



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Sede Amministrativa del Dottorato di Ricerca

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Sede Convenzionata

XXI CICLO DEL
DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE, DELLE
STRUTTURE E DEI TRASPORTI

***DEFINIZIONE DI UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE PER LA
VALUTAZIONE DELLA PERCEZIONE DEL RISCHIO E DEL
COMPORTAMENTO DI GUIDA DEGLI UTENTI STRADALI NEGLI
ELEMENTI CURVILINEI DEI TRACCIATI STRADALI IN CONDIZIONI
OPERATIVE DIFFERENZIATE***

(Settore scientifico-disciplinare ICAR/04)

Dottorando

Andrea MANGANARO

Coordinatore del Collegio dei Docenti

Chiar.mo Prof. Ing. Roberto CAMUS

Università degli Studi di Trieste

Tutore / Relatore

Chiar.mo Prof. Ing. Aurelio MARCHIONNA

Università degli Studi di Trieste

Correlatore

Chiar.mo Prof. Ing. Marco PASETTO

Università degli Studi di Padova

ANNO ACCADEMICO 2007/2008

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
2	DESCRIZIONE ANALITICA DEI FATTORI INFLUENTI SULLA SICUREZZA STRADALE.....	5
2.1	Generalità	5
2.2	L'interazione triangolare "uomo-strada-ambiente".....	7
2.3	Descrizione delle principali cause di incidentalità.....	9
2.4	Il fattore umano	18
2.5	La teoria dell'errore umano.....	26
3	RAPPORTI TRA GEOMETRIA DELL'ASSE E COMPORTAMENTO DELL'UTENTE.	31
3.1	Geometria dell'asse e fattori di rischio connessi.	31
3.2	Sinistrosità' delle curve circolari rispetto alle condizioni operative osservate.	39
3.3	Impegno di aderenza trasversale in condizioni operative e fattori di rischio conseguenti.....	47
4	ASPETTI PSICO-COMPORTAMENTALI CONNATURATI CON LA GUIDA SU STRADA.....	59
4.1	Visibilità, visione e percezione durante la guida.....	59
4.2	Analisi del rapporto tra utente stradale e spazio stradale (geometria, segnaletica).....	63
5	CRITERI E METODOLOGIE SPERIMENTALI.	77
5.1	Obiettivi.	77
5.2	Approccio metodologico.....	77
5.3	Organizzazione delle attività.....	78
5.4	Descrizione del caso-studio.....	80
5.5	Analisi di sicurezza del tronco stradale e criticità conseguenti.....	85
6	ATTIVITÀ SPERIMENTALI NELL'AMBIENTE 'FISICO'.	89
6.1	Obiettivi specifici della ricerca.....	89
6.2	Metodologie di prova.....	90
6.3	Modalità di elaborazione fotogrammetrica dei video.	94
6.4	Rilievo ed analisi delle velocità operative.	96
7	ATTIVITÀ SPERIMENTALI IN AMBIENTE 'VIRTUALE'.	101
7.1	Limiti e potenzialità della realtà virtuale di tipo immersivo ad uso ingegneristico.....	101
7.2	Potenzialità dei modelli virtuali di tipo immersivo.	106
7.3	Trasferimento dell'ambiente 'fisico' in realtà 'virtuale'.	107
7.4	Calibrazione del modello virtuale.....	113
7.5	Definizione e costruzione degli ambienti di guida.....	117

7.6	Metodologie di prova.....	119
8	RISULTATI CONSEGUITI.....	123
8.1	Risultati delle attività sperimentali nell'ambiente 'fisico'	123
8.2	Risultati delle attività sperimentali in ambiente 'virtuale'.....	127
8.3	Indagine statistica mediante questionari a risposta multipla.	166
9	CONCLUSIONI.....	171
10	RINGRAZIAMENTI.....	179
11	BIBLIOGRAFIA.....	181

Capitolo 1

INTRODUZIONE

La sicurezza della circolazione si caratterizza per la propria centralità nell'ambito delle politiche di tutte le Amministrazioni e gli Enti di gestione delle infrastrutture stradali della rete italiana. Le ragioni di ciò si riconoscono inevitabilmente nell'acquisizione di una consapevolezza collettiva delle drammatiche conseguenze associate alla sinistrosità stradale. I dati annui sul fenomeno dell'incidentalità sono a dir poco allarmanti (200.000 incidenti, 6.000 morti, 280.000 feriti) e nonostante il fatto che il tema della sicurezza sia un tema già ampiamente dibattuto, esso si conferma giorno dopo giorno assolutamente centrale ed urgente sia all'interno della comunità scientifica che come obiettivo di indiscussa priorità nell'ambito delle azioni governative delle Amministrazioni.

Alcuni studi recenti hanno inteso proporre una particolare metodologia di analisi, finalizzata ad evidenziare la ricorrenza di deficienze infrastrutturali nei siti di maggiore concentrazione di incidenti. Tuttavia, è opportuno rilevare che quando il livello di incidentalità supera certi limiti, non si può fattivamente ritenere sufficiente e cautelativo limitare la bonifica dei cosiddetti "punti neri", ma si rende – al contrario – indispensabile un'analisi completa del livello funzionale dell'infrastruttura nel suo complesso, al fine di impostare le più opportune ed adeguate strategie di intervento (Benedetto, 1998). D'altra parte, è ben nota la complessità dello studio delle cause e della dinamica dei sinistri, non solo – e non tanto - per la molteplicità dei fattori in gioco quanto piuttosto – e soprattutto - per le reciproche interferenze che si vengono ad instaurare (Di Mascio, 1994).

In questa direzione, molte ricerche sono state svolte e altre sono ancora in corso, proprio per identificare quelle caratteristiche infrastrutturali che, associate a specifiche ed assegnate condizioni ambientali, possono essere all'origine dell'incidentalità.

I fattori ambientali che si possono considerare possono essere molteplici. Tradizionalmente, la maggiore attenzione è sempre stata dedicata all'influenza della pioggia, giacché questa condizione appare più strettamente correlabile all'incidentalità attraverso le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni.

Alcuni studi (Ravanelli e Confinale, 1993) indicano chiaramente che il comportamento degli utenti è caratterizzato da una maggiore prudenza al verificarsi di condizioni meteorologiche avverse e che è rilevabile una riduzione del numero assoluto di sinistri in presenza di piogge di elevata intensità. Da uno studio svedese, condotto da Schandersson nel 1992, emerge che la presenza di pioggia battente si traduce in un aumento consistente (fino al 40-50%) del

tasso di incidentalità, mentre per altezze di precipitazione basse e medie si registrano tassi del tutto confrontabili a quelli riscontrati in condizioni di asciutto e localmente anche inferiori.

Ampi studi francesi (Pejoan e Le Breton, 1993) evidenziano, inoltre, che a fronte di un rischio di incidenti su strada bagnata doppio di quello su strada asciutta, le velocità medie tenute dai veicoli diminuiscono, così come gli incidenti che coinvolgono le utenze deboli.

L'analisi della distribuzione statistica dell'incidentalità stradale descrive, tuttavia, un contesto abbastanza chiaro, da cui emerge senza dubbio la constatazione del fatto che un numero notevole di incidenti (circa il 50-60% sulle strade statali, provinciali e comunali ed il 30% sulle autostrade) avviene in tratti non rettilinei del tracciato.

Alcuni studi condotti sul comportamento dei conducenti (Giuffré et al., 1997) hanno evidenziato che tanto più le caratteristiche dell'infrastruttura si avvicinano a quelle proprie della "classe" della strada che l'utente sta percorrendo, tanto meglio egli riesce a riconoscerne le caratteristiche prestazionali e la "pericolosità" (o "grado di rischio").

Un'ampia sintesi degli studi eseguiti per strade a due corsie, a basso e medio volume di traffico, è riportata in un lavoro di Choueiri e altri (1994), nel quale si evidenzia l'esistenza di una stretta correlazione tra il raggio delle curve circolari ed il tasso di incidentalità, come verrà meglio precisato nel prosieguo della presente analisi.

Capitolo 2

DESCRIZIONE ANALITICA DEI FATTORI INFLUENTI SULLA SICUREZZA STRADALE.

2.1 Generalità

Il concetto di sicurezza assume oggi un ruolo di primo ordine nella progettazione e nella riqualificazione delle infrastrutture stradali divenendo una misura della qualità e della validità tecnica della proposta progettuale. Le stesse norme di progettazione stradale, “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade” D.M. 6792 del 5/11/2001 e s.m.i (D.M. 22/04/2004), fanno riferimento “all’innalzamento del livello di sicurezza ed al miglioramento funzionale della circolazione stradale” quale obiettivo prioritario della progettazione dei nuovi interventi o dell’adeguamento delle strade esistenti. Le ragioni di ciò si riconoscono nell’acquisizione di una consapevolezza collettiva delle drammatiche conseguenze associate alla sinistrosità stradale.

