Università degli studi ROMA TRE

SCUOLA DOTTORALE IN INGEGNERIA
SEZIONE SCIENZE DELL'INGEGNERIA CIVILE
XXI Ciclo

Tesi di Dottorato

Analisi degli effetti indotti dalla funzionalità stradale sulla sicurezza dell'esercizio viario

Dottorando: Ing. Alessandro Calvi

Docente guida: Prof.ssa Ing. Maria Rosaria De Blasiis

Coordinatore del dottorato: Prof. Ing. Leopoldo Franco

Roma, Febbraio 2009

Collana delle tesi di Dottorato di Ricerca
In Scienze dell'Ingegneria Civile
Università degli Studi Roma Tre
Tesi n° 20

Sommario

La sicurezza stradale rappresenta una delle principali problematiche sociali in tutto il mondo. L'attuale approccio progettuale delle infrastrutture stradali è basato sul rispetto delle equazioni cinematiche e dinamiche del veicolo isolato che impongono standard geometrici per ogni singolo elemento e non considerano in maniera adeguata il comportamento dell'utente significativamente influenzato dalle scelte progettuali. La continua crescita dei carichi di traffico ha comportato un abbassamento significativo dell'offerta funzionale delle reti stradali. Inoltre sulle stesse infrastrutture congestionate è presente una commistione di flussi diversamente motivati con differenti esigenze e aspettative di servizio.

Le tecnologie emergenti della simulazione di guida in realtà virtuale permettono di interpretare le complesse interazioni esistenti tra l'uomo, l'ambiente stradale e i veicoli attraverso un approccio interdisciplinare.

Nell'ambito della presente tesi sono presentate numerose sperimentazioni condotte in realtà virtuale che dimostrano come il comportamento dell'utente, ed in particolare la sua soglia di percezione ed accettazione del rischio, sia indiscutibilmente influenzata dalle caratteristiche geometriche della strada (per basse densità veicolari, quando prevale il ruolo delle geometrie d'asse e di piattaforma) e dalle interferenze veicolari (per alte densità di flusso, quando prevale il comportamento dell'utente in funzione del disagio). Saranno anche descritte procedure di simulazione per la verifica della qualità dei progetti in ordine alla sicurezza dell'esercizio viario per la viabilità extraurbana.

Ciò ha suggerito, in un'ottica di verifica sistemica della funzionalità e sicurezza dell'infrastruttura, la proposta di una teoria del disagio subito dall'utente nel percorrere un certo itinerario stradale causato dalle differenze esistenti tra le aspettative e necessità della domanda di mobilità e la reale offerta dell'infrastruttura. L'applicazione della teoria a numerosi casi di studio reali ne ha ampiamente validato le ipotesi di base rivelando che le scelte progettuali non possono prescindere da una dettagliata analisi dei flussi veicolari (in termini di entità, composizione, variabilità, motivazione degli spostamenti), della funzionalità sistemica dell'infrastruttura, delle aspettative e desideri degli utenti e del loro comportamento indotto dalla strada.

Abstract

Road safety is one of the most crucial problems all over the world. Traditional approach to the design of safe roads is based on kinematical and dynamic equations that impose geometrical requirements for each single element, neglecting human factors and driver's behaviour without taking adequately into account traffic flows.

The increase of traffic flows causes a severe problem of vehicle interferences when the levels of service of the road decrease. It has a relevant impact on safety. At the same time, the high value of vehicles density is determined by the overlapping of traffic flows generated by different motivations.

International literature agrees that road safety is affected by human factors. This should suggest to engineers that driver's behaviour has to be considered more in depth and that an interdisciplinary approach to road project is strongly recommended.

Emerging technologies of simulation in virtual reality make it possible to evaluate the interaction among driver, vehicle and road environment (traffic, geometry, pavement, external conditions) through an interdisciplinary approach.

Many virtual reality experiments developed in this thesis pointed out that the risk accepted by drivers crucially depends on road geometry and traffic conditions. Results allow to propose some laws and procedures to formulate the quality audit of road project under safety perspective with the great advantages of simulated environment experiments.

The application of the theory to many case studies of rural roads points out the validity of the model for the evaluation of the expected accident occurrence as a function of the level of discomfort suffered by road users.

Results suggest to take into account in road projects an in depth analysis of traffic flows (in terms of volume, composition, variability, motivation), of road geometry from a systemic point of view, of driver's expectations, desires, perception and his behaviour influenced by road characteristics and operating conditions.

Indice

ELENCO DELLE FIGURE VIII

ELENCO DELLE TABELLE XII

ELENCO DEI SIMBOLI XIII

1. INTRODUZIONE 1

1.1 LE RESPONSABILITA' DELLA STRADA 5

1.2 IL PERCORSO DELLE TEORIE INCIDENTALI 6

1.3 LE RELAZIONI TRA UTENTE ED INFRASTRUTTURA 9

2. LA VERIFICA DELLA QUALITA' DEL PROGETTO 15

2.1 LA FUNZIONALITA' SISTEMICA DELL'INFRASTRUTTURA 16

2.2 GLI INDICATORI DI LETTERATURA 20

2.3 LA STIMA DELL'INCIDENTALITÀ ATTESA: LE NUOVE TECNOLOGIE 23

2.3.1 RETI NEURALI 24

2.3.2 HAZARD ANALYSIS, LA TEORIA DEL RISCHIO 27

3. LA SIMULAZIONE DI GUIDA IN REALTA' VIRTUALE 31

3.1 IL SIMULATORE DI GUIDA DEL CRISS 32

3.2 LA CONFIGURAZIONE DEL CAMPIONE 34

3.3 LE PRINCIPALI ATTIVITÀ DI RICERCA IN SIMULAZIONE 36

3.4 LE SPERIMENTAZIONI CONDOTTE NELL'AMBITO DELLA TESI 44

4. LA VERIFICA DELLA QUALITÀ DEL PROGETTO IN CONDIZIONI DI BASSE DENSITÀ VEICOLARI 46

4.1 LA SPERIMENTAZIONE **49**

4.2 L'INDIVIDUAZIONE DEGLI INCIDENTI IMPUTABILI ALLA STRADA **51**

4.3 METODOLOGIA **54**

4.4 LA CONDUZIONE DELLE PROVE **55**

4.5 IL DISAGIO PATOLOGICO **57**

4.6 RISULTATI **59**

4.7 CONFRONTO CON UN INDICATORE GEOMETRICO TRADIZIONALE: *CCR* **65**

4.8 CONCLUSIONI **67**

5. VERIFICA SPERIMENTALE DELLA VARIABILITÀ DELLA SOGLIA DI RISCHIO PER IL SORPASSO IN FUNZIONE DEL CARICO DI TRAFFICO **69**

5.1 DALL'ALBERO DEGLI EVENTI ALLA SIMULAZIONE DI GUIDA **69**

5.2 LA SPERIMENTAZIONE **71**

5.2.1 LA SPERIMENTAZIONE SU VIABILITA' ORDINARIA **73**

5.2.2 LA SPERIMENTAZIONE SU VIABILITA' AUTOSTRADALE **76**

5.3 STIMA DEL RISCHIO SOGGETTIVO PER LA MANOVRA DEL SORPASSO **78**

5.4 CONCLUSIONI **81**

6. VERIFICA SPERIMENTALE DEL RISCHIO DI TAMPONAMENTO IN FUNZIONE DELLA DENSITÀ VEICOLARE **83**

6.1 LA SPERIMENTAZIONE **83**

6.2 L'ANALISI DEI RISULTATI **87**

6.2.1 I COMPORTAMENTI INDOTTI DAL CARICO DI TRAFFICO **87**

6.2.1.1 LA SOGLIA DI ATTENZIONE (*Sa*) 87

6.2.1.2 LA PERCEZIONE DEL RISCHIO (*Pr*) 89

6.2.1.3 IL DISTANZIAMENTO MINIMO (*dmin*) 90

6.2.2 I LIVELLI DI RISCHIO 91

6.2.2.1 LA VARIABILE PROBABILISTICA 92

6.2.2.2 LA GRAVITÀ DEL SINISTRO 93

6.3 CONCLUSIONI 95

7. LA TEORIA DEL DISAGIO 97

7.1 I LIVELLI DI DISAGIO 98

7.2 LA SOGLIA DI RISCHIO 102

7.3 LO STUDIO CONDOTTO SUL CAMPO 106

7.3.1 I CASI STUDIO 106

7.3.2 DEFINIZIONE DELLE TRATTE OMOGENEE 107

7.3.3 DETERMINAZIONE DELLE VELOCITÀ OPERATIVE 108

7.3.4 VALUTAZIONE DELLA VELOCITÀ DESIDERATA 108

7.3.5 DETERMINAZIONE DELL'INCIDENTALITÀ SPECIFICA IMPUTABILE ALLA TRATTA 111

7.3.6 CALCOLO DEL LIVELLO DI DISAGIO 111

7.4 CONCLUSIONI 113

8. CONCLUSIONI GENERALI E SVILUPPI FUTURI 115

BIBLIOGRAFIA 117

Elenco delle figure

1.1 L'approccio multidisciplinare per la gestione del rischio incidentale. 3

1.2 La distribuzione delle cause incidentali. 3

2.1 La logica progettuale in una visione sistemica. 17

2.2 Struttura formale di un neurone artificiale. 25

2.3 La fase di test della rete neurale. 26

2.4 Schema dell'albero degli eventi. 28

3.1 Il laboratorio di simulazione del CRISS. 33

3.2 Il dimensionamento del campione. 35

3.3 La validazione della simulazione sulle velocità in transito su una zona di cantiere autostradale. 37

3.4 Il tracciato di prova e l'impulso random per l'attivazione della reazione. 38

3.5 La descrizione delle traiettorie della manovra del sorpasso. 39

3.6 La valutazione dell'omogeneità dei tracciati test in funzione delle V_{85} misurate. 40

3.7 Variabilità della fascia di dispersione delle traiettorie in funzione dello sviluppo dei rettifili. 41

3.8 Indicatori di qualità del progetto. 42

3.9 La verifica di qualità dei progetti stradali. 43

3.10 L'ambito delle sperimentazioni in realtà virtuale. 45

4.1 Protocollo di simulazione per la certificazione della qualità dei progetti stradali. 48

4.2 Casi di studio riprodotti in simulazione di guida in realtà virtuale. 51

4.3 Rappresentazione schematica del processo iterativo per la valutazione degli incidenti ripetitivi. 53

4.4 Determinazione del range di variabilità e dell'incidentalità ripetitiva. 54

4.5 Laboratorio di realtà virtuale del CRISS. 56

4.6 Confronto tra lo scenario reale e lo scenario simulato. 57

4.7 Disagio Patologico DP. 58

4.8 DP_{mod} *e incidentalità specifica per l'A24. 61*

4.9 DP_{mod} *e incidentalità specifica per la SR148. 61*

4.10 DP_{mod}^{*} *e incidentalità specifica per l'A24 e la SR148. 63*

4.11 Gallerie nello scenario simulato dell'A1. 63

4.12 DP_{mod}^{*} *e incidentalità specifica per l'A24, l'A1 e la SR148. 64*

4.13 Possibile procedura alternativa per la verifica del progetto stradale. 66

4.14 Indicatore tradizionale CCR vs indicatore di simulazione DP_{mod}^{*}*. 67*

4.15 Indicatore tradizionale CCR vs incidentalità specifica I. 67

5.1 Albero degli eventi per la determinazione della probabilità di sorpasso in debito di sicurezza. 70

5.2 Scenari di simulazione in realtà virtuale. 72

5.3 Schema esemplificativo del sorpasso a rischio per la viabilità ordinaria. 72

5.4 Diagramma spazio/tempo per l'individuazione dei sorpassi a rischio. 74

5.5 Sorpassi a rischio e densità veicolare per la viabilità ordinaria. 75

5.6 Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità ordinaria. 76

5.7 Sorpassi orari e densità veicolare per la viabilità autostradale. 77

5.8 Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità autostradale. 78

5.9 Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità ordinaria ed autostradale. 79

5.10 Probabilità del sorpasso in debito di sicurezza in funzione della densità veicolare. 80

6.1 Lo scenario di simulazione. 84

6.2 Il piano della sperimentazione. 84

6.3 L'output grafico per l'analisi del moto relativo. 86

6.4 Soglia temporale di attenzione Sa. 88

6.5 Soglia di percezione del rischio Pr metrica e temporale. 89

6.6 Distanza minima di accodamento dmin metrica e temporale. 91

6.7 Probabilità normalizzata di tamponamento. 93

6.8 Gravità normalizzata di tamponamento. 94

6.9 Rischio normalizzato di tamponamento. 95

7.1 Condizioni operative e velocità desiderata. 99

7.2 Schema qualitativo ed esemplificativo di: livello di disagio, soglia di rischio, disagio cumulato e incidentalità specifica. 104

7.3 Casi di studio e localizzazione. 106

7.4 Determinazione delle componenti della domanda di mobilità. 110

7.5 Incidentalità specifica in funzione del livello di disagio. 113

Elenco delle tabelle

2.1 Alcuni esempi di modelli interpretativi della qualità del progetto. 22

4.1 DP_{mod}^{*}, incidentalità specifica e CCR per l'A24, l'A1 e la SR148. 65

5.1 Probabilità elementari dell'albero degli eventi del sorpasso ed indicatori di primo e secondo ordine. 70

5.2 Sorpassi a rischio e densità veicolare per viabilità ordinaria. 75

5.3 Condizioni di prova per la viabilità autostradale. 76

5.4 Sorpassi a rischio per la viabilità autostradale. 77

5.5 Grado di sicurezza per la viabilità ordinaria ed autostradale. 79

6.1 Soglia di attenzione spaziale negli scenari di simulazione. 87

6.2 Confronto tra velocità di avvicinamento e velocità del flusso. 88

6.3 Soglia temporale di attenzione Sa. 88

6.4 Soglia di percezione del rischio Pr. 89

6.5 Distanza minima di accodamento dmin. 91

6.6 Probabilità normalizzata di tamponamento. 92

6.7 Gravità normalizzata di tamponamento. 94

7.1 I casi di studio. 106

7.2 Componenti tipologiche della domanda di mobilità:caratteri distintivi degli spostamenti e livelli di servizio "desiderati". 109

7.3 Livello di disagio ed incidentalità specifica. 112

Elenco dei simboli

Nell'elenco che segue sono riportati i principali simboli che compaiono nei capitoli della tesi.

a	*Accelerazione media*
$a_t(s)$	*Accelerazione trasversale all'ascissa s*
$a_t(s)^{fis}$	*Accelerazione trasversale fisiologica all'ascissa s*
$a_t(s)^{pat}$	*Accelerazione trasversale patologica all'ascissa s*
C	*Capacità della sezione stradale*
CCR	*Curvature Change Rate*
CF	*Comfort Fisiologico*
$dmin$	*Distanziamento minimo*
DP	*Disagio Patologico*
D_q	*Disagio cumulato alla generica progressiva q dell'itinerario*
ds	*Distanza di sicurezza*
E	*Energia cinetica*
H_P	*Durata in ore della condizione* P_P%
H_{PT}	*Intervallo temporale elementare*
H_T	*Durata in ore del flusso* N_T
i	*Indice della classe di mobilità*
I	*Incidentalità specifica*

I_C	*Incidenti casuali*
I_f	*Incidentalità fisiologica media al km*
I_L	*Incidenti localizzati*
I_R	*Incidenti ripetitivi*
IS	*Incidentalità specifica*
j	*Indice orario*
k	*Costante di proporzionalità per il livello di disagio*
L	*Lunghezza arco di cerchio*
LD	*Livello di Disagio*
LD_x	*Livello di Disagio della tratta omogenea elementare x*
Lx	*Lunghezza tratte omogenee elementari*
m	*Massa media di un veicolo*
N	*Flusso orario*
N_C	*Flusso orario della componente C di domanda di traffico*
N_{CT}	*Flusso orario della componente C di domanda di traffico T*
N_{ij}	*Flusso orario della classe i nell'ora j*
N_{PT}	*Flusso orario caratterizzato dalla percentuale di veicoli pesanti P sulla domanda di traffico T*
N_T	*Flusso orario della classe di traffico T*
N/C	*Densità veicolare*
P	*Probabilità di accadimento*

P_I	*Probabilità dello scenario I*
Pr	*Percezione del rischio*
$P\%$	*Percentuale di traffico pesante*
$P_P\%$	*Condizioni del traffico pesante*
q	*Generica progressiva*
R	*Raggio del cerchio*
R^2	*Coefficiente di regressione*
S	*Numero totale di sorpassi per simulazione*
Sa	*Soglia di attenzione*
S_R	*Numero totale di sorpassi a rischio per simulazione*
SR	*Soglia di Rischio*
SR_q	*Soglia di Rischio alla generica progressiva q dell'itinerario*
T	*Classi di traffico*
t_R	*Tempo medio per utente di permanenza nelle condizioni di rischio*
t_T	*Tempo medio di durata della prova*
v	*Velocità media*
Va_1	*Velocità di avvicinamento nella prima fase*
Va_2	*Velocità di avvicinamento nella seconda fase*
Vd	*Velocità desiderata*
Vd_c	*Velocità desiderata della componente C di flusso*

V_{di}	*Velocità desiderata della classe di mobilità i-esima*
Ve	*Velocità di esercizio*
V_{ej}	*Velocità di esercizio nell'ora j-esima*
Ve_x	*Velocità di esercizio della tratta omogenea elementare*
Vf	*Velocità media del flusso*
x	*Tratte omogenee elementari*
y	*Tratta generica*
Δ	*Range di variabilità degli incidenti casuali*
$(\eta_u)_S$	*Grado soggettivo di sicurezza per la manovra del sorpasso*
ρ	*Raggio di una curva*
τ	*Tempo psicotecnico di reazione*

1. Introduzione

Se si analizza il fenomeno incidentale, quale si è andato configurando in questi ultimi anni per il sistema viario italiano, appare evidente che la ripetitività degli eventi, la loro localizzazione e tipologia, attribuiscono alla strada una rilevante quota di responsabilità. Altrettanto evidente è la constatazione di relazioni tra le sue condizioni di fruizione e il manifestarsi di quei comportamenti a rischio da parte dei conducenti che giocano un ruolo fondamentale nella genesi dell'evento incidentale. Lo studio delle leggi generali che regolano tali rapporti è quindi altrettanto importante per migliorare la qualità dei progetti quanto lo è la geotecnica stradale per garantire l'affidabilità statica del manufatto.
Alcune stime valutano i costi annui imputabili all'incidentalità stradale pari a circa 20 miliardi di euro e rilevano come questa sia la prima causa di morte sotto i 25 anni e la terza sotto i 55 [84].
Il costo sociale relativo all'incidentalità stradale è attualmente considerato uno dei problemi più gravi dei paesi industrializzati e sviluppati. I trend di crescita di morti e feriti mostrano risultati preoccupanti in tutto mondo.
Gli stati membri dell'Unione Europea hanno adottato piani mirati, leggi e decreti per invertire questa tendenza, come è stato già attuato oltreoceano [49,50,69,72,78]. Oltre all'aspetto sociale esiste anche una giustificazione strettamente economica [32,68,89,90] legata al costo della vita umana che alcune stime pongono nell'intorno di un milione di euro [51]. Infatti, in accordo con la commissione europea i dati registrati dimostrano che gli incidenti stradali costano circa 45 miliardi di euro per anno, suddivisi in 15 miliardi per spese mediche, interventi della polizia e riparazione dei veicoli, e 30 miliardi per perdite di produzione economica dovuta a morti e feriti. L'UE ha adottato programmi, finanziato progetti e moltiplicato gli sforzi per promuovere la sicurezza stradale. La commissione europea ha più recentemente dichiarato nel COM(2003) 311 finale, nell'aggiornamento delle stime numeriche: "*ogni anno più di 40000 persone muoiono nell'unione europea a seguito di incidenti stradali e 1700000 restano ferite. Questi incidenti sono la causa principale di morte per la fascia di età sotto i 45 anni e causano più vittime che infarti o tumori nella stessa fascia. Il costo totale per la società è stato stimato a più di 160 miliardi per anno corrispondenti al 2% del EU GNP- un prezzo esorbitante da pagare*".

I costi sociali e finanziari pongono in evidenza come l'esercizio della mobilità stradale abbia assunto ormai i connotati propri dell'emergenza. Inoltre occorre prendere atto della necessità di adeguare i criteri progettuali delle infrastrutture viarie ai caratteri di un fenomeno circolatorio che negli ultimi decenni si è profondamente modificato per effetto delle diverse esigenze di domanda intervenute rispetto al tempo in cui le opere erano state realizzate.
La mobilità di persone e merci è oggi cerniera di tutti i processi che caratterizzano lo sviluppo di una moderna economia. Allo stesso modo lo sviluppo economico condiziona fortemente la domanda di trasporto per i suoi caratteri sia qualitativi che quantitativi. Tra le cause che hanno determinato la situazione attuale è possibile elencare le più significative:

- la crescita esponenziale della domanda, prossima su molti itinerari alla capacità, che comporta livelli di disagio tali da influenzare la soglia di accettazione del rischio da parte degli utenti;
- l'incremento del trasporto merceologico su gomma, che condiziona pesantemente la funzionalità delle reti viarie per la natura stessa del territorio italiano orograficamente accidentato;
- l'evoluzione del sistema sociale ed economico che ha modificato i caratteri della domanda di mobilità determinando carichi di traffico fortemente variabili su base stagionale e giornaliera, oltre che una commistione di flussi diversamente motivati sugli stessi itinerari;
- lo svecchiamento del parco circolante e l'evoluzione tecnologica dei veicoli, oggi capaci di prestazioni impensabili alcuni anni or sono soprattutto in termini di velocità ed accelerazioni;
- una pianificazione territoriale che non sempre ha interpretato correttamente le linee di tendenza dello sviluppo urbanistico, e che ha spesso coinvolto le infrastrutture viarie imponendo ad esse funzioni diverse rispetto a quelle per cui erano state concepite.

Le conseguenze di tutto ciò hanno mutato radicalmente le condizioni che caratterizzavano la mobilità stradale negli anni '60, quando cioè venivano formalizzate le prime "norme" progettuali. In ambito extraurbano indubbiamente la progettazione delle strade basata su criteri ormai datati è una delle concause dell'elevato livello incidentale imputabile alle nostre opere; un'ulteriore causa è certamente da ricondurre ad una colpevole

gestione e manutenzione del patrimonio infrastrutturale, per il quale vengono destinate risorse del tutto marginali rispetto alle reali necessità.
Proprio perché è fortemente mutato lo scenario di riferimento non è possibile ritenere ancora valide regole progettuali concepite oltre mezzo secolo or sono. S'impone una revisione critica delle certezze maturate quando si riteneva sufficiente garantire la sicurezza dell'esercizio viario assicurando la compatibilità della geometria stradale con la dinamica e la cinematica del veicolo isolato, trascurando del tutto di prendere in considerazione il comportamento degli utenti. Lo scenario è radicalmente cambiato e con esso sono mutate le interazioni tra gli attori principali dell'esercizio di guida. E' quindi necessario un nuovo approccio multidisciplinare che possa abbracciare contemporaneamente gli studi e le esperienze di più discipline, dalle scienze ingegneristiche a quelle mediche e psicologiche [9,40,56,82,86,91].
Il problema si pone oggi in termini particolarmente complessi, riassunti schematicamente dall'ideogramma in figura 1.1.

Fig. 1.1 – L'approccio multidisciplinare per la gestione del rischio incidentale.

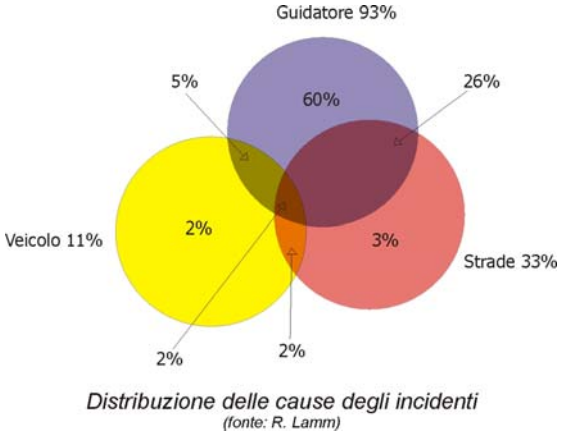

Fig. 1.2 – La distribuzione delle cause incidentali [71].

Per gestire progettualmente un reale controllo dei livelli di rischio è quindi necessario considerare la strada come una delle componenti di un più complesso sistema *uomo-veicolo-strada*, caratterizzato da molteplici variabili che si condizionano reciprocamente e che contribuiscono in maniera diversa alle dinamiche che governano il verificarsi degli eventi incidentali (figura 1.2) [70,71].
Da alcuni anni a questa parte lo sviluppo delle tecnologie meccaniche ed elettroniche ha consentito all'industria automobilistica di realizzare veicoli particolarmente affidabili, sia per la prevenzione degli incidenti, sia per mitigare le conseguenze dei sinistri. Nel contempo però ha prodotto autovetture capaci di prestazioni che inducono nel conducente un senso di sicurezza che spesso non è compatibile con le caratteristiche tecniche e funzionali del sistema stradale italiano. Ed è proprio il grado di sicurezza dell'utente rapportato a quello assunto dal progettista uno dei punti più delicati della sicurezza dell'esercizio viario.
In questo scenario diviene fondamentale, come verrà ampiamente discusso nel seguito, studiare ciò che l'utente percepisce e ciò che esso accetta come rischio. E' evidente ad esempio che l'aderenza percepita dal guidatore è una delle variabili che condiziona le velocità che esso adotta così come le geometrie stradali e l'ambiente al contorno possono condizionare significativamente il comportamento di guida, così come è ampiamente discusso in letteratura [1,8,53,58,59,64,94].
Problemi di questo tipo investono la fruizione della rete viaria e vanno tenuti in debita considerazione per spiegare l'evoluzione del fenomeno incidentale. Non investono tuttavia le responsabilità del progettista sin quando non si prevede di realizzare nuove opere o di adeguare le esistenti. Ma quando ciò si verifica non è eticamente lecito giustificare una progettazione inadeguata sotto il profilo della sicurezza invocando comportamenti "anomali" degli utenti che tali non sono se sono coerenti con il comportamento di un utente "mediamente prudente".
E' infatti il comportamento di quest'ultimo a cui si deve far riferimento per garantire una progettazione "intrinsecamente sicura".
Ciò non è facile, ma non possono essere le difficoltà che si incontrano nel costruire un'affidabile modellazione del comportamento degli utenti a giustificare un diverso approccio progettuale. Non tener conto dei limiti psicofisiologici del conducente del veicolo, dei suoi condizionamenti psicologici e degli automatismi di guida equivale a supporre che la sicurezza delle nostre strade possa essere garantita imponendo per decreto che è vietato morire [24].

Occorre pertanto approfondire gli studi sugli attuali scenari incidentali al fine di individuare le responsabilità dirette ed indirette dell'infrastruttura nella genesi degli eventi incidentali, al fine di proporre interventi efficaci per la sicurezza stradale per evitare di indurre comportamenti a rischio negli utenti.
E' necessario individuare quali siano i fattori legati all'ambiente stradale, endogeni ed esogeni, che influenzano ed incidono maggiormente sulle scelte del guidatore mediamente prudente, modificandone od alterandone le percezioni e, di conseguenza le reazioni.

1.1 Le responsabilità della strada

Ciò che distingue la strada da ogni altra opera di ingegneria civile è la constatazione della rilevante influenza che le scelte progettuali determinano sul comportamento degli utenti e come, a parità di altre condizioni, tali comportamenti siano fortemente dipendenti dalle condizioni d'esercizio.
Purtroppo, per motivi storici, il tradizionale approccio progettuale prescinde da un'adeguata considerazione di questi mutui condizionamenti e da ciò discende una rilevante responsabilità della strada nel determinare gli attuali livelli di sinistrosità.
Le responsabilità della strada che concorrono a determinare un evento incidentale sono molteplici e dipendono da cause diverse. Numerosi studi condotti su scenari incidentali di diverse viabilità extraurbane, sia ordinarie che autostradali, hanno consentito di porre in evidenza su tutte alcune di queste cause che ricorrono più frequentemente:

- un contatto ruota strada che, per una inadeguata esecuzione delle sovrastrutture o come conseguenza di gravi ammaloramenti della pavimentazione, non garantisce idonei valori di aderenza;
- situazioni locali di insidia indotte da anomalie localizzate, sia geometriche, sia funzionali, che si definiscono tali in quanto non possono essere previste in tempo utile dall'utente;
- geometrie progettuali che, pur compatibili localmente con la cinematica e la dinamica del veicolo isolato, non garantiscono nel loro complesso la funzionalità sistemica dell'infrastruttura;
- un'offerta di servizio che, discostandosi sensibilmente dalle aspettative degli utenti, determina l'accettazione di più elevati livelli di rischio e un conseguente incremento di manovre in debito di sicurezza.

Tutte queste cause di rischio derivano di norma da errori progettuali, carenze manutentorie e mancato adeguamento delle infrastrutture all'evoluzione di quelle condizioni al contorno discusse nel precedente paragrafo, che sono determinanti per garantire la corretta funzionalità della strada.
Purtroppo la tendenza generalizzata a trasferire sull'utente la responsabilità primaria dell'evento incidentale finisce per autorizzare una realizzazione e gestione delle infrastrutture che spesso è gravemente deficitaria.
La ricerca delle responsabilità degli eventi incidentali ha da sempre suscitato un grande interesse ed il percorso che oggi ha condotto all'individuazione delle relazioni tra l'utente e la strada come conoscenza imprescindibile per spiegare le dinamiche di guida, ha inizio già alla fine dell'800.

1.2 Il percorso delle teorie incidentali

Prima di procedere presentando più nel dettaglio le varie metodologie e i vari approcci impiegati negli studi sviluppati nell'ambito della tesi di dottorato, ritengo opportuno discutere brevemente su come a livello internazionale la problematica incidentale sia sempre esistita.
Alcune delle più brillanti teorie incidentali hanno cercato nel corso degli anni di fornire una risposta esaustiva ad un quesito la cui soluzione è tutt'oggi (più che mai, aggiungerei) di enorme complessità: perché accadono gli incidenti? Facile da chiedere, estremamente complicato rispondere!
Il problema della previsione e prevenzione degli incidenti stradali non è sicuramente nuovo e a riguardo si sono susseguite numerose teorie sviluppate e proposte per attribuire le cause degli incidenti a partire dalla fine del XIX secolo.
Alcune di queste teorie, le più significative per ogni epoca, sono presentate cronologicamente:

- Random theory (teoria degli incidenti come eventi puramente casuali, 1890-1920, Bortkiewicz, 1898 [34]);
- Accident prone theory (teoria incidentale basata sulla statistica e sulla tendenza individuale a generare incidenti, 1910-1950, Greenwood e Yule, 1920 [61]);
- Causal theory (la teoria della causalità degli incidenti, 1930-1970, Forbes, 1939 [54]);

- System theory and epidemiological accident theory (teoria sistemica ed epidemiologica, 1940-1990, Cresswell e Froggatt, 1963 [43]);
- Behavioural approach (teoria incidentale comportamentale, 1970-2009, Wilde, 1994 [93]).

La ricerca incidentale, l'*accidentology*, come è definita oggi, intendendo la scienza moderna che studia i fenomeni incidentali, iniziò più di 100 anni fa, nel 1898, quando Bortkiewicz pubblicò il suo libro intitolato *"The law of small number"* [34]. Bortkiewicz studiò la frequenza delle morti causate da cadute e calci da cavallo all'interno dell'esercito prussiano. In questo libro mostrava come eventi con bassa frequenza presso una grande popolazione si suddividessero con una distribuzione poissoniana anche al variare delle probabilità degli eventi. Si tratta del libro che rese famosi i dati sugli incidenti mortali da cavallo presso i 14 reparti della cavalleria prussiana nell'arco di 20 anni. L'economista russo dimostrava appunto come tali dati seguissero la distibuzione statistica in questione. Utilizzando un modello poissoniano di distribuzione casuale degli incidenti trovò che il numero delle morti per corpo d'arma per anno era perfettamente casuale e giunse alla conclusione che gli incidenti sono puramente eventi accidentali sui quali l'uomo non può avere controllo. La teoria casuale considera implicitamente il concetto di uguaglianza tra le persone in termini di esposizione al rischio di morte. È anche interessante notare come la formulazione di questa teoria segua a distanza di qualche anno la rivoluzione francese in cui il valore culturale di uguaglianza, *egalité*, venne diffuso in tutto il mondo. In questo senso l'etimologia della parola incidente trova la giustificazione nella casualità, nel destino, nel fato: "e che potevo farci? E' stato un incidente!", frase che a noi tutti è capitato di pronunciare più volte, la maggior parte delle quali probabilmente per cercare di discolparci di qualche nostro errore.

Ma quando si osservò che la probabilità di morte non era la stessa per ogni persona, ma le persone che lavoravano con materiale esplosivo durante la prima guerra mondiale erano più soggette, evidentemente più esposte diremmo oggi, ad incidenti, fu pubblicata nel *Journal of the Royal Statistical Society* da Greenwood e Yule nel 1920 [61] la "*accident prone theory*". Il più semplice dei modelli utilizzati che descriveva adeguatamente la distribuzione degli incidenti osservata era il modello binomiale negativo. Alcune persone erano insomma più esposte ad avere incidenti che altre. E' interessante notare come anche per questa teoria ci sia una coerenza con il trend culturale dell'epoca. Infatti nello stesso anno

Freud proponeva le basi della psicoanalisi. Furono sviluppati i primi test di intelligenza e di personalità che permettevano così di identificare quelle persone che erano particolarmente predisposte agli incidenti e negare loro l'accesso a quelle attività dove potevano causare dei problemi. Per la prima volta si iniziava a parlare della personalità, dell'individualità, della differenza tra persone. Si passò da una concezione esclusivamente casuale alla convinzione che gli incidenti fossero dovuti solo agli errori di poche persone, aventi qualche sorta di disordine mentale.

Dopo la prima guerra mondiale il settore dei trasporti crebbe enormemente come conseguenza della guerra stessa. È risaputo infatti come il trasporto costituisca un settore strategico durante i periodi di guerra. Il problema dell'incidentalità stradale divenne importantissimo. Studiando questo problema, forse influenzato dalle nuove teorie della microbiologia che proponevano un virus come causa di ciascuna malattia, Forbes propose la teoria causale nel 1939 sul *Journal of General Psychology* [54]. Nello specifico veniva proposto di attribuire ad ogni incidente stradale una unica causa. Non era possibile che avvenisse un evento incidentale senza che ci fosse una responsabilità da parte di qualcuno o qualcosa.

Successivamente la teoria causale venne rivista poiché si prese coscienza che un evento incidentale era frequentemente causato da una molteplicità di fattori interagenti tra di loro. Si concluse perciò che gli incidenti erano tipicamente eventi multi causali, avevano cioè più di una causa e il fattore umano contribuiva alla generazione di molti di questi incidenti. In particolare molti studi approfonditi iniziavano ad imputare all'errore umano la causa dell'incidente.

Nasce nel 1963, anno di pubblicazione di *"The causation of bus driver accident. An epidemiological study"* [43] da parte di Cresswell e Froggatt, la teoria sistemica e la teoria epidemiologica. Le ipotesi di basi consistono nel ritenere che l'incidente stradale è il risultato di un'interazione errata tra le varie componenti di sistemi complessi. Per esempio, gli umani sbagliano, ma allora perché commettono tali errori? La risposta proposta dalla teoria sistemica è che l'errore viene fatto perché il sistema non è adeguatamente progettato e non si incontra perfettamente con le capacità umane.

La teoria sistemica pensava quindi di trovare la soluzione agli incidenti modificando le componenti tecniche del sistema dei trasporti stradali. L'ingegneria stradale e meccanica divennero fondamentali in quest'ottica. Come teoria di prevenzione incidentale, la teoria sistemica ebbe il più

grande successo di qualsiasi altra teoria incidentale. Gli interventi che furono effettuati sul sistema stradale, controllo del traffico e progettazione dei veicoli, fecero decrescere significativamente il numero di incidenti nei paesi motorizzati.
Infine, nel 1994, Wilde pubblicò la sua teoria sul risk homeostasis [93], che sosteneva che la generazione dell'incidente era strettamente connessa a fattori comportamentali dell'utente e della società. L'idea di base di questa teoria è che la percezione e l'accettazione del rischio da parte dell'uomo è un fattore determinante per stimare il reale numero di incidenti in una certa attività. Più nel dettaglio, Wilde dice che ogni società ha il numero di incidenti che vuole avere e l'unico modo per abbassare questo valore è cambiare il livello di rischio (il livello desiderato di sicurezza). In altri termini sostiene che il livello di rischio che ciascun individuo ritiene ottimale per il proprio benessere, sia emotivo che fisiologico, risulta controllato omeostaticamente. Concetto chiave diviene l'ottimizzazione del livello di rischio intrapreso: il sistema individuo mantiene nel tempo un livello omeostatico di rischio, fluttuando continuamente per compensare i cambiamenti dell'ambiente di vita; le differenze tra la situazione desiderata (livello ottimale di rischio) e la situazione realmente percepita (livello effettivo di rischio) vengono ridotte con l'attuazione di un comportamento compensatorio attraverso una rivalutazione cognitiva.
Occorre sottolineare che tutte queste teorie nascono per combattere gli incidenti spiegandone esclusivamente le possibili cause generatrici. Non si occupano cioè degli eventuali interventi di prevenzione e/o mitigazione dei sinistri.

