Transportation Association of Canada TAC, (1999) Geometric design guide for Canadian roads, Ottawa, ON, Canada.
26. xxx
27. Polus, A. (1980) The Relationship of Overall Geometric Characteristics to the Safety Level of Rural Highways, *Traffic Quarterly*. **34(4)**, 575-585
28. McLean, J. (1981) Driver Speed Behaviour and Rural Road Alignment Design. *Traffic Engineering and Control*, **22(4)**, 208-211)

29. Fitzpatrick et al.(8)
30. Aarts, L., Van Schagen, I. (2006) Driving speed and the risk of road crashes: A review, *Accident Analysis and Prevention*, **38**, 215–224
31. Benedetto A., Benedetto C., De Blasiis M.R. (2004) Evaluation of reaction time in virtual reality environment for road safety increasing; *Proc. 3rd International Conference on Traffic and Transport Psychology*; Nottingham, UK.
32. Benedetto, A., A. de Angelini, D. di Renzo, F. Guerrieri, S. Markham. (2002). "About the standards of a driving simulation for road engineering: a new approach". *Proc. VII Intern. Conf. on Application of Advanced Technology in Transportation (ASCE)*, Cambridge Massach., USA
33. Benedetto, C., M.R. De Blasiis, A. Benedetto. (2003). Driving simulation based approach for quality control of road projects. *Advances in Transportation Studies*, **I(B)**, 86-96
34. Benedetto A., Benedetto C., De Blasiis M.R.; 2004a; Reliability of standards for safe overtaking: advances using real time interactive simulation in Virtual Reality; *Proc. 82 TRB Annual Meeting*; Washington D.C., USA.
35. Adam, J.J., F.G.W.C. Paas, M.J. Buekers, I.J. Wuyts, W.A.C. Spijkers and P. Wallmeyer. (1996). Perception-action coupling in choice reaction time tasks. *Human Movement Sciences*, **15**, 511-519
36. Posner, M.I. (1978). Chronometric exploration of mind. Hillsdale: Erlbaum
37. Proctor, R.W., T.G. Reeve. (1990). Stimulus-response compatibility: an integrated perspective. Amsterdam: North Holland
38. Gibson, J. (1979). The ecological approach to visual perception. Boston: Houghton Mifflin
39. Michaels, C.F. (1988). S-R compatibility between response position and destination of apparent motion: evidence of the detection of affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **14**, 231-240
40. Lenné M.G., Triggs T.J., Redman J.R. (1997). Time of day variations in driving performance. *Accident Analysis and Prevention*, **29(4)**, 431-437
41. Proctor R.W., Van Zandt T., Lu C. and Weeks D.J. (1993). Stimulus-response compatibility for moving stimuli: perception of affordances or directional coding? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 81-91
42. Benedetto A., Benedetto C., De Blasiis M.R.; 2004c; A new effective approach to accidents prediction to improbe roads design and rehabilitation; *Advances in Transportation Studies;* **IV(A)**; 5-32
43. Austroads; 1994; Road safety audit; Sydney, Australia
44. Kanellaidis G. 1999; Aspects of road safety audits; *Journal of Transportation Engineering*, **125(6)**, 481-486
45. Benedetto A., Calvi A., D'Amico F., De Blasiis M.R.; 2005; Advanced and effective indicator for road risk assessment; *Proc. International Conference Road Safety in 4 Continents RS4C, Warsaw*
46. *Benedetto C. "Il progetto della strada sicura – la ricerca sperimentale in realtà virtuale".*