La Commissione Europea nel 2000 ha proposto con il “Programma di azione europeo per la sicurezza stradale” di fissare l’obiettivo di dimezzare il numero di morti entro il 2010. Dal confronto tra tutti gli Stati membri erano infatti emersi gli stessi problemi di sicurezza stradale: velocità eccessiva, consumo d’alcool, mancato uso della cintura di sicurezza, protezione insufficiente, punti ad alto rischio della rete stradale, inosservanza dei tempi di guida e di riposo per il trasporto professionale, cattiva visibilità. Il Programma Quadro Europeo presenta diversi campi d’azione sui quali intervenire:

- *Incoraggiare gli utenti ad un migliore comportamento:* armonizzando le sanzioni a livello europeo, ricorrendo alla formazione continua dei conducenti privati e professionali, migliorando i controlli di polizia e incoraggiando campagne d’istruzione e di sensibilizzazione degli utenti.
- *Sfruttare il progresso tecnico:* fissare migliori livelli di sicurezza per i veicoli, armonizzando le misure di sicurezza passiva (come l’obbligo dell’installazione delle cinture di sicurezza) e sostenendo il progresso tecnico.
- *Incoraggiare il miglioramento delle infrastrutture stradali:* identificando ed eliminando i punti pericolosi.
- *Sicurezza del trasporto professionale di merci e di passeggeri:* ridurre il numero d’incidenti legati agli automezzi pesanti e disciplinare la formazione di conducenti professionisti e il rispetto dei tempi di guida e di riposo.

- *Soccorso e assistenza alle vittime della strada*: esaminare le migliori prassi nel campo delle cure mediche post-trauma.
- *Raccolta, analisi e diffusione dei dati sugli incidenti*: migliorare la raccolta e l'analisi dei dati relativi agli incidenti per individuare i campi d'azione prioritari.
- *Una Carta europea della sicurezza stradale*: coinvolgere tutte le parti interessate, vale a dire le imprese di trasporto, i costruttori di autoveicoli, i fornitori di attrezzature, le compagnie di assicurazione, i gestori d'infrastrutture, le collettività locali e regionali, invitandole a sottoscrivere una Carta europea della sicurezza stradale.

Ogni giorno in Italia si verificano in media 652 incidenti stradali, che provocano la morte di 16 persone e il ferimento di altre 912. Nel complesso, nell'anno 2006 sono stati rilevati 238.124 incidenti stradali, che hanno causato il decesso di 5.669 persone, mentre altre 332.955 hanno subito lesioni di diversa gravità. Rispetto al 2005 si riscontra una lieve diminuzione del numero degli incidenti (-0,8%), dei morti (-2,6%) e dei feriti (-0,6%).

Tabella II.1 - Incidenti stradali, morti e feriti – Anni 2005-2006

	Valori Assoluti		Valori Percentuali
	2005	2006	2005/2006
Incidenti	240.011	238.124	-0,8
Morti	5.818	5.669	-2,6
Feriti	334.858	332.955	-0,6

L'analisi dell'incidentalità nel lungo termine evidenzia una costante riduzione della gravità degli incidenti, evidenziata dall'indice di mortalità (numero di morti ogni 100 incidenti) che si attesta al 2,4% nel 2006 contro il 2,8% del 2000 e dall'indice di gravità, che passa da 1,9 a 1,7 decessi ogni 100 infortunati. Nel periodo 2000-2006, gli incidenti in Italia sono passati da 256.546 a 238.124, i morti da 7.061 a 5.669, i feriti da 360.013 a 332.955. Si è pertanto registrato un decremento del 7,2% per quanto riguarda il numero di incidenti, del 7,5% per i feriti e del 19,7% per quanto riguarda il numero di morti in incidente.

Resta, tuttavia, lontano l'obiettivo fissato dall'Unione Europea che prevede la riduzione del 50% dei morti entro il 2010: per raggiungere questo risultato l'Italia non dovrebbe superare i 3.100 morti per incidenti stradali annui, ciò equivale ad una riduzione ogni anno di circa il 9%. L'Italia, con 95 morti per incidente stradale ogni milione di abitanti, registra ancora un tasso praticamente doppio rispetto a Paesi quali Gran Bretagna, Olanda e Svezia che si attestano a 50 decessi per milione di abitanti.

Tabella II.2 - Incidenti stradali, morti e feriti - Anni 2000-2006

ANNI	Incidenti	Morti	Feriti	Indice di mortalità	Indice di gravità
2000	256.546	7.061	360.013	2,8	1,9
2001	263.100	7.096	373.286	2,7	1,9
2002	265.402	6.980	378.495	2,6	1,8
2003	252.271	6.563	356.475	2,6	1,8
2004	243.490	6.122	343.179	2,5	1,8
2005	240.011	5.818	334.858	2,4	1,7
2006	238.124	5.669	332.955	2,4	1,7

2.2 L'interazione triangolare "uomo-strada-ambiente".

Il rapporto tra Uomo ed Ambiente durante l'attività di guida dei veicoli è eminentemente composto da due fasi: la prima riguarda il trasferimento delle informazioni dall'ambiente all'uomo, la seconda realizza l'attività psicomotoria dell'individuo. È proprio la prima fase, e cioè la percezione delle informazioni provenienti dall'esterno che condiziona in gran parte la diversità dei comportamenti di guida sperimentabili nell'utenza stradale.

Una miglior conoscenza di questo aspetto, perciò, costituisce un fondamentale obiettivo per gli studi riguardanti l'influenza del comportamento umano ai fini della sicurezza stradale. Infatti, mentre negli ultimi anni si è registrato un forte sviluppo, nello studio e nella predisposizione dei cosiddetti dispositivi di "sicurezza passiva", strumenti atti a salvaguardare l'incolumità fisica di conducenti e passeggeri dopo il verificarsi d'incidenti (cioè a ridurre il danno), rimangono meno indagati ed efficaci gli interventi "attivi", intendendo come tali gli accorgimenti e i sistemi di tipo strutturale, geometrico, ottico etc., capaci di ridurre la probabilità degli incidenti stradali.

È noto che, durante la guida, tutti gli apparati sensoriali rimangono coinvolti nei processi percettivi. In senso quantitativo, le informazioni che il guidatore acquisisce provengono prevalentemente dalla vista e dall'udito. Il programma di ricerca, pertanto, ha individuato la necessità di indagare più attentamente le relazioni esistenti tra sensazioni visive e comportamento di guida. All'utente, istante per istante, non pervengono informazioni tradotte in termini numerici, ma, più semplicemente, comparazioni di tipo qualitativo, ad esempio tra velocità e traiettoria del proprio veicolo, e posizione (ed eventuale stato di moto) degli altri elementi fisici presenti (fissi o in movimento).

Il comportamento dell'utente durante la guida, come si accennato, è determinato in larga misura da informazioni di natura visiva che egli trae dall'ambiente in cui si muove. Di conseguenza, dovendo progettare un'infrastruttura viaria sicura, diviene particolarmente utile

poter prevedere e valutare le reazioni del conducente di fronte ai diversi input visivi cui egli può essere soggetto (visibilità del tracciato e degli eventuali ostacoli, abbagliamento, visione in condizioni avverse per opacità dell'aria).

Storicamente, molti degli studi presenti in letteratura si sono concentrati sull'esame delle sole relazioni esistenti tra velocità veicolare e caratteristiche geometriche del tracciato, senza in alcun modo considerare altri fattori concomitanti come la percezione dell'ambiente stradale da parte degli utenti stessi.

Scallen e Carmody (1999), tra tutti, hanno indagato gli effetti di alcune caratteristiche dell'ambiente stradale sul comportamento umano a Tofte, in Minnesota, giungendo alla conclusione che l'impiego di pavimentazioni chiare si traduce nella pratica di velocità più moderate così come la cura dell'arredo della strada dal punto di vista percettivo (spartitraffico, margini esterni) induce effetti altamente desiderabili nel processo selettivo della velocità da parte dell'utente.

Oltre ai fenomeni percettivi legati al campo della visione, è di sicuro di notevole interesse lo studio della percezione del rischio da parte dell'utente in condizioni non ideali di marcia. Uno specifico studio condotto da Lamm nel 1989 ha evidenziato che la presenza di acqua sulla superficie stradale non si rispecchia in sostanziali variazioni delle velocità operative osservate e che gli utenti non paiono adeguare la propria velocità ed il proprio comportamento in curva alle diverse condizioni di strada bagnata e strada asciutta. L'aspetto più grave che ne deriva è la constatazione del fatto che gli utenti non hanno coscienza del decadimento delle proprietà di aderenza delle pavimentazioni bagnate rispetto alle corrispondenti condizioni di asciutto. Peraltro, non adeguando il proprio comportamento alle diverse condizioni ambientali, l'utente stesso presceglie più o meno consapevolmente di accettare un livello di rischio di entità superiore, confidando sui margini di sicurezza che la geometria e le caratteristiche superficiali della pavimentazione dovrebbero generalmente ammettere, senza tuttavia conoscerne l'entità ed il limite.