1.3 Le relazioni tra utente ed infrastruttura

L'evoluzione dell'approccio "all'incidentologia" dimostra con grande evidenza che gli incidenti nascono come conseguenze di diverse cause. La teoria sistemica e la teoria del comportamento dimostrano che è sempre più rilevante nella causa dell'incidente il ruolo dell'infrastruttura e del comportamento degli utenti indotto dall'ambiente stradale. In quest'ottica la stima del rischio di un'infrastruttura assume la massima importanza. Rispetto alle condizioni del flusso veicolare, la stima del rischio della strada è significativa quando analizza non solo gli aspetti cinematici e dinamici ma anche i comportamenti umani nelle differenti condizioni di traffico e ambientali. È in questo senso che una reale valutazione della proprietà sistemica dell'infrastruttura non può essere determinata

esclusivamente attraverso il semplice controllo di predeterminati standard. È necessaria un'analisi sul comportamento degli utenti. Da questa considerazione è possibile partire per una breve discussione su alcuni studi e ricerche sviluppate più recentemente in ambito internazionale per approfondire le tematiche della sicurezza stradale con riferimento al ruolo interattivo dell'utente e dell'infrastruttura.
Infatti la letteratura più recente fornisce alcuni importanti studi effettuati sulle relazioni causa-effetto tra il progetto di ogni singolo elemento geometrico e la sua efficacia funzionale [48].
Tradizionalmente sono state studiate le correlazioni tra gli incidenti e la geometria dei singoli elementi delle strade (raggio di curvatura, curve di transizione, larghezza di corsia o banchina, condizioni e caratteristiche della pavimentazione, ecc.). La verifica sistemica del progetto globale è invece ancora un settore poco esplorato a causa della difficoltà di trovare degli indicatori così precisi che possano esprimere un giudizio attendibile al riguardo.
Nel 1999 Lamm [71] propose nuovi indicatori (tra cui il *CCRs*) per valutare la coerenza geometrica dell'infrastruttura. Questi parametri costituiscono un'evoluzione importante rispetto ai tradizionali requisiti e standard geometrici [52]. Infatti essi sono funzione di elementi geometrici consecutivi: questo approccio supera la tradizionale valutazione basata sui requisiti relativi ai singoli elementi dirigendosi verso una prospettiva sistemica, quella definita dal *design consistency* che rappresenta la qualità dell'insieme di scelte progettuali dal punto di vista delle corrette conseguenze che queste hanno sulle azioni di chi è alla guida, che a loro volta dipendono evidentemente dalla coerenza tra ciò che l'utente si aspetta e ciò che la geometria stradale gli offre. I parametri utilizzati per descrivere il comportamento e le scelte degli utenti sono di diverso genere e di diversa difficoltà di osservazione. Tra questi i più significativi proposti in letteratura sono la velocità operativa, il Visual Load Index ed il Mental Work Load. In particolare la velocità operativa è il parametro che ha avuto nel tempo la maggiore attenzione da parte della ricerca scientifica operante nel settore soprattutto per la maggiore facilità con la quale è possibile rilevare le velocità dei veicoli durante la marcia [8,52,53,59,64,70,71].
Fino ad oggi ha dominato l'approccio tradizionale, nonostante molti contributi scientifici, basati su studi effettuati da psicologi, abbiano messo in luce che la sicurezza stradale è un problema decisamente influenzato dalla sfera dei fattori umani [57].

Questo dovrebbe suggerire all'ingegneria che, sia il comportamento dell'utente, sia i fattori condizionanti il comportamento dell'utente, debbano essere considerati più in profondità rispetto alle semplicistiche assunzioni tradizionali adottate sinora dall'ingegneria stradale. In questa direzione sono stati ottenuti risultati interessanti studiando tra l'altro la correlazione tra l'evento incidentale e il livello di servizio offerto da un'infrastruttura [14,15,17,22,37,42,95].
Nel 2002 Carsten [40] ha messo in evidenza la necessità di analizzare il problema della sicurezza attraverso uno studio interdisciplinare.
La reazione dell'utente agli stimoli e alle percezioni è il fattore predominante nella determinazione che una situazione di guida (un errore dell'utente, un'insidia geometrica, una improvvisa frenata di emergenza, condizioni climatiche particolarmente avverse,…) possa condurre o meno al verificarsi dell'evento incidentale.
La relazione tra le capacità e le aspettative dell'utente e la reale offerta dell'infrastruttura è stata ampiamente discussa [55,56,93]. In questo senso molte concettualizzazioni sono a volte irreali, in quanto l'utente accetta una probabilità incidentale comunque maggiore di zero sotto talune condizioni. È stato dimostrato [62] come la percezione soggettiva del rischio durante la guida sia un fattore determinante per la sicurezza stradale. In altri termini poiché la guida è essenzialmente un'attività autonoma, un utente determina la difficoltà del suo/sua obiettivo adottando e accettando differenti soglie del rischio, tenendo conto che l'esercizio di guida è evidentemente un'attività multi-tasks (bisogna soddisfare contemporaneamente più obiettivi).
L'accettazione del rischio può essere definita come il livello del rischio, o la soglia del rischio percepito, che l'utente desidera accettare [85]. Tale supposizione è condivisa da molti modelli di guida basati sul rischio e sulle motivazioni alla guida dell'utente [33,67,76,77,92].
Più in particolare nel 1999 Deery [46] ha trattato la percezione del rischio in riferimento all'esperienza soggettiva del rischio stesso, percepito in particolari condizioni di flusso veicolare. Nel 1988 Brown and Groeger [35] proposero una teoria nella quale dichiaravano che queste percezioni sono in realtà determinate da due tipologie di input:

a) informazione riguardanti i rischi potenziali in determinate condizioni geometriche e di traffico;
b) informazioni sull'abilità dell'utente (e le potenzialità del veicolo) per prevenire che questi rischi potenziali si trasformino in incidenti reali.

Il complesso meccanismo della percezione-reazione è spiegato nella letteratura scientifica in due principali teorie [5]:

- information-processing framework [80,81]. Tale teoria sostiene che l'informazione è processata lungo una serie di passi indipendenti: identificazione dello stimolo, trasferimento stimolo-risposta, reazione;
- ecological framework [60,75]. Le basi di questa teoria invece si fondano sull'ipotesi che la reazione ad uno stimolo avvenga direttamente, senza una fase di trasferimento stimolo-risposta.

La soglia del rischio e il meccanismo di percezione - reazione dipendono, per lo stesso soggetto, dallo stress e dalla fatica come dal carico mentale. L'analisi del rischio non può escludere fattori dipendenti dalle condizioni dell'utente: per questo motivo sono necessari nuovi strumenti di ricerca.

L'esercizio della guida automobilistica e le ricadute in termini di sicurezza stradale costituiscono un argomento di grande complessità perché ricadono in un ambito in cui il campo di indagine investe dei settori per i quali risulta determinante il comportamento dell'individuo, le sue attitudini, l'esperienza e quei personali criteri e convincimenti che sono alla base dei processi decisionali. Come è ben noto, infatti, non solo dai dati scientifici ma ancor prima dall'esperienza comune, in analoghe situazioni è frequente osservare diversi comportamenti al variare degli utenti, ma anche differenti comportamenti per lo stesso utente, difficilmente prevedibili poiché connessi spesso a fattori assolutamente estranei al contorno viario e di traffico.

Benché esistano degli schemi teorici di interpretazione dei meccanismi ergonomico - cognitivi che schematizzano tra l'altro i comportamenti di guida, generalmente riconducibili a processi automatici, appare allo stato attuale impossibile simulare numericamente queste dinamiche comportamentali esclusivamente attraverso algoritmi, come invece accade per altri settori di ricerca in cui è prevalente una interpretazione puramente a base fisica dei fenomeni e sono trascurabili o assenti le componenti aleatorie.

D'altra parte due ragioni spingono in modo determinante nella direzione di una ricerca basata sulla simulazione. Da una parte la possibilità di investigare a costi relativamente contenuti, attraverso un vasto campionamento sperimentale, un fenomeno condizionato da rilevanti componenti aleatorie; dall'altra la necessità di introdurre nei tradizionali schemi a base fisico-cinematica la componente umana per un'analisi multidisciplinare delle problematiche.

Come più volte sottolineato è ormai un fatto che le problematiche della sicurezza stradale rappresentino una questione che interessa non solo le scienze meccaniche (il veicolo) e le scienze ingegneristiche (la strada), ma anche le discipline che studiano i fattori umani; da una parte in ragione delle intrinseche differenze soggettive, endogene, tra gli utenti, che comportano sia differenti capacità percettive (es. l'ampiezza utile del campo visivo) e reattive (es. la destrezza o il coordinamento delle azioni), sia differenti propensioni individuali nell'assegnazione ed accettazione di specifici criteri decisionali (es. la definizione delle soglie di rischio), dall'altra parte in ragione delle differenze di comportamento indotte dall'ambiente esterno e quindi per così dire esogene rispetto all'individuo (es. le condizioni di traffico, la geometria stradale, l'ambiente circostante la strada).

Questa problematica è resa ancor più complessa da due fatti sostanziali:

1. le capacità individuali e i parametri comportamentali non rappresentano una grandezza invariante nel tempo (es. variano con l'età o con specifiche condizioni fisiologiche e patologiche) e nello spazio (es. variano al variare degli scenari prospettici, della luminosità o dello skyline);
2. sussiste un forte condizionamento delle capacità individuali rispetto allo stato psicologico dell'utente. L'esempio estremo è quello dei comportamenti in situazioni di panico.

Si è di fronte quindi ad un'ampia variabilità di comportamenti dei driver e alla non trascurabile possibilità di effettuare rilevazioni anomale, nel momento in cui si sta indagando sul comportamento umano.

In genere ciò non rappresenta una reale limitazione sin quando è possibile reiterare un gran numero di misure nelle stesse identiche condizioni di prova, utilizzando poi per la loro interpretazione i metodi della statistica. In questo caso invece, quando si effettuano misure sul campo, ciò non è normalmente possibile per due ordini di motivi: da un lato non è mai possibile garantire identiche condizioni di prova, dall'altro non possiamo reiterare un numero di misure statisticamente attendibili a causa dei loro costi e dei tempi della sperimentazione.

Queste difficoltà possono essere superate operando in realtà virtuale.

2. La verifica della qualità del progetto

L'esercizio della mobilità su strada dei veicoli è regolato da molteplici fattori che, in prima approssimazione, sono riconducibili a tre categorie principali:

- la meccanica della locomozione, nell'ambito della quale vanno considerate le prestazioni dei veicoli e i condizionamenti che ne regolano, sia la cinematica, sia gli equilibri statici e dinamici in relazione alle condizioni di fruizione della strada;
- le condizioni funzionali ed 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 carico di lavoro mentale e dai molteplici parametri psicofisiologici che influenzano i meccanismi automatici della conduzione del veicolo.

Lo studio delle tre componenti del sistema, singolarmente intese, è oggetto di discipline specialistiche fondate su teorie autonome, in gran parte affidabili e confortate dall'esperienza.

Per le finalità della moderna progettazione stradale si configura invece come una indiscutibile lacuna l'analisi dei fenomeni derivanti dalle interazioni tra tali componenti, sia in condizioni di ordinario funzionamento della strada, sia quando si determinano particolari situazioni di esercizio. Sono pertanto queste interazioni a rappresentare i fenomeni di maggiore interesse che devono essere presi in considerazione per sviluppare un approccio multidisciplinare alla progettazione finalizzato alla verifica della qualità del progetto per le prestazioni offerte in termini di sicurezza dell'esercizio.

Non può infatti essere sufficiente garantire determinati standard geometrici definiti in base alla cinematica e dinamica del veicolo isolato per verificare gli effetti delle scelte progettuali sul comportamento di guida e sulle ricadute che tali mutue interazioni possono avere sulla sicurezza dell'infrastruttura. Nei prossimi paragrafi verrà discusso il percorso di ricerca che ha trovato nelle nuove tecnologie uno strumento efficace per l'analisi del complesso sistema *uomo-veicolo-strada*.

2.1 La funzionalità sistemica dell'infrastruttura

Benché le radici ferroviarie dell'ingegneria stradale ne abbiano condizionato l'approccio metodologico, è maturato ormai il comune convincimento che la qualità del progetto non possa essere soddisfatta se si prescinde da una verifica delle mutue coerenze tra le geometrie d'asse e di piattaforma.
Al riguardo sono numerosi i riferimenti normativi e di letteratura, che verranno discussi nel paragrafo successivo, che hanno suggerito alcune correlazioni tra gli standard introducendo anche alcuni criteri per evitare significative anomalie prospettiche.
Tuttavia, a fronte di un'esigenza indiscutibile, nessuno dei metodi proposti può ritenersi soddisfacente in quanto nessuno di essi tiene conto degli effetti indotti sull'utente dalle condizioni di fruizione della strada. Queste, d'altra parte, tenuto conto delle possibili combinazioni delle variabili geometriche, ambientali e di traffico, non possono essere trattate in modo sistematico e rendono necessario interare il tradizionale approccio progettuale basato sugli standard con quello della verifica sistemica della fruizione della strada nelle diverse condizioni di esercizio.
A questo proposito è necessario distinguere le nuove realizzazioni dagli interventi finalizzati ad adeguare le strade esistenti alle mutate esigenze della circolazione. Per gli adeguamenti infatti, poiché questi interessano di norma porzioni limitate dell'itinerario, è indispensabile che l'analisi del progetto sotto il profilo della sicurezza sia comunque estesa alle tratte a monte e a valle della zona d'intervento, ciò al fine di accertare che non si trasferiscano altrove oggettive situazioni di rischio (migrazione dei "punti neri"[23,24]).
In ogni caso, tenuto conto dei rapporti di causa effetto che presiedono all'evento incidentale, per garantire una progettazione in sicurezza sia delle nuove opere, sia degli adeguamenti, è necessario seguire un percorso logico, proposto dal Prof. Carlo Benedetto [23,24], che prevede nell'ordine:

1. l'analisi di tutte quelle situazioni che, per qualunque tipo di causa, sono da ritenere oggettivamente temibili nell'ipotesi di condizioni imposte di fruizione della strada (ad es. veicolo isolato in condizioni ambientali minime normali);
2. l'assunzione di standard geometrici adeguati a soddisfare tali condizioni d'uso, supponendo in prima ipotesi che l'utente adotti un comportamento coerente con quello a cui si è fatto riferimento per la determinazione degli standard;

3. la verifica degli effetti sistemici della strada e dei condizionamenti indotti in fase di esercizio, finalizzata ad individuare le condizioni di maggior rischio indipendentemente dalle ipotesi iniziali di fruizione della strada, al variare quindi delle condizioni ambientali e di carico di traffico;
4. l'analisi critica e la verifica degli standard originariamente assunti, tenendo conto del reale comportamento degli utenti nelle diverse condizioni di circolazione, finalizzata ad accertare se le situazioni ipotizzate per la determinazione degli standard risultano realmente più vincolanti sotto il profilo della sicurezza;
5. l'adeguamento della geometria d'asse e di piattaforma all'esito della verifica, tenendo conto della funzionalità sistemica dell'infrastruttura valutata nel suo complesso.

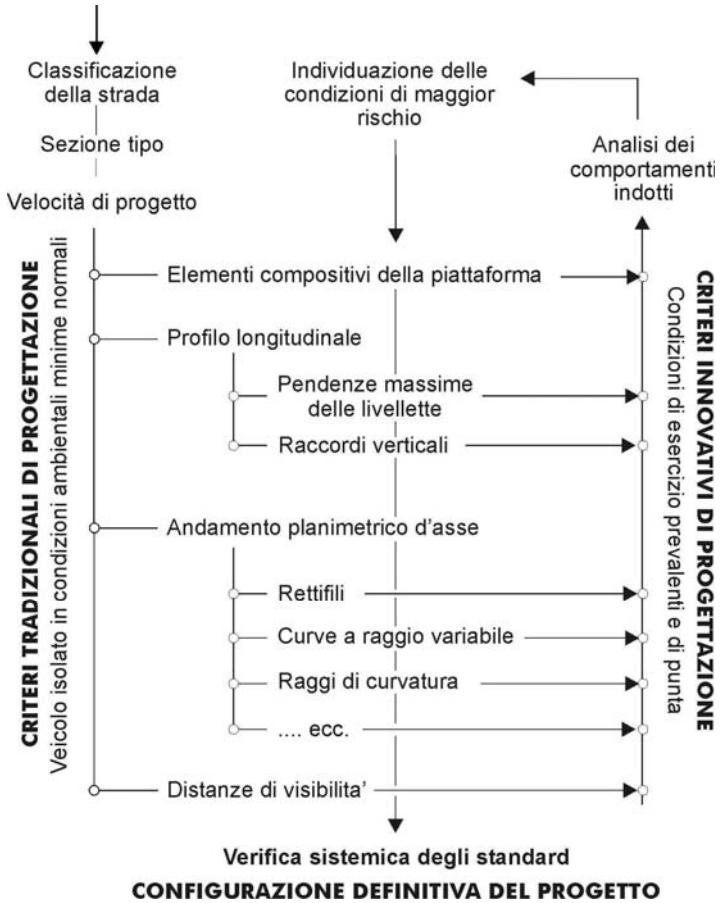

Fig. 2.1 – La logica progettuale in una visione sistemica [24].

In sostanza, la progettazione in sicurezza richiede l'attuazione di un processo iterativo nell'ambito del quale assume un ruolo fondamentale il momento della verifica, come è illustrato sinteticamente in figura 2.1.
Attualmente la progettazione stradale basa le sue regole solo sui primi due passi del procedimento; elude infatti il momento della verifica. Inoltre le ipotesi assunte per la determinazione degli standard, fondandosi esclusivamente sulle leggi della dinamica e cinematica del veicolo, si configurano come assiomi indubitabili che non tengono conto di alcune variabili fondamentali che l'analisi incidentale ci impone invece di prendere in considerazione.
Tra queste sono da considerare:

- l'entità dei carichi di traffico e la loro variabilità temporale, in quanto è ormai dimostrato che per la stessa infrastruttura, a parità di altre condizioni, l'incidentalità specifica dipende in modo significativo dall'offerta di servizio della strada [22,31,42];
- la composizione dei flussi, distinta per tipologia veicolare e motivazione degli spostamenti, in quanto le diverse prestazioni dei veicoli e le diverse aspettative di servizio comportano quelle interferenze funzionali che sono causa frequente di incidenti [8,27,30];
- la variabilità delle condizioni ambientali a cui l'utente adegua i suoi comportamenti assumendo gradi di sicurezza che sono funzione delle sensazioni percepite nelle particolari condizioni di esercizio e non certo dipendenti dalle ipotesi progettuali assunte per la determinazione degli standard [3,5,45];
- le interferenze indotte dall'ambiente al contorno, che possiamo ritenere trascurabili solo per la progettazione autostradale ove la delimitazione degli spazi e la recinzione delle aree di competenza ne confina gli effetti solo in corrispondenza degli svincoli e delle aree di servizio [45,47,94].

Nel loro complesso l'incidenza di tali variabili può ricondursi direttamente o indirettamente alla necessità di tener conto di un unico fondamentale condizionamento progettuale, quello rappresentato dal comportamento indotto negli utenti dalla strada e dalle sue condizioni di funzionalità.
La valutazione soggettiva del rischio e i conseguenti comportamenti di guida dipendono dalle condizioni reali di fruizione della strada. Non possiamo quindi ritenere che la marcia del veicolo isolato e le condizioni ambientali "minime normali", a cui si fa usuale riferimento, esprimano

sempre e in ogni caso le condizioni più vincolanti per un corretto dimensionamento degli standard geometrici dell'infrastruttura.
Le compatibilità dinamiche e cinematiche rappresentano quindi una condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la sicurezza della circolazione.
Considerata la variabilità delle condizioni di fruizione della strada può essere quindi opportuno far riferimento a tradizionali criteri normativi per articolare una prima stesura progettuale, ma a valle di essa s'impone quella verifica sistemica che è garantita dal processo iterativo a cui si è fatto prima riferimento. Tutto ciò è sinteticamente descritto dal diagramma di flusso [23,24] in figura 2.1 che deve tener conto sia delle condizioni prevalenti di esercizio, sia delle diverse situazioni che caratterizzano la fruizione della strada, posto particolare riferimento alla variabilità delle condizioni ambientali e dei carichi di traffico.
Il mancato adeguamento dell'ingegneria stradale alle regole della moderna circolazione veicolare si giustifica da un lato per effetto della maggiore attenzione posta alle tecnologie costruttive, dall'altro perché sino ad epoca recente la concezione geometrica della strada non si è potuta giovare dello strumento principe di ogni disciplina scientifica rappresentato dalla verifica sperimentale.
Tale possibilità, di cui si tratterà in seguito, è oggi garantita dallo sviluppo delle tecnologie informatiche che hanno consentito di rendere operative avanzate strumentazioni per un'affidabile simulazione dell'esercizio viario in realtà virtuale che consente di analizzare le principali relazioni che si determinano tra la strada, l'uomo e l'ambiente ricreando in laboratorio condizioni il più possibile prossime alle reali.
Considerata la rilevanza degli effetti psicofisiologici per la caratterizzazione del livello di rischio di una infrastruttura stradale, è evidente la necessità di verificare la qualità dei progetti, sia per le nuove realizzazioni, sia per gli adeguamenti, mediante modelli che consentano di valutare i comportamenti indotti sull'utente dalle condizioni di circolazione, oltre che dall'articolazione geometrica del tracciato e dalla configurazione della sezione trasversale.
Per questo motivo si è scelto di presentare brevemente nel prossimo paragrafo un approccio tradizionale di verifica basato esclusivamente su indicatori sintetici della coerenza geometrica del tracciato per poi, negli altri paragrafi analizzare l'approccio multidisciplinare sviluppato negli anni dal Centro Interuniversitario di Ricerca per gli Studi sulla Sicurezza Stradale (CRISS).

2.2 Gli indicatori di letteratura

L'obiettivo dell'ingegneria stradale è da sempre stato quello di garantire una circolazione sicura e movimenti efficienti da parte di persone e trasporto merci. Per raggiungere questo scopo è necessario che il progetto delle strade sia valido dal punto di vista tecnico ma non solo. E' indispensabile, come si è già ampiamente discusso, studiare i comportamenti indotti dalla strada e dalle condizioni di traffico sull'utente.

Molti errori dell'utente sono dovuti ad un'interpretazione errata delle geometrie stradali [1,8,14,18,19,21,27]. Per questo determinare un metodo di valutazione della qualità progettuale porta a verificare la coerenza degli elementi geometrici.

La coerenza del progetto implica che il progetto o la geometria della strada non violino né le aspettative degli utenti né l'abilità dell'utente nel guidare e controllare il veicolo in modo sicuro. La qualità diminuisce quando il carattere generale del tracciato cambia in modo significativo tra elementi adiacenti, proprio perché la strada deve essere progettata conformemente alle aspettative dell'utente. Una curva avente un raggio piccolo se preceduta da un lungo rettifilo è un esempio di incoerenza progettuale.

Diversi ricercatori hanno riposto molte energie nel tentativo di determinare un metodo che valuti la qualità del progetto. Sin dagli anni cinquanta si è cercato di determinare un modello che possa fornire un giudizio sulla qualità del tracciato stradale progettato. La rispondenza di questi metodi è stata verificata calcolando i rispettivi valori su alcune strade esistenti e rapportando tali risultati con i dati incidentali. In questo modo si è cercato di elaborare una relazione biunivoca tra il metodo studiato e l'incidentalità.

I metodi riportati nella presente tesi sono stati individuati attraverso una ricerca bibliografica rivolta verso le nazioni che hanno riposto i maggiori sforzi nell'individuazione di un metodo di valutazione della qualità del progetto. A tale proposito quelli maggiormente rappresentativi sono i seguenti:

- Alignment indices
- Speed distribution measures
- Speed-profile model
- Class of service
- Driver workload

Gli alignment indices (indicatori di tracciato) sono misure quantitative di determinate caratteristiche geometriche dell'infrastruttura. Gli indici sono stati elaborati inizialmente con lo scopo di trovare una relazione che valutasse le velocità operative.
Questi potenziali indicatori identificano la presenza di incoerenze geometriche nel caso di:

a. grande incremento nel valore di un indice;
b. alto tasso di variazione riguardo alcune lunghezze;
c. grande differenza tra le caratteristiche individuali e il valor medio dell'indice di tracciato.

Tuttavia molti di questi indicatori non tengono conto né del numero, né dello sviluppo delle curve, dell'articolazione altimetrica, dell'ordine con il quale l'utente affronta gli elementi geometrici del tracciato; alcuni indicatori rischiano di compensare alcune carenze planimetriche con buone alternative altimetriche.
La tabella 2.1 riporta un elenco, assolutamente non esaustivo, di indicatori geometrici del tracciato con la relativa formulazione, sviluppati nel corso degli anni da diversi ricercatori in ambito internazionale.
Le speed distribution measures (misure sulla distribuzione della velocità) misurano la qualità del progetto facendo uso di strumenti statistici. In particolare misurano la variazione delle velocità tra elementi adiacenti. Se tutti i valori determinati sono interni a certi range di valori il tracciato è coerente.
Lo speed-profile model (il profilo delle velocità) stima, invece, le velocità operative della strada utilizzando i dati di tracciato planimetrici e altimetrici. La qualità del progetto viene assicurata dal rispetto di determinati criteri di sicurezza.
Il Class of Service [28] (classe di servizio) è un indicatore sperimentale che tiene conto sia delle caratteristiche geometriche del tracciato sia delle velocità di percorrenza degli elementi della strada. Misura il tempo a cui l'utente è sottoposto ad accelerazione centrifuga.
Infine il driver workload è una misura del carico di lavoro subita dall'utente durante la guida. Un incremento del carico di lavoro del driver è un potenziale indicatore che un elemento del tracciato è incoerente.
Per comprendere quale sia stata la rivoluzione concettuale che è derivata dalla recente considerazione dei fattori umani, è sufficiente una rapida ricognizione di letteratura che dimostra come tuttavia, sino ad epoca recente, a fronte di un'esigenza di verifica della qualità del progetto che risale agli anni '50, l'ingegneria stradale si è sempre riferita ad indicatori

geometrici che si sono dimostrati ben poco significativi ogni volta che si è cercato di correlarli ad un reale scenario incidentale [21,52,53,70,71,74]. Questo è dovuto soprattutto al fatto che tali indicatori di qualità possono caratterizzare le geometrie del tracciato e le sue coerenze, ma non possono prevedere il reale comportamento di guida degli utenti che lo percorreranno. Solo valutando le influenze degli elementi geometrici sulla guida si può riuscire a ricavare una relazione logica ed esplicativa tra le caratteristiche dell'infrastruttura e l'incidentalità attesa al fine di poter valutare la qualità del progetto in termini di sicurezza dell'esercizio viario.

Tab. 2.1 – Alcuni esempi di modelli interpretativi della qualità del progetto.

Rif.	***Modello***	***Computo***	***Espressività***
Taragin 1954	*AR (average radius)*	$\Sigma R_i / n$	*calcola il valor medio del raggio e descrive la curvatura del tracciato*
Mc Lean 1978	*CCR (curvature change rate)*	$\Sigma \omega_i / \Sigma L_i$	*è rappresentativo della tortuosità del tracciato valutata per tratte*
Polus 1980	*RR (max radius / min radius)*	R_{max} / R_{min}	*definisce il range entro cui variano le curvature locali del tracciato*
Polus 1987	*COMBO (combin. VCCR CCR)*	$\Sigma \omega_i / \Sigma L_i + \Sigma \Delta_i / \Sigma L_i$	*tiene conto di come si combinano le curvature planimetriche e altimetriche*
Morral 1994	*DC (degree of curvature)*	$\Sigma (1/R_i) \Sigma L_i$	*definisce un grado di curvatura funzione dei raggi e dello sviluppo*
Krammes 1995	*CL (curve lenght)*	$\Sigma Li_{curva} / \Sigma Li_{rett.}$	*pone a confronto gli sviluppi in curva con quelli in rettifilo*
Al Masaeid 1995	*ATL (average tangent lenght)*	$\Sigma Li_{rett.}/n$	*valuta la lunghezza media dei rettifili descrivendo la rigidezza del tracciato*
Fitzpatrick 2000	*I (speed reduction on horizontal curve)*	$f(\Delta V_{85})$	*è funzione della variazione delle velocità dell'85^a percentile*
Gibreel 2001	*AVRC (average rate of vertical curve)*	$(\Sigma L_i / \Delta_i) / n$	*esprime il tasso medio di curvatura verticale per rappresentare l'altimetria*
Gilbreel 2001	*VCCR (vertical curve change rate)*	$\Sigma \Delta_i / \Sigma L_i$	*calcola la variabilità delle pendenze in rapporto allo sviluppo dei rettifili*

2.3 La stima dell'incidentalità attesa: le nuove tecnologie

Nella prima parte di questo capitolo si è discussa una procedura progettuale fondata su un approccio prestazionale dell'infrastruttura in cui la verifica costituisce un passo imprescindibile.
Come si è visto la procedura progettuale prevede che dopo aver analizzato i principali standard geometrici tenendo conto del comportamento degli utenti in relazione alle diverse condizioni di esercizio, sia possibile disegnare una prima soluzione progettuale che, pur tenendo conto della funzionalità sistemica dell'infrastruttura, deve essere verificata sotto il profilo prestazionale valutandone l'incidentalità attesa di breve e medio periodo.
Questo passo è certamente il più importante di tutto il procedimento in quanto, indipendentemente dalle capacità del progettista di interpretare uno scenario che è sempre di rilevante complessità, sarà possibile valutare positivamente le sue scelte se la verifica consentisse di prevedere un livello d'incidentalità imputabile alla strada compatibile con gli obiettivi che s'intendono perseguire sia nel caso di nuove realizzazioni, sia per gli interventi sul patrimonio.
Questa ultima parte del capitolo si propone di discutere il complesso e articolato percorso di ricerca che ha portato alla proposta e all'applicazione di alcune metodologie per la stima dell'incidentalità attesa (*reti neurali* ed *hazard analysis*), per poi pervenire alla soluzione ottimale basandosi su numerose verifiche sperimentali avvalendosi in modo determinante del contributo della simulazione dell'esercizio viario in realtà virtuale di cui si parlerà più nel dettaglio nei capitoli successivi, in cui verranno presentati i risultati più significativi che sono stati ottenuti nel corso di questo dottorato di ricerca.
Ritengo opportuno nel seguito riportare il percorso di ricerca iniziato diversi anni fa dal Prof. Carlo Benedetto, dalla Prof.ssa Maria Rosaria De Blasiis e da tutto il gruppo di ricerca del CRISS nell'ambito della sicurezza dell'esercizio viario.
In questo modo sarà più chiaro comprendere le motivazioni, basate sulle risultanze delle varie attività sperimentali, per cui si è arrivati alla conclusione che la simulazione di guida in realtà virtuale sia il più potente strumento per poter raggiungere o quantomeno avvicinare l'ambizioso obbiettivo di verificare la qualità di un progetto, attraverso la stima dell'incidentalità attesa in quanto, come si vedrà, consente di interpretare qualitativamente e, soprattutto quantitativamente, le relazioni che intercorrono tra l'utente, la strada e l'ambiente.

2.3.1 Reti Neurali

L'obiettivo di pervenire ad una verifica sistemica della funzionalità della strada, correlando le sue caratteristiche fisiche e funzionali, globalmente intese, con lo scenario di incidentalità analizzato per tratte elementari di sviluppo unitario, ha spinto la ricerca condotta all'interno del CRISS a verificare se, in luogo di un mero riscontro degli standard geometrici, fosse possibile adottare metodi innovativi per prevedere l'incidentalità di una infrastruttura viaria di cui fossero note le caratteristiche, il traffico e la situazione ambientale al contorno.
In considerazione del numero rilevante di variabili coinvolte, il problema può trovare soluzione solo se si dispone di metodi affidabili per l'elaborazione automatica dell'informazione.
Ciò tuttavia non può essere sufficiente in quanto il calcolo programmato rende necessaria la predisposizione di modelli e algoritmi matematici di univoca interpretazione e nell'ambito delle applicazioni per lo studio della sicurezza stradale tale univocità non può essere facilmente garantita (ad un'elevata curvatura planimetrica non corrisponde necessariamente un elevato tasso incidentale, così come evidenti anomalie visuali non sono relazionate direttamente ad un comportamento più prudente dell'utente).
Numerose metodologie hanno dimostrato i loro limiti quando si è cercato di applicarle alla soluzione di problemi di particolare complessità, quali sono quelli che richiedono analisi interpretative ad alto livello. Si è cercato allora di superare il problema sviluppando, sin dalla metà degli anni ottanta, il *"calcolo neurale"*, alternativo a quello programmato, che consente l'elaborazione dell'informazione come risposta alternativa ad un ambiente informativo, quello creato dal problema da risolvere, senza cercare di codificare a priori alcuna regola di analisi inerente al problema stesso.
In sostanza ci si è ispirati al 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.
L'intelligenza artificiale ha dimostrato in numerosi campi di applicazione una rilevante capacità di apprendere ed interpretare relazioni input/output anche particolarmente complesse. Dal punto di vista dell'utilizzatore 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 (figura 2.2).

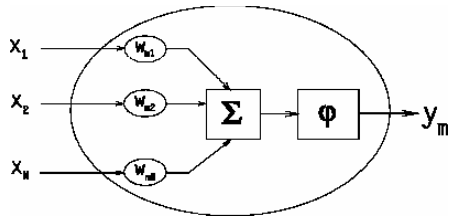

Fig. 2.2 – Struttura formale di un neurone artificiale.

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.
In particolare per una efficace applicazione 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.
Per effetto delle condizioni a cui si è fatto prima riferimento, 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. E' necessario infatti considerare tutte le variabili che concorrono nel determinare il sinistro.
Infatti è quanto meno necessario tener conto:

- delle caratteristiche della strada (tipologia viaria, standard geometrici, loro mutua articolazione e anomalie locali);
- delle condizioni di esercizio (entità dei flussi, loro composizione, livelli di servizio e carichi di punta);
- delle interferenze fisiche (intersezioni, segnaletica, carico antropico ed emergenze locali);

- delle interferenze ambientali (caratteri climatici, eventi stagionali, stimoli visuali e carico di lavoro mentale).

In genere non si dispone comunque di un sistema di input/output su cui effettuare l'apprendimento sufficientemente ampio da soddisfare la complessità dell'architettura richiesta.
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.
Pertanto, anche se questa fase della ricerca si è conclusa in modo tale da soddisfare le aspettative scientifiche dello studio, si è ritenuto che non potesse rappresentare 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.
La validità scientifica del metodo è risultata comunque evidente applicandolo all'Autostrada Salerno - Reggio Calabria [15,23,24] (figura 2.3) per la quale, oltre a disporre del progetto, erano stati effettuati numerosi studi per conto dell'ANAS acquisendo una banca dati particolarmente documentata. I risultati di tale studio, condotto dal Prof. Carlo Benedetto, hanno dimostrato che sui 43 dati utilizzati nella fase di verifica l'errore medio è risultato pari a 3,4%. Tuttavia, con altrettanta evidenza ci si rese conto che per una viabilità ordinaria, di sviluppo più contenuto, non sarebbe mai stato possibile disporre degli elementi necessari per ottimizzare la rete ed effettuare un suo adeguato apprendimento. Questo limite, per altro, se induce rilevanti difficoltà per l'applicazione alla viabilità in esercizio, esclude del tutto la possibilità di utilizzare il metodo per la verifica della viabilità di nuova realizzazione.

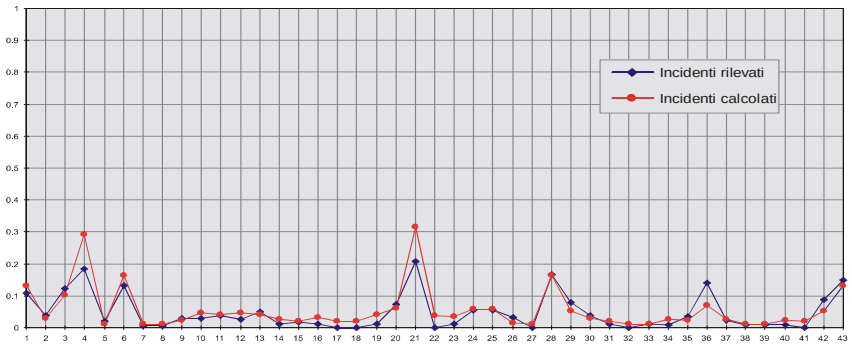

Fig. 2.3 – La fase di test della rete neurale [15].

2.3.2 Hazard Analysis, la teoria del rischio

Furono questi motivi che spinsero il gruppo di ricerca a maturare l'idea di sviluppare una 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.
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.
Nel caso specifico dell'incidentalità stradale un approccio di questo tipo ha validità generale in quanto prende in considerazione la successione logica delle situazioni fisiche e delle decisioni del conducente in funzione degli eventi che si determinano durante la marcia del veicolo.
La diversa incidenza dei rapporti di causa/effetto che regolano gli eventi incidentali (le condizioni ambientali, il carico di traffico … ecc) hanno effetto sulle probabilità elementari intercettate dai percorsi critici e conseguentemente sulla loro produttoria. Il percorso critico è una successione di eventi che connette le alternative di processo che possono determinare il sinistro e poiché ogni alternativa a rischio è caratterizzata da una probabilità indipendente dalle altre, la probabilità dell'evento finale sarà pari al loro prodotto (formula (1)).
Il primo passo della procedura si basa sulla costruzione schematica di un percorso logico di eventi elementari, conseguenti uno all'altro, che possono condurre all'evento temuto, come è sinteticamente rappresentato in figura 2.4 [23].
L'architettura di questo percorso, definita per esigenze di opportunità *"albero degli eventi"*, fornisce un primo importante strumento per l'analisi qualitativa del fenomeno incidentale in quanto le alternativa che esso propone sono tra loro subordinate e assumono un peso diverso nel concorrere al sinistro in funzione della loro gerarchia.

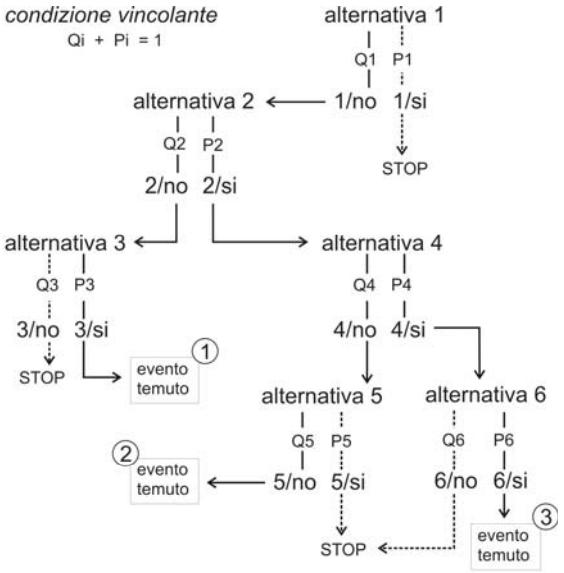

Fig. 2.4 – Schema dell'albero degli eventi.

La probabilità finale (P_T) che per un singolo veicolo si verifichi l'evento temuto sarà pari alla somma dei prodotti delle probabilità intercettate dai diversi percorsi critici.
In termini generali, indicando con i le probabilità intercettate da un percorso critico e con j i diversi percorsi sarà:

$$P_T = \Sigma_j \Pi_{ij} \tag{1}$$

E poiché le probabilità elementari, tra loro indipendenti, dipendono dalla configurazione della strada valutata nel suo complesso, dal carico di traffico, dalla sua composizione planoaltimetrica, dal comportamento degli utenti e dalle condizioni ambientali al contorno, l'albero degli eventi soddisfa i principi base di un'analisi sistemica, certamente più esplicita di quella gestita dalle reti neurali e, soprattutto, estendibile alle nuove realizzazioni.
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.

L'ordine di successione degli eventi, quale 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.
Un ulteriore elemento che distingue la procedura per la previsione incidentale basata sull'albero degli eventi rispetto alle metodologie proprie dell'hazard analysis è la mancata considerazione della gravità degli eventi. Questo tuttavia non è un limite imputabile al metodo in quanto nel caso specifico dell'incidentalità stradale, come si è già detto, le conseguenze dei sinistri non dipendono di norma dalle cause che li hanno prodotti. Il vero problema è un altro e riguarda la stima delle probabilità elementari.
Le probabilità intercettate dai percorsi critici possono essere classificate in tre distinte categorie che pongono problemi molto diversi per la loro determinazione. In particolare è possibile distinguere:

a) le 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;
b) le probabilità legate alle diverse *condizioni di traffico*, che possono essere stimate ricorrendo a modelli ormai consolidati della teoria della circolazione veicolare, quali sono ad esempio i metodi proposti dall'H.C.M. [88] per il calcolo della capacità, degli equivalenti dei veicoli pesanti in autovetture, della riduzione delle velocità al crescere della densità veicolare;
c) le probabilità dipendenti dal *comportamento degli utenti* in relazione alle esigenze di guida, agli stimoli esterni e alle sollecitazioni indotte dalla strada, posto particolare riferimento all'effettuazione delle manovre in debito di sicurezza.

Sono evidentemente queste ultime probabilità a costituire la chiave di volta dell'intera procedura, in quanto la loro determinazione è di difficile valutazione, poiché sono molto complesse le relazioni che intercorrono tra l'infrastruttura e il comportamento di guida degli utenti, come è stato già discusso alla fine del primo capitolo.
Di conseguenza, nel momento in cui le analisi incidentali dimostrano 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.
Ciononostante la procedura dell'Hazard Analysis ed in particolare dell'albero degli eventi applicato alle tipologie incidentali più frequenti (tamponamento, scontro frontale) è stata più volte sperimentata, ottenendo risultati di grande interesse come è possibile esaminare consultando alcune memorie del Prof. Carlo Benedetto [15,23,24].
Oggi, sul piano scientifico questa fase del percorso della ricerca con cui si vuole dotare l'ingegneria di metodi affidabili per valutare la qualità del progetto sotto il profilo della sicurezza è ormai superata. I risultati conseguiti e l'esperienza maturata sul piano sperimentale consentono di affermare che lo strumento principe per la soluzione del problema è rappresentato dalla simulazione di guida in realtà virtuale.

3. La simulazione di guida in Realtà Virtuale

Nella letteratura internazionale si rinvengono non pochi contributi scientifici, in cui un approccio in simulazione trova giusta applicazione allo studio di specifici aspetti medico-fisiologici e psicologici.
L'applicazione della simulazione nell'ingegneria meccanica è storicamente più affermata specialmente nei settori applicativi e produttivi, prima ancora che negli ambiti strettamente teorici ed accademici.
Per le specifiche esigenze dell'ingegneria stradale, gli scopi di una sperimentazione finalizzata allo studio dei fenomeni circolatori possono essere molteplici. Di norma riguardano:

- lo studio dei fattori umani che regolano la guida del veicolo, quale ad esempio la variabilità del tempo di reazione in diverse situazioni ambientali e di traffico;
- la verifica del comportamento degli utenti in particolari condizioni di circolazione, come ad esempio la valutazione del rischio accettato in funzione del disagio indotto dalle interferenze veicolari;
- l'analisi delle conseguenze imputabili alla variazione di una o più condizioni che caratterizzano il sistema *uomo-veicolo-strada*, quale, ad esempio, la dispersione delle traiettorie in funzione del dimensionamento e della successione delle geometrie d'asse.

Allo scopo il Centro Interuniversitario di Ricerca per gli Studi sulla Sicurezza Stradale (CRISS), istituito con atto convenzionale dai Rettori dell'Università degli studi Roma Tre, della Sapienza di Roma e del Politecnico di Milano, si è dotato di un simulatore di guida e ha studiato apposite procedure di sperimentazione che verranno discusse nei paragrafi successivi. L'obiettivo che il Centro si è proposto è duplice e sostanzialmente ha riguardato e riguarda tutt'oggi l'ottimizzazione progettuale da un lato, e la verifica delle assunzioni teoriche, dall'altro.
Il primo aspetto, più propriamente applicativo, ha ricadute immediate e significative in fase di elaborazione dei progetti sia per verificare la qualità delle scelte, sia per orientare le scelte stesse verso risultati più efficaci. Il secondo aspetto ha ovviamente ricadute di natura più specificamente teorica tra cui l'adozione di protocolli di gestione delle procedure di simulazione idonei a garantire la standardizzazione e l'affidabilità dei risultati.

3.1 Il simulatore di guida del CRISS

Lo strumento della simulazione di guida in realtà virtuale consente, con grande versatilità, di verificare in ambiente interattivo situazioni geometriche di qualsiasi tipo in condizioni di traffico (livello di servizio) e in condizioni ambientali (pioggia, abbagliamento, nebbia, bassa aderenza, ecc.) predeterminati, attraverso procedure sperimentali standardizzate, controllate e completamente ripetibili.
I due principali requisiti del sistema riguardano:

- ✓ un elevato livello di realismo della simulazione, concepita in modo da garantire per l'utente un ambiente virtuale simile alla realtà tanto da indurre analoghi comportamenti in analoghe condizioni di guida;
- ✓ un'architettura informatica sufficientemente versatile ed in grado di rappresentare la strada secondo i consueti parametri di progetto, dalle geometrie plano altimetriche, alle tipologie e arredo delle sezioni, dalle condizioni di traffico all'ambito circostante.

Il primo requisito è soddisfatto da un sistema di interfacce utente di ultima generazione, supportato da risorse informatiche efficacemente dedicate, e da un ambiente per la simulazione in cui ciascun meccanismo di controllo della guida (pedali, volante e cambio) è inserito all'interno di un veicolo reale (Alfa Sud – Alfa Romeo).
Il secondo requisito è garantito dal Low Cost PC Based Driving Simulator (STI Technology) attualmente implementato su quattro Personal Computer collegati in rete e dedicati alla generazione delle immagini e all'integrazione delle equazioni numeriche, attraverso le quali è schematizzato l'articolato processo in realtà virtuale (la figura 3.1 riassume i principali sistemi del laboratorio di simulazione).
Parte integrante del laboratorio di simulazione è l'insieme delle attrezzature concepite per generare stress codificati in particolari condizioni di guida (ad es. abbagliamento), e l'insieme dei sistemi, tradizionali ed avanzati, per la caratterizzazione dell'utente sotto il profilo psico-fisico.
Il processo di simulazione di guida è governato da un modello dinamico completo del veicolo in grado di operare in tempo reale.
In particolare il modello si basa sull'Analisi Non Lineare della Dinamica del Veicolo (VDANL, Vehicle Dynamics Analysis, Non Linear) sviluppata per la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), integrato al fine di assicurare possibilità di esecuzione in Real Time (VDANL/RT).

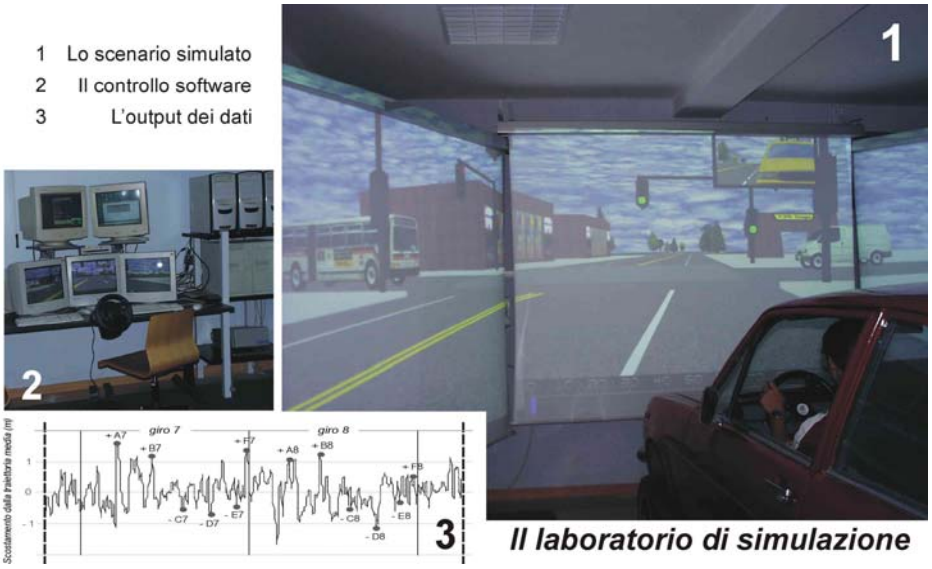

Fig. 3.1 – Il laboratorio di simulazione del CRISS.

Il modello VDANL/RT è costituito sostanzialmente da tre principali elementi di simulazione tra loro interconnessi che riguardano specificamente:

- ✓ il modello della dinamica del veicolo (Vehicle Dynamics Model), che rappresenta il nucleo centrale del processo di simulazione e all'interno del quale si inseriscono i due successivi elementi;
- ✓ la generazione della potenza utile alle ruote (Power/Drive Train), che, in funzione delle condizioni di pressione sul pedale dell'acceleratore e del cambio inserito, calcola i momenti in corrispondenza di ciascuna ruota del veicolo;
- ✓ il modello STIREMOD per la simulazione pneumatico-pavimentazione.

A questi si aggiungono i modelli che governano le interfacce con l'utente, ovvero i modelli del sistema sterzante e quello del sistema frenante, che traducono e quantificano l'entità degli interventi del conducente sui pedali del freno e dell'acceleratore (pressioni esercitate) e sul volante (angolo e velocità di sterzatura).

Per quanto riguarda la riproduzione dell'ambiente stradale il simulatore permette di ricostruire con elevato realismo sia le caratteristiche geometriche della sezione stradale e l'andamento plano-altimetrico dell'asse, sia tutti gli elementi interni che esterni all'infrastruttura. Più nello specifico l'ambiente esterno viene simulato utilizzando una serie di

sfondi già implementati sul simulatore, affiancati dalla possibilità di inserire qualunque tipo di oggetto presente nel paesaggio (abitazioni, vegetazione …) o accessorio della sezione stradale (barriere assorbitici d'urto, segnaletica verticale …).
La sezione stradale può essere ricostruita in dettaglio definendone il numero di corsie per senso di marcia e la loro larghezza e pendenza trasversale, ma anche le caratteristiche geometriche della segnaletica orizzontale e delle scarpate laterali (sezione in trincea, in rilevato), consentendo di riprodurre qualsivoglia situazione stradale.
Il simulatore risulta particolarmente versatile nella gestione delle condizioni di circolazione che possono essere simulate definendo da software sia la composizione (veicoli leggeri e pesanti), sia la densità, sia il comportamento di ciascun veicolo. Infine, per rendere la simulazione più realistica possibile anche in situazioni d'emergenza, si è realizzato un sistema esterno al veicolo che consente di assicurare l'esatta riproducibilità dei disturbi in differenti prove sperimentali (marcia notturna, abbagliamento, … ecc.).

3.2 La configurazione del campione

Qualunque sia la finalità della sperimentazione, dopo aver imposto le condizioni atte a garantire la riproducibilità delle misure è necessario configurare correttamente un adeguato campione di driver.
E' necessario tener presente che può risultare anche sensibilmente diverso il comportamento dei singoli utenti, quale si manifesta nelle stesse condizioni di prova.
Questo infatti, pur rispettando leggi di validità generale, si differenzia sensibilmente da un soggetto all'altro, sia per le specificità dei caratteri psicofisici dei singoli individui, sia per gli effetti che possono derivare da una diversa esperienza di guida e/o da particolari condizioni emotive. Ne consegue che quando si studia il fenomeno circolatorio per indagare i rapporti di causa/effetto che determinano gli eventi incidentali, è necessario:

- ✓ configurare opportunamente il campione dei driver sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo;
- ✓ individuare eventuali comportamenti anomali di uno o più driver che potrebbero inquinare i risultati della sperimentazione.

A tale proposito, quando le finalità dell'indagine sono quelle di studiare i fattori umani o di analizzare i fenomeni più generali che regolano l'esercizio della guida, assume particolare importanza l'esigenza di

contenere la dispersione delle misure: è quindi opportuno selezionare un campione di driver il più omogeneo possibile, purché espressivo della componente tipologica degli utenti che si vuole analizzare. In questo caso, per quanto riguarda la dimensione minima del campione e/o del numero di prove da effettuare, poiché l'analisi dei risultati si basa di norma sulla media dei valori rilevati, può adottarsi un criterio orientativo di valutazione basato sulla verifica della stabilità della media degli output di prova calcolata su un numero crescente di misure. Infatti, se la media è significativa del fenomeno indagato, risulterà tendenzialmente stabile nell'intorno di un valore che rappresenta adeguatamente l'esito della sperimentazione quando le sue ulteriori variazioni risultano contenute entro prefissati limiti di accettazione.
A seconda dei casi, può essere necessario dimensionare diversamente il campione; è tuttavia possibile definire il numero di prove da effettuare verificando quante di esse sono necessarie per garantire che le ulteriori oscillazioni della media risultino compatibili con la tolleranza ritenuta ammissibile.
Nel caso invece in cui la finalità delle misure fosse quella di analizzare il fenomeno circolatorio così come avviene nella realtà, la composizione del campione dovrà ovviamente riprodurre la stratificazione degli utenti per classi significative (ad es. per sesso, età, e capacità di guida .. ecc.) e ogni categoria dovrà essere opportunamente rappresentata nel rispetto dei rapporti numerici tra le diverse componenti. Da ciò deriva l'esigenza di un ampio campionamento che rende la sperimentazione particolarmente onerosa.

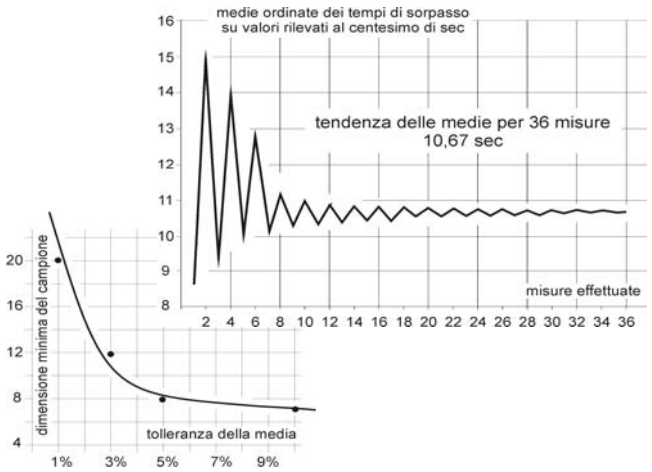

Fig. 3.2 – Il dimensionamento del campione.

Anche se il metodo basato sulla convergenza delle medie (figura 3.2) fornisce un preciso orientamento per dimensionare il campione, questo, tuttavia, deve essere assunto di maggior ampiezza per consentire l'eventuale esclusione di output sperimentali anomali e/o non affidabili. Tale esclusione si verifica a valle di una procedura di validazione dei dati sperimentali (vengono applicate procedure proprie della statistica quali ad esempio il criterio di Chauvenet) che è sempre necessaria in quanto, sia sul campo, sia in realtà virtuale, le influenze dell'ambiente esterno, eventi imprevisti o particolari stati emotivi del soggetto in prova, possono fornire risposte anomale e non affidabili.

3.3 Le principali attività di ricerca in simulazione

Ovviamente le prime campagne sperimentali sono state condotte allo scopo di ottimizzare il sistema, verificarne i limiti, accertarne le potenzialità e stabilire di conseguenza i protocolli delle tecniche di misura. Questa fase dello studio è risultata particolarmente impegnativa ed ha consentito di redigere rigorosi protocolli di prova da rispettare per ogni sperimentazione al fine di ottenere risultati affidabili e rappresentativi dei fenomeni indagati. Sono stati raggiunti importanti obbiettivi quali ad esempio la corretta taratura dei sistemi hardware e software utilizzati per le misure, la definizione delle tecniche di misura atte ad assicurare una corretta risposta sperimentale e la scelta degli indicatori a cui riferire un giudizio di qualità della funzionalità sistemica dei tracciati in prova.
I principali temi di ricerca sviluppati hanno riguardato:

a) La taratura dei processi di simulazione e verifica della loro affidabilità (validazione);
b) La variabilità dei tempi di reazione in funzione del carico di lavoro mentale;
c) L'analisi delle geometrie della manovra di sorpasso in assenza di interferenze;
d) La previsione delle velocità di esercizio per la verifica delle geometrie locali;
e) La verifica della dispersione delle traiettorie per elementi geometrici variabili;
f) L'individuazione degli indicatori di qualità del progetto ai fini della sicurezza;
g) La verifica di qualità dei progetti stradali (nuove opere e adeguamenti).

a) La taratura dei processi di simulazione e verifica della loro affidabilità [12]

Il processo di simulazione, pur consentendo la predisposizione di scenari atti a rappresentare adeguatamente le condizioni di circolazione, è influenzato dall'ambiente di prova. Si è quindi ritenuto opportuno provvedere ad una preventiva taratura del sistema nel corso della quale si sono definite le procedure per la migliore caratterizzazione del veicolo, del campione di utenti e delle situazioni al contorno (di traffico e ambientali). Si è quindi provveduto a verificare la significatività degli output della simulazione tramite il riscontro dei dati rilevati su strada utilizzando un veicolo opportunamente strumentato disponibile presso la Facoltà di Psicologia dell'Università Sapienza di Roma che analizza la psicologia di guida per la modellazione dei processi cognitivi dell'utente stradale. La ricerca ha confermato le potenzialità dei processi di simulazione per la verifica dei comportamenti indotti dalla geometria stradale e dalle sue condizioni di fruizione.
Si è quindi proceduto ad effettuare diverse sperimentazioni finalizzate alla validazione della simulazione. I risultati di misure sulle traiettorie dei veicoli e sulle velocità di esercizio eseguite sul campo e sugli stessi scenari ricostruiti in simulazione hanno dimostrato come gli utenti adottino lo stesso comportamento di guida. Ciò ha comprovato l'attendibilità delle sperimentazioni in realtà virtuale, ambiente nel quale vengono restituite all'utente le stesse sensazioni, stimoli e percezioni sottoposte dalla reale guida su strada. In figura 3.3 sono mostrati i risultati di una sperimentazione condotta in una zona di cantiere autostradale che hanno mostrato una differenza delle velocità misurate sul campo e ricavate dagli output di simulazione inferiore al 5%.

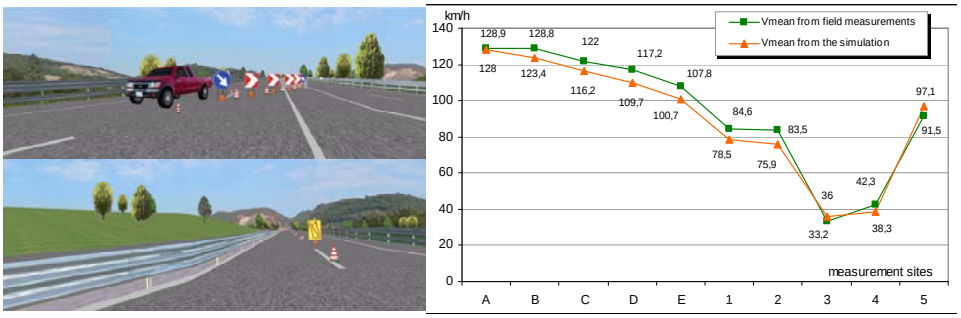

Fig. 3.3 – La validazione della simulazione sulle velocità in transito su una zona di cantiere autostradale.

b) La variabilità dei tempi di reazione in funzione del carico di lavoro mentale [13,17]

Il tempo psicotecnico di reazione è una grandezza che condiziona significativamente la sicurezza delle manovre. La letteratura e la normativa nazionale ed internazionale forniscono modelli di valutazione ed assunti teorici discordanti e raramente verificati su base sperimentale. Le sperimentazioni sistematiche attengono a lavori nel settore delle scienze psicologiche, i cui risultati non possono essere trasferiti direttamente alle teoria delle strade per ragioni connesse alle modalità con cui tali esperimenti sono condotti. Tali modalità infatti, finalizzate prevalentemente alle verifiche di modelli cognitivi, non valutano pienamente i condizionamenti del processo di guida, così come avviene operando in ambiente interattivo.
La sperimentazione in realtà virtuale ha consentito di analizzare come i tempi di reazione varino rispetto a differenti condizioni di affaticamento determinate da un crescente carico mentale indotto da difficoltà intrinseche crescenti nei compiti di guida assegnati all'utente.
Un risultato di interesse della sperimentazione, che contrasta con consolidate esperienze nel settore degli studi psicologici, consiste nell'evidenza che il tempo di reazione non è significativamente correlato al carico di lavoro mentale, piuttosto si è registrato in realtà virtuale una riduzione delle velocità di guida al crescere delle difficoltà (figura 3.4).
Questi elementi sono di particolare importanza laddove si voglia formulare un giudizio di qualità di un progetto stradale che tenga conto dell'eventuale penalizzazione indotta da particolari condizioni interne (geometrie) od esterne (condizioni ambientali) alla strada rispetto al comportamento dell'utente, con specifico riferimento a tutti gli standard su cui incide il tempo psicotecnico di reazione.

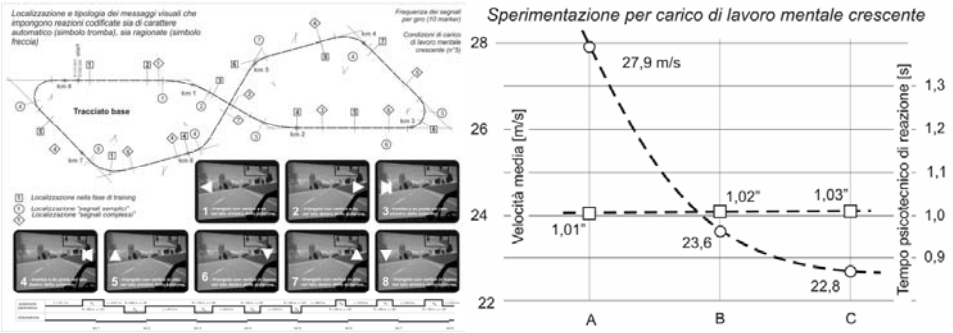

Fig.3.4– Il tracciato di prova e l'impulso random per l'attivazione della reazione.

c) L'analisi delle geometrie della manovra di sorpasso in assenza di interferenze [13,14,16]

L'elevata criticità della manovra di sorpasso sulle strade ordinarie rispetto alla sicurezza dell'esercizio è dimostrata dall'assoluta prevalenza di incidenti riconducibili allo scontro frontale. Peraltro, anche su viabilità autostradale, tale manovra rappresenta una situazione che, sotto particolari condizionamenti geometrici, ambientali e di guida, incide sulla sicurezza dell'esercizio.
La normativa e i modelli teorici più diffusi in Italia assumono ipotesi rispetto alla cinematica del sorpasso, non verificate sperimentalmente. La letteratura internazionale e alcuni regolamenti di altri paesi identificano numerosi modelli interpretativi della manovra di sorpasso perlopiù basati su ipotesi aprioristiche di natura concettuale, la cui affidabilità solo talvolta è stata verificata in base ad osservazioni sperimentali.
La simulazione in realtà virtuale ha consentito di studiare su un campione di utenti significativo, come la manovra del sorpasso venga effettuata in condizioni standard e riproducibili (figura 3.5). I risultati della ricerca hanno permesso di ricostruire la geometria del sorpasso analizzando le reali traiettorie percorse dai veicoli, nonché tutte le caratteristiche cinematiche della manovra stessa, dai tempi di ciascuna fase, agli angoli di deviazione, alle velocità, alle componenti delle accelerazioni.
In estrema sintesi la ricerca ha posto in evidenza come alcuni presupposti dei modelli adottati cadano in forte difetto. Ad esempio la simmetria della manovra non risulta mai garantita né sufficientemente approssimata, la velocità di esecuzione del sorpasso non è costante. Inoltre si sono verificati alcuni elementi che invece caratterizzano la manovra in modo stabile, quale ad esempio la sua durata temporale che si conserva pressoché invariata nell'intorno degli 11 secondi.

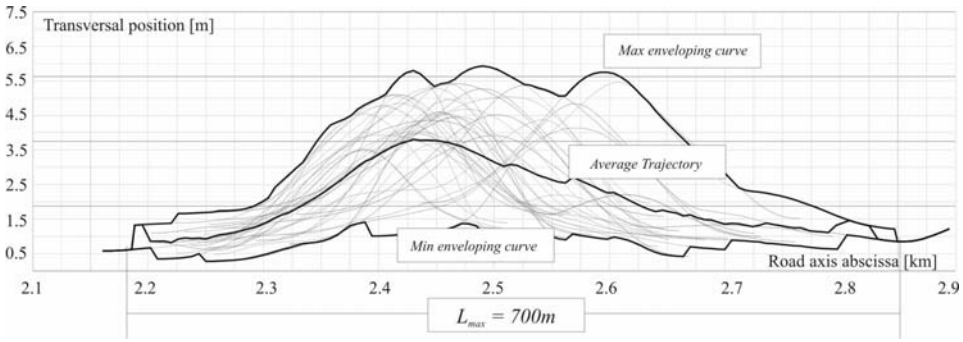

Fig. 3.5 – La descrizione delle traiettorie della manovra del sorpasso.

d) La previsione delle velocità di esercizio per la verifica delle geometrie locali [10,11,14]

La reale dinamica di ogni manovra del veicolo stradale dipende strettamente dalla velocità del veicolo stesso. Come è noto la normativa italiana suggerisce di adottare la velocità di progetto locale per valutare l'estensione delle manovre. D'altra parte le misure su strada hanno evidenziato anche rilevanti differenze tra le velocità di esercizio e quelle di progetto. Pertanto la conoscenza affidabile delle velocità di esercizio con riferimento ai caratteri geometrici della strada è di fondamentale importanza. La letteratura propone alcuni modelli predittivi basati su rilievi effettuati su viabilità esistente [1,2,3,45,47,67,74].
In simulazione è stato possibile calcolare la distribuzione delle velocità operative in condizioni standardizzate e, attraverso regressioni effettuate rispetto alle caratteristiche planoaltimetriche della strada, verificare l'affidabilità di modelli predittivi [10,11,14]. Rispetto ai modelli predittivi esistenti è stato possibile verificare l'influenza dell'articolazione altimetrica tendenzialmente trascurata, nonché delle condizioni geometriche al contorno, quali ad esempio rettifili, curve e raccordi antecedenti alle sezioni in cui si sviluppa la manovra.
Sono stati ottenuti diversi modelli di predizione delle velocità operative (velocità dell'ottantacinquesima percentile) e numerose analisi sono state condotte per verificare l'omogeneità dei tracciati in funzione delle differenze di velocità adottate tra elementi consecutivi del tracciato (figura 3.6).

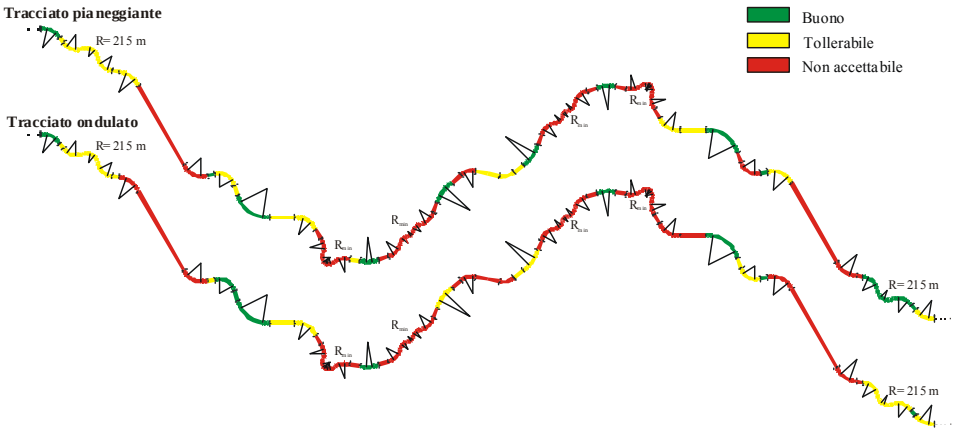

Fig. 3.6 – La valutazione dell'omogeneità dei tracciati test in funzione delle V_{85} misurate.

e) La verifica della dispersione delle traiettorie per elementi geometrici variabili [19,28,38]

La dispersione delle traiettorie rappresenta un importante indicatore di qualità del progetto per la sicurezza dell'esercizio poiché quantifica lo scostamento tra lo sviluppo di una manovra così come schematizzata dal progettista e la reale articolazione di questa.
La simulazione in realtà virtuale consente l'analisi dettagliata delle traiettorie percorse con campionamenti particolarmente minuziosi. Tali traiettorie, per poter essere confrontate rispetto all'asse stradale, devono essere depurate dello scostamento intrinsecamente connesso al comportamento di guida di ciascun utente, derivante dalla propensione individuale di guidare più a destra o in prossimità dell'asse della strada.
Il risultato di maggior interesse tratto dalla sperimentazione consiste nell'aver posto inequivocabilmente in evidenza che la dispersione delle traiettorie è influenzata sia dai singoli elementi geometrici, sia dalla loro combinazione (figura 3.7). Ciò porta a definire un quadro di una certa complessità nell'analisi dei progetti stradali, perché, in forza di tali conclusioni, si rende indispensabile un processo di valutazione per la formulazione di un giudizio di qualità che non può prescindere da una lettura sistemica del tracciato stradale.

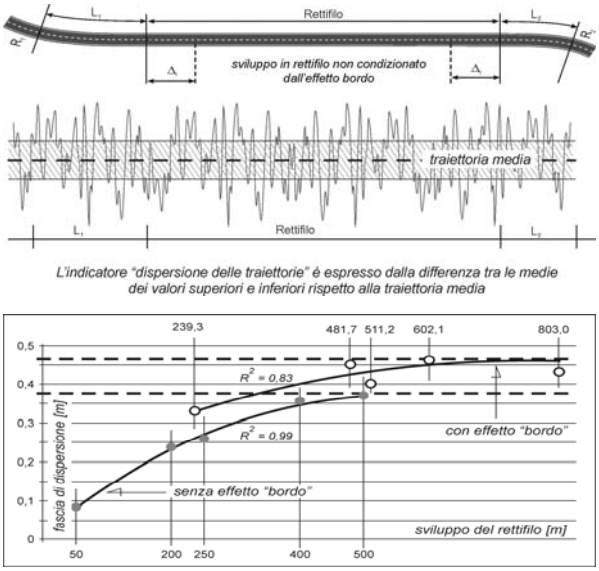

Fig. 3.7 – Variabilità della fascia di dispersione delle traiettorie in funzione dello sviluppo dei rettifili.

f) L'individuazione degli indicatori di qualità del progetto ai fini della sicurezza [21]

La letteratura internazionale propone degli indicatori sintetici che, in funzione di alcune caratteristiche geometriche dei tracciati stradali (raggi di curvatura planimetrici, lunghezza dei tratti di clotoide, ecc.), consentono di formulare un giudizio di qualità sul progetto. Tali indici sono in generale impostati a fronte di ipotesi teoriche assunte a priori sulla base di convincimenti derivati esclusivamente dalla dinamica dell'esercizio della guida. In particolare tali ipotesi correlano situazioni critiche a fronte di situazioni stradali che comportano sollecitazioni dinamiche sopra soglie di tolleranza ovvero variazioni brusche della cinematica del veicolo. La simulazione in realtà virtuale consente di verificare l'effettiva affidabilità di tali strumenti analitici registrando il valore istantaneo che assumono le grandezze che inducono un disagio sull'utente (p.es. accelerazioni trasversali), eventualmente anche monitorando le condizioni psicofisiche dell'utente durante la guida. Inoltre la simulazione consente di verificare sino a che punto tali indicatori, laddove siano significativi, conservino i caratteri di significatività al variare delle condizioni di esercizio (figura 3.8).

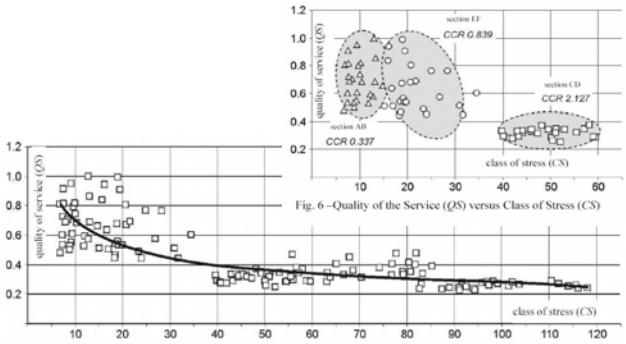

Fig. 6 – Quality of the Service (*QS*) versus Class of Stress (*CS*)

Fig. 9 – Quality of the Service *QS* versus Class of Stress *CS* (total measurements)

Tab. 1 – Comparison *QS* observed and computed (using equation 4)

CCR computed	$\langle CS \rangle$ observed	$\langle QS \rangle_m$ observed	$\langle QS \rangle_c$ computed	$\langle QS \rangle_m - \langle QS \rangle_c$	Δ %
0.337	9.785	0.695	0.750	0.055	7.9
0.839	21.597	0.636	0.534	-0.102	-16.1
2.127	48.661	0.319	0.376	0.057	18.0
3.965	70.339	0.362	0.321	-0.041	-11.3
8.012	98.982	0.269	0.277	0.008	3.1
				$\langle \Delta \rangle$%	11.3

Fig. 3.8 – Indicatori di qualità del progetto.

g) La verifica di qualità dei progetti stradali (nuove opere e adeguamenti) [28]

Il simulatore di guida consente di ricostruire in realtà virtuale l'ambiente stradale con un elevato livello di realismo. In particolare è possibile generare esattamente la geometria planoaltimetrica di un tracciato, qualunque essa sia, le condizioni di traffico presunte, le condizioni ambientali e lo scenario di contorno, dagli oggetti che si localizzano immediatamente a bordo strada, sino al panorama di sfondo. In simulazione la strada può essere percorsa senza particolari oneri di sperimentazione da numerosi utenti e da differenti categorie di veicoli.
L'analisi dei comportamenti di guida, la variabilità delle traiettorie e il calcolo di sintetici indicatori di funzionalità e sicurezza dell'esercizio viario, i quali tengono conto dell'intera articolazione del tracciato e dell'ambiente stradale, consentono di formulare giudizi consistenti rispetto alla qualità del progetto, prima che esso venga realizzato.
Una volta identificate le criticità del progetto è anche possibile valutare l'efficacia di interventi per la correzione delle eventuali anomalie [48,63], modelli di gestione del traffico e varianti progettuali, simulando in realtà virtuale tali provvedimenti e ripetendo, nelle medesime condizioni, le prove di guida rispetto al medesimo campione di utenti (figura 3.9).