Un altro fattore ambientale altamente sfavorevole alla sicurezza della circolazione è la nebbia. Essa comporta elevati tassi di incidentalità legati non solo alle condizioni di bassa visibilità degli utenti durante la marcia, ma soprattutto perché essa interferisce con i meccanismi percettivi della velocità e della distanza, a causa della riduzione del contrasto cromatico tra i colori ambientali degli oggetti. Un ulteriore elemento critico associato alla presenza della nebbia consiste nella sottostima dei tempi di arresto e di frenatura, con la conseguente difficoltà operativa nell'adeguamento delle velocità rispetto alle condizioni di sicurezza dettate dal tracciato.

2.3 Descrizione delle principali cause di incidentalità.

All'idea di un viaggio è pensiero comune credere che il bel tempo sia sinonimo di minor rischio ed invece la grande maggioranza degli incidenti e del numero delle vittime si contano proprio nelle giornate di sereno. E' ovvio che le giornate di bel tempo e comunque con strada asciutta sono molte di più rispetto a quelle con la pioggia, la neve o la nebbia. Una maggior presunzione di sicurezza, derivante dal bel tempo, induce il guidatore ad aumentare la velocità e ciò giustifica la vastissima forbice rispetto alle situazioni climatiche più critiche.



Figura II.1 – Incidente stradale

Col sereno nel 2004 in Italia si sono verificati 174.471 incidenti (rilevati dalle forze di polizia) pari al 76,8% del totale con 4.067 morti (72,3%) e 239.099 feriti (75,5%). Con la pioggia gli incidenti rilevati sono stati 26.327, pari all'11,7%, con 663 morti (11,8%) e 39.582 feriti (12,5%). Eppure le giornate di pioggia, specie d'inverno sono frequenti. Quindi questi dati, e gli altri che seguono (*raccolti in Tabella 5*) per le condizioni di neve e nebbia, sembrano indicare una maggiore prudenza dei conducenti quando le condizioni atmosferiche non sono ideali. Se parliamo della strada innevata scendiamo infatti ad appena 917 incidenti che ammontano alla percentuale insignificante dello 0,4% del totale, con 18 morti, solo 0,3% del totale e 1.450 feriti 0,5%.

Tabella II.3 - Percentuale di incidenti, morti e feriti suddivisi nella varie condizioni meteo – Anno 2004

	Incidenti	% sul tot.	Morti	% sul tot.	Feriti	% sul tot.
Sereno	172.471	76,80%	4.067	72,30%	239.099	75,50%
Nebbia	1.402	0,60%	56	1,00%	2.186	0,70%
Pioggia	26.327	11,70%	663	11,80%	39.582	12,50%
Grandine	115	0,05%	5	0,08%	201	0,06%
Neve	917	0,40%	18	0,30%	1.450	0,50%
Vento Forte	304	0,10%	12	0,20%	416	0,10%
Altro	23.017	10,20%	804	14,30%	33.696	10,60%
Totale	224.553		5.625		316.630	

In riferimento al solo caso della Regione Veneto (anno 2006), i dati sull'incidentalità in relazione ai fattori ambientali descrivono un contesto statisticamente rappresentativo come ben evidenziato dalle seguenti rappresentazioni.

Un primo dato particolarmente rilevante si riferisce alle condizioni meteo-climatiche prevalenti di accadimento degli incidenti stradali (sia totali che mortali), da cui emerge proprio come alle condizioni di cielo sereno resti associato un numero consistente di sinistri, ponendosi ben al di sopra delle ben più temute condizioni di pioggia o di nebbia.

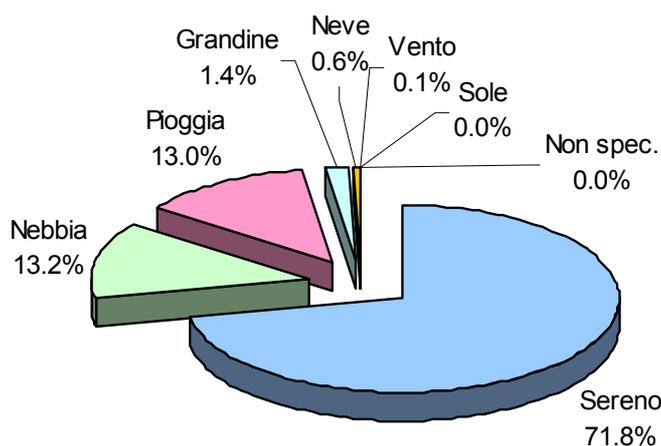


Fig. II.2 – Composizione percentuale degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per condizioni meteorologica.

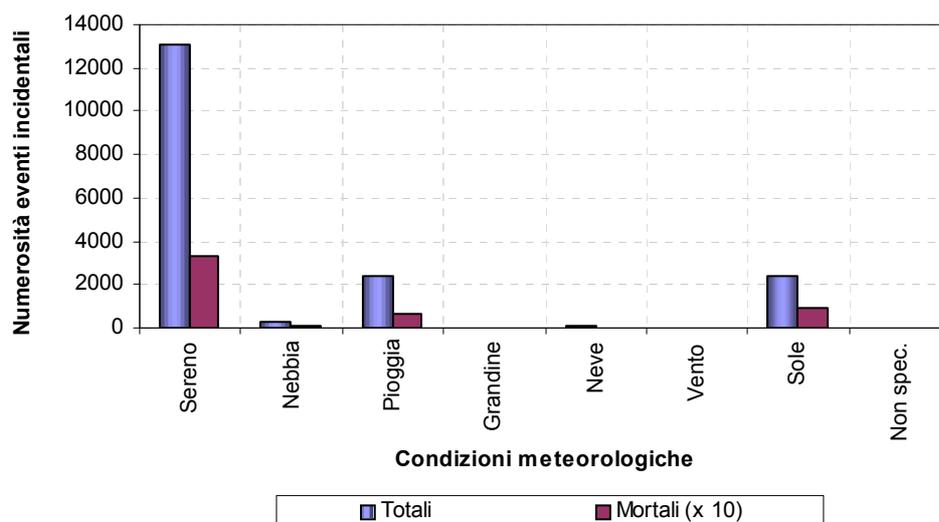


Fig. II.3 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per condizioni meteorologica.

Rispetto alle condizioni del manto stradale al momento del sinistro, i dati statistici riferiti dalla Regione dimostrano come il fondo asciutto resti superiormente associato alla circostanza di accadimento degli eventi incidentali rispetto alle condizioni di manto bagnato o ghiacciato. Anche la numerosità di eventi incidentali mortali si mantiene ben superiore nelle predette condizioni di fondo stradale asciutto anziché in quelle di fondo bagnato. A dimostrare, una volta di più, che la sinistrosità si concentra statisticamente nelle condizioni meteo-climatiche più favorevoli (cielo sereno, fondo stradale asciutto) piuttosto che in quelle meno favorevoli (pioggia/nebbia, fondo stradale bagnato/ghiacciato).

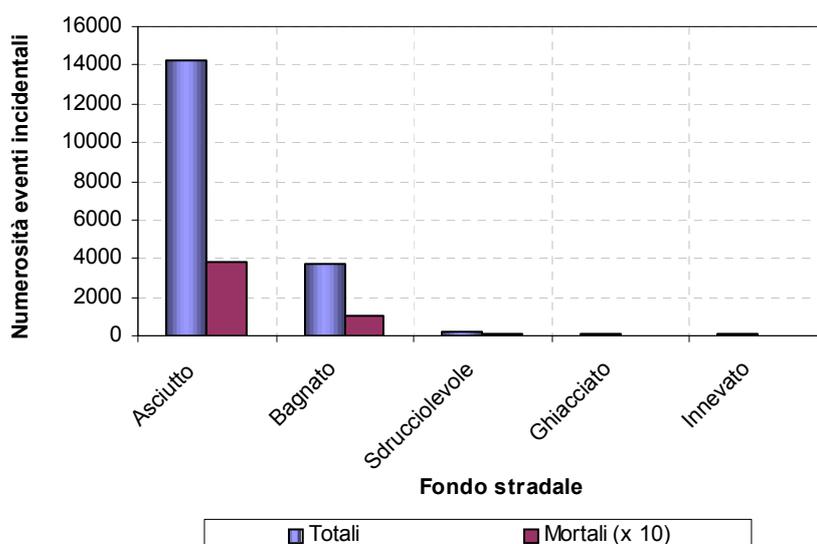


Fig. II.4 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per stato funzionale del manto stradale.