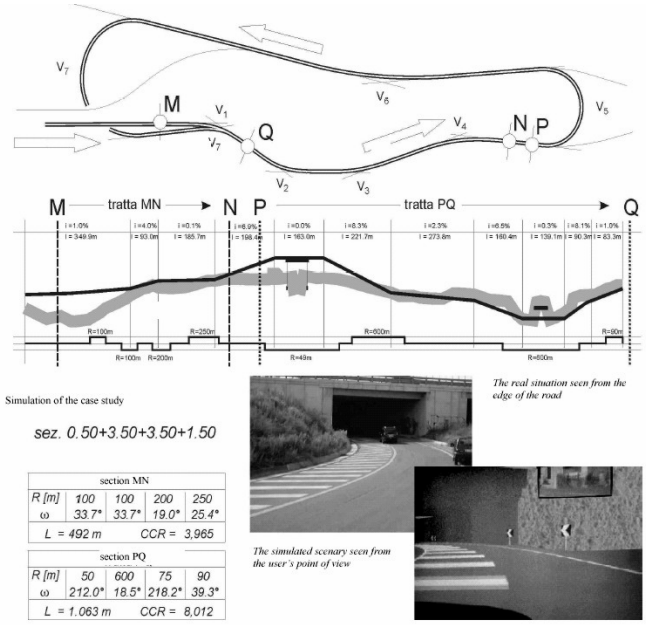

Fig. 3.9 – La verifica di qualità dei progetti stradali.

3.4 Le sperimentazioni condotte nell'ambito della tesi

Come si è più volte sottolineato la letteratura scientifica è concorde nell'attribuire alla strada una rilevante responsabilità nel determinare significativi rischi di esercizio che possono derivare da errori di progettazione, da carenze manutentorie, o da condizioni funzionali che inducono una rilevante frequenza di comportamenti a rischio da parte degli utenti.

Questa ultima questione è quella di più difficile soluzione in quanto:

- non disponiamo di riferimenti consolidati; l'esigenza di coniugare l'esercizio della strada con i comportamenti indotti sui conducenti dei veicoli si è imposta solo recentemente, da quando tali comportamenti sono fortemente condizionati da rilevanti carichi di traffico;
- il problema può essere affrontato solo assicurando all'ingegneria stradale il contributo delle discipline psicologiche, che studiano i modelli di comportamento dell'utente nelle condizioni ordinarie di esercizio;
- una significativa verifica sperimentale si è resa possibile solo da quando moderni sistemi di simulazione in realtà virtuale hanno consentito di superare i limiti degli accertamenti episodici effettuabili sul campo.

Una sistematica campagna di sperimentazioni in realtà virtuale sviluppate nell'ambito della tesi di dottorato ha consentito, in una prima fase di studio, di perseguire lo scopo di analizzare il rischio indotto dalle caratteristiche della strada e dalle sue condizioni di funzionalità.

Tali risultati, come si vedrà nell'ultimo capitolo, hanno costituito le basi per proporre una nuova teoria, la teoria del disagio, la cui applicazione su casi di studio reali (viabilità extraurbana caratterizzata da unica carreggiata), ha portato a sua volta ad importanti conclusioni con ricadute progettuali nell'ottica di un approccio prestazionale di verifica di qualità del progetto ai fini della sicurezza dell'esercizio.

Nello specifico sono state analizzate in simulazione due diverse condizioni funzionali di viabilità extraurbana (figura 3.10):

- ✓ le prime, caratterizzate da basse densità veicolari, dove sono le geometrie dell'infrastruttura ad influenzare i comportamenti di guida laddove la percezione e l'interpretazione del tracciato da parte dell'utente non corrisponde alla reale articolazione plano altimetrica della strada;

- ✓ le seconde, caratterizzate da alte densità di flusso, dove sono le interferenze veicolari ad indurre comportamenti a rischio per effetto del disagio subito dagli utenti le cui necessità ed aspettative non trovano riscontro nella funzionalità dell'infrastruttura.

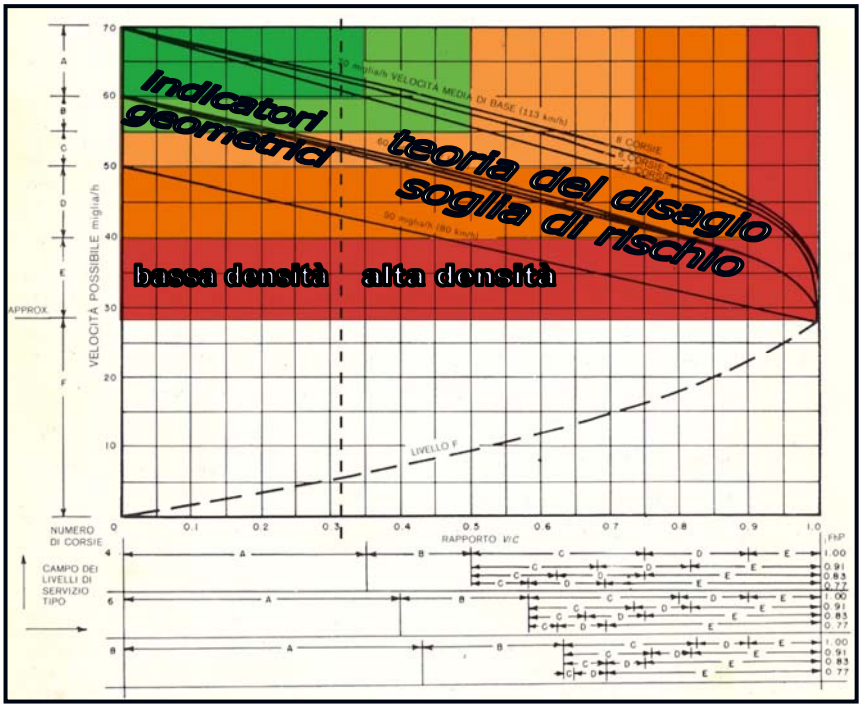

Fig. 3.10 – L'ambito delle sperimentazioni in realtà virtuale.

4. La verifica della qualità del progetto in condizioni di basse densità veicolari

Considerata la rilevanza degli effetti psicofisiologici per la caratterizzazione del livello di rischio di una infrastruttura stradale, è evidente la necessità di verificare la qualità dei progetti, sia per le nuove realizzazioni, sia per gli adeguamenti, mediante modelli che consentano di valutare i comportamenti indotti sull'utente dalle condizioni di circolazione, oltre che dall'articolazione geometrica del tracciato e dalla configurazione della sezione trasversale.
In argomento si è visto come sia possibile individuare tra i più promettenti processi di verifica finalizzati ad accertare la qualità dell'offerta stradale sotto il profilo della sicurezza d'esercizio quello fondato sulle verifiche in realtà virtuale, ovvero basato sulla simulazione tramite complessi sistemi hardware e software atti a ricreare in laboratorio condizioni il più possibile prossime alle reali.
Queste considerazioni hanno promosso un'impegnativa attività di ricerca nell'ambito del CRISS che, oltre a sviluppare un'attività sperimentale per approfondire gli aspetti teorici della disciplina, si è posto l'obiettivo di mettere a punto un sistema innovativo per la verifica di qualità dei progetti stradali che utilizza le rilevanti potenzialità del simulatore di guida descritto precedentemente attraverso l'identificazione di opportuni indicatori di simulazione.
Nelle sue linee essenziali il processo di certificazione della qualità dei progetti attraverso la simulazione di guida in realtà virtuale, sia per le nuove opere, sia per gli adeguamenti della viabilità in esercizio, prevede [23]:

- l'acquisizione della documentazione tecnica e il rilevamento sul campo dei dati necessari per la costruzione di adeguati scenari di simulazione;
- la determinazione delle più significative condizioni di esercizio per le finalità della verifica (carico di traffico, composizione dei flussi, condizioni ambientali);
- la scelta di un campione di driver atto a rappresentare correttamente la composizione degli utenti della strada (esperti, principianti, età media, stati fisiologici, ..ecc.) numericamente significativo sotto il profilo statistico;

- la determinazione degli indicatori che, per la specificità del caso in esame, sono più adeguati a rappresentare la qualità dell'offerta di servizio;
- la progettazione e l'esecuzione di esaustive campagne di misure in realtà virtuale per acquisire i valori locali e medi degli indicatori;
- l'elaborazione dei dati e la conseguente espressione di un sintetico giudizio di qualità sistemica della strada sotto il profilo della sicurezza opportunamente motivato.

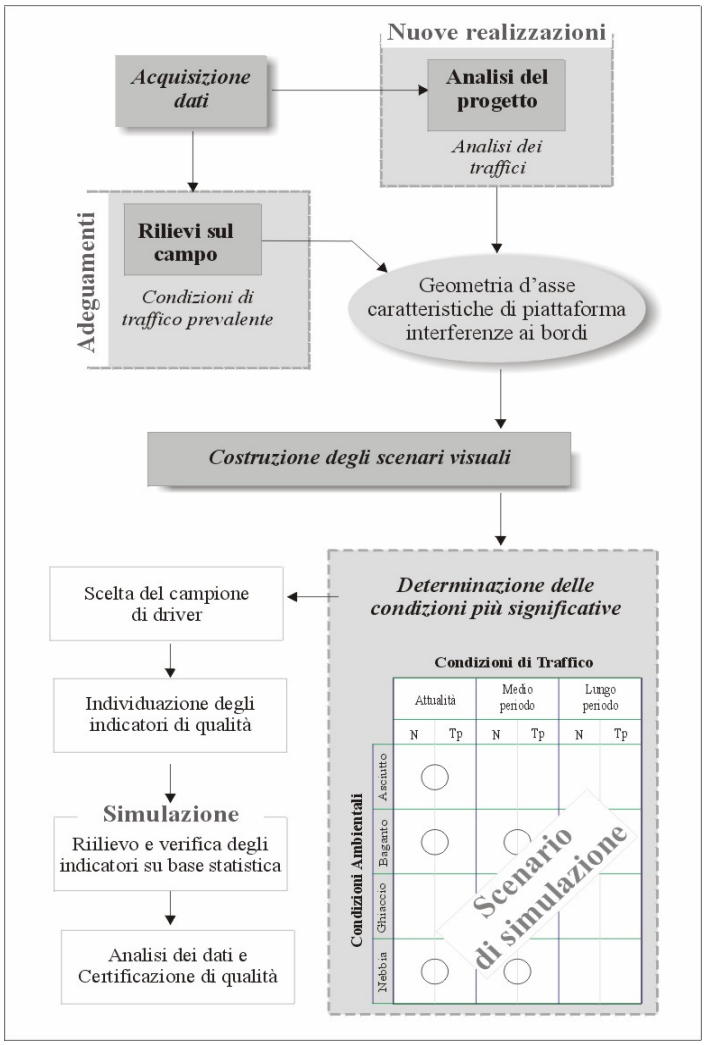

Fig. 4.1 – Protocollo di simulazione per la certificazione della qualità dei progetti stradali [23].

Evidentemente il problema principale dell'intero processo rappresentato in figura 4.1 si individua nell'identificazione e nella validazione di un indicatore che possa essere rappresentativo del comportamento degli utenti ed altamente correlato all'incidentalità stradale in modo da poter fornire come valore finale della procedura un livello di previsione dell'incidentalità attesa.
Questo capitolo illustra sinteticamente i risultati ottenuti da una sperimentazione in simulazione di guida in realtà virtuale che può ritenersi un importante passo di una pluriennale attività di ricerca finalizzata a determinare criteri e metodologie scientifiche per verificare la qualità dei progetti stradali e degli interventi di adeguamento della viabilità esistente sotto il profilo della sicurezza di esercizio.
Lo studio, nello specifico, ha proposto un avanzato ed efficace indicatore per la stima del rischio che tiene in considerazione il comportamento umano in conseguenza delle sollecitazioni indotte dall'infrastruttura stradale. I risultati dei primi esperimenti a riguardo sono stati discussi altrove [28].
Riassumendo, gli obbiettivi specifici della sperimentazione descritta nei prossimi paragrafi e del protocollo di certificazione in generale, riguardano:

- la validazione di un indicatore di sicurezza basato sul comportamento dell'utente;
- l'ottimizzazione della procedura di calcolo dell'indicatore e la validazione dello stesso attraverso la correlazione con il numero di incidenti;
- la generalizzazione dei risultati ad un'ampia casistica di applicazioni.

L'esigenza di individuare un avanzato indicatore di simulazione di guida in realtà virtuale nasce dal fatto che i tradizionali indicatori geometrici, come già discusso nei precedenti capitoli, non considerano né il normale comportamento umano (utente mediamente prudente), né il comportamento dell'utente alla guida sotto determinate condizioni di stress, rischio, fatica. Queste ultime condizioni sono spesso indotte dall'ambiente stradale, dove infatti le ripetute sollecitazioni dinamiche (accelerazioni) durante la guida possono causare comportamenti anomali. Questa è la ragione per cui si è pensato di esaminare, quale indicatore di simulazione, la variabilità delle accelerazioni trasversali subite dall'utente durante la guida attraverso un parametro che esprime il disagio dell'utente e non è influenzato da comportamenti soggettivi.

L'ipotesi di base consiste nel ritenere che una elevata variabilità dell'accelerazione trasversale locale rispetto all'accelerazione centrifuga, calcolata in base alla curvatura dell'asse stradale, possa essere giustificata dalle numerose correzioni che l'utente deve effettuare per fare in modo che la sua traiettoria segua la traiettoria ideale dell'asse.
Ciò comporta che sarà maggiore il disagio subito dall'utente per effetto della difficoltà di interpretare e percepire correttamente il tracciato stradale. Questa assunzione trova riscontro in Benedetto [28] che ha proposto un analogo indicatore definito classe di stress (*CS*) che misura il tempo durante il quale l'utente subisce determinate accelerazioni trasversali. Viene calcolato moltiplicando per ogni curva, appartenente al segmento in esame, il tempo di percorrenza dell'elemento per l'accelerazione centrifuga subita dall'utente nella curva stessa, il tutto pesato per il tempo di percorrenza del segmento totale.
La formula del CS è la seguente:

$$CS = \Sigma_i \, a_i t_i / \Sigma_i \, t_i \qquad (1)$$

con a accelerazione centrifuga e t tempo di percorrenza del singolo elemento. Tale indicatore può essere considerato come un'evoluzione degli indicatori tradizionali (*CCR* e *CCRs*), capace anche di mostrare una buona correlazione con essi. Sebbene l'indicatore non tenga esplicitamente conto dell'ordine con il quale l'utente affronta i vari elementi della strada, escludendo in questo modo dalla verifica il concetto di sistematicità dell'infrastruttura, bisogna notare che il CS viene calcolato dopo aver determinato le velocità degli elementi del tracciato (rettifili, archi di cerchio) e si ha quindi la possibilità di verificare l'esistenza di possibili incongruenze nel caso in cui si verifichino grandi differenze di velocità e dell'indicatore tra elementi adiacenti. Ciò consentirebbe di studiare l'omogeneità del tracciato, requisito fondamentale per una corretta ed agevole lettura dell'infrastruttura da parte dell'utente (*self explaining road*).

4.1 La sperimentazione

La sperimentazione ha interessato diverse infrastrutture stradali (figura 4.2) aventi carreggiate separate con due corsie per senso di marcia. Sono state selezionate sei tratte omogenee appartenenti a tre infrastrutture esistenti caratterizzate da un elevato numero di incidenti registrati negli anni, da basse densità veicolari e da geometrie del tracciato piuttosto articolate:

A24 A1 SR148

Fig. 4.2 – Casi di studio riprodotti in simulazione di guida in realtà virtuale.

- ✓ due tratte dell'autostrada A24 che collega Roma a L'Aquila e in particolare tra gli svincoli di Vicovaro e Tagliacozzo;
- ✓ due tratte dell'autostrada A1 che collega Milano con Napoli in corrispondenza del valico appenninico tra Prato Calenzano e Roncobilaccio;
- ✓ due tratte della SR148 Pontina, che collega Roma a Terracina, tra Aprilia e Pomezia.

Mentre la sezione stradale delle tre infrastrutture è pressoché la stessa, a carreggiate separate con due corsie per senso di marcia, la velocità di esercizio è significativamente differente.

Al fine di evitare risultati influenzati o sovraparametrizzazioni dei modelli interpretativi, sono state scelte per ogni infrastruttura due tratte omogenee, prive di intersezioni (flusso veicolare costante, assenza di ingressi o uscite, ambito extraurbano), prive di segnalazioni anomale, aventi approssimativamente le stesse caratteristiche di esercizio e le stesse condizioni ambientali al contorno.

Contemporaneamente è stato necessario estrarre dai database incidentali esclusivamente quegli incidenti causati, direttamente o indirettamente, dall'infrastruttura, scartando cioè quegli eventi incidentali il cui verificarsi è da attribuire alla casualità propria del comportamento umano e delle condizioni ambientali (in questi casi si può parlare di incidentalità fisiologica dell'infrastruttura [44]), ossia di una quota parte di incidenti il cui verificarsi è governato da eventi assolutamente casuali (concetto questo che contrasta in un certo senso con la vision zero auspicata dagli svedesi). A tal fine si ritiene utile riportare brevemente la procedura seguita per l'individuazione degli incidenti imputabili alla strada [23,25,37] che può essere utilizzata anche per la rilocalizzazione degli eventi incidentali non localizzati. Tale procedura è di fondamentale importanza soprattutto per la viabilità ordinaria dove i sinistri non localizzati costituiscono una percentuale molto elevata.

4.2 L'individuazione degli incidenti imputabili alla strada

Per soddisfare le esigenze di una moderna progettazione stradale l'obiettivo primario dell'analisi incidentale è il riconoscimento dei rapporti di causa/effetto che possono essere governati da opportune scelte progettuali; tuttavia, l'individuazione degli eventi direttamente o indirettamente imputabili alla strada trova immediata applicazione per intervenire sul patrimonio in esercizio al fine di ridurre gli attuali livelli incidentali. Infatti, anche se una componente certamente non trascurabile dell'incidentalità deve attribuirsi ad altre cause, dopo aver individuato le situazioni in cui prevale la responsabilità dell'infrastruttura, è possibile intervenire efficacemente per rimuovere le anomalie fisiche e funzionali che determinano i sinistri ripetitivi.
Allo scopo, è possibile adottare una procedura che, nella sua essenzialità si articola nei seguenti passi elementari.

1. Analisi dello scenario incidentale per un arco temporale predefinito e calcolo dell'incidentalità specifica media per il periodo considerato.

L'esigenza di prendere in considerazione più annualità consecutive è imposta dalla necessità di effettuare le successive elaborazioni utilizzando un campione statisticamente affidabile. A tale scopo l'arco temporale da considerare deve essere il più ampio possibile, sempre che nel periodo considerato non siano intervenute significative variazioni delle condizioni di fruizione della strada, tali da non consentire di comparare gli scenari incidentali per effetto, ad esempio, di rilevanti incrementi dei traffici, di una variazione della composizione tipologica dei flussi, di significativi interventi manutentori, ... ecc.

2. Individuazione degli incidenti ripetitivi (I_R) e di quelli casuali (I_C) con riferimento ai soli incidenti localizzati (IL), assumendo per essi come ripetitivi quelli che eccedono l'incidentalità media di una prefissata soglia numerica ($\Delta/2$) essendo Δ il range di variabilità locale degli incidenti casuali;

Per la determinazione del valore di soglia è necessario adottare un procedimento che consente di calcolare, per i soli incidenti localizzati, sia il valor medio dell'incidentalità imputabile agli eventi casuali, sia il loro possibile range di variabilità locale. Allo scopo, devono necessariamente adottarsi criteri probabilistici che, tuttavia, si sono dimostrati particolarmente affidabili alla luce dei riscontri condotti sul campo in situazioni controllate, ove è stato possibile effettuare un adeguato monitoraggio.

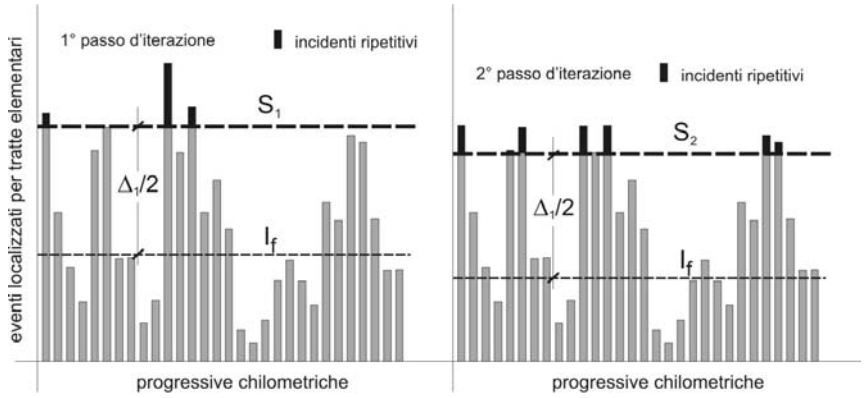

Fig. 4.3 – Rappresentazione schematica del processo iterativo per la valutazione degli incidenti ripetitivi.

Facendo riferimento al grafico in figura 4.3, dove sono rappresentati i soli incidenti localizzati, la procedura prevede nell'ordine:

a. il calcolo dell'incidentalità media al chilometro dei soli incidenti localizzati

   $(I_f) = IL/\text{km}.$ (2)

   In figura 4.3 l'incidentalità media si è indicata con la scrittura I_f in quanto, quando si estenderà il calcolo alla totalità degli incidenti, il suo valore ricavato al termine della procedura sarà rappresentativo dell'incidentalità "fisiologica" della strada;
b. l'assunzione, in prima ipotesi, di un range di variabilità locale Δ_1, tale per cui solo il 5% dei chilometri della tratta siano caratterizzati da una concentrazione degli incidenti che eccedono la soglia $S_1 = (I_f) + \Delta_1 /2$ così definita;
c. l'attribuzione degli incidenti (Σ_1) che eccedono il valore di soglia S_1 al sottoinsieme di incidenti ad altra probabilità di ripetizione;
d. la "correzione dell'incidentalità media" prima calcolata (esclusi gli incidenti che superano la soglia S_1) e la conseguente definizione di un nuovo valore di soglia pari a: $S_2 = (IL-\Sigma_1)/km + \Delta_1 /2$;
e. l'attribuzione degli incidenti (Σ_2) che eccedono il valore di soglia S_2 al sottoinsieme di incidenti ad altra probabilità di ripetizione;
f. la reiterazione del procedimento come al punto "d", ripetuta sin quando ulteriori riduzioni del valore di soglia (S_f) non comportino l'individuazione di incidenti ad alta probabilità di ripetizione ($\Sigma_f = 0$).

A seguito dell'iterazione, con riferimento al valore Δ_1 questa prima fase della procedura avrà individuato come incidenti ripetitivi un numero di sinistri pari a:

$$(I_R)_1 = \Sigma_1 + \Sigma_2 + \ldots\ldots + \Sigma_{f-1} + \Sigma_f. \qquad (3)$$

Reiterando l'intero processo a partire dalla fase "a" assumendo un valore di $\Delta_2 < \Delta_1$e successivamente $\Delta_3 < \Delta_2$..... ecc, si otterrà una serie di coppie di valori $\Delta_i ; (I_R)_i$ rappresentabile in forma ordinata.
Tale rappresentazione assume usualmente l'andamento in figura 4.4 e consente di individuare un "gomito" della curva che discrimina due sottoinsiemi caratterizzati rispettivamente da un'elevata e da una modesta variabilità di $(I_R)_i$ in funzione di Δ_i. Pertanto il numero degli incidenti ripetitivi si otterrà reiterando il procedimento per il valore di $\Delta/2$ individuato dal gomito della curva.
Tale modello matematico è stato più volte testato e validato [13,18,21,23,25,37].
L'intera procedura è stata sviluppata dal Prof. Carlo Benedetto nel corso della sua pluriennale attività di ricerca nel campo della sicurezza stradale. Ho voluto in questo paragrafo riportarla nel dettaglio [23,25] in quanto ritengo sia utile per comprendere le potenzialità di un nuovo approccio all'analisi incidentale che il professore è riuscito a sviluppare nei suoi anni di ricerca.
Il modello è stato applicato in questa sperimentazione per estrarre gli incidenti imputabili all'infrastruttura dal totale degli eventi registrati nelle banche dati a disposizione (fonte ACI-ISTAT, arco temporale di studio 2000-2004 [4]).

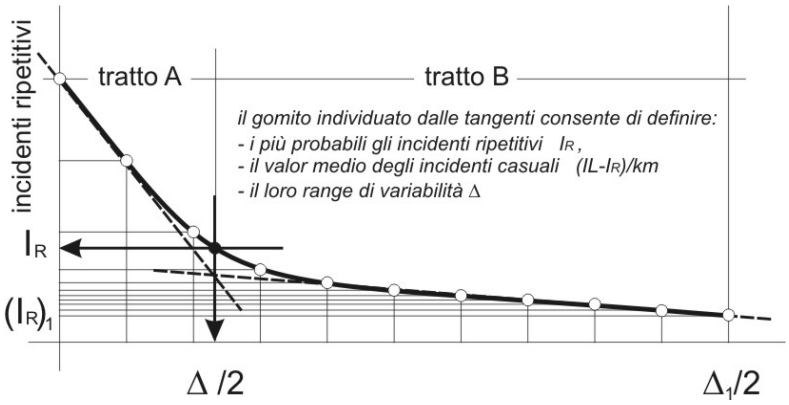

Fig. 4.4 – Determinazione del range di variabilità e dell'incidentalità ripetitiva.

4.3 Metodologia

Com'è stato già discusso nel capitolo precedente, l'approccio innovativo della simulazione rende possibile riprodurre in realtà virtuale la totalità delle condizioni differenti di traffico, ambiente stradale e al contorno. Per migliorare il realismo della simulazione è fondamentale la generazione grafica di tutti gli oggetti costituenti l'ambiente al contorno, come vegetazione, muri, barriere di sicurezza e l'introduzione delle geometrie stradali e delle sezioni trasversali.
In considerazione della complessità delle simulazioni in programma, si è preventivamente verificata la significatività dei dettagli da riprodurre in realtà virtuale. Questa fase dell'indagine ha posto in evidenza la necessità di rappresentare col maggiore dettaglio possibile l'ambiente interno della strada (sezione, pendenze, raggi, arredi, ..ecc.), mentre si può comporre il paesaggio prescindendo dalle emergenze di dettaglio (edifici, tipologia della vegetazione, …ecc.), purché siano rispettati i principali caratteri morfologici ottenibili in simulazione utilizzando per esempio per gli sfondi le foto acquisite in sito.
Gli scenari sono stati implementati sul simulatore di guida del laboratorio di realtà virtuale del Centro Interuniversitario di Ricerca per gli studi sulla Sicurezza Stradale (figura 4.5).
Prima di generare lo scenario di simulazione si è reso necessario acquisire tutti i dati utili: cartografia, mappe georeferenziate, foto e video delle tre infrastrutture. Tutte le informazioni sono state inserite nel software di simulazione secondo una sintassi basata su un codice alfanumerico per riprodurre le sei tratte stradali di studio.
Questo passo è stato molto importante per restituire miglior affidabilità e un adeguato livello di realismo allo scenario di simulazione.
Come dimostrato sperimentalmente altrove [6,10,11,14,15,19,20,28,38], se lo scenario ha un appropriato livello di realismo l'utente si comporta in realtà virtuale come nel mondo reale [12,87].
La costruzione degli scenari è stata indubbiamente un'attività onerosa nell'ambito dell'intera sperimentazione, sia in quanto ha richiesto numerosi sopralluoghi sulle infrastrutture di studio per ottenere tutte le informazioni necessarie, sia perché si è cercato di riprodurre con la massima fedeltà lo scenario reale, includendo i flussi veicolari, nell'ambiente simulato.
La figura 4.6 mostra alcune immagini dello scenario della viabilità esistente e delle stesse tratte ricostruite in realtà virtuale con riferimento all'autostrada A24.

Fig. 4.5 – Laboratorio di realtà virtuale del CRISS.

4.4 La conduzione delle prove

Le prove sono state condotte utilizzando un campione di driver composto da 24 unità, preventivamente caratterizzato sotto il profilo delle capacità di guida.
Per evitare risultati influenzati da differenze significative nelle modalità di guida, come possono essere l'esperienza, l'età, il livello di stress, lo stato emotivo o neuro cognitivo, o da altri fattori, è stato selezionato un gruppo omogeneo di utenti e a questi è stato applicato un rigido protocollo di prova.
La sperimentazione ha riguardato un numero di soggetti adeguato dal punto di vista statistico [19,23,24,38]. Ogni driver è stato "istruito" alla guida in simulazione imponendo una fase preventiva di training e, a valle di essa, una fase di test finalizzata all'accertamento della validità delle misure stesse.
Per ogni prova si sono rilevati con passo temporale di 0,2 secondi tutti i parametri atti a caratterizzare le situazioni locali di guida (indicatori elementari e composti).

Fig. 4.6 – Confronto tra lo scenario reale (sinistra)
e lo scenario simulato (destra).

In particolare sono stati tabulati su foglio elettronico gli output di simulazione riguardanti i parametri:

- ✓ cinematici (distanza percorsa, tempo e velocità corrispondenti, posizione del baricentro del veicolo rispetto alla geometria d'asse, curvatura della traiettoria);
- ✓ dinamici (accelerazione longitudinale e trasversale, forze di massa corrispondenti);
- ✓ caratterizzanti l'equilibrio del veicolo (imbardata, angolo di beccheggio e di rollio, carico sulle sospensioni);
- ✓ caratterizzanti la guida (angolo di sterzatura del volante, pressione sul freno, rapporto al cambio innestato, tempi di risposta a sollecitazioni esterne, battito cardiaco in prova e a riposo);
- ✓ caratterizzanti l'ambiente esterno (condizioni ambientali, aderenza al contatto ruota/strada, flusso veicolare, velocità dei veicoli interferiti nella stessa direzione e in direzione opposta, distanze relative).

4.5 Il Disagio Patologico

Inizialmente, percorrendo con nuovi criteri i percorsi tradizionali dell'ingegneria stradale che verificano le anomalie prospettiche del tracciato, pur pervenendo a qualche risultato di un certo interesse, l'indagine ha prodotto dei risultati del tutto insoddisfacenti sin tanto che non è maturata l'intuizione di un indicatore basato sulle conseguenze indotte dalle geometrie piuttosto che dall'analisi teorica delle loro coerenze.

Così, dopo aver esaminato diverse possibilità, si è pervenuti alla soluzione del problema riconoscendo nelle "microcorrezioni" di guida, imposte al conducente del veicolo dalla successione delle geometrie d'asse, l'indicatore più espressivo della qualità del progetto sotto il profilo della sicurezza.

Più precisamente l'indicatore individuato sperimentalmente è pari all'integrale delle differenze valutate in assoluto dell'accelerazione trasversale subita dal conducente del veicolo (derivante quindi dalla traiettoria percorsa) e dell'accelerazione trasversale teorica imputabile alle curvature locali della strada (ricavate ovviamente dalla lettura del progetto). Infatti la variabilità locale istantanea dell'accelerazione trasversale mostra chiaramente le correzioni della traiettoria che l'utente effettua come illustrato nella figura 4.7.

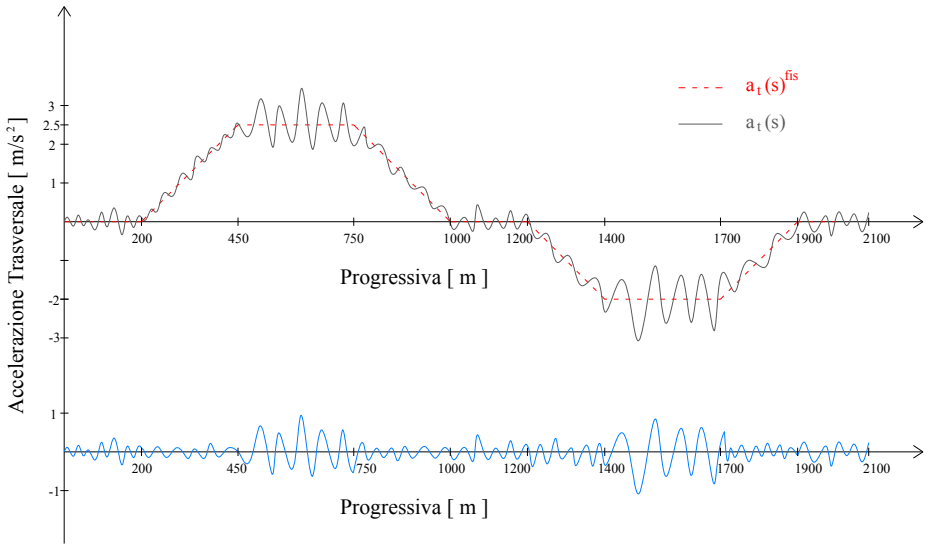

Fig. 4.7 – Disagio Patologico *DP*.

Sono possibili due tipi di correzioni:

- ✓ le prime sono fisiologiche, collegate alla geometria (curvatura) della strada;
- ✓ le seconde sono patologiche e dipendono dalle differenze tra la geometria reale della strada e l'interpretazione degli utenti del tracciato stradale dipendente dalle loro aspettative.

E' ragionevole assumere che valori elevati della frequenza (ϕ) e dell'ampiezza (A) di queste ultime correzioni siano significativi di tracciati che manifestano una difficile lettura da parte degli utenti, denunciando una bassa coerenza delle geometrie.

Teoricamente in un'infrastruttura in cui il Disagio Patologico rilevato è nullo, l'utente non ha avuto la necessità di adottare delle correzioni patologiche (evidentemente questo caso estremo può verificarsi esclusivamente su veicoli a guida vincolata, in cui è possibile seguire perfettamente le geometrie dell'asse stradale).

In generale, infatti, la variabilità dell'accelerazione trasversale lungo l'ascissa s ($a_t(s)$) può essere espressa come la somma delle accelerazioni fisiologiche ($a_t(s)^{fis}$) e patologiche ($a_t(s)^{pat}$):

le prime sono direttamente definite dalla curvatura locale della strada ($1/\rho$) e le seconde dipendono sia dalla strada che dal comportamento dell'utente, e possono essere analiticamente espresse attraverso una serie di Fourier:

$$a_t(s) = a_t(s)^{fis} + a_t(s)^{pat} = v(s)^2/\rho(s) + \Sigma_{i=1,\infty} A_i \sin(\omega_i s + \phi_i) \qquad (4)$$

In sostanza l'accelerazione trasversale fisiologica può essere calcolata dalla geometria stradale.

Viceversa l'accelerazione trasversale patologica è ricavabile dagli output di simulazione come sottrazione numerica alla generica ascissa:

$$a_t{}^{pat}{}_j = a_{t\,j} - v_j{}^2/\rho_j \qquad (5)$$

Per tener conto correttamente sia della frequenza sia dell'ampiezza della correzione patologica si propone di assumere come indicatore della differenza tra la strada reale e le aspettative dell'utente l'integrale di $a_t{}^{pat}(s)$ che nel seguito è definito come DP (Pathologic Discomfort o Disagio Patologico):

$$DP = \int_{s=0}^{s=L} \left| a_t{}^{pat}(s) \right| ds \approx \sum_{j=0}^{N} \left| \left(\left| a_{tj} \right| - \left| \frac{v_j^2}{\rho_j} \right| \right) \right| \qquad (6)$$

Ovviamente l'integrale è esteso dall'inizio della tratta stradale fino alla fine o, come verrà applicato nel seguito della trattazione, sarà calcolato per ogni singolo chilometro delle tratte stradali riprodotte in simulazione.
Il Disagio Patologico *DP* deve essere corretto rispetto al comportamento individuale alla guida di ciascun utente. Infatti ogni utente guida in funzione delle proprie abitudini rispetto alla linea d'asse (per esempio più o meno a sinistra o a destra) e in funzione della propria percezione del rischio, della capacità di reazione, della prudenza e di altri fattori umani.
Questo comportamento soggettivo può essere quantificato analogamente attraverso un comfort fisiologico (*CF*) che è calcolato nello stesso modo del *DP* ma considerando esclusivamente le tratte in rettifilo della strada (curavtura $\rho = 0$).
Se L è la lunghezza della tratta analizzata e λ è la somma delle lunghezze dei rettifili (esclusi quelli in cui la vicinanza di un elemento curvilineo può influenzare il risultato), il *DP* modificato, DP_{mod}, è ricavato da questa differenza:

$$DP_{mod} = DP - CF*L/\lambda \tag{7}$$

4.6 Risultati

Il Disagio Patologico modificato è stimato per ogni chilometro delle tratte analizzate in modo da poterlo confrontare direttamente con i database italiani degli incidenti localizzati, che forniscono i valori aggregati degli incidenti per ogni singolo chilometro dell'infrastruttura [4].
Le figure 4.8 e 4.9 mostrano i risultati ottenuti separatamente per i primi due casi studio analizzati (A24 e SR148). Ogni punto sul grafico è rappresentativo di un chilometro delle tratte.
È evidente come siano state ottenute correlazioni molto alte e inaspettate tra il numero degli incidenti imputabili all'infrastruttura e l'indicatore ricavato dalla simulazione.
Sebbene entrambe le correlazioni siano elevate il caso della SR148 mostra un valore del coefficiente di regressione R^2 significativamente più basso di quello ricavato per l'autostrada A24 (circa 0,5 anziché 0,9).
La spiegazione è stata ritrovata nei differenti valori delle velocità di esercizio delle due infrastrutture rilevate durante le simulazioni di guida (circa 100Km/h della SR148 contro i 130Km/h dell'autostrada A24), che devono essere presi in considerazione in quanto la velocità di percorrenza incide significativamente sull'ampiezza e sulla frequenza delle correzioni effettuate dall'utente.

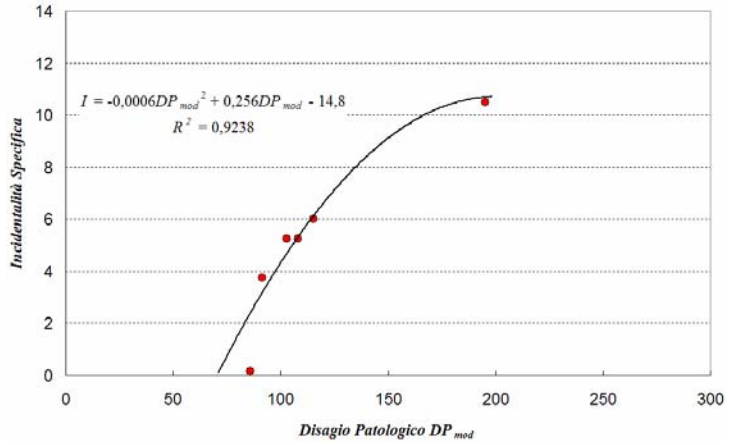

Fig. 4.8 – DP_{mod} e incidentalità specifica per l'A24.

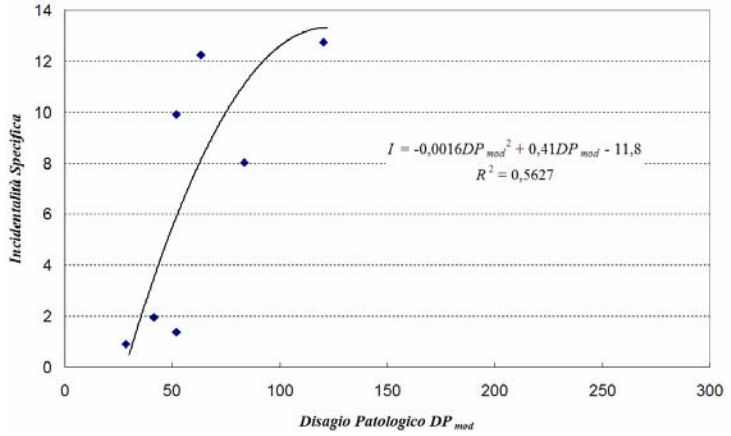

Fig. 4.9 – DP_{mod} e incidentalità specifica per la SR148.

Alla luce di un approfondimento in merito sono risultate alcune importanti evidenze. Infatti minore è la velocità di esercizio e

- ✓ minore è il valore assoluto dell'accelerazione trasversale derivante dalle correzioni apportate sulla traiettoria dell'utente;
- ✓ minore è la gravità degli incidenti.

Poiché i database italiani registrano esclusivamente gli incidenti con danni alle persone, è possibile che qualche evento incidentale non sia stato registrato per la SR148 in quanto il sinistro non ha provocato danni alle persone.

Queste due considerazioni suggeriscono che il DP_{mod} possa in qualche modo dipendere dalla velocità di esercizio.

La correzione necessaria è funzione sia della velocità di esercizio registrata sull'infrastruttura, sia del numero di incidenti registrati per flusso veicolare per il singolo chilometro della strada: l'incidentalità specifica *I,* pari al numero di incidenti rilevati rapportati al flusso di traffico transitato sul chilometro nell'intero arco temporale di riferimento dell'analisi incidentale.
Il modello proposto è espresso analiticamente dalla seguente formula:

$$DP_{mod}^{*} = DP_{mod} + \alpha \Delta v (1+\beta I)^2 \qquad (8)$$

dove α e β sono due coefficienti di calibrazione e Δv è la differenza tra le velocità di esercizio delle due infrastrutture (si è considerata come velocità di riferimento quella dell'autostrada A24, pari a 130 km/h; anche nella seguente sperimentazione sull'autostrada A1 i valori dell'indicatore sono stati omogeneizzati a tale velocità di esercizio).
I valori di α e β sono stati ricavati utilizzando come funzione obiettivo il valore del parametro di regressione R^2 relativo alla correlazione tra l'incidentalità specifica e il DP_{mod}^{*}.
Il massimo valore di R^2 uguale a 0,9257 è stato ottenuto per $\alpha = 5{,}5$ e $\beta = 0{,}02$. L'equazione di regressione ottenuta è di conseguenza:

$$DP_{mod}^{*} = 1.06\, I^2 + 0.34\, I + 75 \qquad (9)$$

I valori del DP_{mod}^{*} sono stati calcolati per entrambe le tratte delle due infrastrutture (ovviamente nel caso dell'A24 $\Delta v=0$, $DP_{mod} = DP_{mod}^{*}$). Tale relazione è significativa esclusivamente per la SR148 in cui il Δv riscontrato rispetto all'A24 è stato di 30 km/h. Evidentemente la relazione dovrà essere modificata ogni volta a seconda della velocità di esercizio della nuova infrastruttura ricostruita in simulazione.
I valori dell'R^2 aumentano fino a valori maggiori di 0,9 per entrambi i casi.
La figura 4.10 illustra i risultati ottenuti dopo aver apportato al Disagio Patologico le correzioni dovute ai differenti valori di velocità adottate dai driver nelle diverse tratte stradali e mostra come l'incidentalità specifica imputabile alla strada, realmente registrata sulle infrastrutture nell'arco temporale di studio, sia fortemente crescente all'aumentare dell'indicatore di simulazione, dando ragione del fatto che maggiori sono le correzioni che l'utente apporta alla propria traiettoria, maggiori sono le difficoltà e il disagio che esso subisce lungo il suo itinerario e maggiori sono le probabilità di commettere errori di guida che possono condurre ad eventi incidentali.

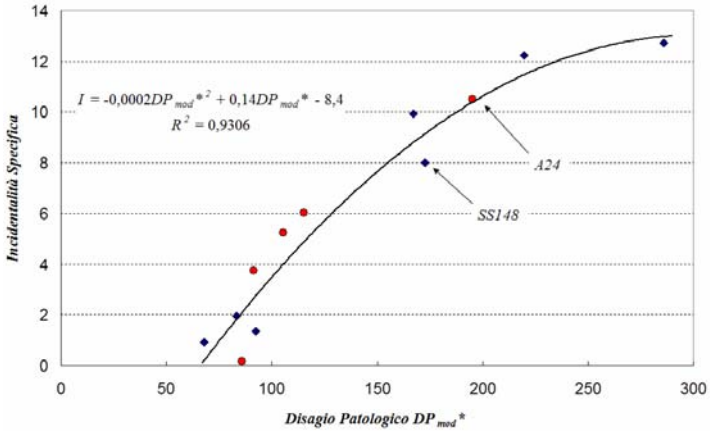

Fig. 4.10 – DP_{mod}^{*} e incidentalità specifica per l'A24 e la SR148.

Questi risultati inaspettati, sorprendentemente promettenti, sono stati quindi validati su ulteriori chilometri di due tratte di un'altra infrastruttura, l'autostrada A1 (in particolare tra Firenze e Bologna) ed hanno confermato la stretta correlazione tra le accelerazioni trasversali, o meglio il Disagio Patologico DP_{mod}^{*}, e l'incidentalità specifica.
In particolare la tratta di indagine è rappresentata da due sub-tratte della A1 tra Bologna e Firenze (figura 4.11). La prima sub-tratta va dal km 250 al km 255, tra le uscite di Roncobilaccio e Barberino; la seconda va dal km 269 al km 277 tra le uscite di Barberino e Prato Cadenzano. Come si può vedere in tali tratte erano presenti anche alcune gallerie.

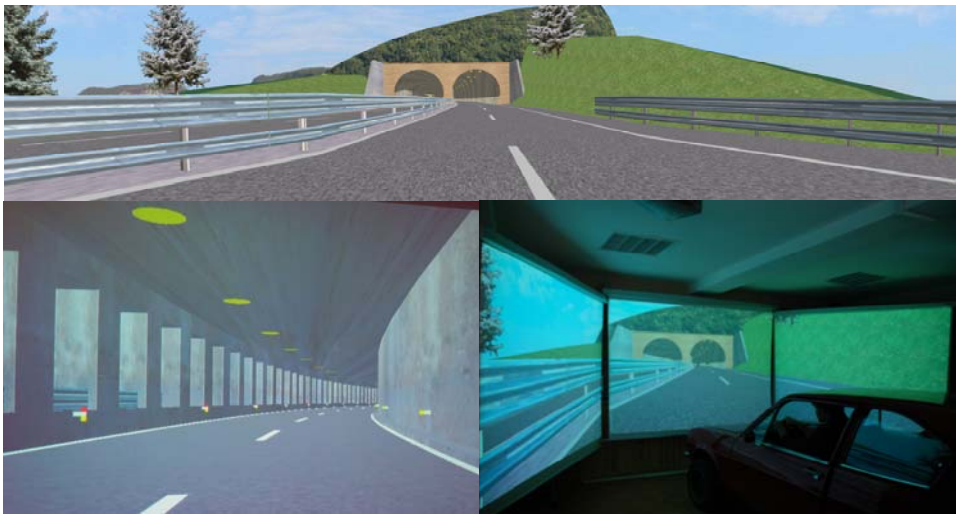

Fig. 4.11 – Gallerie nello scenario simulato dell'A1.

Dopo aver calcolato anche per le tratte di questa viabilità autostradale il Disagio Patologico modificato, tenendo in considerazione le diverse velocità adottate ed omogeneizzando i valori dell'indicatore rispetto alle velocità dell'A24 (130 km/h), sono stati riuniti tutti i valori del DP_{mod}^{*} e dell'incidentalità specifica per ognuno dei 32 km delle sei tratte.
Tenendo in considerazione i dati di partenza, si nota come i dati relativi allo studio sull'A1 vadano ad integrare lo studio dell'A24 e della SR148; in particolare vanno a completare la relazione, aumentando il dominio della stessa, comprendendo anche i casi di alta incidentalità in corrispondenza di alti valori dell'indicatore registrati proprio in corrispondenza dei chilometri più tortuosi della A1.
Nella figura 4.12 e nella tabella 4.1 sono confrontati i valori del DP_{mod}^{*} ottenuti dalla simulazione e il numero degli incidenti registrati e rapportati al flusso veicolare estratti dai database per una serie storica di 5 anni [4]. Si può notare come la correlazione conservi un'alta attendibilità e si auspicano nel prossimo futuro ulteriori sperimentazioni su tratte stradali caratterizzate da valori elevati di incidentalità in modo da verificare la relazione e generalizzare dei risultati ad altre tipologie di infrastrutture. Si raccomanda anche un'ulteriore indagine atta alla verifica della relazione tra indicatore ed incidentalità per la viabilità ordinaria su singola carreggiata.

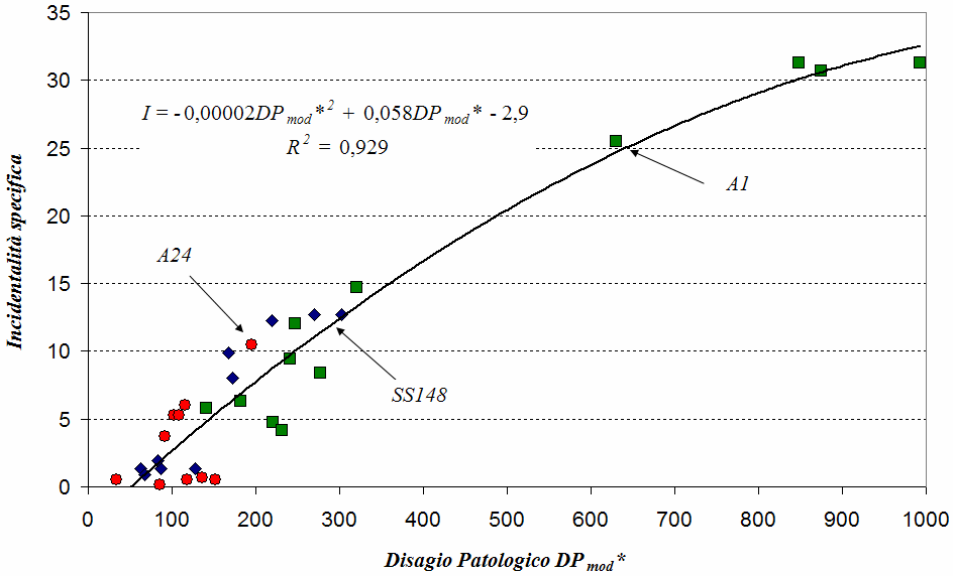

Fig. 4.12 – DP_{mod}^{*} e incidentalità specifica per l'A24, l'A1 e la SR148.

Tab. 4.1 – DP_{mod}^{*}, incidentalità specifica e *CCR* per la SR148, l'A24 e l'A1.

Casi di studio	***Chilometro***	DP_{mod}^{*}	***Incidentalità specifica***	***CCR***
SR 148 Pontina	*Km 21*	301,97	12,73	1,72
	Km 22	219,67	12,25	0,53
	Km 23	167,29	9,90	0,00
	Km 24	172,54	8,01	1,00
	Km 25	269,57	12,73	1,20
	Km 32	62,75	1,37	0,00
	Km 33	128,24	1,37	0,61
	Km 34	86,55	1,37	0,08
	Km 35	83,37	1,94	0,00
	Km 36	67,82	0,91	0,00
A24 Roma - L'Aquila	*Km 36*	102,69	5,25	0,70
	Km 37	195,16	10,50	1,10
	Km 38	115,24	6,00	0,70
	Km 39	91,40	3,75	0,58
	Km 40	108,01	5,25	0,47
	Km 53	34,00	0,53	0,00
	Km 54	118,19	0,53	0,67
	Km 55	136,14	0,70	1,10
	Km 56	85,94	0,18	0,54
	Km 57	151,69	0,53	1,40
A1 Napoli - Milano	*Km 250*	247,22	12,05	0,17
	Km 251	992,67	31,29	1,23
	Km 252	847,64	31,29	1,86
	Km 253	874,45	30,71	1,83
	Km 254	630,02	25,46	1,85
	Km 269	140,85	5,78	0,02
	Km 270	220,71	4,73	1,50
	Km 271	231,45	4,20	1,21
	Km 272	241,07	9,47	0,92
	Km 273	181,65	6,31	0,41
	Km 274	277,51	8,41	0,46
	Km 275	320,22	14,73	0,96

4.7 Confronto con un indicatore geometrico tradizionale: *CCR*

La tecnologia del simulatore di guida ad oggi risulta non accessibile a tutti coloro che effettuano le verifiche di qualità dei progetti stradali; per questo motivo si è pensato di sviluppare una ulteriore analisi atta alla verifica di eventuali correlazioni tra l'indicatore di realtà virtuale, nello specifico il Disagio Patologico, con un indicatore geometrico tradizionale, ovvero il *CCR*.
Il Curvature Change Rate (*CCR*) è un indicatore relativo alla geometria planimetrica di un'infrastruttura. E' stato introdotto in letteratura da McLean nel 1978 [74] e consente di valutare per tratte omogenee la deviazione angolare in percentuale del tracciato, fornendo così delle informazioni relative alla tortuosità dello stesso, anche se limitandosi esclusivamente ad una valutazione planimetrica.
La relazione di calcolo è la seguente:

$$CCR = \frac{\sum \omega_i}{\sum L_i} \tag{10}$$

dove $\omega_i = L_i/R_i$ rappresenta la deviazione angolare delle curve planimetriche e di transizione presenti nel tracciato, mentre L_i rappresenta la lunghezza dei singoli elementi geometrici della sezione interessata.
La correlazione tra DP_{mod}^* e *CCR* è stata ricercata per costruire un'alternativa per la valutazione della qualità dei progetti stradali in termini di incidentalità attesa secondo lo schema riportato in figura 4.13.
Nel caso si riuscisse ad evidenziare una elevata correlazione tra l'indicatore geometrico tradizionale e l'indicatore di simulazione, che interpreta le difficoltà dell'utente nel percorrere un certo tracciato ed è altamente legato all'incidentalità stradale, sarebbe in futuro possibile stabilire una legge tra i due indicatori, magari differenziata in funzione della tipologia stradale o delle condizioni di funzionalità, che possa consentire al progettista di verificare la qualità del progetto attraverso la valutazione dell'indicatore tradizionale, il quale in quel caso avrebbe la "certificazione" di essere correlato al comportamento di guida dell'utente.

Fig. 4.13 – Possibile procedura alternativa per la verifica del progetto stradale.

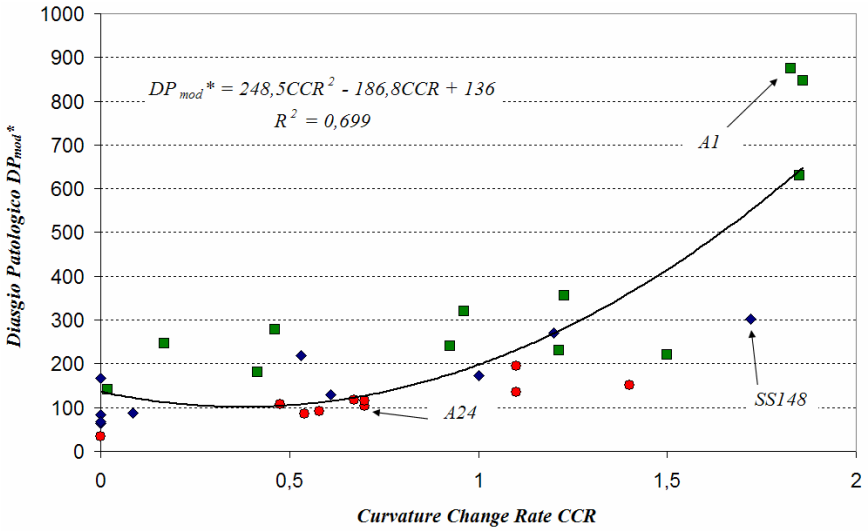

Fig. 4.14 – Indicatore tradizionale *CCR* vs indicatore di simulazione DP_{mod}^{*}.

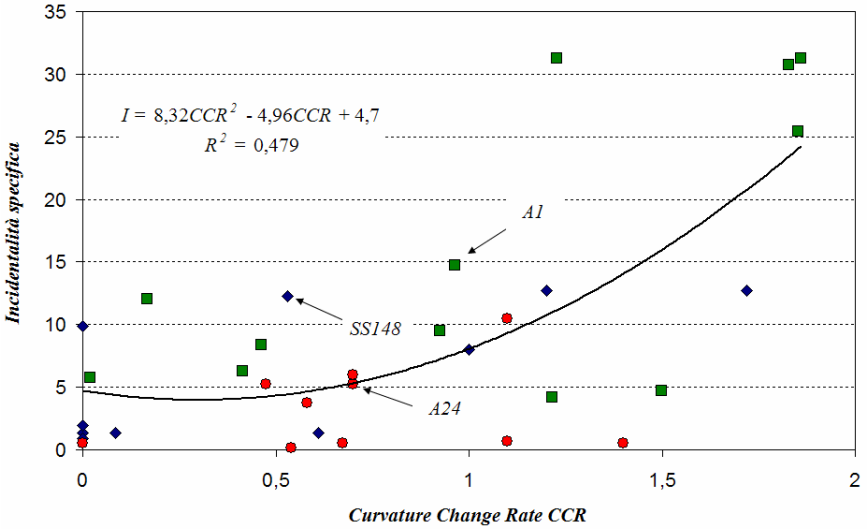

Fig. 4.15 – Indicatore tradizionale *CCR* vs incidentalità specifica *I*.

In tabella 4.1 sono riportati per ogni chilometro delle tratte analizzate i corrispondenti valori del *CCR* e in figura 4.14 è possibile verificare una discreta corrispondenza dell'indicatore tradizionale con l'indicatore di simulazione. Al crescere della tortuosità del tracciato aumentano le difficoltà dell'utente nell'interpretazione della traiettoria ideale.

Si è quindi proceduto a verificare una eventuale correlazione diretta tra l'indicatore tradizionale e l'incidentalità specifica registrata.
La figura 4.15 mostra i risultati di questa ulteriore indagine. Sebbene sia possibile individuare un trend di crescita dell'incidentalità specifica con la tortuosità del tracciato non si è registrata una elevata correlazione tra l'indicatore e l'incidentalità, dimostrando come tale relazione sia ad oggi possibile solo analizzando il comportamento dell'utente attraverso la sperimentazione di guida in realtà virtuale e la valutazione di indicatori sperimentali che possano restituire un livello incidentale atteso del progetto o dell'intervento di adeguamento.

4.8 Conclusioni

Gli ottimi risultati confermano l'ipotesi teorica che assume l'accelerazione trasversale come un efficace indicatore di disagio e rilevatore di possibili carenze del progetto e delle sue geometrie nella sicurezza stradale.
La metodologia proposta per stimare l'indicatore di Disagio Patologico per una infrastruttura esistente o di progetto è attuabile esclusivamente attraverso un approccio interattivo di simulazione.
Tali sperimentazioni sono state condotte su viabilità extraurbane, caratterizzate da basse densità veicolari in cui sono proprio le geometrie dell'asse e della piattaforma ad influenzare maggiormente i comportamenti degli utenti.
I risultati di queste sperimentazioni sono stati pubblicati e presentati su riviste e convegni internazionali [13,18,37]. Inoltre l'indicatore proposto è stato nel seguito validato anche su strada tramite veicolo strumentato [41], correlandolo all'incidentalità rilevata sulle stesse tratte di studio percorse dal veicolo e ottenendo elevati valori di regressione del tutto coerenti con i risultati in simulazione descritti in questo capitolo.
E' necessario sottolineare come, in realtà, la maggior parte del nostro patrimonio infrastrutturale sia interessato da elevati flussi veicolari e da numerose interferenze alla libera marcia dei veicoli. Proprio queste limitazioni prevalgono in questi casi sulle geometrie stradali, inducendo comportamenti anomali negli utenti, sottoposti ad un elevato disagio.
I capitoli seguenti tratteranno proprio due sperimentazioni condotte, sempre nell'ambito della tesi di dottorato, in realtà virtuale per verificare la variabilità del rischio accettato dagli utenti in funzione della densità veicolare, con specifico riferimento alla manovra del sorpasso ed alla probabilità dell'evento tamponamento.

5. Verifica sperimentale della variabilità della soglia di rischio per il sorpasso in funzione del carico di traffico

L'elevata criticità della manovra di sorpasso sulle strade ordinarie rispetto alla sicurezza dell'esercizio è dimostrata dall'assoluta prevalenza di incidenti riconducibili allo scontro frontale. Peraltro, anche su viabilità autostradale, tale manovra rappresenta una situazione che, sotto particolari condizionamenti geometrici, ambientali e di guida, incide sulla sicurezza dell'esercizio.
Al fine di identificare un modello atto a valutare livelli prefissati di sicurezza per l'esercizio viario, è indispensabile analizzare come la cinematica delle manovre sia intrinsecamente determinata da processi decisionali influenzati dalle condizioni della circolazione.
Infatti al variare dei flussi di traffico, cambiano sensibilmente le condizioni di interferenza tra i veicoli, con esse muta la soglia di rischio che l'utente mediamente accetta e ciò può determinare un incremento delle manovre a rischio in condizioni di flusso crescente [65,66,67].
Tale presunzione teorica, ragionevolmente condivisibile, non è facilmente verificabile su strada, sia in ragione delle difficoltà logistiche e dell'onerosità di una campagna sotto traffico, sia in quanto le condizioni di prova non sarebbero normalizzate e ripetibili.
Tali limitazioni sono state superate in realtà virtuale, simulando scenari stradali identici per ogni aspetto fatto salvo il carico di traffico e lasciando libero l'utente di effettuare la manovra di sorpasso ogni volta che lo riteneva opportuno.
Tramite la ricostruzione dei diagrammi spazio-temporali della manovra si è valutato, per un campione significativo di utenti, come varia il numero dei sorpassi a rischio e il grado di sicurezza dell'utente in funzione del flusso di traffico.

5.1 Dall'albero degli eventi alla simulazione di guida

Il principale obiettivo di questo lavoro consiste nella definizione di metodi e procedure scientificamente validate per la previsione dei livelli incidentali di progetti di nuove infrastrutture o di interventi di adeguamento della viabilità esistente.

Come si è visto nel secondo capitolo una metodologia avanzata si basa sull'analisi probabilistica della teoria dell'hazard analysis. Si riporta in figura 5.1 l'albero degli eventi della manovra del sorpasso da cui possono generarsi eventi incidentali riconducibili allo scontro frontale e frontale laterale. La tabella 5.1 riassume gli indicatori di primo e secondo ordine che influenzano le varie probabilità elementari dell'albero con, in evidenza, i parametri dipendenti dal comportamento dell'utente.

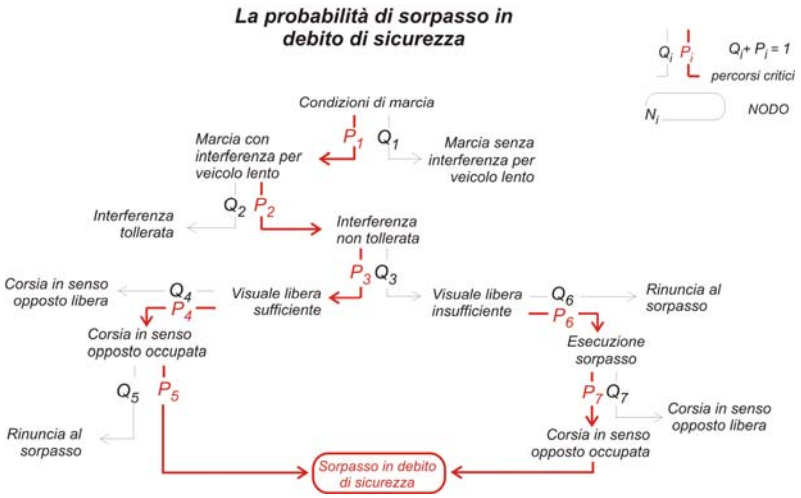

Fig. 5.1 – Albero degli eventi per la determinazione della probabilità di sorpasso in debito di sicurezza.

Tab. 5.1 – Probabilità elementari dell'albero degli eventi del sorpasso ed indicatori di primo e secondo ordine.

Probabilità elementari	***Indicatori di primo ordine***	***Indicatori di secondo ordine***
P_1, Q_1	Densità veicolare	Capacità Flusso di traffico
P_1, Q_1	Durata del viaggio	Lunghezza della strada Velocità operativa
P_2, Q_2	***Tollerabilità delle interferenze***	Velocità desiderata Velocità di esercizio ***Disagio cumulato***
P_3, Q_3	Distanza di visibilita	Velocità operativa Condizioni ambientali
P_3, Q_3	Visuale libera	Ostacoli visivi
P_4, Q_4 & P_6, Q_6	***Soglia di accettazione del rischio dell'utente***	***Disagio cumulato*** ***Stato psicofisico dell'utente***
P_5, Q_5	Flusso di traffico opposto	Flusso di traffico
P_6, Q_6	Distanze disponibili / necessarie	Velocità operativa Condizioni ambientali

Lo schema individua i percorsi critici, successione delle alternative che si devono verificare perché si manifesti l'evento temuto. L'architettura dell'albero consente inoltre di stabilire una precisa gerarchia tra le variabili e tra gli interventi mirati alla riduzione della probabilità finale dell'evento incidentale come si è già discusso nel dettaglio nel secondo capitolo.
Come si è detto infatti tale procedura, ormai consolidata a livello teorico dei percorsi logici, incontra delle rilevanti difficoltà quando occorre valutare quantitativamente e non solo qualitativamente le probabilità elementari dei percorsi critici con particolare riguardo a quelle dipendenti dai comportamenti degli utenti.
Ciò ha quindi sollecitato delle campagne sperimentali in simulazione che hanno preso in considerazione le tipologie incidentali a cui si possono ricondurre il maggior numero di sinistri: lo scontro frontale o frontale laterale (causato dalla manovra di sorpasso in debito di sicurezza) e il tamponamento (dovuto al mancato rispetto della distanza di sicurezza per l'arresto).
Questo capitolo riporta proprio i risultati ottenuti analizzando gli effetti indotti dalla funzionalità stradale sulla sicurezza dell'esercizio viario e in particolare sulla variabilità della soglia di accettazione del rischio da parte dell'utente durante la manovra del sorpasso al variare delle condizioni di circolazione. Vedremo invece nel prossimo capitolo i risultati della sperimentazione condotta in realtà virtuale sul rischio di tamponamento e la coerenza di tali esiti con quelli della manovra del sorpasso.

5.2 La sperimentazione

Come si è già sottolineato la finalità di questa campagna sperimentale è stata quella di interpretare la manovra di sorpasso e le sue oggettive condizioni di rischio in relazione alla funzionalità sistemica della strada.
Tenuto conto della complessità del fenomeno, poiché non è possibile esplicitare l'effetto delle interferenze con un algoritmo matematico, in quanto funzione della soggettività di comportamento dell'utente, si è studiato il problema tramite una verifica sperimentale condotta in realtà virtuale.
I risultati di questa sperimentazione sono stati presentati e pubblicati su riviste e convegni internazionali e nazionali [16,31,36].
Nei paragrafi successivi sono riportati i risultati più interessanti con particolare riferimento alla variabilità del grado di sicurezza adottato dagli utenti in funzione della densità veicolare.

In particolare si è proceduto come segue:

- sono stati predisposti due scenari di prova rappresentativi delle condizioni di funzionalità di una viabilità ordinaria (strada ad unica carreggiata) e di una viabilità autostradale (figura 5.2);
- si è effettuata la simulazione in condizioni di velocità libera (nel senso che l'utente poteva adottare la velocità che riteneva più opportuna per le diverse condizioni operative) per diversi carichi di traffico (densità veicolare N/C = 0,15 ÷ 0,9) e per un numero adeguato di prove (300 misure in totale);
- sono stati considerati sicuri i sorpassi per i quali, in fase di manovra, la distanza tra il veicolo sorpassante (nello specifico il veicolo del driver) e quello marciante in senso opposto non risultava mai inferiore al doppio dello spazio d'arresto (per la viabilità ordinaria); per la viabilità autostradale la distanza di riferimento è stata la distanza di sicurezza pari al tempo di reazione moltiplicato per la velocità di percorrenza verificata tra il driver e il primo veicolo marciante nella corsia di sorpasso nella stessa direzione, localizzato subito davanti o dietro il driver (figura 5.3).

Viabilità ordinaria *Viabilità autostradale*

Fig. 5.2 – Scenari di simulazione in realtà virtuale.

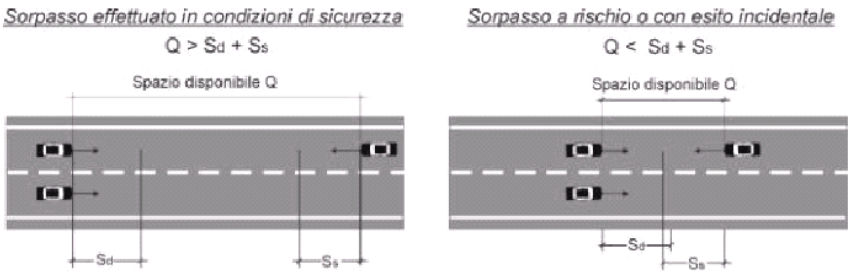

Fig. 5.3– Schema esemplificativo del sorpasso a rischio per la viabilità ordinaria.

Sono stati coinvolti nelle sperimentazioni 30 utenti di età compresa tra i 22 e i 29 anni ed una percorrenza media annua di 3500 km in ambito urbano e 6500 km in ambito extraurbano.
Ogni utente ha percorso i due scenari cinque volte, per un totale di dieci prove, con differenti valori di densità veicolare caratteristici di diversi livelli di servizio e, di conseguenza, con valori di velocità del flusso diversi tra loro.
Gli scenari sono stati creati in maniera tale da non indurre comportamenti anomali negli utenti causati da insidie geometriche o da altri condizionamenti esterni all'infrastruttura. La distanza di visibilità per il sorpasso era garantita in tutti e due i tracciati per la totalità dello sviluppo delle tratte.
La viabilità ordinaria è stata caratterizzata da una sezione trasversale composta da unica carreggiata con una corsia di 3,75 metri per senso di marcia e banchine in entrambi i lati di 1,5 metri. L'articolazione altimetrica del tracciato era completamente pianeggiante.
La viabilità autostradale è stata invece realizzata con carreggiate separate, due corsie per senso di marcia di larghezza pari a 3,75 metri e banchine di 3 metri; lo spartitraffico centrale era largo 2 metri.
In fase di prova si sono acquisiti, con passo temporale di 0,2 secondi, tutti gli output necessari a descrivere la traiettoria del veicolo, le velocità locali, le accelerazioni longitudinali e trasversali, l'aderenza impegnata, le distanze relative tra il driver e gli altri veicoli presenti nello scenario e l'esito delle manovre. In questo modo è stato possibile effettuare il conteggio dei sorpassi ed analizzarne le caratteristiche, in modo da valutare se il sorpasso fosse stato effettuato in sicurezza oppure accettando un certo grado di rischio.
Tenuto conto delle diverse velocità adottate dai driver per ogni singola manovra di sorpasso, per accertare correttamente la loro attribuzione 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.
La figura 5.4 rappresenta una delle 300 schede prodotte per sintetizzare i risultati di ogni prova, andando in particolare a rappresentare il moto del veicolo del driver insieme alle caratteristiche cinematiche e dinamiche degli altri veicoli presenti nel tracciato.
Tali diagrammi sono stati fondamentali per l'individuazione e classificazione dei vari sorpassi effettuati dal driver in ogni singola prova e per poter poi valutare numericamente il grado di sicurezza adottato dagli utenti in funzione della densità veicolare.

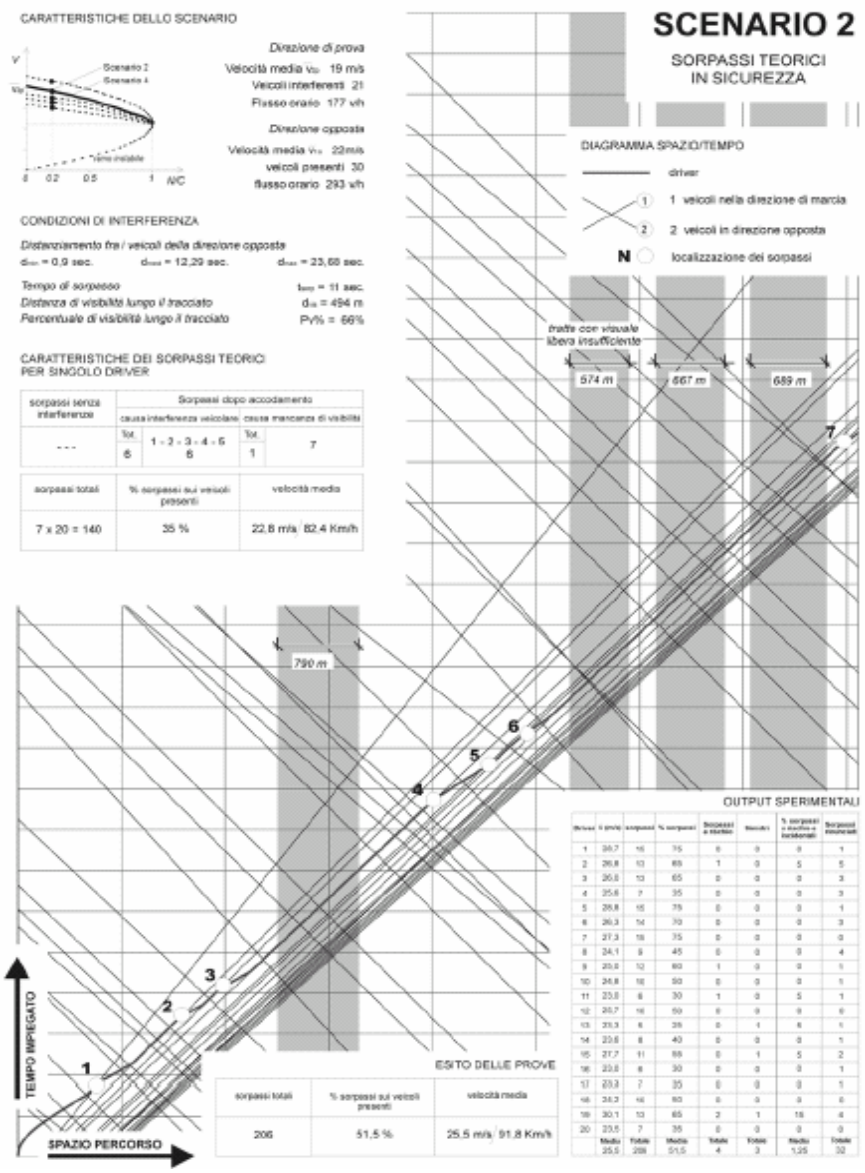

Fig. 5.4 – Diagramma spazio/tempo per l'individuazione dei sorpassi a rischio.