Analizzando invece le modalità di incidente, i dati statistici sull'incidentalità evidenziano anche che la maggior parte dei sinistri stradali avviene tra due o più veicoli (76,5%) mentre il 23,5% a veicoli isolati, ponendo conseguentemente l'accento sul fattore 'traffico' quale elemento di rischio prioritario di accadimento dei sinistri. La circostanza è ben documentata anche dall'analisi statistica dell'orario di accadimento degli eventi incidentali (sia totali che mortali), che ben evidenzia la relazione esistente tra lo stato di congestione del traffico e la numerosità dei sinistri, concentrandosi eminentemente tra le ore 8 e le ore 20, con picco di giornata circoscritto all'intervallo orario 18-20. La numerosità degli eventi incidentali durante il periodo notturno risulta essere statisticamente meno significativa rispetto a quella riferita al periodo diurno.

Si vuole tuttavia sottolineare come, al contrario, il tasso di incidentalità notturno (in termini di rapporto tra numero di eventi e veicoli circolanti) sia percentualmente superiore a quello diurno, ove il numero di sinistri è numericamente elevato ma è rapportato ad un parco-veicoli circolante molto superiore a quello notturno. In termini di severità dei sinistri, si osserva tuttavia che gli incidenti mortali registrati tra le 18 e le 20 si attestano sull'1,9% del totale mentre alle 2 di notte (ad esempio) arrivano fino all'8,5% del totale.

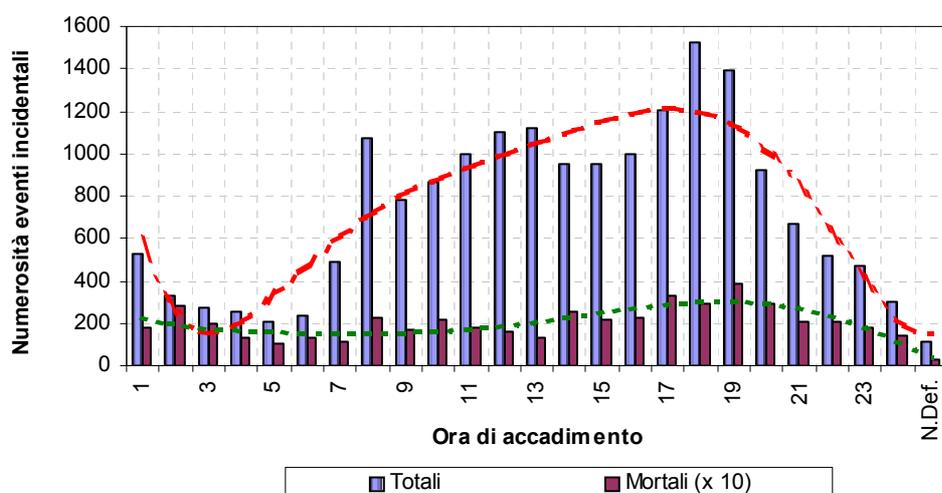


Fig. II.5 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per orario di accadimento.

Volendo completare il quadro dei fattori ambientali in grado di influire direttamente o indirettamente sulla fenomenologia dell'incidentalità stradale, un ulteriore dato di interesse è costituito dall'analisi statistica del mese di accadimento degli eventi, da incrociare con le informazioni già derivate relative ai fattori meteo-climatici.

La rappresentazione grafica riportata nel seguente istogramma evidenzia come la maggior concentrazione di eventi incidentali totali si localizzi a cavallo dei mesi estivi (ad esclusione di agosto, da considerarsi come mese atipico rispetto alle ordinarie condizioni di circolazione

sulla rete stradale). I mesi autunnali (settembre ed ottobre) riportano valori sensibilmente inferiori rispetto ai precedenti, mentre i mesi di gennaio e febbraio si collocano addirittura all'estremo inferiore dei periodi con maggiore incidentalità specifica.

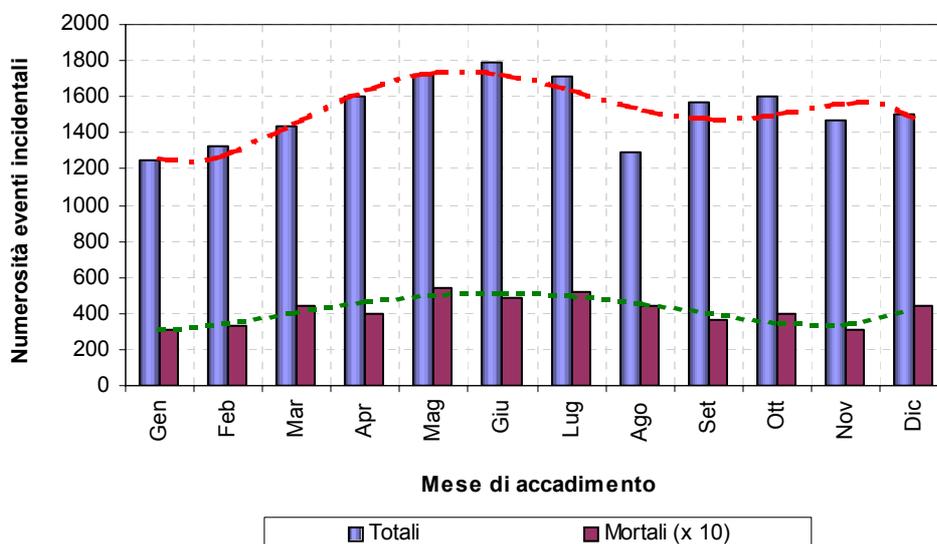


Fig. II.6 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per mese di accadimento.

Inoltre, con l'intento di completare la disamina delle cause ambientali e meteo-climatiche associate all'incidentalità stradale, è stata condotta una lettura trasversale dei dati sugli eventi incidentali nella Regione Veneto (anno 2006) in funzione del giorno della settimana, da cui emerge senz'altro una maggiore incidenza dei sinistri (totali e mortali) in corrispondenza del weekend, non tanto – e non solo – in termini assoluti ma soprattutto in termini percentuali rispetto al traffico circolante, tipicamente più basso rispetto a quello mediamente osservato nel corso dei giorni feriali.

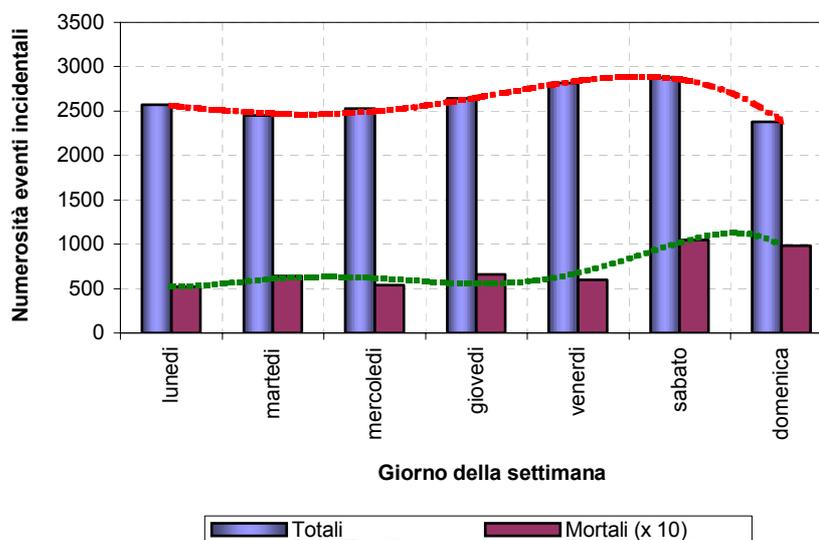


Fig. II.7 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per giorno di accadimento.

Rispetto alla localizzazione degli eventi incidentali, la ripartizione degli stessi in funzione della categoria di strada evidenzia come la maggiore casistica di eventi incidentali totali resti associata alla rete stradale di rango statale o regionale, di poco superiore a quella associata alla rete stradale provinciale. La numerosità di eventi incidentali mortali risulta al contrario sbilanciata in favore delle infrastrutture stradali di competenza provinciale, collocandosi ben al di sopra anche delle autostrade, delle strade di competenza comunale e delle strade di competenza diversa. Ne consegue una maggior tasso di mortalità sulle strade di tipo provinciale rispetto a quelle di diversa competenza e rango.