5.2.1 La sperimentazione su viabilità ordinaria

Il risultato delle misure, per gli aspetti che qui interessano e per il caso della viabilità ordinaria, è sintetizzato nella tabella 5.2, che consente di confrontare il numero di sorpassi a rischio, stimati per l'intero campione, con quelli effettuati nelle diverse condizioni di prova.

Tab. 5.2 – Sorpassi a rischio e densità veicolare per la viabilità ordinaria.

Scenari di traffico [autovetture]	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Densità veicolare [flusso/capacità]	*0.1*	*0.2*	*0.4*	*0.5*	*0.6*
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*

Tutto ciò ha richiesto una onerosa 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.
Dall'andamento della percentuale dei sorpassi a rischio (S_R) rispetto ai sorpassi totali (S) in funzione della densità veicolare è evidente l'assunzione da parte dell'utente di un rischio fortemente crescente con la densità veicolare (figura 5.5). Si può notare come al crescere delle interferenze veicolari il numero dei sorpassi a rischio rispetto ai sorpassi totali effettuati dagli utenti nello scenario sia significativamente più elevato, dando ragione del fatto che l'utente accetta un rischio più alto quando cresce il disagio indotto dalle costrizioni imposte dal flusso.
Come conseguenza, definendo il grado di sicurezza come nella seguente espressione:

$$(\eta_u)_S = S/(S_R) \qquad (1)$$

si può constatare una riduzione dello stesso al crescere della densità veicolare come illustrato in figura 5.6.

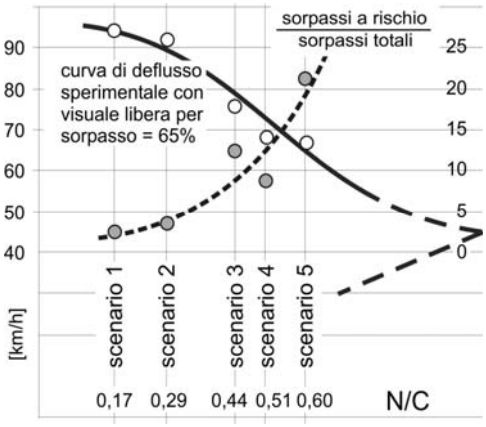

Fig. 5.5 – Sorpassi a rischio e densità veicolare per la viabilità ordinaria.

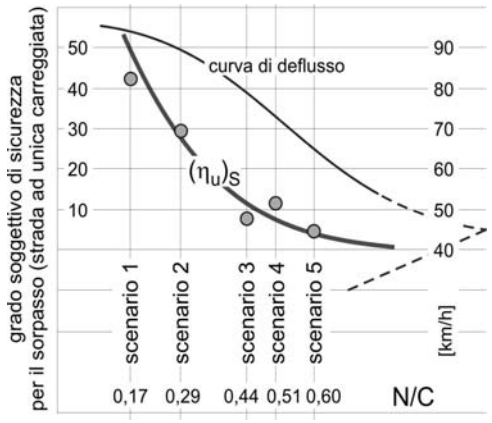

Fig. 5.6 – Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità ordinaria.

Oltre a validare l'esito della sperimentazione, l'elevato coefficiente di regressione della curva di interpolazione del grado di sicurezza per il sorpasso in funzione della densità veicolare ($R^2=0.87$) ha suggerito l'opportunità di verificare la generalizzazione dei risultati nel contesto completamente diverso della viabilità autostradale, caratterizzata evidentemente tra l'altro da una velocità di base significativamente più elevata (120 km/h).

5.2.2 La sperimentazione su viabilità autostradale

Come nel caso precedente sono state eseguite in realtà virtuale un totale di 150 prove divise per cinque diverse situazioni di carico di traffico, cui corrispondono precisi valori del rapporto *N/C* e della velocità media del flusso *Vf*, al fine di mettere in evidenza l'influenza del disagio subito dall'utente sulla sua vocazione al sorpasso (tabella 5.3).
In ogni scenario di traffico è stata creata una precisa situazione che ha visto il driver accodato ad un veicolo lento sulla corsia di marcia e dei pacchetti di veicoli più veloci sulla corsia di sorpasso, che non sempre consentivano al driver la possibilità di inserirsi e quindi di sorpassare, ma soltanto in determinati momenti.

Tab. 5.3 – Condizioni di prova per la viabilità autostradale.

LS	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
N/C	*0.15*	*0.55*	*0.70*	*0.80*	*0.90*
Vf [Km/h]	*112*	*94*	*85*	*80*	*64*

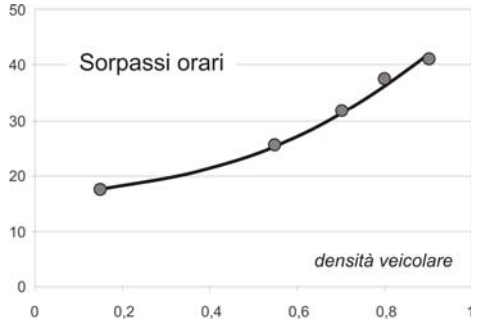

Fig. 5.7 – Sorpassi orari e densità veicolare per la viabilità autostradale.

La figura 5.7 mostra come esista un incremento significativo dei sorpassi al decadere del livello di servizio. Tale andamento dipende da:

a. diversa densità veicolare (incremento del numero dei veicoli interferiti e incremento della differenza di velocità del driver e velocità del flusso imposta)
b. assunzione di un elevato livello di rischio al crescere del disagio.

Per valutare il disagio subito dall'utente è stata presa in esame la differenza di velocità desiderata (120 km/h) e la velocità media del driver nel livello di servizio LS considerato e si è arrivati a poter assumere le condizioni del livello di servizio A come condizioni di riferimento a "disagio nullo". In tale situazione di flusso libero infatti i driver hanno espresso una velocità desiderata pressoché coincidente con la velocità dei veicoli interferenti. E' stato possibile quindi considerare nullo il disagio cumulato per l'utente dipendente dalle interferenze veicolari. Il numero di sorpassi effettuato è stato pari al 46% dei sorpassi potenziali e, per quanto detto, tale percentuale è stata assunta come indicatore di rischio "nullo". Conseguentemente si sono considerati sorpassi a rischio quelli eccedenti tale percentuale rilevati su base oraria al crescere della densità veicolare. Prendendo, quindi, a riferimento il LS A, è stato possibile distinguere per ogni LS i sorpassi a rischio da quelli non a rischio (tabella 5.4)

Tab. 5.4 – Sorpassi a rischio per la viabilità autostradale.

Livello di servizio	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Q di riferimento (LS A)	*46%*	*46%*	*46%*	*46%*	*46%*
Sorpassi non a rischio	*18*	*18*	*22*	*23*	*24*
Sorpassi a rischio (>46%)	*0*	*8*	*10*	*15*	*17*
Sorpassi a rischio/sorpassi orari	*0%*	*30,3%*	*32,2%*	*39,4%*	*42,6%*

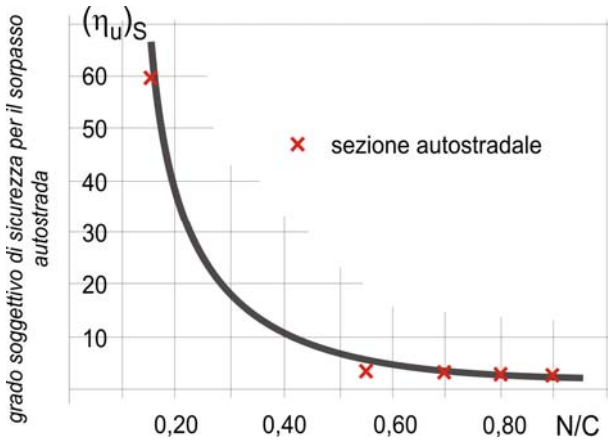

Fig. 5.8 – Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità autostradale.

Definendo nuovamente il grado di sicurezza per il sorpasso come rapporto tra sorpassi totali e sorpassi a rischio (formula (1)) e graficando tale indicatore in funzione della densità veicolare si ottengono i risultati rappresentati in figura 5.8.
Questa seconda parte della sperimentazione è stata quindi condotta in maniera e con criteri diversi rispetto alla prima, ma ha tuttavia fornito risultati coerenti con quelli precedentemente illustrati. In particolare, anche in questo caso, la relazione tra grado di sicurezza assunto dall'utente e la densità veicolare ha un andamento decrescente e un coefficiente di regressione molto alto ($R^2 = 0.97$).

5.3 Stima del rischio soggettivo per la manovra del sorpasso

Vista la coerenza dei risultati delle due sperimentazioni, si è ritenuto opportuno verificare entro che limiti fosse possibile generalizzare la funzione $(\eta_u)_S = f(N/C)$ indipendentemente dall'ambito della sperimentazione.
La curva risultante rappresentata in figura 5.9 con i valori della tabella 5.5 esprime la relazione esistente tra il grado di sicurezza dell'utente per la manovra di sorpasso e la densità veicolare dell'infrastruttura per entrambi i casi studio analizzati. L'elevato valore del coefficiente di regressione ($R^2=0.93$) dimostra non solo un netto andamento decrescente del grado di sicurezza all'aumentare delle interferenze veicolari, ma fornisce anche una legge che permette di valutare le condizioni di rischio in funzione dei reali flussi di traffico caratterizzanti un'infrastruttura.

Tab. 5.5 – Grado di sicurezza per la viabilità ordinaria ed autostradale.

N/C	*0,15*	*0,17*	*0,29*	*0,44*	*0,51*	*0,55*	*0,60*	*0,70*	*0,80*	*0,90*
S/S_R	*60,00*	*42,00*	*29,43*	*8,06*	*11,55*	*3,30*	*4,74*	*3,10*	*2,54*	*2,35*

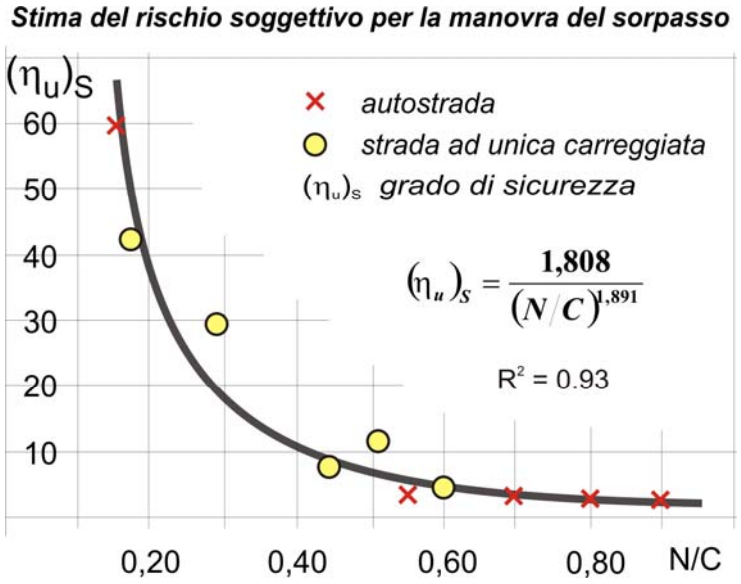

Fig. 5.9 – Grado di sicurezza per il sorpasso vs densità veicolare per la viabilità ordinaria ed autostradale.

L'andamento della curva può essere ricondotto all'espressione:

$$(\eta_u)_S = 2 \cdot (N/C)^{-2} \tag{2}$$

che fornisce valori molto prossimi a quelli risultanti dalla sperimentazione.

I risultati sorprendenti della sperimentazione dimostrano ulteriormente le enormi potenzialità di utilizzo della simulazione in realtà virtuale per determinare il reale comportamento dell'utente indotto dall'infrastruttura. E' evidente come l'approccio innovativo di valutazione della qualità di un progetto sotto il profilo della sicurezza dell'esercizio viario tramite l'utilizzo della hazard analysis, opportunamente integrato con sperimentazioni in realtà virtuale per la determinazioni delle probabilità elementari riguardanti il comportamento dell'utente, garantisca non solo la stima dell'incidentalità attesa, ma fornisca gli strumenti essenziali per

verificare l'efficacia degli interventi di adeguamento per la messa in sicurezza della viabilità esistente.
Le correlazioni sono risultate di elevatissima affidabilità e forniscono uno strumento teorico e sperimentale utile per la verifica di qualità di un progetto in ordine alla sicurezza intrinseca ad esso connessa al variare delle condizioni di esercizio.
Tale sperimentazione ha inoltre permesso di valutare quantitativamente la probabilità che l'utente effettui un sorpasso in debito di sicurezza in funzione della densità veicolare; probabilità che è stata in questa elaborazione calcolata assumendola inversamente proporzionale al grado di sicurezza adottato dagli utenti nella varie sperimentazioni. In figura 5.10 è possibile notare due andamenti completamente differenti che trovano giustificazione nell'accettazione di un grado di sicurezza da parte dell'utente elevato, fin quando non viene raggiunta una soglia di disagio (in questa sperimentazione individuabile intorno allo 0.4 di densità veicolare) tale che l'utente, trovando una infrastruttura la cui operatività ben si discosta dalle proprie esigenze ed aspettative, inizia ad adottare dei comportamenti azzardati che possono determinare dei fenomeni incidentali. Come vedremo nel seguito tale soglia trova riscontro anche nella probabilità di accadimento dell'evento tamponamento ed i risultati di tali sperimentazioni in realtà virtuale saranno poi verificati operativamente sul campo attraverso l'applicazione pratica di un modello teorico basato sui risultati acquisiti dalle prove in laboratorio virtuale.

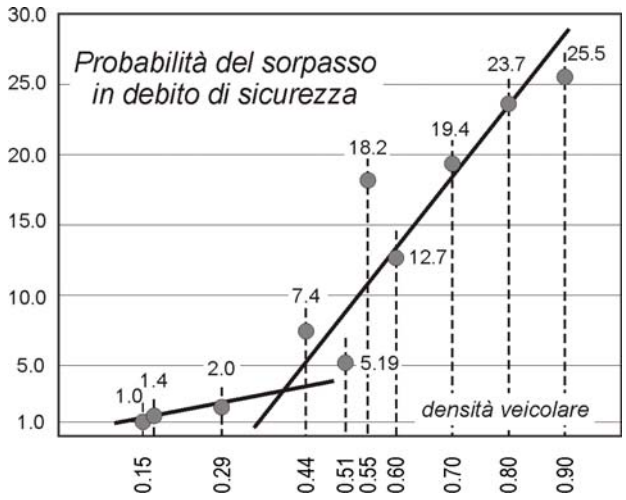

Fig. 5.10 – Probabilità del sorpasso in debito di sicurezza
in funzione della densità veicolare.

5.4 Conclusioni

La sperimentazione ha messo in evidenza che l'effetto derivante dalle interferenze veicolari è così rilevante sulla sicurezza dell'esercizio viario da non poter essere trascurato. Non è perciò sufficiente limitarsi allo studio della visuale libera per il sorpasso, ma bisogna porre attenzione sui livelli massimi di interferenze che possono indurre l'utente mediamente prudente ad adottare comportamenti a rischio e quindi manovre in debito di sicurezza. Adottare per l'ingegneria stradale un approccio di questo tipo vuol dire superare la tradizionale logica degli standard a vantaggio di verifiche prestazionali che, nel caso in esame, possono condurre a soluzioni più articolate di quelle che prevedono il solo adeguamento della visuale libera a predeterminate distanze di visibilità.
In particolare per quanto riguarda la manovra di sorpasso è necessario porre particolari condizioni relative a:

- la scelta di una velocità di progetto coerente con la velocità desiderata;
- lo sviluppo delle tratte stradali dove le distanze di visibilità sono insufficienti per la manovra del sorpasso, valutate in relazione alle prevalenti condizioni di traffico,
- l'articolazione altimetrica del tracciato, e quindi l'eventuale inserimento di corsie per veicoli lenti, in quanto una significativa presenza di traffico pesante può determinare rilevanti condizioni di interferenze e quindi di disagio.

Tali condizioni naturalmente non possono essere assunte a priori in quanto le soluzioni progettuali devono adeguarsi di volta in volta alla specificità del caso.
Il processo decisionale deve perciò affidarsi al metodo della verifica, che prevede nell'ordine:

1. la preliminare determinazione di un obiettivo funzionale (il livello delle interferenze subite dagli utenti tollerabile nelle prevalenti condizioni di traffico);
2. la stima dei condizionamenti e del disagio subito dagli utenti, per poter fare una valutazione delle prevedibili condizioni di rischio;
3. l'analisi dei più opportuni e convenienti provvedimenti progettuali per ricondurre il livello delle interferenze subite alla condizione funzionale ritenuta ammissibile.

Considerato il rischio intrinseco della manovra di sorpasso, si ritiene che la sperimentazione descritta sia di per sé meritevole di considerazione, ma più ancora del contributo specifico vale la dimostrazione di come sia

possibile indirizzare l'ingegneria stradale al soddisfacimento di requisiti prestazionali in funzione degli effetti indotti sulla soggettiva valutazione e accettazione del rischio da parte dell'utente.
Per questo motivo si è deciso di affrontare una seconda campagna di sperimentazioni finalizzata alla determinazione del rischio di tamponamento analizzando il comportamento di guida al variare delle condizioni di funzionalità dell'infrastruttura.

6. Verifica sperimentale del rischio di tamponamento in funzione della densità veicolare

Dopo aver esaminato le condizioni del sorpasso, che rappresenta la causa prima degli incidenti che si determinano sulla viabilità ad unica carreggiata, questa parte della tesi illustra i risultati di un'indagine volta ad analizzare i gradi di sicurezza assunti dagli utenti in relazione al rischio di tamponamento, al variare della densità veicolare caratterizzante l'infrastruttura, essendo quest'ultimo l'incidente prevalente per la viabilità di tipo autostradale. Anche in questo caso le probabilità risultanti dalla sperimentazione possono essere utilizzate all'interno dell'albero degli eventi del tamponamento, andando così a sostituire i prodotti di alcune probabilità elementari di complessa valutazione numerica.
Si vuole ancora sottolineare che lo scopo di tali sperimentazioni è indubbiamente duplice: da una parte si vuol dimostrare che il comportamento di guida è significativamente influenzato dalle condizioni di circolazione e che, laddove si manifesta una grande differenza tra le aspettative dell'utente e la reale offerta di servizio, si assiste ad un incremento dei tassi incidentali generati dall'aumento delle manovre azzardate causato dall'insoddisfazione dell'utente; da un'altra parte si vuole proporre una metodologia scientificamente dimostrata che preveda l'analisi di qualità di un progetto in termini prestazionali di sicurezza e funzionalità e che si basi sull'intero e complesso sistema di mutue interazioni *uomo-strada-ambiente*.

6.1 La sperimentazione

Predisposta una sezione trasversale di tipo autostradale, si è costruito uno scenario di simulazione che non inducesse significativi condizionamenti per effetto delle geometrie d'asse o delle situazioni ambientali (figura 6.1). Si vuole ricordare che sia la sperimentazione sul sorpasso che questa hanno voluto analizzare la variabilità del comportamento umano in uno stesso scenario, e quindi a parità di situazioni geometriche, al variare delle condizioni operative. Successivamente, per quanto riguarda il traffico, si sono programmate cinque condizioni di circolazione, tali da corrispondere a diversi livelli di servizio della strada.

Fig. 6.1 – Lo scenario di simulazione.

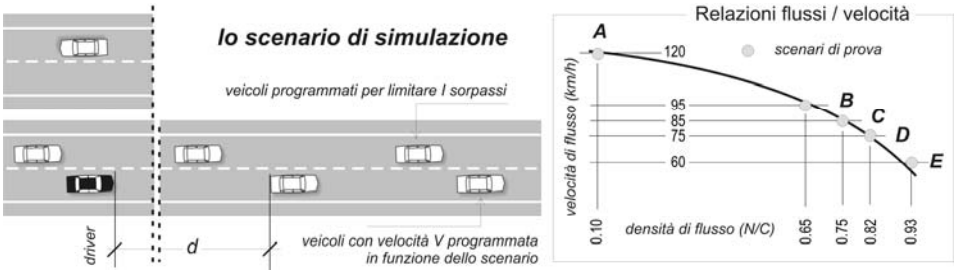

Fig. 6.2 – Il piano della sperimentazione.

In particolare, per ognuno di essi si è assunta la densità veicolare e la velocità media di esercizio indicate in figura 6.2 e desunte dalla curva di deflusso dell'infrastruttura [88].
Adottando le consuete procedure per garantire la ripetitività e la riproducibilità della sperimentazione [23], si è selezionato un campione di 25 driver che garantisse un adeguato livello di omogeneità per età, capacità ed esperienza di guida.
Ogni driver è stato chiamato a percorrere lo stesso scenario per cinque volte ed ogni volta il flusso veicolare aumentava in relazione al livello di servizio corrispondente.
Dopo ogni prova è stato previsto un periodo di pausa di 5 minuti per far riposare il driver ed evitare che la successiva simulazione potesse essere influenzata dagli effetti della memoria breve o da episodi di stanchezza. Nonostante ciò, a valle della sperimentazione si sono dovuti escludere 2 driver per il loro comportamento anomalo. Tuttavia, la verifica di convergenza delle medie ha dimostrato che il campione composto da 23 driver, per un totale di 115 prove di simulazione, è ampiamente compatibile con il livello di approssimazione richiesto. E' risultato infatti che sarebbero stati sufficienti 15 driver per garantire uno scarto delle distanze minime nell'intorno della linea di tendenza della media inferiore al 2%.

Per valutare l'esito della sperimentazione si sono rilevati cinque volte al secondo tutti i parametri (32) che descrivono le condizioni di guida del driver e dei veicoli interferiti, ponendo particolare attenzione:

- ai tempi e spazi di marcia;
- ai valori istantanei delle velocità longitudinali;
- ai valori istantanei delle accelerazioni longitudinali e trasversali;
- alla variabilità delle distanze dei driver dal veicolo che li precede;
- alla posizione, istante per istante, dei driver sulla carreggiata;
- alla pressione sul pedale del freno e dell'acceleratore.

Benché le elaborazioni dei risultati sperimentali siano state condotte operando su base numerica, in questa sede, per sinteticità, si riporta a titolo d'esempio l'output grafico relativo ad un solo driver e ad una singola condizione di prova, dove è rappresentata una situazione di interferenza del driver con un altro veicolo più lento (figura 6.3).

Per individuare più correttamente le situazioni di accodamento e quelle di sorpasso, in ogni scheda è stata inserita anche la posizione trasversale sulla carreggiata del veicolo. Il tutto è stato valutato in funzione del tempo di prova simulata.

In questo modo è possibile monitorare l'avvicinamento del driver al veicolo lento ed individuare le diverse condizioni di moto, analizzando la cinematica e la dinamica delle varie fasi.

In particolare è anche possibile identificare il tempo trascorso dal driver nella fase di accodamento in condizioni di non sicurezza (quando cioè la distanza dal veicolo lento è inferiore alla distanza di reazione, assunta pari al valore della velocità del driver moltiplicato il tempo di reazione preso pari a due secondi e mezzo). Tale condizione sarà nel seguito discussa per quantificare la variabilità della probabilità dell'evento tamponamento in funzione della densità veicolare.

Ogni fase delle manovre di avvicinamento è stata analizzata al fine di valutare da una parte il comportamento del singolo utente in riferimento alla propria percezione delle distanze di sicurezza rispetto al veicolo lento che lo precede e dall'altra la probabilità di essere coinvolti in un tamponamento in funzione delle condizioni di deflusso. In realtà come verrà illustrato nei prossimi paragrafi, in via esplorativa, si è voluto procedere ad una stima del rischio di tamponamento, andando a quantificare anche la gravità del potenziale evento incidentale, individuando nell'energia cinetica dissipata nell'urto un approssimato indicatore delle conseguenze del sinistro.

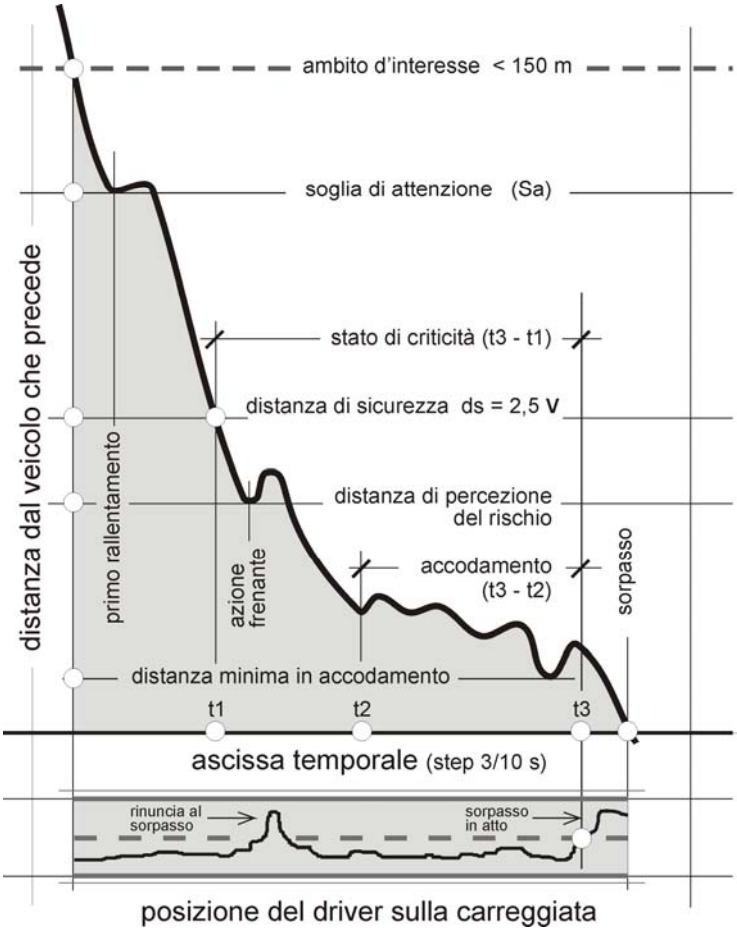

Fig. 6.3 – L'output grafico per l'analisi del moto relativo.

L'output grafico della figura 6.3 è stato riprodotto per ogni interferenza veicolare incontrata e subita dai driver. L'andamento qualitativo riportato è significativo per l'86% delle interferenze analizzate che sono quindi caratterizzate da tutte le fasi distinguibili in figura.
Si vuole sottolineare il fatto che, al fine di non considerare eventi influenzati da caratteristiche geometriche dell'infrastruttura (es. frenature dovute a raggi di curva particolarmente stretti) lo scenario è stato progettato e costruito evitando tali condizionamenti e che sono stati comunque considerate solo quelle situazioni che si manifestavano in un ambito di interesse di 150 metri tra driver e veicolo. A tale distanza il driver iniziava a modificare il proprio comportamento in funzione del veicolo lento effettuando i primi rallentamenti.

6.2 L'analisi dei risultati

Effettuata la sperimentazione, per analizzare i rapporti di causa/effetto che determinano il tamponamento in funzione del carico veicolare, si sono valutati sia i comportamenti degli utenti nei cinque scenari considerati, sia i livelli di rischio risultanti dalla prevedibile probabilità e gravità degli eventi. I risultati della sperimentazione sono stati pubblicati in una memoria agli atti di un convegno internazionale [29].

6.2.1 I comportamenti indotti dal carico di traffico

Per descrivere gli effetti del carico di traffico sul comportamento degli utenti, si sono individuate alcune situazioni tipiche e ripetitive che consentono di caratterizzare in modo univoco:

a. la soglia di attenzione, definita come la distanza metrica e temporale tra il driver e il veicolo che lo precede in corrispondenza della quale si manifesta la prima reazione ad un potenziale rischio di tamponamento;
b. la soglia di percezione del rischio, definita anch'essa come un distanziamento metrico e temporale, misurato in corrispondenza di una significativa azione frenante esercitata prima dell'accodamento;
c. il distanziamento minimo del driver in accodamento, al quale riferire il rischio soggettivo tollerato dal conducente nelle diverse condizioni di marcia.

6.2.1.1 La soglia di attenzione (Sa)

Per valutare la distanza corrispondente alla soglia di attenzione si è preso in considerazione il primo rallentamento del driver individuato nel moto relativo (figura 6.3), analizzando i soli eventi verificatisi per distanze inferiori a 150 m. Così definita, la soglia di attenzione per i 5 scenari considerati è poco variabile (mediamente pari a 119,4m,), risultando quindi sostanzialmente indipendente dalle condizioni di marcia. Le variazioni percentuali rispetto alla media (*Δ%*) sono contenute entro il valore massimo dell'8% come riportato in tabella 6.1.

Tab. 6.1 – Soglia di attenzione spaziale negli scenari di simulazione.

Scenari	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Sa [m]	115.2	118.4	128.5	124.3	112.0
Δ% su media	- 3.5 %	- 0.8 %	+ 7.6 %	+ 1.4 %	- 6.2 %

Tab. 6.2 – Confronto tra velocità di avvicinamento e velocità del flusso.

Scenari	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*
Va_1 *[Km/h]*	141.5	111.1	103.2	93.6	74.9
Vf [km/h]	118.8	92.8	82.7	74.6	60.5
Va_1 *- Vf*	22.7	18.3	20.5	19.0	14.4
(Va_1 *- Vf)%*	+ 19.1	+ 19.7	+ 24.8	+ 25.5	+ 23.8

Per valutare tale distanza in termini temporali è necessario far riferimento alla velocità media del driver nella fase di avvicinamento (Va_1) che, ovviamente, è più elevata di quella media di flusso (*Vf*); quest'ultima infatti si riduce per effetto dei ritardi indotti dalle interferenze. E' interessante rilevare (tabella 6.2) come la differenza percentuale tra le velocità di avvicinamento e le velocità di flusso sia crescente con la densità veicolare e ciò denuncia un disagio del driver anch'esso crescente che, tuttavia, non ha comportato ulteriori effetti per la breve durata della prova (< 5'). Sotto il profilo temporale la soglia di attenzione (*Sa [s]*), sempre superiore al tempo psicotecnico di reazione (tabella 6.3 e figura 6.4), è caratterizzata da un valore crescente in funzione del flusso in quanto, a parità di spazi, si riduce notevolmente la velocità di avvicinamento.

Tab. 6.3 – Soglia temporale di attenzione *Sa*.

N/C	*Sa [m]*	Va_1 *[Km/h]*	*Sa [s]*
0.10	115.2	141.5	3.0
0.65	118.4	111.1	3.8
0.75	128.5	103.2	4.5
0.82	124.3	93.6	4.8
0.93	112.0	74.9	5.4

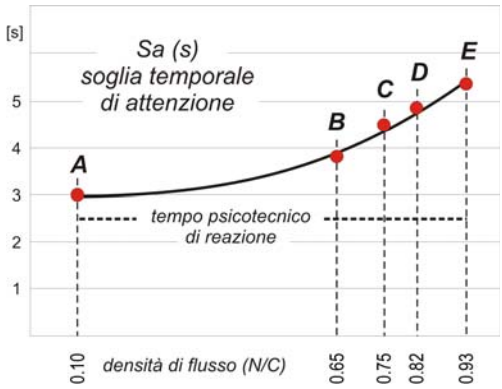

Fig. 6.4 – Soglia temporale di attenzione *Sa*.

6.2.1.2 La percezione del rischio (Pr)

La sperimentazione dimostra che, dopo aver preso coscienza della possibile interferenza con un veicolo più lento, i driver non modificano sensibilmente il loro comportamento. Mantengono infatti una velocità di avvicinamento (Va_2) pressoché coincidente con quella che precede la soglia di attenzione (Va_1).
Riducendosi progressivamente le distanze dai veicoli che li precedono, i driver percepiscono una potenziale situazione di rischio, a cui corrisponde un nuovo rallentamento, più significativo in quanto si manifesta a seguito di una vera azione frenante, evidenziato anch'esso dal moto relativo (figura 6.3).
Le distanze a cui ciò si verifica decrescono in modo significativo con la densità veicolare. Tuttavia, la riduzione degli spazi disponibili (Δ) è compensata dalla riduzione delle velocità di avvicinamento, pertanto si mantiene pressoché costante la distanza di percezione del rischio espressa in termini temporali.
I risultati sono riassunti nella tabella 6.4 e graficati sinteticamente in figura 6.5.

Tab. 6.4 – Soglia di percezione del rischio *Pr*.

N/C	*Pr [m]*	*Va_2 [Km/h]*	*Pr [s]*
0.10	47.5	141.8	1.2
0.65	38.3	113.8	1.2
0.75	38.7	97.4	1.4
0.82	32.6	87.2	1.3
0.93	28.7	76.7	1.3

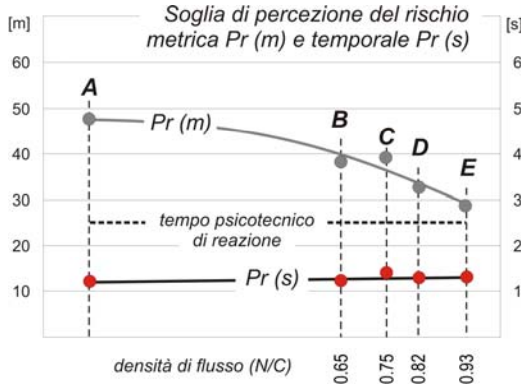

Fig. 6.5 – Soglia di percezione del rischio *Pr* metrica e temporale.

Pertanto l'esito della sperimentazione dimostra che, contrariamente a quanto avviene per la soglia di attenzione, la percezione del rischio è strettamente dipendente dalle velocità di flusso. In altri termini l'utente percepisce il rischio ed agisce sul pedale del freno quando la distanza temporale dal veicolo che lo precede è di poco superiore al secondo indipendentemente dalle condizioni di circolazione. Tale percezione, tuttavia, si produce ad una distanza temporale dal "veicolo lento" sensibilmente inferiore a quella auspicabile per soddisfare un adeguato standard di sicurezza.
La letteratura internazionale [2] e le stesse sperimentazioni condotte in ambiente virtuale [13,17,39] suggeriscono di adottare un tempo di reazione τ pari almeno a 2,5 secondi. Tale valore è pienamente giustificato per il tamponamento in quanto, ammesso che non varino gli intervalli temporali di decisione ed azione, sono decisamente maggiori quelli di percezione e interpretazione, condizionati da un messaggio visuale indiretto (accensione dei dispositivi luminosi del veicolo che precede) ed equivoco nell'interpretazione dell'intensità dell'azione frenante del veicolo lento. Da ciò dobbiamo dedurne che l'elevata percentuale di incidentalità imputabile al tamponamento trova la sua giustificazione in un generalizzato apprezzamento del rischio per distanze sensibilmente inferiori rispetto a quelle che dovrebbero garantire un tempo di reazione "sicuro".

6.2.1.3 Il distanziamento minimo (dmin)

Dopo aver apprezzato la potenziale situazione di rischio analizzata al punto precedente, il driver procede nella marcia predisponendosi al sorpasso, preceduta da una fase di accodamento che, per effetto dei modesti intervalli temporali del distanziamento, si esercita in condizioni di rischio.
Allo scopo di descrivere compiutamente la fase di accodamento, si sono elaborati gli output di prova per stimare la distanza minima (figura 6.3) che caratterizza ciascuno dei 5 scenari considerati.
Dall'elaborazione dei dati risulta che anch'essa si riduce sensibilmente, ma se teniamo conto della velocità in accodamento, che corrisponde ovviamente alla velocità di flusso, constatiamo che gli intervalli temporali sono pressoché costanti nell'intorno del valor medio di 8 decimi di secondo. La tabella 6.5 e la figura 6.6 mostrano i risultati di questa analisi sulla distanza minima del driver dal veicolo lento durante la fase di accodamento.

Tab. 6.5 – Distanza minima di accodamento *dmin.*

N/C	*dmin [m]*	*Va_f [Km/h]*	*d min [s]*
0.10	30.3	118.8	0.9
0.65	18.1	92.8	0.7
0.75	19.0	82.7	0.8
0.82	18.3	74.6	0.9
0.93	14.8	60.5	0.9

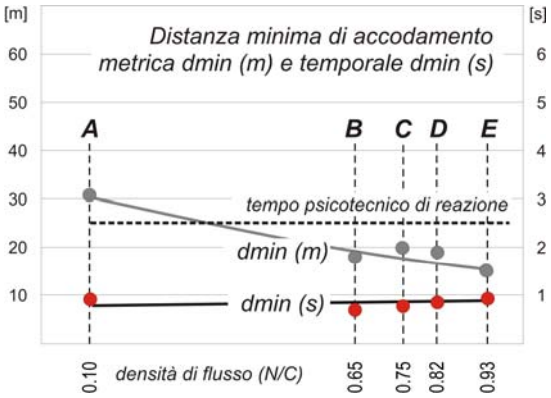

Fig. 6.6 – Distanza minima di accodamento *dmin* metrica e temporale.

L'intervallo temporale che corrisponde alla distanza minima conferma anche in questo caso una valutazione soggettiva del rischio legata ai tempi dell'eventuale manovra piuttosto che agli spazi disponibili.
Trova anche conferma una sua rilevante sottostima rispetto ai tempi che garantirebbero un adeguato standard di sicurezza.

6.2.2 I livelli di rischio

Dopo aver analizzato il comportamento degli utenti nelle diverse condizioni di circolazione si è proceduto nelle elaborazioni degli output di simulazione indagando i livelli di rischio del tamponamento considerando separatamente la probabilità e la gravità degli eventi per ogni scenario di prova e per ogni situazione di rischio incontrata dal singolo driver durante lo svolgimento della prova.
Tale analisi, come presentato nel seguito, consentirà di stimare la variabilità del rischio oggettivo di tamponamento al variare delle condizioni di circolazione, esattamente come è stato già discusso nella sperimentazione dedicata al sorpasso, dove tra l'altro era stato possibile quantificare la variabilità della probabilità del sorpasso a rischio.

6.2.2.1 La variabile probabilistica

Avendo assunto un intervallo temporale di sicurezza pari a 2,5 secondi, sono da ritenere critiche tutte le condizioni di marcia per le quali il distanziamento dal veicolo che precede il driver è inferiore ad una distanza di sicurezza pari a $ds = 2.5\ Va_2/3.6$ [m].
Per stimare quindi la probabilità dell'evento incidentale possiamo assumere come indicatore un valore proporzionale ai tempi di permanenza dei driver nella condizione d < ds (t1 - t3), calcolati sin quando in fase di manovra il driver non occupa la corsia di sorpasso (figura 6.3). In particolare poiché durante la singola prova di simulazione il driver ha interferito con più veicoli lenti, l'indicatore terrà conto della somma dei vari intervalli di tempo in cui si manifestava una situazione di rischio durante tutto lo scenario. Questi tempi, rilevati su una percorrenza di uguale sviluppo (5300m), risultano fortemente crescenti con il decadere della qualità dell'esercizio viario.
Ai fini del calcolo della probabilità che si manifesti un evento incidentale nell'unità di tempo è necessario estendere il calcolo al totale dei veicoli costituenti il flusso. Pertanto posta pari a *1* la probabilità del tamponamento per lo scenario A, il valore normalizzato per il generico scenario (*I*) sarà espresso dalla relazione:

$$P_I = \frac{(t_R)_I}{(t_R)_A} \cdot \frac{(t_T)_A}{(t_T)_I} \cdot \frac{N_I}{N_A} \qquad (1)$$

ove t_R è il tempo medio per utente di permanenza nelle condizioni di rischio, t_T è il tempo medio di durata della prova e N il traffico orario che caratterizza il singolo scenario.
Sviluppando il calcolo si ricavano i valori normalizzati, riportati in figura 6.7 ed in tabella 6.6, che denunciano una proporzionalità diretta tra densità di traffico e probabilità del sinistro, sicuramente affidabile come dimostra un coefficiente di regressione prossimo all'unità ($R^2 = 0.95$).

Tab.6.6 – Probabilità normalizzata di tamponamento.

Scenario	t_R *[s]*	t_T *[s]*	*N*	*P*
A	34.36	170.90	200	1,0
B	59.69	204.46	1300	9,4
C	86.50	224.47	1500	14,4
D	73.11	238.31	1640	12,5
E	97.36	293.25	1860	15,4

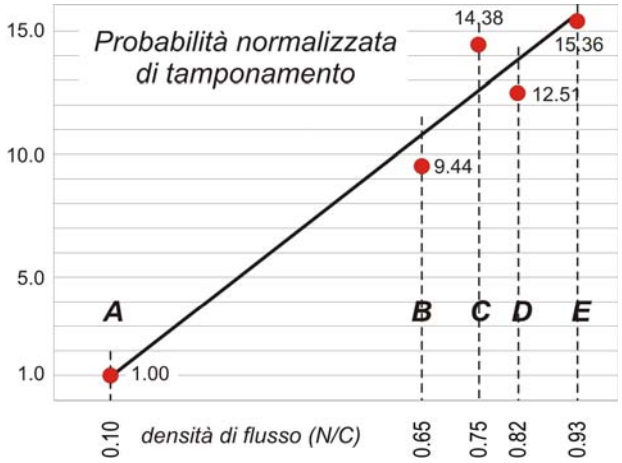

Fig. 6.7 – Probabilità normalizzata di tamponamento.

I risultati dell'indagine confermano l'esito dello studio relativo al rischio connesso alla manovra di sorpasso dal quale risultava che gli elevati livelli incidentali della rete viaria sono prevalentemente imputabili alle caratteristiche funzionali di un patrimonio stradale che ha esaurito da tempo la sua vita utile.

6.2.2.2 La gravità del sinistro

Se prescindiamo dagli effetti indotti da un incidente sui malfunzionamenti dell'infrastruttura e il conseguente coinvolgimento di altri veicoli, si può assumere come indicatore significativo della gravità dell'evento l'energia cinetica dissipata nell'urto.
In realtà anche questa è una macroscopica approssimazione, in quanto le conseguenze del sinistro possono essere anche molto diverse per effetto delle circostanze in cui si manifesta (presenza o meno di ostacoli laterali, numero di occupanti del veicolo …ecc.).
Fatta salva quindi la necessità di valutare il singolo evento con riferimento alla specificità del caso, in questa sede si è stimata la dissipazione energetica conseguente al sinistro considerando due veicoli della stessa massa (m) marcianti entrambi in fase di accodamento alla velocità di flusso (Vf).
Per effetto di un'emergenza, trascorso il tempo psicotecnico di reazione, quando l'utente che precede il driver effettua un'energica azione frenante (si è ipotizzata una decelerazione $a=-6m/s^2$) segnala a quest'ultimo la manovra tramite l'accensione dei gruppi ottici.

Chi segue ritarderà anch'esso la manovra per l'incidenza dello stesso tempo di reazione e presumibilmente eserciterà una frenatura meno energica (decelerazione $a=-4m/s^2$) in quanto non ha cognizione diretta dell'emergenza.
Sotto tali ipotesi, indicando rispettivamente con v_1 e v_2 le velocità del driver e del veicolo lento al momento dell'impatto, il loro valore dipenderà dal mutuo distanziamento nell'istante in cui si manifesta l'emergenza.
Tenuto conto del sovrapporsi delle due condizioni di moto a velocità costante durante la fase di reazione e di moto uniformemente decelerato in frenatura, il calcolo numerico fornisce i valori di velocità e di dissipazione energetica normalizzata con riferimento allo scenario *A* descritti in tabella 6.7 e riportati graficamente in figura 6.8.
Come era logico attendersi, i valori normalizzati della gravità si riducono sensibilmente all'aumentare della densità veicolare in quanto con essa si riducono le velocità di flusso anche se, come si è visto in precedenza si riducono anche le distanze tra i due veicoli durante la fase di accodamento che precede il sorpasso.

Tab. 6.7 – Gravità normalizzata di tamponamento.

Scenario	*dmin [m]*	v_1 *[m/s]*	v_2 *[m/s]*	*ΔE*	*ΔE normal*
A	30.3	14.6	30.6	369	1.00
B	18.1	11.7	25.8	264	0.71
C	19.0	7.8	23.1	236	0.64
D	18.3	5.7	20.8	200	0.54
E	14.8	3.3	16.7	134	0.36

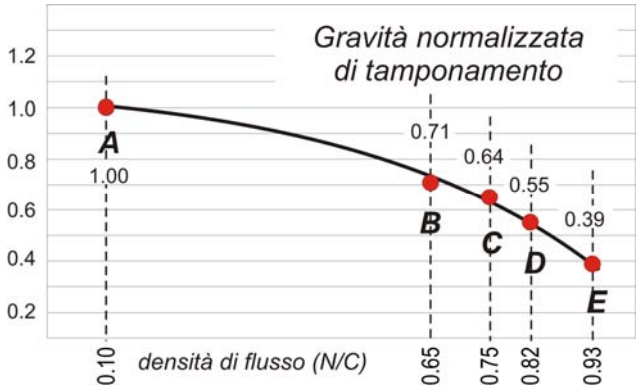

Fig. 6.8 – Gravità normalizzata di tamponamento.

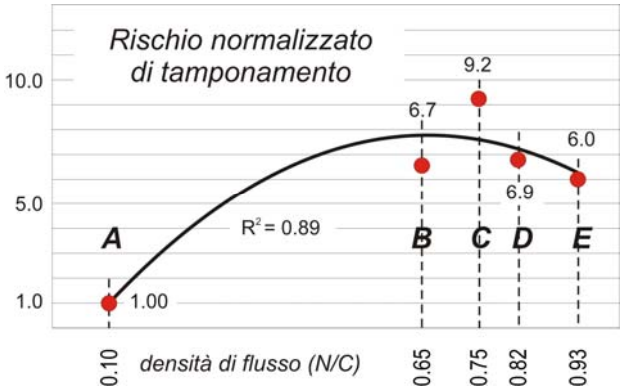

Fig. 6.9 – Rischio normalizzato di tamponamento.

Tuttavia la figura 6.9 dimostra che l'entità di tali riduzioni non compensano la probabilità crescente dell'evento. Ne consegue un livello di rischio normalizzato che raggiunge i valori massimi per la densità veicolare corrispondente allo scenario C, mantenendosi successivamente nell'intorno degli stessi valori.

6.3 Conclusioni

Lo studio fornisce delle indicazioni di larga massima in quanto si è sperimentata una condizione di esercizio "teorica", tuttavia i suoi risultati sono di estremo interesse sia per quanto riguarda l'analisi di comportamento degli utenti, sia per la valutazione del rischio connesso al tamponamento dimostrando una grande coerenza con gli esiti della sperimentazione condotta in riferimento alla manovra del sorpasso.
Per quanto riguarda il primo punto emerge un'evidente sottovalutazione del pericolo sia in termini di apprezzamento del rischio, sia con riferimento alle distanze minime accettate in fase di accodamento.
Evidentemente, come progettisti, costruttori e gestori del patrimonio viario non possiamo correggere i comportamenti dell'utente, né affidarci totalmente alle campagne di educazione stradale. Se vogliamo realmente contribuire alla riduzione dell'attuale tasso incidentale è necessario realizzare le condizioni per ridurre al minimo le manovre di emergenza e assicurare per queste ultime la massima efficacia.
In fase di esercizio l'emergenza è conseguenza di interferenze "impreviste" da parte del conducente del veicolo, normalmente indotte dalle condizioni al contorno della strada (immissioni, deviazioni, attraversamenti, …ecc.).

E' quindi evidente che una normativa progettuale finalizzata al soddisfacimento di condizioni di sicurezza non può prescindere dalla considerazione degli ambiti territoriali attraversati dall'infrastruttura viaria. E' inoltre altrettanto importante imporre il mantenimento di una qualità delle superfici di rotolamento che assicuri il contenimento degli spazi di frenata anche in condizioni ambientali avverse.
Per quanto riguarda invece l'analisi delle variabili che regolano l'entità del rischio di esercizio lo studio dimostra che è determinante il fattore probabilistico rispetto a quello modulato sulla gravità dell'evento. Nel caso stradale quest'ultima non può essere oggetto di generalizzazione in quanto le conseguenze del sinistro dipendono dalla situazione in cui esso si determina (ambiente confinato, veicoli coinvolti, situazioni di traffico, …ecc).
In questa sede pertanto la dissipazione energetica conseguente al tamponamento si è assunta come indicatore di gravità solo a titolo esplorativo, soprattutto per mettere in evidenza come sia la probabilità dell'evento incidentale a rappresentare la variabile primaria del rischio.
Questa osservazione consente di inquadrare in una giusta prospettiva i provvedimenti di sicurezza attiva e di sicurezza passiva di competenza dell'ingegneria stradale. Nel recente periodo abbiamo assistito ad uno sviluppo importante dell'attività di ricerca in ordine ai provvedimenti da porre in essere per ridurre la gravità degli eventi; analoga attenzione invece non si è riservata per la prevenzione dell'evento incidentale e ancora scarsa sensibilità è dimostrata verso la prioritaria importanza di far prendere coscienza che se è vero che alla base dei sinistri si può evidenziare una causa per lo più legata all'errore umano, è anche e soprattutto vero che tali errori sono per lo più causati da comportamenti indotti direttamente o indirettamente dall'infrastruttura stradale. Al di là del contributo che queste sperimentazioni possono portare all'aggiornamento delle conoscenze chi scrive ritiene che il loro merito maggiore sia quello di dimostrare come le nuove tecnologie sperimentali consentano di tradurre delle intuizioni di buon senso in leggi matematiche scientificamente dimostrate.
In particolare tali risultanze hanno posto le basi di una teoria del disagio dell'utente alla guida che ha riscontrato sul campo tutta la sua applicabilità e attendibilità come si potrà constatare nel successivo capitolo.

7. La teoria del Disagio

Le sperimentazioni fin qui presentate hanno principalmente dimostrato come sia necessario verificare la qualità di un progetto stradale in funzione della sicurezza di esercizio tenendo conto delle principali relazioni che si determinano tra la strada, l'uomo e l'ambiente. Queste inducono comportamenti spontanei, in parte dettati dall'esperienza di guida, in parte dalle aspettative di servizio che prevalgono su ogni altra sollecitazione.

Molti dei comportamenti sanzionati dalle leggi e dai regolamenti che presiedono all'esercizio viario sono conseguenza di una valutazione soggettiva del rischio da parte del conducente del veicolo che non trova riscontro nell'obbligo imposto dai regolamenti stessi, ma che si è visto dalle prove in simulazione, dipende da altre variabili interne all'infrastruttura e dalla sua funzionalità. Esemplare è il caso del mancato rispetto del limite di velocità sulle strade extraurbane interessate da un flusso di lunga percorrenza quando questo attraversa i centri abitati.

Fenomeni analoghi si producono in molte altre situazioni, sia in ambito urbano, sia extraurbano, e nel loro complesso sono tutti coerenti nel porre in evidenza come la valutazione della soglia "ammissibile" di rischio da parte degli utenti, oltre a dipendere dal disagio subito, sia funzione di altre variabili psicofisiologiche tra cui assumono un peso rilevante per l'esercizio di guida:

- l'inconscia memorizzazione delle condizioni di guida che, nelle diverse situazioni, hanno concorso a formare l'esperienza del conducente e che ne regolano gli automatismi di guida propri dell'esercizio viario (memoria lunga);
- gli stimoli comportamentali derivanti dalle particolari condizioni di fruizione della strada, dalle aspettative di guida correlate alla motivazione degli spostamenti e dalla soggettiva valutazione delle conseguenze di uno stile di guida sollecitato dalla memorizzazione, altrettanto inconscia, dell'efficacia dei comportamenti sperimentata percorrendo lo stesso itinerario (memoria breve).

Ed è proprio l'analisi degli effetti della memoria breve a porre in evidenza come, nell'esercizio della guida, per garantire la sicurezza sia prevalente la funzionalità sistemica dell'infrastruttura rispetto alla coerenza della geometria d'asse con gli standard normativi.

Ciò conforta il convincimento che, in fase di progetto, il rispetto degli standard geometri sia condizione necessaria ma non sufficiente per garantire un adeguato livello di sicurezza dell'esercizio viario. E se ciò è vero per le nuove realizzazioni, lo è ancor più per gli interventi sulla viabilità in esercizio. Gran parte della rete stradale è stata realizzata infatti per soddisfare condizioni di circolazione molto diverse dalle attuali e quando si interviene localmente prescindendo da una verifica della qualità sistemica della strada, in molti casi si enfatizzano quelle disomogeneità plano-altimetriche che sono una delle cause prevalenti del fenomeno incidentale [3,8,45,47,59,74,79].
Inoltre occorre sottolineare come le attuali condizioni di circolazione impongano numerose restrizioni alle aspettative e alle necessità degli utenti inducendo quello stato di disagio al quale, nelle varie sperimentazioni di guida in realtà virtuale, è stata imputata la gravante responsabilità dell'incremento delle manovre azzardate effettuate da parte dell'utente [65,67,73,77,83].
Quello che si vuole ora verificare è se questi importanti risultati ottenuti attraverso la simulazione ritrovano riscontro nelle dinamiche di guida reali così complesse come quelle che governano l'esercizio su strada e possono condurre agli eventi incidentali.
Si vuole certificare se la variabilità della soglia di rischio riscontrata in simulazione può essere effettivamente correlata all'incidentalità registrata sul campo. Per questo è stato necessario formulare una teoria, la teoria del Disagio.

7.1 I livelli di disagio

Come si è visto nei capitoli precedenti numerose verifiche sperimentali condotte in ambiente virtuale hanno posto in evidenza che il rischio accettato dall'utente cresce con legge esponenziale al crescere del disagio e dei condizionamenti indotti dalle interferenze veicolari.
In considerazione dell'importanza che assume questo fenomeno per la verifica della funzionalità sistemica dell'infrastruttura, è opportuno dotarsi di un modello atto a quantificare, almeno sotto il profilo parametrico, il livello di disagio indotto localmente (*LD*) in particolari condizioni di circolazione. Queste, com'è noto, sono descritte dalla curva di deflusso che dà ragione della progressiva riduzione della velocità media di esercizio all'aumentare della densità veicolare. La figura 7.1 schematizza la potenziale differenza tra le condizioni operative e la funzionalità auspicata dall'utente, espresse in termini di velocità.

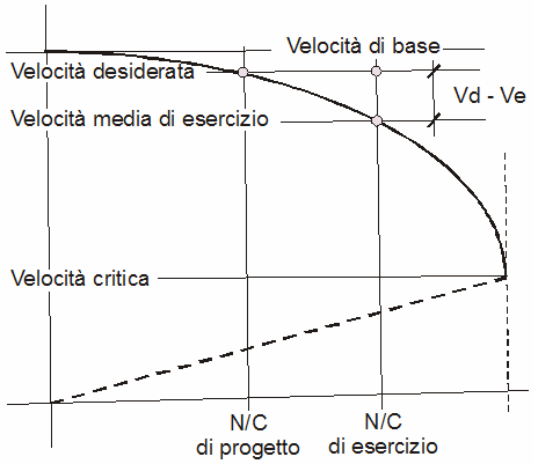

Fig. 7.1 – Condizioni operative e velocità desiderata.

Possiamo pertanto ritenere che per una tratta omogenea dell'itinerario e per un particolare carico di traffico, un significativo indicatore del livello di disagio sia espresso dalla differenza tra la velocità desiderata dall'utente (*Vd*) e la velocità media di esercizio (*Ve*) imposta dalle condizioni locali di circolazione.

$$LD = K\,(Vd - Ve) \qquad (1)$$

Ovviamente la (1) ha un carattere meramente definitorio in quanto il livello di disagio imputabile alla tratta dovrà tener conto della variabilità delle caratteristiche locali della strada e dei carichi di traffico, in entità e composizione. Inoltre si dovrà tener conto del fatto che la velocità desiderata dipende dalla motivazione degli spostamenti [9,45,47]. Pertanto, in una particolare situazione di traffico, il livello locale di disagio assumerà valori diversi per le diverse componenti di flusso, risultando tanto maggiore quanto più la velocità di esercizio si discosta dalle aspettative di servizio. In altri termini il livello di disagio, responsabile della variabilità della soglia di rischio accettato dall'utente, cresce nel momento in cui le restrizioni della corrente veicolare impongono all'utente velocità e libertà di manovra molto distanti da quelle desiderate.
La velocità media di esercizio dipende dalla densità veicolare, a sua volta funzione del flusso orario (*N*), della percentuale di traffico pesante (*P%*) e dell'articolazione altimetrica del tracciato. Ai fini del calcolo è quindi necessario distinguere situazioni geometriche e temporali omogenee.

Nell'ordine è necessario:

1. individuare le tratte elementari omogenee (x) di sviluppo (L_x) ove si conservano costanti i caratteri geometrici (sezione, pendenze medie e lunghezza delle livellette) che concorrono alla stima della capacità;

   $\Sigma_x L_x$ = *sviluppo dell'itinerario*

2. stabilire per ogni tratta le classi (T) di carico di traffico che nel corso dell'anno descrivono la variabilità della domanda di mobilità (variazioni stagionali e giornaliere), ognuna rappresentata dal valor medio di flusso orario (N_T) e dalla sua durata in ore (H_T);

   $\Sigma_T N_T H_T$ = *traffico totale annuo*

3. determinare per ogni tratta e per ogni classe di traffico le diverse condizioni di traffico pesante (P_P %) e la loro relativa durata in ore (H_P) che concorrono a descrivere compiutamente i caratteri del traffico veicolare;

   $\Sigma_P H_P = H_T$ $\qquad$ $\Sigma_T N_T \Sigma_P P_{PT} H_{PT}$ = *traffico totale annuo pesante*

In sostanza, dopo aver individuato la più rappresentativa curva di deflusso dell'itinerario, la procedura impone un'analisi che conduce alla determinazione di una velocità di esercizio *Ve* locale, relativa alle diverse tratte considerate per un certo periodo dell'anno caratterizzato dal regime stazionario dei flussi, costanti per carico di traffico e percentuale di traffico pesante.

Poiché le motivazioni dello spostamento sono determinanti per valutare la velocità desiderata dagli utenti, la stima del livello di disagio impone un'ulteriore distinzione che deve tener conto della velocità desiderata Vd_C espressa da ogni componente (N_C) del flusso veicolare (N_T), essendo ovviamente

$$\Sigma_C N_{CT} = N_T$$

Effettuata quest'ultima disaggregazione è possibile esplicitare la (1) traducendola in una procedura di calcolo il cui risultato è tanto più affidabile quanto più completa e dettagliata è la banca dati che descrive la domanda di mobilità. Il modello teorico trova la sua migliore traduzione operativa per le infrastrutture ove è attivo il monitoraggio del traffico, dove è possibile reperire dati attendibili e significativi per l'analisi della variabilità della domanda di mobilità in termini di entità e composizione.

Per la viabilità ordinaria extraurbana, in considerazione degli attuali limiti del censimento della circolazione, è indispensabile sviluppare un'adeguata analisi territoriale che consenta di stimare per "macroclassi" i caratteri tipici e la variabilità delle condizioni di circolazione. In particolare, ipotizzando un adeguato livello informativo, per la generica tratta x, per l'intervallo temporale elementare H_{PT} e per l'utente medio risulta:

$$(LD)_{x,H_{PT}} = \frac{k}{N_T} \cdot \sum_C \left(Vd_C - Ve_{x,H_{PT}}\right) \cdot N_{CT} \tag{2}$$

La (2) esplicita un livello "istantaneo" di disagio che si prolunga nel tempo per le ore (H_{PT}) in cui si mantengono costanti le condizioni di mobilità e interessa tutti i veicoli transitati nello stesso periodo. Pertanto, estendendo il calcolo ad una annualità, per la generica classe T di traffico, sarà:

$$(LD)_{x,H_T} = \sum_P (LD)_{x,H_{PT}} \cdot N_{PT} \cdot H_{PT}$$

Quindi, estendendo ancora il calcolo a tutte le classi T ed esplicitando il risultato con riferimento all'utente medio si ricava

$$(LD)_x = \frac{\sum_T (LD)_{x,H_T}}{\sum_T N_T \cdot H_T}$$

da cui

$$(LD)_x = K \cdot \frac{\sum_T \frac{1}{N_T} \sum_P N_{PT} \cdot H_{PT} \sum_C \left(Vd_c - Ve_{x,H_{PT}}\right) \cdot N_{CT}}{\sum_T N_T \cdot H_T} \tag{3}$$

La (3) calcola il livello di disagio imputabile ad una tratta generica dell'itinerario percorsa in una delle due direzioni di marcia. Ovviamente un'analoga procedura consente la stima del livello di disagio nella direzione opposta, purché si tenga conto della diversa distribuzione dei traffici e della diversa incidenza del profilo altimetrico per la stima della capacità.

La formula (3) fa riferimento al livello di disagio subito dall'utente medio nell'arco temporale di un anno.

Sul piano teorico nulla osta a sviluppare il calcolo con particolare rigore; tuttavia le approssimazioni imposte da una disaggregazione per classi fortemente condizionata dalla disponibilità dei dati suggeriscono di accettare alcune ipotesi semplificative.
In particolare è opportuno:

- caratterizzare la tratta in funzione di un andamento altimetrico pianeggiante, collinare o montagnoso, prescindendo da una più precisa considerazione della pendenza e della lunghezza delle singole livellette;
- definire un numero limitato di classi di traffico e di condizioni di traffico pesante che consentano di distinguere situazioni di circolazione ad esempio tipiche dei livelli di servizio A/B, C, D ed E;
- considerare per la stima della velocità desiderata le componenti di traffico rappresentate dalla mobilità locale e di lunga percorrenza, distinguendo il traffico commerciale da quello delle autovetture.

7.2 La soglia di rischio

La stima del livello o indice di disagio è solo il primo passo del procedimento che ci consente di valutare la soglia di rischio (*SR*) accettata dall'utente. Infatti, per correlare la funzionalità della strada al suo scenario incidentale è necessario tener presente che questo è fortemente condizionato da una frequenza di manovre in debito di sicurezza che dipende dal disagio "cumulato" D_q subito dall'utente nel momento in cui transita in corrispondenza della generica progressiva (q) dell'itinerario in esame.
Il disagio cumulato D_q è conseguenza di un progressivo "affaticamento" indotto dal livello di disagio che caratterizza il percorso e dal tempo decorso dall'inizio della percorrenza. Per la generica progressiva q localizzata sulla tratta (x) caratterizzata da un livello di disagio $(LD)_x$ sarà quindi:

$$D_q = \sum_{1}^{x-1}{}_i (LD)_i \cdot f\left(\frac{L_i}{Ve_i}\right) + (LD)_x \cdot f\left(\frac{q - \sum_{1}^{x-1}{}_i L_i}{Ve_x}\right) \tag{4}$$

Nella (4) la velocità di esercizio varia con il carico di traffico e la percentuale di traffico pesante; pertanto occorre assumerne il valore risultante dalla media ponderale dei periodi (H_{PT}) di stazionarietà dei flussi (N_{PT}). Per una tratta generica y sarà quindi:

$$Ve_y = \frac{\sum_{PT} \left(Ve_y\right)_{H_{PT}} \cdot N_{PT} \cdot H_{PT}}{\sum_{PT} N_{PT} \cdot H_{PT}} \tag{5}$$

Al momento non si dispone di un preciso riferimento sperimentale per una rigorosa valutazione della funzione di affaticamento; tuttavia ai fini applicativi, tenuto conto delle approssimazioni imposte dalle attuali banche dati e dalla valenza parametrica del disagio come indicatore della soglia di rischio accettata dall'utente, in prima approssimazione è possibile semplificare la (4) accettando una legge di proporzionalità diretta tra il disagio subito e lo spazio percorso.
In tale ipotesi risulta:

$$D_q = \sum_{1}^{x-1} {}_i \left(LD\right)_i \cdot L_i + \left(LD\right)_x \cdot \left(q - \sum_{1}^{x-1} {}_i L \right)_i \tag{6}$$

Come si vede nella formula (6) il disagio cumulato in un certo istante del tragitto non è altro che la somma algebrica dei livelli di disagio subiti dall'utente per lo sviluppo della varie tratte omogenee alla quale andrà sommata la quota parte di disagio subita nella tratta x in cui si trova l'utente con riferimento alla progressiva q.
Rappresentando gli andamenti qualitativi delle funzioni con riferimento ad una generica curva di deflusso come illustrato nella figura 7.2, è possibile notare che mentre il livello di disagio della tratta LD_x è strettamente correlato all'andamento della curva stessa, il disagio cumulato D_q è certamente crescente con la densità veicolare, ma non può essere meglio precisato in quanto dipende dalla sezione stradale considerata.
La figura, seppur rappresenti solo uno schema qualitativo dei vari andamenti dei parametri che descrivono la teoria del disagio, fornisce alcuni utili spunti di riflessione che, nel seguito della trattazione, troveranno interessanti applicazioni pratiche e riscontri nella viabilità in esercizio con particolare riferimento al fenomeno incidentale.

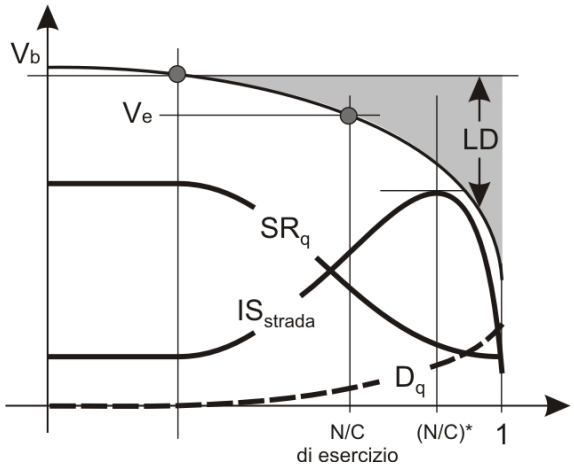

Fig. 7.2 – Schema qualitativo ed esemplificativo di:
livello di disagio, soglia di rischio, disagio cumulato e incidentalità specifica.

Come si è visto nei capitoli precedenti con maggior dettaglio, le verifiche in realtà virtuale hanno dimostrato che la soglia di rischio (*SR*) stimata dal driver anche "mediamente prudente" è una funzione decrescente del disagio stesso. Noto pertanto D_q si può rappresentare l'andamento di SR_q come in figura.
In particolare la soglia del rischio si mantiene costante sin tanto che la velocità di esercizio non scende al di sotto della velocità desiderata, quindi decresce rapidamente al crescere di D_q, raggiungendo il valor minimo in corrispondenza del massimo disagio.
L'incidentalità specifica *IS* imputabile alla strada avrà un andamento speculare rispetto alla SR_q sin tanto che, per una elevata densità veicolare *(N/C)**, le condizioni di circolazione non sono tali da impedire fisicamente le stesse manovre a rischio.
Considerato l'andamento solo qualitativo delle variabili che descrivono il comportamento degli utenti, si è reso necessario quantificare un rapporto numerico tra il disagio subito e la componente incidentale imputabile alla strada. Tali obiettivi sono stati perseguiti sia in simulazione di guida in realtà virtuale, attraverso le sperimentazioni precedentemente illustrate relative al sorpasso ed al tamponamento, sia tramite un'impegnativa campagna di sperimentazioni al vero che ha analizzato tali correlazioni in funzione della tipologia viaria e delle caratteristiche quali-quantitative della domanda, come verrà presentato nel dettaglio nel paragrafo successivo.

Tuttavia, sin d'ora, il modello illustrato in questo paragrafo consente di esprimere un giudizio attendibile sulla funzionalità sistemica dell'infrastruttura, evidenziare le eventuali criticità locali ed accertare i possibili effetti funzionali di diverse scelte progettuali.
Per quanto riguarda la funzionalità sistemica il parametro più significativo è rappresentato dal disagio subito dall'utente nelle due direzioni di marcia, mediato sull'intero itinerario.
Poiché per la sua determinazione intervengono sia le caratteristiche della strada, sia le condizioni di domanda, estendendo il calcolo a ciascun itinerario della rete si dispone di un indicatore idoneo a programmare le priorità degli adeguamenti con stretto riferimento alla sicurezza d'esercizio.
Le eventuali criticità del singolo itinerario sono rese evidenti invece da indici di disagio locale superiori alla media. Ciò può dipendere da anomalie imputabili alla strada (pendenze elevate e/o di notevole sviluppo, limitazioni di visibilità, restringimenti, distanze di visibilità per il sorpasso non sufficienti, …ecc.) o da particolari condizioni di traffico derivanti da una distribuzione non omogenea della domanda di mobilità ed in particolare da flussi veicolari nettamente superiori rispetto a quelli per i quali le infrastrutture erano state progettate alcuni decenni fa.
E' infatti tale difficoltà della rete infrastrutturale nell'assorbire gli attuali flussi di traffico a generare livelli di disagio tali da indurre comportamenti a rischio negli utenti che trovano riscontro negli elevati tassi incidentali registrati nelle nostre infrastrutture. Se è vero che l'utente è responsabile della maggior parte dei sinistri (si arriva addirittura ad assumere percentuali superiori al 90%!!!), è sicuramente ancor più vero, e sarebbe fondamentale prenderne coscienza, che tali "errori", o meglio rischi assunti, sono in gran parte il risultato finale di una mancata corrispondenza tra le aspettative dell'utente e le condizioni funzionali e caratteristiche geometriche delle infrastrutture.
Oltre ad evidenziare le situazioni locali di particolare disagio, il modello consente di verificare la reale efficacia degli interventi di adeguamento. Infatti, reiterando il calcolo dopo aver supposto la loro realizzazione, possono porsi in relazione i benefici perseguibili con i costi degli interventi. Il livello di disagio può in questo senso essere considerato un ottimo indicatore di qualità del progetto e degli interventi di adeguamento della viabilità esistente in termini di sicurezza dell'esercizio viario, inserendo nel processo di verifica le mutue interazioni tra l'utente e la strada.

7.3 Lo studio condotto sul campo

Per verificare la reale significatività della teoria del disagio, si è analizzato un ampio campione viario applicando la procedura di calcolo dell'indice di disagio e correlando ad esso gli incidenti reali imputabili alla responsabilità della strada registrati in un arco temporale di quattro anni.

7.3.1 I casi studio

Lo studio ha interessato 25 tratte stradali omogenee di 20 km appartenenti a 25 infrastrutture extraurbane ad una carreggiata ed unica corsia per senso di marcia (tabella 7.1 e figura 7.3). Si è scelto il campione per coprire un'ampia variabilità di condizioni orografiche, di traffico e al contorno. Oltre ai dati incidentali sono state raccolte informazioni fondamentali per ogni tratta sul flusso di traffico orario in termini di entità e composizione, sulle velocità dei veicoli misurate su opportune sezioni localizzate all'interno delle tratte e sulle caratteristiche geometriche della sezione trasversale e dell'andamento plano altimetrico di ogni caso di studio analizzato.

1	*SS 236 Goitese*
2	*SS 10 Padana Inferiore*
3	*SS 64 Porrettana*
4	*SS 20 De colle di Tenda*
5	*SS 16 Adriatica*
6	*SS 56 di Gorizia*
7	*SS 9 Via Emilia*
8	*SS 1 Via Aurelia*
9	*SS 16 Adriatica*
10	*SS 9 Via Emilia*
11	*SS 11 Padana Superiore*
12	*SS 11 Padana Superiore*
13	*SS 73 Senese Aretina*
14	*SS 12 dell'Abetone*
15	*SS 17 dell'App. abr.*
16	*SS 106 Jonica*
17	*SS 647 Fondo valle del Biferno*
18	*SS 4 Salaria*
19	*SS 3 Flaminia*
20	*SS 85 Vena Frana*
21	*SS 231 di S. Vittoria*
22	*SS 77 della Val di Chienti*
23	*SS 17 dell'App. abr.*
24	*SS 35 dei Giovi*
25	*SS 76 della val d'Esino*

Tab. 7.1 – I casi di studio.

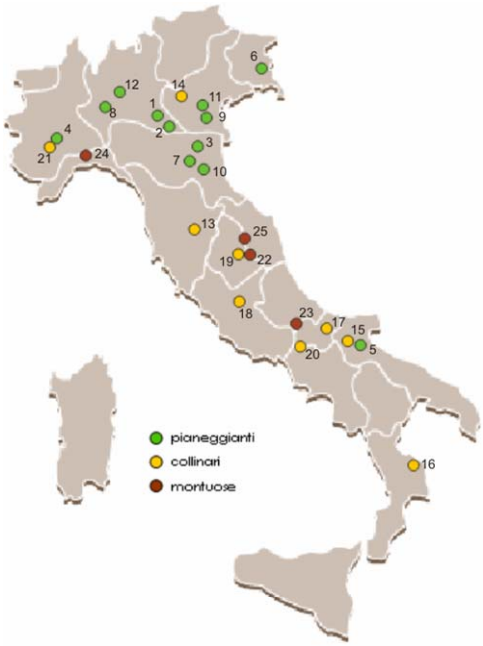

Fig. 7.3 – Casi di studio e localizzazione.

L'esito dello studio, presentato in convegni nazionali ed internazionali e pubblicato su una rivista internazionale [26], ha posto in evidenza che il legame che intercorre tra disagio, soglia soggettiva di rischio e incidentalità specifica è così stretto da tollerare rilevanti approssimazioni.
Nel caso specifico l'elaborazione ha tenuto conto di due sole componenti di domanda (lunga e breve percorrenza) ai fini della valutazione della velocità desiderata, di una descrizione qualitativa dell'andamento altimetrico del tracciato (pianeggiante, collinare, montuoso) ed inoltre il coefficiente di proporzionalità della formula (3) è stato posto pari ad 1 per ogni caso di studio.
I passi fondamentali dello studio sono stati:

- l'individuazione delle tratte omogenee a cavallo delle sezioni di rilevamento;
- la determinazione della velocità operativa risultante dai rilievi effettuati in sezioni caratteristiche;
- l'analisi della domanda di mobilità al fine di distinguere le componenti di breve e lunga percorrenza e le corrispondenti velocità desiderate;
- la determinazione dell'incidentalità specifica imputabile alla tratta e il calcolo del relativo indice di disagio.