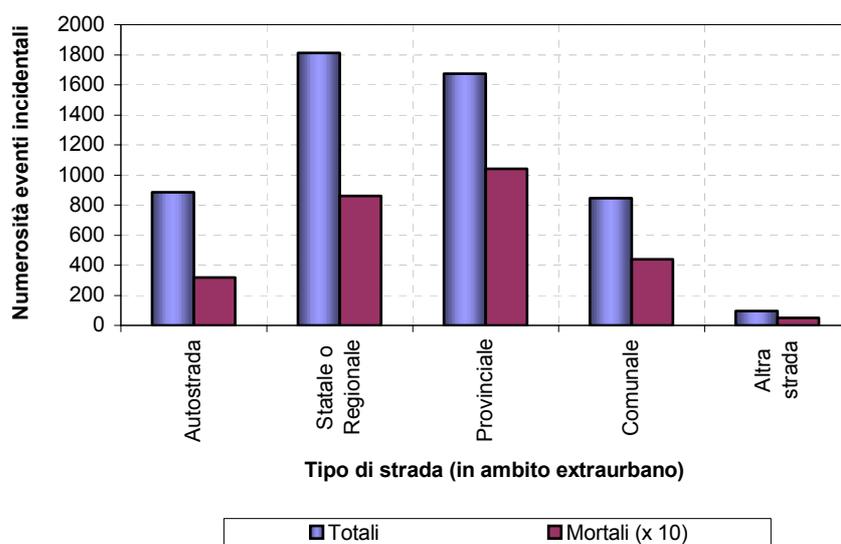


Fig. II.8 – Istogramma descrittivo degli incidenti stradali nel Veneto (2004) per categoria di strada.

Nell'ambito degli incidenti tra veicoli la tipologia di incidente più diffusa è lo scontro frontale-laterale (85.098 casi) con 1.373 morti e 121.828 feriti, seguita dal tamponamento, che registra 43.610 casi con 581 morti e 70.160 persone ferite.

Tra gli incidenti a veicoli isolati la fuoriuscita o sbandamento del veicolo rappresenta la maggior parte dei casi (21.959 incidenti) con 1.127 morti e 27.647 feriti. L'investimento di pedone rappresenta l'8% degli incidenti: si registrano 19.089 casi in cui hanno perso la vita 723 persone e 21.503 sono rimaste ferite.

L'indice di mortalità, calcolato secondo la diversa natura di incidente, evidenzia come lo scontro frontale sia la tipologia più pericolosa (5,4 decessi ogni 100 incidenti), seguita dalla fuoriuscita di strada (5,1 decessi ogni 100 incidenti), dall'urto con ostacolo accidentale (4,9 decessi ogni 100 incidenti) e dall'investimento di pedone (3,8 decessi ogni 100 incidenti). I dati appena citati sono riassunti nella Tabella 4.

Tabella II.4 – Incidenti e persone infortunate secondo la natura – Anno 2006

NATURA DELL'INCIDENTE	Valori assoluti			Valori percentuali			Indice di mortalità
	Incidenti	Morti	Feriti	Incidenti	Morti	Feriti	
Scontro frontale	16.594	893	27.175	7,0	15,8	8,2	5,4
Scontro frontale-laterale	85.098	1.373	121.828	35,7	24,2	36,6	1,6
Scontro laterale	28.731	320	36.396	12,1	5,6	10,9	1,1
Tamponamento	43.610	581	70.160	18,3	10,2	21,1	1,3
Urto con veicolo in momentanea fermata o arresto	8.051	129	10.606	3,4	2,3	3,2	1,6
Totale incidenti tra veicoli	182.084	3.296	266.165	76,5	58,1	79,9	1,8
Investimento di pedone	19.089	723	21.503	8,0	12,8	6,5	3,8
Urto con veicolo in sosta	2.088	46	2.363	0,9	0,8	0,7	2,2
Urto con ostacolo accidentale	8.408	408	10.417	3,5	7,2	3,1	4,9
Urto con treno	8	1	8	0,0	0,0	0,0	12,5
Fuoriuscita	21.959	1.127	27.647	9,2	19,9	8,3	5,1
Frenata improvvisa	1.121	5	1.266	0,5	0,1	0,4	0,4
Caduta da veicolo	3.389	63	3.586	1,4	1,1	1,1	1,9
Totale incidenti a veicoli isolati	56.040	2.373	66.790	23,5	41,9	20,1	4,2
Totale	238.124	5.669	332.955	100,0	100,0	100,0	2,4

L'analisi dei dati sull'incidentalità stradale in Italia dimostra purtroppo che non meno del 90% degli incidenti stradali trova la sua origine nel fattore umano: cioè in tutta quella gamma di comportamenti (mancato rispetto delle segnalazioni semaforiche, mancato rispetto dello STOP, della distanza di sicurezza, sorpassi azzardati, eccesso di velocità rispetto alle condizioni esistenti, incauto uso del cellulare, assunzione di sostanze alcoliche o stupefacenti, sonnolenza e stanchezza, distrazione, ecc.) di cui gli utenti della strada per incuria, per arroganza, per sopravvalutazione delle proprie capacità, si rendono troppo spesso responsabili.

Nell'ambito dei comportamenti errati di guida, il mancato rispetto delle regole di precedenza, la guida distratta e la velocità troppo elevata sono le prime tre cause di incidente e costituiscono da sole il 45,86% dei casi.

Lo stato psico-fisico alterato del conducente, pur non rappresentando una percentuale elevata del totale dei casi (2%), va segnalato per la gravità degli eventi. Le cause principali che rientrano in tale categoria sono: l'ebbrezza da alcool (4.246 casi pari al 71% della categoria), il malore, l'ingestione di sostanze stupefacenti o psicotrope ed il sonno che con 1.586 casi pesano per il 26,4%.

Soltanto in 685 casi, che pesano per lo 0,2% sul totale, sono stati difetti o avarie del veicolo ad aver causato gli incidenti. Il comportamento scorretto del pedone o lo stato psico-fisico alterato dello stesso si rileva in 9.339 casi e pesa per il 3,11% sul totale delle cause di incidente.

La distribuzione tra ore del giorno e della notte delle cause accertate o presunte di incidente evidenzia le cause che si riscontrano maggiormente nelle ore notturne: velocità, presenza di ostacoli o buche sulla carreggiata, alcool e droghe, sonno. Di giorno prevalgono le manovre ed i sorpassi irregolari e gli incidenti con pedoni. Nella Tabella 5 sono elencate le cause presunte o accertate di incidente stradale.

Tabella II.5 – Cause accertate o presunte di incidente stradale – Anno 2006

Descrizione cause	Valori assoluti	Percentuale
Procedeva senza rispettare le regole della precedenza o il semaforo	53326	17,74
di cui:		
Procedeva senza rispettare lo stop	17039	5,67
Procedeva senza dare la precedenza al veicolo proveniente da destra	15665	5,21
Procedeva senza rispettare il segnale di dare precedenza	16982	5,65
Procedeva senza rispettare le segnalazioni semaforiche o dell'agente	3640	1,21
Procedeva con guida distratta o andamento indeciso	46190	15,36
Procedeva con velocità troppo elevata	38365	12,76
di cui:		
Procedeva con eccesso di velocità	36432	12,12
Procedeva senza rispettare i limiti di velocità	1887	0,63
Procedeva senza mantenere la distanza di sicurezza	31270	10,4
Manovrava irregolarmente	18360	6,11
Svoltava irregolarmente	9188	3,06
Procedeva contromano	7544	2,51
Sorpassava irregolarmente	6645	2,21
Ostacolo accidentale	6401	2,13
Veicolo evitato	6377	2,12
Non dava la precedenza al pedone sugli appositi attraversamenti	5246	1,74
Buche, ecc. evitato	5220	1,74
Procedeva non in prossimità del margine destro della carreggiata	3517	1,17
Veicolo fermo in posizione irregolare urtato	3165	1,05
Altre cause relative al comportamento	7495	2,49
Cause imputabili al comportamento scorretto del conducente nella circolazione	284629	94,67
Anormale per ebbrezza da alcool	4246	1,41
Anormale per improvviso malore	678	0,23
Anormale per ingestione di sostanze stupefacenti o psicotrope	433	0,14
Anormale per sonno	400	0,13
Abbagliato	120	0,04
Anormale per condizioni morbose in atto	75	0,02
Altre cause relative allo stato psico-fisico del conducente	57	0,02
Cause imputabili allo stato psico-fisico del conducente	6009	2
Rottura o insufficienza dei freni	241	0,08

Scoppio o eccessiva usura di pneumatici	191	0,06
Rottura o guasto dello sterzo	74	0,02
Mancanza o insufficienza dei fari o delle luci di posizione	66	0,02
Altre cause relative al veicolo	62	0,02
Distacco di ruota	51	0,02
Cause imputabili a difetti o avarie del veicolo	685	0,23
Comportamento scorretto del pedone	9301	3,09
Pedone anormale per ebbrezza da alcool	27	0,01
Altre cause relative allo stato psico-fisico del pedone	11	0
Cause imputabili al pedone	9339	3,11
Totale	300662	100

L'analisi della distribuzione statistica dell'incidentalità stradale descrive un contesto abbastanza chiaro, da cui emerge senza dubbio la constatazione del fatto che un numero notevole di incidenti (circa il 50-60% sulle strade statali, provinciali e comunali ed il 30% sulle autostrade) avviene in tratti non rettilinei del tracciato.