7.3.2 Definizione delle tratte omogenee

L'esigenza di delimitare l'analisi alle tratte omogenee deriva dalla necessità di confinare l'indagine in un contesto ove l'anomalia statistica sia realmente tale e non dipenda da una diversa situazione al contorno. Allo scopo, pur essendo determinante il contributo dell'esperienza, è necessario affidare la valutazione a criteri oggettivi, suggeriti dall'analisi dei dati in possesso e dai rilievi sul campo. In particolare, questi impongono alcuni accertamenti preventivi che riguardano lo stato della strada, le sue condizioni di funzionalità e i caratteri più evidenti dello scenario incidentale per verificarne in forma aggregata la costanza o meno nel tempo e nello spazio.
Per il primo punto si è resa necessaria l'analisi dei luoghi, il rilievo delle geometrie stradali, l'accertamento delle interferenze con l'ambiente al contorno e delle condizioni di esercizio in situazioni di flusso libero e condizionato. Per tali finalità si può procedere celermente, a costi relativamente contenuti, senza interferire con l'esercizio viario. Per il rilievo delle geometrie si può utilizzare infatti un sistema GPS, così come si può provvedere alla registrazione dello scenario visuale tramite un

sistema di telecamere tra loro sincronizzate, predisposte per la successiva elaborazione elettronica delle immagini.
Per indagare il comportamento degli utenti sono stati effettuati alcuni rilievi di traffico in momenti opportuni della giornata e nelle sezioni caratteristiche della strada utilizzando uno dei tanti sistemi automatici oggi disponibili che, oltre a rilevare le velocità di transito, ha consentito di registrare la classe dei veicoli e i loro distanziamenti temporali.
Si deve ricorrere alle usuali tecniche dell'analisi urbanistica per valutare le funzioni assolte dalla strada nel contesto di rete, sia per individuare le diverse componenti della domanda di mobilità (come si è già discusso non è possibile considerare portatori di analoghe esigenze e quindi soggetti attivi di analoghi comportamenti, gli utenti che utilizzano la strada per finalità diverse, come ad esempio è evidente per le componenti di domanda di lunga e breve percorrenza), sia per stimare i carichi di traffico distinti per tipologia veicolare in funzione della loro variabilità stagionale, giornaliera ed oraria.

7.3.3 Determinazione delle velocità operative

Numerosi rilievi sul campo effettuati in diversi giorni dell'anno hanno consentito di collezionare tutte le informazioni necessarie inerenti i flussi di traffico e le velocità operative nelle diverse ore della giornata. In particolare è stata considerata come velocità operativa la velocità dell'85° percentile.
In sintesi per ogni ora del giorno di rilevamento e per ogni senso di marcia si sono registrati tutti i dati del flusso veicolare (entità e composizione) e delle velocità. Tali dati sono stati nel seguito utilizzati per stimare il livello di disagio in un giorno caratteristico dell'anno come somma di tutti i livelli di disagio registrati nelle singole ore.

7.3.4 Valutazione della velocità desiderata

Il disagio dell'utente è un aspetto molto soggettivo: per le stesse condizioni di traffico il livello di disagio può essere più o meno tollerato a seconda della motivazione dello spostamento del singolo utente. Il disagio infatti dipende dalle aspettative e dai desideri del singolo; così differenti tipologie di domanda di mobilità accetteranno in maniera diversa le restrizioni imposte dalle interazioni veicolari sulle proprie velocità e libertà di manovra. Il traffico di breve percorrenza desidererà velocità più basse di quelle desiderate dalla componente di lunga percorrenza.

Ogni utente è sottoposto alla stessa condizione di circolazione ma reagirà in maniera differente a seconda delle proprie necessità e bisogni.

Tab. 7.2 – Componenti tipologiche della domanda di mobilità: caratteri distintivi degli spostamenti e livelli di servizio "desiderati" [24,30].

Componenti primarie di mobilità	***Tipologia degli spostamenti***	***Caratteri distintivi degli spostamenti***
*Traffico locale di breve raggio (C/D)**	*Mobilità sistematica*	*Le percorrenze medie sono inferiori alla dimensione del bacino commerciale attraversato*
		È pressoché costante e concorre al TGM nel rapporto dei giorni lavorativi sul totale dei giorni annui
	Mobilità pendolare	*Le percorrenze medie assicurano tempi di percorrenza compatibili con il ciclo lavorativo*
		Si manifesta nelle aree metropolitane e decresce con funzione quadratica con la distanza dal centro urbano
*Traffico di media Percorrenza (B/C)**	*Gravitazione urbana*	*Ha caratteri simili alla mobilità pendolare risultando tuttavia compatibile con maggiori percorrenze medie*
		Decresce linearmente con la distanza dai centri in quanto non influenzata dal carico antropico locale
	Fruizione turistica locale	*Le percorrenze medie sono funzione della dislocazione sul territorio delle mete turistiche*
		Presente per periodi limitati, di norma esprime un modesto contributo al TGM annuo
*Traffico di lunga Percorrenza (A/B)**	*Mobilità produttiva*	*La percorrenza media è pari all'intero sviluppo dell'itinerario essendo i poli O/D esterni ad esso*
		La domanda è costante e può stimarsi facendo riferimento alle sezioni ove è minimo il TGM
	Mobilità turistica stagionale	*Analoga alla precedente interessa tuttavia il solo traffico autoveicolare*
		La sua entità può essere stimata tenendo conto delle variazioni mensili di consumo di carburante
*Gravitazioni esterne di lunga percorrenza (A)**		*La percorrenza media coincide con la distanza tra i nodi che connettono l'itinerario alla rete*
		E' una componente costante di domanda valutabile in funzione della congruità dei flussi a livello di nodo

(X/Y)* Livelli di Servizio "desiderati"

Per questo motivo si è resa necessaria un'approfondita analisi del traffico e della rete stradale di ogni singola tratta al fine di distinguere le componenti di flusso caratterizzate da diverse motivazioni degli spostamenti, per poter quindi attribuire alle varie classi una diversa velocità desiderata che deve comunque tener conto della tipologia dell'infrastruttura [27,30]. La tabella 7.2 riassume a livello generale i caratteri distintivi degli spostamenti e i livelli di servizio desiderati della varie componenti tipologiche della domanda di mobilità.
Le analisi condotte hanno soprattutto indagato la variabilità stagionale ed oraria dei flussi e le caratteristiche della rete stradale nella quale la tratta si inserisce, con particolare attenzione alle infrastrutture autostradali, alternativa primaria per gli spostamenti di lungo raggio.
Tutte queste valutazioni hanno consentito di suddividere l'intera domanda di mobilità in termini percentuali tra le due classi di traffico di breve e lunga percorrenza per ogni tratta omogenea analizzata (si è infatti scelto di suddividere la domanda di mobilità nelle due macrocomponenti di breve raggio e lungo raggio). Poiché la priorità degli utenti che devono sostenere lunghi spostamenti è da ricercare nella libertà di poter adottare una velocità sostenuta, compatibile con le caratteristiche del tracciato e con i limiti imposti, si è deciso di attribuire a tale classe una velocità desiderata di 90 km/h. Al contrario gli spostamenti di breve percorrenza non richiedono velocità elevate e tali utenti accetteranno con minor insoddisfazione i restringimenti imposti. Per tale classe la velocità desiderata è stata considerata pari a 50 km/h.
La figura 7.4 illustra due esempi dell'attribuzione delle percentuali di domanda alle tratte omogenee in funzione dell'analisi territoriale ed infrastrutturale condotta per ogni sezione analizzata.

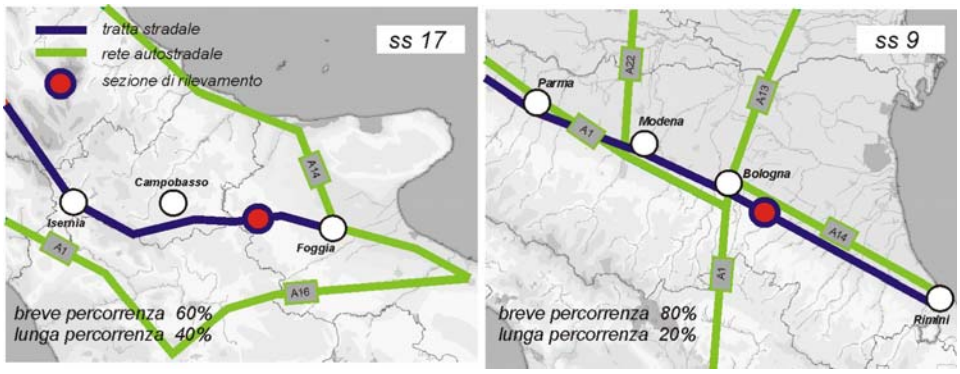

Fig. 7.4 – Determinazione delle componenti della domanda di mobilità.

7.3.5 Determinazione dell'incidentalità specifica imputabile alla tratta

Il principale obiettivo dell'analisi incidentale è quello di riconoscere le relazioni di causa effetto che governano le dinamiche dei sinistri e che possono essere governate dalle scelte progettuali.
L'analisi incidentale coinvolge un grande numero di responsabilità. Sebbene l'utente sia considerato comunemente come il primo e l'unico responsabile degli eventi incidentali, sono numerosi gli studi e le evidenze che contraddicono tale assunzione: la ripetitività degli incidenti nelle stesse progressive stradali è un chiaro sintomo della responsabilità dell'infrastruttura.
Sono stati raccolti per ogni tratta i dati incidentali relativi a quattro anni (dal 2000 al 2003, fonte ACI-ISTAT [4]) e sono stati selezionati per il prosieguo della sperimentazione solo i sinistri imputabili direttamente o indirettamente alla responsabilità della strada seconda la procedura iterativa presentata nel capitolo 4.
Il dato incidentale attribuito ad ogni tratta fa ovviamente riferimento ad un tasso incidentale, ottenuto dividendo i sinistri registrati nei 20 kilometri della sezione per il flusso veicolare transitato nello stesso arco temporale (quattro anni) ed esprimendo poi il risultato in incidenti ogni cento milioni di veicoli transitati.

7.3.6 Calcolo del Livello di Disagio

Una volta determinate le velocità operative, i flussi orari e le velocità desiderate dalle varie componenti della domanda di mobilità, si è proceduto al calcolo del livello di disagio per ogni tratta omogenea analizzata.
La formula (7) utilizzata per la valutazione del livello di disagio della generica tratta *x* in un giorno caratteristico rispetto al singolo utente è:

$$LD_x = K \sum_{j=1}^{24} \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(V_{di} - V_{ej} \right) \cdot N_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} N_{ij}} \right] \qquad (7)$$

dove:

- *k* è il coefficiente di proporzionalità (in questa analisi *k* = 1);
- *j* è l'indice orario;

- i è l'indice della classe di mobilità (in genere $i = 1...n$, in questa analisi $n = 2$ e $i = 1$ per il traffico di lunga percorrenza; $i = 2$ per la componente di breve percorrenza);
- V_{di} è la velocità desiderata della classe di mobilità i-esima;
- V_{ej} è la velocità di esercizio nell'ora j-esima;
- N_{ij} è il traffico orario della classe i nell'ora j.

Una breve discussione si rende necessaria sulla scelta di porre $k = 1$ per ogni tratta. In generale è possibile affermare che il coefficiente di proporzionalità possa dipendere dalla velocità di esercizio di ogni tratta. A titolo di esempio consideriamo due tratte stradali caratterizzate dallo stesso livello di disagio (es. $LD_1 = LD_2 = k*40$), calcolato però a partire da diversi valori di velocità operative e desiderate. In particolare $\Delta V_1 = V_{d1} - V_{e1} = 40$ km/h con V_{d1} di 130 km/h e V_{e1} di 90 km/h; per la seconda tratta $\Delta V_2 = V_{d2} - V_{e2} = 40$ km/h e V_{d2} di 80 km/h e V_{e2} di 40 km/h. E' ragionevole supporre che gli utenti nei due casi siano sottoposti ad un disagio differente causato dalle diverse imposizioni delle correnti veicolari. In particolare gli utenti della seconda tratta sono evidentemente sottoposti ad un disagio maggiore causato da una velocità operativa significativamente più bassa di quella della prima tratta. In questa sperimentazione non è stata registrata una sostanziale differenza di velocità operative tra le varie tratte in esame e la scelta di trascurare il fattore k nel calcolo del livello di disagio può considerasi un'accettabile approssimazione rimandando a future sperimentazioni l'analisi della dipendenza del coefficiente k del livello di disagio dalla velocità operativa. Inoltre poiché dallo studio è emerso che alla componente di mobilità locale corrispondeva una velocità desiderata sostanzialmente coincidente con la velocità operativa delle tratte (pari circa a 50 km/h), l'indice di disagio è stato calcolato per la sola componente di lunga percorrenza. In tabella 7.3 sono riportati i valori del livello di disagio e dell'incidentalità specifica per ogni tratta.
I risultati dell'indagine sono sintetizzati nel grafico in figura 7.5 ove si nota sia una stretta correlazione tra le variabili, sia una soglia al di sotto della quale l'incidentalità non è influenzata dall'indice di disagio.

Tab. 7.3 – Livello di disagio ed incidentalità specifica (per 100 milioni di veicoli transitati) per ogni caso di studio.

Tratta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
LD	87	215	76	27	51	196	254	330	169	120	119	92	419	9	5	190	1	97	164	158	145	187	139	120	74
IS	112	126	115	56	58	102	179	376	96	80	68	64	728	84	183	82	85	51	84	71	67	95	73	47	98

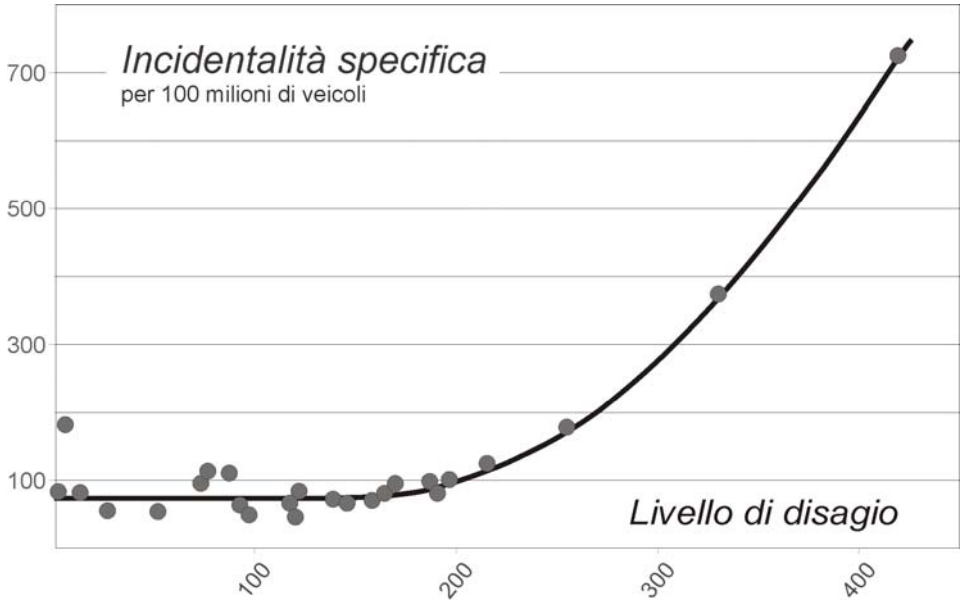

Fig. 7.5 – Incidentalità specifica in funzione del livello di disagio.

Ciò trova la sua spiegazione nel fatto che sin quando l'indice di disagio non raggiunge valori significativi, l'utente mediamente prudente non viene sollecitato ad effettuare manovre in debito di sicurezza. Di contro una volta superata questa soglia di accettabilità del disagio, come è stato anche verificato in simulazione di guida in realtà virtuale, il numero delle manovre azzardate cresce notevolmente e questo trova riscontro nell'incremento repentino dell'incidentalità registrata.
E' evidente come sia necessario un ampliamento dei casi di studio soprattutto per infrastrutture caratterizzate da livelli di disagio più elevati per verificare se l'incidentalità specifica registrata si localizzi nel tratto crescente della curva di regressione. Ciononostante è possibile sin da ora notare come tutto ciò che è stato riscontrato sperimentalmente in realtà virtuale trova riscontri pratici e di assoluta importanza nella realtà, con particolare attinenza alle problematiche incidentali e alla sicurezza dell'esercizio viario.

7.4 Conclusioni

I risultati ottenuti forniscono importanti indicazioni sia per la scelta razionale degli interventi di adeguamento della viabilità esistente (per ridurre l'incidentalità occorre migliorare le condizioni funzionali delle

infrastrutture, non più adatte ad assorbire l'attuale domanda di mobilità, e ridurre così il livello di disagio), sia per stimare l'incidentalità attesa di nuovi progetti stradali (una dettagliata analisi dei flussi in termini di entità, composizione e variabilità, ed un'approfondita stima delle velocità operative può fornire importanti informazioni sui livelli attesi di incidentalità del progetto).

Un approccio avanzato deve tenere in considerazione questo complesso sistema di condizionamenti e di comportamenti degli utenti influenzati dalle caratteristiche funzionali e non solo geometriche dell'infrastruttura.

Le condizioni operative, le necessità e le aspettative degli utenti, i condizionamenti e le restrizioni imposte dalle interferenze veicolari, la variabilità della soglia di accettazione del rischio da parte degli utenti sono tutte variabili fondamentali da prendere in considerazione per effettuare delle scelte progettuali sotto la prospettiva della sicurezza dell'esercizio viario.

In ultimo emerge da queste analisi la primaria importanza da dedicare alle analisi della domanda di mobilità che non possono ritenersi soddisfatte dal solo valore del traffico di progetto, ma che richiedono dettagliate stime della sua variabilità stagionale, giornaliera, oraria in termini di entità e composizione, valutandone sia le componenti di flusso veicolare pesante, sia le differenti componenti del flusso aventi diverse motivazioni di spostamento. Tali analisi sono essenziali sia in fase di pianificazione che di progettazione e, come si è visto, costituiscono le basi per la verifica della qualità del progetto sia sotto il profilo funzionale che di sicurezza, definendo così le reali prestazioni delle nuove opere o degli interventi di adeguamento sulla viabilità esistente.

8. Conclusioni generali e sviluppi futuri

Le sperimentazioni sviluppate nell'ambito della presente tesi hanno messo in evidenza la rilevante influenza che le scelte progettuali determinano sul comportamento degli utenti e come, a parità di altre condizioni, tali comportamenti siano fortemente dipendenti dalle condizioni d'esercizio.
I risultati conseguiti e l'esperienza maturata sul piano sperimentale consentono di affermare che lo strumento principe per la soluzione del problema è rappresentato dalla simulazione di guida in realtà virtuale.
E' infatti evidente come tale tecnologia consenta di determinare con elevata affidabilità le relazioni che intercorrono tra l'utente, la strada e l'ambiente al contorno, con significative ricadute sulle procedure di verifica di qualità dei progetti in termini di sicurezza dell'esercizio, attraverso la stima dell'incidentalità prevista per una nuova realizzazione o per un intervento di adeguamento sulla viabilità esistente.
Un approccio avanzato deve tenere in considerazione questo complesso sistema di condizionamenti e di comportamenti degli utenti influenzati dalle caratteristiche funzionali e non solo geometriche dell'infrastruttura.
Le condizioni operative, le necessità e le aspettative degli utenti, i condizionamenti e le restrizioni imposte dalle interferenze veicolari, la variabilità della soglia di accettazione del rischio da parte degli utenti, sono tutte variabili fondamentali da prendere in considerazione per effettuare delle scelte progettuali sotto la prospettiva della sicurezza dell'esercizio viario.
Per quanto attiene ai risultati delle sperimentazioni condotte in realtà virtuale è possibile trarre alcune considerazioni:

1. Le nuove tecnologie sperimentali consentono di tradurre delle intuizioni di buon senso in leggi matematiche scientificamente dimostrate;
2. In condizioni di basse densità veicolari la difficoltà di interpretazione e di percezione del tracciato stradale costituisce la principale causa degli elevati tassi di incidentalità registrati nelle infrastrutture;
3. Il grado di sicurezza adottato dall'utente dipende dalla densità veicolare. La sua soglia di accettazione del rischio varia sensibilmente al variare delle condizioni di deflusso;
4. Il comportamento degli utenti indotto dalle restrizioni imposte dalle interferenze veicolari è fortemente influenzato dal disagio.

Proprio queste considerazioni hanno spinto la ricerca a valutare quantitativamente il disagio subito dall'utente e generato dalle condizioni di marcia al fine di verificarne la reale influenza sulla sicurezza dell'esercizio viario. L'applicazione della teoria del disagio ha sottolineato, ancora una volta, che per garantire la sicurezza stradale non è possibile attribuire all'utente un ruolo passivo di mero rispetto delle ipotesi assunte dal progettista.
E' infatti indispensabile considerare nelle scelte progettuali:

1. I flussi di traffico in termini di entità, variabilità e composizione;
2. I limiti, le necessità e le aspettative delle diverse componenti della domanda di mobilità;
3. I condizionamenti e le restrizioni imposte dalle correnti veicolari;
4. La variabilità del comportamento dell'utente in funzione delle condizioni di esercizio;

Si configura quindi come obiettivo primario quello di ridurre il disagio subito dagli utenti nell'esercizio di guida evitando così una elevata probabilità delle manovre in debito di sicurezza e, conseguentemente, riducendo gli elevati tassi incidentali che si registrano nelle infrastrutture stradali. I risultati ottenuti forniscono importanti indicazioni sia per la scelta razionale degli interventi di adeguamento della viabilità esistente (per ridurre l'incidentalità occorre migliorare le condizioni funzionali delle infrastrutture, non più adatte ad assorbire l'attuale domanda di mobilità, e ridurre così il livello di disagio), sia per stimare l'incidentalità attesa di nuovi progetti stradali (una dettagliata analisi dei flussi in termini di entità, composizione e variabilità, e un'approfondita stima delle velocità operative può fornire importanti informazioni sui livelli attesi di incidentalità del progetto).
Tali analisi sono essenziali sia in fase di pianificazione che di progettazione e, come si è visto, costituiscono le basi per la verifica della qualità del progetto sia sotto il profilo funzionale che di sicurezza, definendo così le reali prestazioni delle nuove opere o degli interventi di adeguamento sulla viabilità esistente.
Gli sviluppi futuri della ricerca saranno orientati sia alla generalizzazione dei risultati, sperimentando e validando i modelli proposti per altre tipologie viarie, ampliando così la casistica indagata, sia allo studio delle molteplici condizioni di esercizio e delle caratteristiche delle infrastrutture che si riscontrano sulla viabilità stradale.

Bibliografia

1. Aarts, L., van Shagen, I., 2006. Driving speed and the risk of road crashes: a review. *Accident Analysis and Prevention*. 38, 215-224.
2. AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. 118-119. 1994.
3. Aberg, L., Larsen, L., Glad, A. and Beilinsson, L. (1997). Observed vehicle speed and drivers perceived speed of others. *Applied Psychology: an international review*, 46, 287-302.
4. ACI, *Automobile Club d'Italia, Localizzazione degli incidenti stradali*, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004.
5. Adam, J.J., Paas, F.G.W.C., Buekers, M.J., Wuyts, I.J., Spijkers, W.A.C. and Wallmeyer, P. (1996). Perception-action coupling in choice reaction time tasks. *Human Movement Sciences*, 15, 511-519.
6. Allen, R.W., Rosenthal, T.J., Aponso, B.L., Klyde, D.H., Anderson, F.G., Hougue, J.R., Chrstos, J.P. (1998). A low cost PC based driving simulator for prototyping and Hardware-in-the-Loop Applications. *SAE (Society of Automotive Engineers)* paper 98-0222, Warrendale, PA.
7. Allen, RW, Fancher, P.S., Levison, W.H., Machey, J., Mourant, R.R., Schnell, T., Srinivasan, R. (2000). *Simulation and measurement of driver and vehicle performance. Transportation in the new millennium.*
8. Awatta, M., Hassan, Y., Sayed, T. Quantitative Evaluation of Highway Safety Performance Based on Design Consistency. *Advances in transportation studies*. IX(A), 29-44. 2006.
9. Beirness, D. Do we really drive as we live? The role of personality factors in road crashes. *Alcohol, Drugs and Driving*. 9, 126–143, 1993.
10. Bella, F. Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis and Prevention*, 40 (2008) 1078-1087.
11. Bella, F. Effects of the driver perception of combined curves on speed and lateral placement. *Proceedings of the 85th Annual Meeting TRB*. Washington, January 22-26, 2006.
12. Bella, F. Validation of a driving simulator for work zone design. *TRR: Journal of the TRB* n. 1937 pp. 136-144, 2005.

13. Benedetto, A., Calvi, A., D'Amico, F. Approach based on interactive simulation for design of main rural roads. *Proceedings of Third Gulf Conference on Road TGCR06*, Muscat, Oman, 2006.
14. Benedetto, A., Benedetto, C., De Blasiis, M.R. A driving simulator based integrated approach for road geometry validation: an assessment of the road safety standards. *Proc. VII Intern. Conf. on Application of Advanced Technology in Transportation* (ASCE), Cambridge Massachusset., USA, 2002.
15. Benedetto, A., Benedetto, C., De Blasiis, M.R. (2004). A new effective approach to accidents prediction to improve roads' design and rehabilitation . *Advances in Transportation Studies*, IV(A), 5-32.
16. Benedetto, A., Benedetto, C., De Blasiis, M.R. (2004). Reliability of standards for safe overtaking: advances using real time interactive simulation in Virtual Reality. *Proc. 82 TRB Annual Meeting, Washington D.C.,* USA.
17. Benedetto, A., Benedetto, C., De Blasiis, M.R. Evaluation of reaction time in virtual reality environment for road safety increasing. *Proc. 3rd International Conference on Traffic and Transport Psychology*. Nottingham, UK. 2004.
18. 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.
19. Benedetto, A., Calvi, A., D'Amico, F., Zakowska, L. The Effect of Curve Characteristics on Driving Behavior: a Driving Simulator Study. *Proceedings of the 88th Annual Meeting TRB. Washington*, January 13-17, 2009.
20. Benedetto, A., De Angelici, A., Di Renzo, D., Guerrieri, F., Markham, S. (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.
21. Benedetto, A., Sant'Andrea, L.V. Road safety evaluation using a driving simulation approach: overview and perspectives. *Advances in transportation studies*. Special issue, 9-22. 2005.
22. Benedetto, C. (2004). Comment to "Levels of service and road traffic accident rate". *Advances in transportation studies*, III(B),95-96.
23. Benedetto, C. *Il progetto della strada sicura. La ricerca sperimentale in realtà virtuale*. Aracne Ed. 2002.

24. Benedetto, C. *Teoria delle infratrutture viarie*. Dispense del corso di Teoria delle infrastrutture viarie della Laurea Magistrale in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie.
25. Benedetto, C., Benedetto, A., De Blasiis, M.R., Calvi, A. A model for the individuation of road dependent collisions. *2008 International Symposium on Safety Science and Technology*, Beijing, Cina, 2008.
26. Benedetto, C., Calvi, A. Driver's perceived discomfort and road safety. *Advances in Transportation Studies*, XIV, 2008.
27. Benedetto, C., De Blasiis, M.R. Rilevamenti delle velocità libere e loro considerazioni per la determinazione degli standard progettuali della viabilità ordinaria. *Infrastrutture e Territorio, collana di ingegneria delle infrastrutture viarie n.2* – ed. IPS Roma. 1996.
28. Benedetto, C., De Blasiis, M.R., Benedetto, A. (2003). Driving simulation based approach for quality control of road projects. *Advances in Transportation Studies*, I(B), 86-96.
29. Benedetto, C., De Blasiis, M.R., Calvi, A. Risk of vehicle rear end collision in function of traffic *flow. Proc. International Conference Road Safety and Simulation.* 7-9 Novembre 2007, Roma.
30. Benedetto, C., De Blasiis, M.R., De Remigis, P.P. La previsione della domanda di mobilità per la progettazione e gestione delle infrastrutture viarie. *Quarry and Construction* n. 10. 1999.
31. Benedetto, C., De Blasiis, M.R. Verifica sperimentale della variabilità della soglia soggettiva di rischio per la manovra di sorpasso in funzione della densità veicolare. *Proc. Convegno SIIV Padova*. 2003.
32. 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.
33. Bloomquist, G. (1986). A utility maximization model of driver traffic safety behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 18, 371-385.
34. Bortkiewicz, L. von. (1898). *Das Gesetze der kleinen Zahlen*. B.G. Teubner, Leipzig.
35. Brown, I.D., Groeger, J. A. (1988). Risk perception and decision taking during the transition between novice and experienced driver status. *Ergonomics*, 31, 585-597.
36. Calvi, A. Risk assessment for road accident prevention. *Proc. 2006 International Symposium on safety science and technology*, Changsha, China, 2006.

37. Calvi, A., D'Amico, F. Quality control of road project: identification and validation of a safety indicator. *Advances in transportation studies*. IX(A), 47-66. 2006.
38. Calvi, A., D'Amico, F., Zakowska, L. Advanced simulation methods in solving interdisciplinary problems of planning and designing the transport space. *The hearth of the city*. 24-25, 2008, Cracovia.
39. Calvi, A., De Blasiis, M.R. Experimental analysis of reaction time to brake. *Proc. International Conference Road Safety and Simulation*. 7-9 Novembre 2007, Roma.
40. Carsten, O. (2002). Multiple perspectives. *Human Factors for Highway Engineers*, 11-22, Edited by Fuller & Santos, Pergamon, Elsevier Sciences.
41. Casolo, F., Cinquemani, S., Cocetta, M. Road safety: methods to predict the safety level of a freeway. *Advances in transportation studies*. XV(B), 51-62. 2008.
42. Chvanon, V., Zhivopistev, I., (2004). Levels of service and road traffic accident rate. *Advances in transportation studies*, III(B), 87-93.
43. Cresswell, W.L., Froggatt, P. (1963). *The causation of bus driver accidents. An epidemiological study*. Oxford University Press. London.
44. De Blasiis, MR., Firmi, P. (1998). L'analisi dell'incidentalità autostradale per la determinazione della soglia fisiologica del rischio. *Quarry and Construction*, 3.
45. De Waard, D., Jessurun, M., Steyvers, F. J.J.M., Raggatt, P.T.F., Brook-huis, K.A. (1995). Effect of road layout and road environment on driving performance, drivers' physiology and road appreciation. *Ergonomics*, 38, 1395-1407.
46. Deery, H.A. (1999). Hazard and risk perception among young novice drivers. *Journal of Safety Research*, 30(4), 225-236.
47. Denton, G.G. (1980). The influence of visual pattern on perceived speed, *Perception*, 9, 393-402.
48. Elvik, R., Vaa, T. *The handbook of road safety measures*. Elsevier. Amsterdam. 2004.
49. European Transport Safety Council (1997). *Transport accident costs and the value of safety*, Brussels.
50. European Transport Safety Council (2001). *Transport accident and incident investigation in the EU*, Brussels.
51. European Transport Safety Council (2003). *Assessing risk and setting targets in transport safety programmes*, Brussels.

52. FHWA, 1999. *Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways.* FHWA-RD-99-173, US Department of Transportation.
53. Fitzpatrick, K. *Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways, executive summary*. Report FHWA-RD-99-173, Federal Highway Administration, Springfield, VA. 2000.
54. Forbes, T.W. (1939). The normal automobile driver as a traffic problem. *Journal of General Psychology*, 20, 471-474.
55. Fuller, R. (2000). The task-capability interface model of the driving process. *Recherche Transports Sécurité*, 66, 47-59.
56. Fuller, R., Santos, J.A (2002). Psychology and the highway engineer. *Human Factors for Highway Engineers*, 1-10, Edited by Fuller & Santos, Pergamon, Elsevier Sciences.
57. Fuller, R., Santos, J.A. (2000). *Human Factors for Highway Engineers.* Elsevier Science- Pergamon.
58. Geyer, T.A.W., Morri, M.I. (1996). Quantitative risk assessment methodology. *Proceedings of the 1996 annual meeting for the society for risk analysis Europe*.
59. Gibreel, G.M., Easa, S.M., Hassan, Y., El-Dimeery, I.A. State of the art of highway geometric design consistency. *Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers*, ASCE, 125(4), 305-313. 1999.
60. Gibson, J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
61. Greenwood, M., Yule, G.U. (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.
62. Gregersen, N.P. (1996). Young drivers' overestimation of their own skill – An experiment on the relation between training strategy and skill. *Accident Analysis and Prevention*, 28, 243-250.
63. Hauer, E. *Observational before-after studies in traffic safety*, Elsevier Science.
64. Heger, R. (1995). Driving behaviour and driver mental workload as criteria for highway geometric design quality. *International symposium on highway geometric design practices*, Boston, USA.

65. Hill, J.D., Ng Boyle, L.. Driver stress as influenced by driving maneuvers and roadway conditions. *Transportation Research Part F* 10, 177-186, 2007.
66. Hoegberg, L. (1998). Risk perception, safety goals and regulatory decision-making. *Reliability Engineering and System Safety*, 59, 135-139.
67. Janssen, W.H., Tenkink, E. (1988). Considerations on speed selection and risk homeostasis in driving. *Accident Analysis and Prevention*, 20, 137-142.
68. Jones-Lee, M.W. (1990). The value of transport safety, *Oxford Review of Economic Policy.*
69. Lam, T.I. (1999). A sectorial review of risks associated with major infrastructure projects. *International Journal of project management*, 17(2), 77-87.
70. Lamm, R., Choueiri, E.M., Parianos, B., Soilemezoglou, G. A practical safety approach to highway geometric design. International case studies: Germany, Greece, Lebanon and the United States. Paper presented at the *International symposium on highway geometric design practices*, Boston, Massachusset. 1995.
71. Lamm, R., Mailaender, T., Psarianos, B. (1999). *Highway Design & Traffic Safety Engineering Handbook*, McGraw Hill.
72. Lu, J.J., Xiang, Q., Dissanayake, S., Pernia, J. (2004). The Ways to Improve Highway Safety. *Advances in Transportation Studies,* II(A), 3-14.
73. Matthews, G., Sparkes, T., Bygrave, H. Attention overload, stress, and simulated driving performance. *Human Performance*, 9, 77–101, 1996.
74. McLean, J. Driver speed behaviour and rural road alignment design. *Traffic engineering and control*, 22(4), 208-211. 1981.
75. 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.
76. Näätänen, R., Summala, H. (1974). A model for the role of motivational factors in driver decision-making. *Accident Analysis and Prevention*, 3(4), 243-261.
77. Naatanen, R., Summala, H. (1976). *Road-user behaviour and traffic accident*. North-Holland/American Elsevier, Amsterdam and New York.

78. 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.
79. Polus, A. The relationship of overall geometric characteristics to the safety level of rural highways. *Traffic Quarterly*, 34(4), 575-585. 1980.
80. Posner, M.I. (1978). *Chronometric exploration of mind*. Hillsdale: Erlbaum.
81. Proctor, R.W., Reeve, T.G. (1990). *Stimulus-response compatibility: an integrated perspective*. Amsterdam: North Holland.
82. 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.
83. Ranney, T.A. (1994). Models of driving behaviour: a review of their evolution. *Accident Analysis and Preventions*, 26,773-750.
84. Shinar, D. *Traffic Safety and Human Behavior*. Elsevier, 1-813, 2007.
85. Stein, A.C., W.A., Allen. (1987). The effects of alcohol on driver decision making and risk taking. In P.C. Noordzij & R. Roszbach Eds., Alcohol, drugs and traffic safety T86. *Proceedings of the tenth International Conference on Alcohol, Drugs and Traffic Safety*. Amsterdam, September 9-12, 1986, 177-182. Amsterdam: Excerpta Medica.
86. Summala, H. Traffic psychology theories: towards understanding driving behavior and safety efforts. *Theory and application*, 383-394. Elsevier. 2005.
87. Törnros, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel – a validation study. *Accident Analysis and Prevention*, 30 (4), 497-503.
88. Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual* (Special Report 209, Third Edition). National Research Council, 1994, Washington, D.C.
89. Viscusi, W.K. (1993). The value of risks to life and health. *Journal of Economic Literature*.
90. Vrijiling, J.K., van Gelder, P.H.A.J.M. (2000). An analysis of the valuation of human life, *Foresight and precaution ESREL.*
91. Wickens, C.D., Hollands, J.G, (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd edit). Prentice Hall, New Jersey.
92. Wilde, G.J.S. (1986). Social interaction patterns in driver behaviour: an introductory review. *Human factors*, 18, 477-492.

93. Wilde, G.J.S. (1994). *Target risk. Dealing with the danger of death, disease and damage in everyday decisions*. PDE publications, Toronto.
94. Zakowska, L., Carsten, O., Jamson, H. Driver's perception of self explaining road infrastructure and architecture – simulation study. *Traffic and Transportation Psychology, Theory and Application*. 397-405. G. Underwood Edt., Elsevier Ltd. 2005.
95. Zhou, M., Sisiopiku, V. (1997). On the relationship between volume to capacity ratios and accident rates. Paper 970114. *Transportation Research Board*, 76th Annual Meeting, Washington DC.