A conclusione dei numerosi studi condotti in materia finalizzati allo scopo di stabilire una relazione descrittiva dell'incidentalità in funzione della curvatura degli elementi circolari emergono senza dubbio le seguenti evidenze sperimentali:

- in numerosi studi, i tassi di incidentalità aumentano con andamento approssimativamente lineare con il grado di curvatura;
- la tendenza all'aumento della sinistrosità in funzione del grado di curvatura aumenta non solo sulle strade a doppia corsia di tipo extraurbano ma anche sulle strade a corsie multiple ad accessi controllati, sia in ambito urbano che extraurbano;
- esistono pochi studi isolati che non si accordano con la tendenza dell'aumento della sinistrosità con il grado di curvatura. Esistono altresì alcuni studi in cui tale tendenza non è lineare;
- la consuetudine di collegare il grado di curvatura all'incidentalità comporta una sostanziale ambiguità. Poiché alle curve più 'strette' resta anche generalmente associato sviluppo planimetrico ridotto, dopo tutte le ricerche fin qui condotte permane ancora il dubbio se il maggior contributo alla sinistrosità debba essere ascrivibile più allo sviluppo della curva (che è dunque minimo per curve con R piccoli) o più alle condizioni di ingresso ed uscita dell'elemento o se piuttosto sia la concorsualità di fattori ad instaurare le maggiori condizioni di insicurezza.

Il significato delle evidenze sperimentali si traduce operativamente nella constatazione del fatto che quando una lunga tangente è seguita da una curva a ridotto raggio di curvatura, i tassi di incidentalità tendono a crescere rapidamente.

E' chiaro, tuttavia, che la sicurezza dipende non soltanto o comunque non direttamente dalla curvatura della stessa quanto piuttosto dalle reali condizioni di esercizio del tracciato in termini di velocità praticate dagli utenti e dalle informazioni che il "sistema strada" in senso lato è in grado di fornire (rischi, pericoli, ma anche ingombri, geometrie, ecc.).

La velocità praticata dall'utente all'interno delle curve circolari e di conseguenza l'aderenza impegnata trasversalmente dipendono non solo dalle caratteristiche geometriche della curva ma anche dalla velocità di approccio all'elemento stesso, evidenziando così che l'aspetto comportamentale degli utenti risulta essere fondamentale per la sicurezza.

2.4 Il fattore umano

Uno studio del 1990 (Camkin, 1990) evidenzia che la stanchezza è la causa del 20-30% degli incidenti stradali e che questi hanno maggiore probabilità di verificarsi in condizioni di guida "monotona", quando la durata della guida si protrae per lungo tempo e durante il periodo notturno. La saggezza popolare, che ci ricorda che "la notte è fatta per dormire", trova la propria conferma nella prova scientifica che le funzioni vitali dell'organismo sono regolate da un particolare ritmo, chiamato circadiano perché il suo ciclo completo dura circa un giorno. Il turbamento della regolarità del ritmo circadiano, ad esempio a causa di turni a rotazione, e la conseguente privazione di sonno che si verifica nel momento in cui il ritmo richiederebbe di dormire, portano all'alterazione dell'attività muscolare, della temperatura corporea, del sistema sonno/veglia, delle secrezioni ormonali e della pressione sanguigna (Rosekind et al., 1994), fenomeni questi che si manifestano con un generale calo delle prestazioni, riduzione dell'attenzione, peggioramento dell'umore e stanchezza (Bonnet, 1985).

È doverosa innanzitutto una distinzione tra stanchezza mentale e stanchezza fisica, la prima di natura psicologica, la seconda muscolare. Il nostro interesse si rivolge essenzialmente alla prima, responsabile di cali di attenzione e colpi di sonno, causa di incidenti stradali. I sintomi più evidenti della stanchezza mentale sono rappresentati da una sensazione di affaticamento e dalla percezione di indebolimento delle proprie capacità, a cui si associa una generale pesantezza.

La sensazione di stanchezza non è spiacevole se alla persona è consentito riposarsi, ma può risultare stressante se gli è impedito. In particolari condizioni di guida poi, come ad esempio il trasporto su ruote per lunghi tratti, alla stanchezza si può aggiungere la noia, uno stato

psichico che sopraggiunge quando gli stimoli esterni sono pochi e ripetitivi, come ad esempio in caso di un paesaggio monotono, come quello autostradale. Questo porta ad una bassa attivazione del sistema nervoso centrale, caratterizzata da un basso livello di attivazione cerebrale ed accompagnata da una sensazione di affaticamento e sonnolenza, diminuita vigilanza, avversione per il compito (la guida) e riduzione dell'attenzione, sintomi questi molto simili a quelli della stanchezza. L'idea è dunque che la privazione di sonno e la conseguente stanchezza contribuiscano ad un generale calo delle prestazioni, cosa che può condurre a commettere errori durante la guida, possibili cause di incidenti stradali.



Fig. II.9 - La stanchezza alla guida

Uno studio condotto su guidatori di professione (Kecklund e Akerstedt, 1993) riporta che la bassa attivazione cerebrale riscontrata durante la guida, e conseguente ad un prolungato periodo di turnazione irregolare, era associata all'incremento di sonnolenza durante le ultime ore di un turno di guida notturno. Un precedente studio, inoltre (Mackie e Miller, 1978), aveva messo in rilievo come turnazioni di guida irregolari provocassero forte stanchezza del conducente, stress fisiologico e deterioramento delle prestazioni, più di quanto non accadesse in conducenti che osservavano turni regolari.

Con il termine stress si intende una reazione di adattamento dell'organismo agli stimoli ambientali. Nell'uomo la perturbazione dei sistemi fisiologici dell'organismo provocata dall'esposizione ad uno stimolo stressante produce l'attivazione di vari meccanismi nervosi e neuroendocrini che prendono, nel loro insieme, il nome di "Sistema dello Stress 1".

Uno dei più significativi fattori di stress della vita di tutti i giorni è considerata la normale guida su strada: di conseguenza, la salute dell'automobilista così come la sicurezza su strada potrebbero essere messe in pericolo dallo stress indotto dalla guida.

Nelle tabelle seguenti vengono riportate le principali risposte comportamentali (Tabella II.6) e adattive fisiche (Tabella II.7) della risposta da stress.

Tabella II.6 – Principali risposte comportamentali della risposta da stress

Funzione	Risposta
Vigilanza	Aumento dello stato di veglia, allerta, vigilanza
Facoltà cognitive	Aumento delle prestazioni cognitive e della memoria
Dolore	Aumento della soglia di percezione del dolore
Appetito	Anoressia
Aggressività	Aumento dell'aggressività
Libido	Diminuzione della libido

Tabella II.7 – Principali risposte comportamentali della risposta da stress

Funzione	Risposta
Metabolismo	Aumento della glicemia
Sistema cardiovascolare	Aumento della gittata cardiaca, della frequenza cardiaca e della pressione arteriosa. Redistribuzione del flusso sanguigno a cervello, apparato muscolare, cuore
Apparato respiratorio	Aumento della frequenza respiratoria
Apparato muscolare	Aumento della tensione muscolare
Apparato digerente	Inibizione funzione digestiva
Sistema immunitario	Azione immunosoppressiva e antinfiammatoria

Tra i fattori, che alterano lo stato psico-fisico degli utenti alla guida, si trovano anche l'abuso di alcol e l'assunzione di sostanze stupefacenti. Come riportato dalla Stampa nella sua edizione del 30/08/2008, è emerso che quasi un automobilista su due, 37 tra gli 80 (46,2%) sottoposti nella notte ai controlli per contrastare l'abuso di alcol e droga tra chi guida, è risultato positivo ai test. Undici sono risultati positivi alla droga, 17 all'alcol e 9 ad entrambe le sostanze. Le sostanze stupefacenti più usate sono risultate cocaina e derivati della cannabis. Le sostanze che alterano lo stato psico-fisico degli utenti alla guida sono diverse:

L'alcol etilico o etanolo è prodotto dalle fermentazioni degli zuccheri presenti nella frutta, nei cereali, in alcuni semi e tuberi. La quantità contenuta nelle bevande alcoliche si misura in "gradazione alcolica", termine che indica la percentuale in volume di alcol. Gli effetti dell'alcol sul comportamento e quindi anche sulla guida dipendono dalla concentrazione di alcol etilico nel sangue (alcolemia). Gli studi in materia evidenziano essenzialmente tre aspetti:

- il rischio relativo di provocare un incidente grave o mortale aumenta esponenzialmente con l'alcolemia;
- a parità di alcolemia, il rischio è tanto più elevato quanto minore è l'età del conducente;
- a parità di alcolemia, il rischio è maggiore per i bevitori occasionali.

Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto alcol sono diversi:

- il senso piacevole che si avverte dopo l'assunzione anche di basse quantità induce a sottovalutare situazioni di pericolo;
- il senso di valutazione delle distanze e delle velocità viene alterato (sorpassi azzardati);
- l'alterazione delle percezioni visive riduce il campo visivo, diminuisce la visibilità laterale (visione a tunnel) e aumenta la sensibilità all'abbagliamento nella guida notturna (incidenti agli incroci, di sera e nelle gallerie);
- la riduzione della velocità della trasmissione nervosa rallenta i tempi di reazione;
- l'alcol produce sonnolenza e riduce la capacità di concentrazione, quando il tasso alcolemico raggiunge 1 g/l il rischio di pericolosità per sé e per gli altri è aumentato di quasi 20 volte, rispetto ad una alcolemia dello 0,5 g/l; con 1,8 g/l la probabilità di incidente sale a 50 volte.

La Cannabis (Canapa Indiana) è una varietà di canapa originaria dell'Asia centrale ma ormai coltivata in tutto il mondo. Si presenta con foglie secche (Marijuana) o blocchi scuri e solidi (Hashish). Si consuma fumandola (spinelli), ma si può anche ingerire sotto forma di infuso o masticandone le foglie. Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto marijuana o hashish sono diversi:

- per circa un'ora dopo l'assunzione, si è portati a sopravvalutare le proprie capacità e a sottovalutare situazioni di pericolo;
- si ha un'alterazione della coordinazione motoria, della percezione del tempo e dell'attenzione;
- a dosaggi moderati, la percezione più acuta dei contorni, dei colori e della profondità riduce la performance di guida;
- ad alti dosaggi provoca allucinazioni, che possono portare per esempio a frenare all'improvviso di fronte ad un ostacolo inesistente.

Le anfetamine sono sostanze stimolanti, comunemente conosciute per la loro proprietà di ridurre l'appetito. Sono presenti in molti farmaci contro l'obesità e la bulimia. Si trovano anche sul mercato illegale sotto forma di pasticche o, più raramente, in polvere. In questo caso l'assunzione avviene per via endovenosa o per via nasale. Alcuni nomi: crank, crystal, ice, shabu. Molto spesso le anfetamine sono presenti come sostanze da taglio nel LSD o nell'ecstasy. Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto anfetamine sono diversi:

- il senso di euforia e di eccitazione induce a sottovalutare situazioni di pericolo;
- la difficoltà di concentrazione può influenzare la capacità di valutazione delle distanze e della velocità (sorpassi azzardati);

-
- l'anfetamina può condurre ad uno stato di stress psico-fisico con rischio di successivo crollo e colpo di sonno.

E' un estratto della foglia di coca, pianta che si coltiva prevalentemente in America del Sud. Si presenta come polvere da "sniffare", ma anche in scaglie (flake cocaine) e in cristalli (crack). Generalmente viene assunta per via nasale, oppure sciolta e iniettata per via endovenosa. Il crack invece viene fumato. Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto cocaina sono diversi:

- chi la usa prova una sensazione soggettiva di aumento delle capacità intellettive con euforia ed è portato a sottovalutare le conseguenze di alcuni comportamenti, generando delle situazioni molto rischiose;
- con l'esaurirsi dell'effetto si manifestano sonnolenza, incapacità di concentrazione, alterazione dei riflessi.

Con termine ecstasy si indicano decine di sostanze diverse tutte prodotte in laboratorio. La più nota è appunto l'ecstasy (MDMA) seguita da "eve" (MDEA) e "love drug" (MDA). Si presenta sotto forma di pasticche colorate, di forme differenti.

Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto ecstasy sono diversi:

- l'euforia e l'eccitazione, la mancanza del senso di fatica e l'annullamento del bisogno di dormire inducono a sottovalutare situazioni di pericolo;
- i possibili effetti allucinatori e i disturbi nella percezione modificano il senso di valutazione delle distanze e della velocità (sorpassi azzardati);
- l'alterazione delle percezioni visive riduce il campo visivo diminuisce la visibilità laterale (visione a tunnel);
- aumentano la sensibilità all'abbagliamento nella guida notturna;
- rallentano i tempi di reazione.

L'eroina è, insieme all'oppio e alla morfina, il prodotto di successive raffinazioni di estratti del papavero. Si presenta sotto forma di polvere bianca o marrone, spesso granulosa. Viene assunta inalandola per via nasale o iniettandola in vena; molto più raramente viene fumata. L'eroina reperibile nel mercato della droga non è mai allo stato puro, ma è associata, in gergo "tagliata", con numerose altre sostanze. Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto eroina sono diversi:

- si manifestano sonnolenza e diminuisce la capacità di concentrazione;
- l'alterazione della coordinazione motoria, la riduzione del livello di attenzione, il rallentamento dei riflessi inducono a sottovalutare situazioni di pericolo.

LSD o “acido” è un prodotto di sintesi di laboratorio. E' l'allucinogeno più diffuso in Italia e nel mondo. Si presenta sotto forma di francobolli colorati o pillole da consumare per via orale. Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto LSD sono diversi:

- si alternano momenti di euforia e momenti di depressione;
- si manifestano allucinazioni ed viene alterata la percezione della realtà, inducendo a sottovalutare situazioni di pericolo o a frenare a causa di ostacoli inesistenti;
- diminuisce la capacità di valutare distanze e velocità (sorpassi azzardati);
- possono ricomparire stati di allucinasi transitoria anche a distanza di tempo dall'assunzione, i cosiddetti flashback.

Molti farmaci possono recare disturbo alla concentrazione e alla capacità di prestare attenzione. Prima di mettersi al volante, è meglio leggere con attenzione le avvertenze. E' comunque una buona regola evitare qualsiasi farmaco prima di mettersi in viaggio. I farmaci che possono influenzare la guida sono soprattutto:

- Sedativi, Ipnotici, Barbiturici, Benzodiazepine
- Antistaminici
- Antidepressivi
- Stimolanti
- Analgesici
- Farmaci per il mal d'auto.

Gli effetti per chi si mette alla guida dopo aver assunto farmaci sono diversi:

- si manifesta sonnolenza e diminuisce la capacità di concentrazione;
- i riflessi vengono alterati e quindi si allunga il tempo di reazione modificando la performance di guida;
- l'alterazione della coordinazione motoria e della capacità di giudizio influenza il senso di valutazione delle distanze e delle velocità.

Tutte queste sostanze sono pericolose sia per la persona che ne fa uso sia per chi gli sta intorno; molti incidenti stradali potrebbero essere evitati se chi si mette alla guida avesse la consapevolezza del pericolo che corre a guidare dopo l'assunzione di alcol o droghe. Le statistiche, tuttavia, dicono il contrario, chi ne fa uso non conosce i rischi a cui va incontro.

La percezione del rischio è un processo cognitivo coinvolto in diverse attività quotidiane e che orienta i comportamenti delle persone di fronte a decisioni che coinvolgono dei rischi potenziali. La percezione del rischio coinvolge diverse dimensioni come, per esempio, le conseguenze sia immediate sia future e le loro implicazioni tanto su un piano razionale ed oggettivo quanto su un piano emozionale e soggettivo. La ricerca ha sottolineato che in molti

casi esiste una discrepanza tra la percezione soggettiva del rischio e la valutazione oggettiva (Slovic, 2001). In poche parole, capita che le persone a volte temano delle attività che non sono in realtà pericolose e non temano, invece, delle attività che potrebbero avere conseguenze molto drammatiche.

Lo studio psicologico della percezione che le persone hanno del rischio esamina le ragioni che sottostanno ai giudizi che esse danno della rischiosità di diverse attività. Esistono diverse ragioni che inducono le persone a percepire alcune attività rischiose ed altre meno ed esistono differenze anche marcate tra diversi individui (Slovic, 2001). Tuttavia, si possono anche riscontrare dei meccanismi generali che sottendono al modo in cui le persone elaborano le informazioni provenienti dall'ambiente ed anche quelle che hanno in memoria. Questi processi, chiamati euristiche, hanno un ruolo fondamentale nel modo in cui le persone valutano il rischio di un'attività. In particolare, si tratta di strategie di pensiero che agiscono generalmente a livello inconsapevole.

Gli psicologi hanno cominciato ad occuparsi di percezione del rischio quando hanno compreso che i molteplici approcci al calcolo oggettivo del rischio erano insufficienti per poter comprendere i comportamenti delle persone e per poterle indurre a reagire nel modo corretto al pericolo. Infatti, i modelli per il calcolo del rischio oggettivo sono spesso delle approssimazioni di ciò che costituisce un specifico pericolo e non considerano una lista esaustiva dei fattori che potrebbero essere coinvolti. D'altronde, usare una lista esaustiva sarebbe impossibile, se non fosse che in questo modo diventa fondamentale ciò che i singoli valutatori inseriscono nel modello come fattore fonte del rischio. Inoltre, in molti casi si chiede agli esperti di calcolare un valore di rischio oggettivo anche in mancanza di una casistica storica sufficiente. Un particolare limite del rischio inteso come misura oggettiva della pericolosità di un'attività è che in realtà le persone non utilizzano queste stime oggettive nel momento in cui devono decidere il modo in cui comportarsi. Di conseguenza, succede che le persone tendano a sovrastimare o sottostimare il rischio a seconda che percepiscano un'attività più o meno pericolosa di quello che affermano le statistiche e le valutazioni di tipo oggettivo.

La ricerca ha evidenziato che ci sono alcuni fattori che influenzano in modo particolare la percezione che le persone hanno della pericolosità di un'attività (Slovic, 1987). Tra questi fattori ci sono i seguenti:

- quanto controllo è possibile esercitare sugli eventi che possono generare pericolo (per esempio, si pensa di poter esercitare molto controllo nel caso della guida e molto poco nel caso dei cataclismi naturali);
- quanto volontariamente la gente ha deciso di affrontare una situazione rischiosa;
- quanto gravi sono le possibili conseguenze.

Un'importante risultato ottenuto dagli studiosi della percezione del rischio è stato quello di mettere in evidenza che le persone percepiscono la relazione tra rischi e benefici di un'attività in modo differente da come questa relazione si realizza nella realtà. Infatti, da un punto di vista oggettivo, molte attività che coinvolgono un possibile rischio offrono anche dei vantaggi, si pensi ai raggi X nella pratica medica. Vale a dire che nell'ambiente rischi e benefici sono correlati in modo positivo. Tuttavia, nella mente delle persone questi due fattori correlano in modo negativo. Se una persona percepisce un'attività come rischiosa allora assocerà ad essa un basso beneficio, mentre se percepisce un'attività come sicura allora assocerà ad essa un beneficio elevato. Per esempio, se una persona non prende l'aereo per paura di un incidente allora potrebbe giudicare questa attività come molto rischiosa e poco utile; diversamente coloro che trovano utile l'aereo perché permette di andare in tutto il mondo in modo relativamente veloce ne sottovaluteranno il rischio. Questo modo di ragionare dipende in modo determinante dal modo in cui funziona il sistema cognitivo umano ed è dovuto in particolare all'utilizzo del cosiddetto sistema di pensiero intuitivo che agisce principalmente a livello inconsapevole e che influenza le nostre valutazioni coscienti sulla base delle reazioni emotive che associamo a diversi stimoli (Finucane, Alhakami, Slovic e Johnson, 2000).

Uno studio, svolto tra novembre 2003 e gennaio 2004 e parte di un più ampio progetto di promozione della sicurezza stradale in provincia di Trento, ha svolto un'indagine finalizzata alla rilevazione della percezione del rischio di un campione di utenti, che si è rivolto ai servizi di Igiene Pubblica dell'Azienda Sanitaria di Trento (APSS) per il rilascio/rinnovo della patente di guida.

Al campione di utenti veniva chiesto di rispondere ad un questionario standardizzato. La correzione dello stesso è avvenuta in ambulatorio con la possibilità di un breve e mirato intervento di informazione/educazione sanitaria e consegna finale di materiale informativo specifico da parte del medico igienista.

I temi indagati dal questionario erano:

- l'importanza degli incidenti stradali in termini di mortalità e morbosità;
- i fattori causali individuali principali;
- l'uso delle cinture/seggolini;
- il consumo di alcol in relazione alla guida.

E' stata poi calcolata la proporzione di risposte corrette, nel complesso e per le singole domande per:

- distretto sanitario;
- sesso;
- classe di età;
- categoria di patente.

I questionari somministrati dai singoli distretti partecipanti (5/11) sono stati 574, con una rispondenza di poco meno del 100% degli utenti. L'età media dei rispondenti è di 43,2 anni (range 17-87) con una mediana di 39 anni. Per il 58,3% dei rispondenti gli incidenti stradali sono correttamente riconosciuti come prima causa di morte nelle persone fino a 40 anni di età. La percentuale di soggetti che individua l'alcol come importante fattore di rischio per la mortalità stradale è elevata (87,2%), a fronte di una relativamente bassa percentuale (40,4%) di chi è consapevole che gli effetti dell'alcol sulla guida incominciano già al primo bicchiere. Il 44,3% del campione individua comunque un effetto negativo sulla guida "dopo 1-2 bicchieri" che all'incirca corrisponde alla soglia imposta dalla legge per non superare i 0,5 mg/l. La percentuale di risposte "legalmente accettabili" sale pertanto all'87%, anche se questo risultato solleva il problema di un falso senso di sicurezza derivante dalla soglia legale esistente.

Il mancato uso dei dispositivi di sicurezza viene percepito come fattore di rischio dal 73,3% dei rispondenti, senza differenze in relazione al genere, alla classe di età e alla categoria della patente. La domanda con meno risposte corrette (15%) è quella riguardante il numero di accessi al pronto soccorso correlati a incidenti stradali in cui l'intervistato aveva la scelta tra diverse opzioni da 500 a 10000.

Di fronte a una relativamente buona percezione del rischio connesso con alcuni comportamenti, soprattutto quelli legati all'alcol, la percezione delle conseguenze sanitarie (morte e ferite) è bassa. Inoltre esiste un'errata percezione sulle quantità di alcol assunte in grado di influenzare negativamente la qualità della guida. Significativa anche la percentuale relativamente bassa di soggetti che individua la mancata adozione dei dispositivi di sicurezza come causa importante di mortalità e morbosità associata agli incidenti stradali.

2.5 La teoria dell'errore umano.

In buona parte degli eventi incidentali lungo le strade, si suole attribuire la responsabilità al guidatore, corrispondendo alla volontà di etichettare la circostanza come "errore umano" nel corso della guida: errori di valutazione, tempi di reazione, manovre azzardate, comportamento inadeguato, stato psico-fisico alterato. Tutte possibili attribuzioni di responsabilità ricadenti entro la sfera soggettiva del guidatore all'atto del sinistro, quasi a voler scagionare di qualsiasi responsabilità di tipo concorsuale il sistema infrastrutturale entro cui l'evento incidentale ha avuto luogo. Secondo "*Human Error*" di James Reason, la 'Bibbia' degli studi sull'errore umano (edito nel 1990), il 90 per cento degli incidenti nei sistemi complessi dipende dagli uomini (il restante 10% sarebbe da attribuire a fatalità quali la caduta di un fulmine od un malore). Ad un esame più attento di questi dati, si rileva come

l'8% di queste circostanze sia attribuibile al singolo individuo mentre le restanti rientrano più propriamente nella categoria dei cosiddetti "errori organizzativi": in pratica, i fallimenti umani e della tecnologia diventano critici quando si sommano – od agiscono sinergicamente – ai problemi latenti di ogni sistema complesso, quali – nel caso stradale – la geometria, lo stato di manutenzione della pavimentazione o della segnaletica, l'efficacia dell'illuminazione e delle barriere di sicurezza, eccetera.

Le ricostruzioni dei grandi disastri degli ultimi anni, tanto in campo ferroviario che in campo aeroportuale, hanno dimostrato che gli incidenti nascono dalla concatenazione dei singoli problemi: alcuni sono attivi, come la distrazione del guidatore nel caso stradale o la rottura di un elemento meccanico del veicolo, altri – di più difficile individuazione – sono latenti e spaziano dagli errori di progettazione *ab origine* fino all'insufficienza dei sistemi di sicurezza e alla mancata manutenzione delle opere o delle parti. Reason postula la sua teoria asserendo che "le azioni che violano la sicurezza possono essere commesse, ancor più che in conseguenza dei loro precursori psicologici, a causa della complessa interazione tra le influenze intrinseche del sistema e quelle che hanno origine nel mondo esterno."

La casistica delle forme di errore è estremamente variegata ma esistono diverse categorie che racchiudono fenomeni simili dal punto di vista mentale e cognitivo. Una prima differenza è tra errori commessi nell'esecuzione di un'azione o nella loro pianificazione. I primi sono definiti *slips* o *lapses* e sono relativi ad intoppi nell'attuazione di un'operazione automatica, a fronte di una corretta pianificazione della stessa. Tipicamente ad essi corrisponde la coscienza dell'errore una volta che esso sia stato compiuto.

Gli errori della pianificazione (*mistakes*) consistono in vere e proprie mancanze nella scelta di un obiettivo o nei mezzi necessari per raggiungerlo, a prescindere dalla corretta esecuzione delle azioni stabilite: l'errore sta nel piano e non nella correttezza delle azioni in esso previste. Questi ultimi si possono suddividere a loro volta in *rule-based* e *knowledge-based* a seconda che l'errore consista nell'attuazione di una regola corretta nel contesto sbagliato o nell'attuazione di un piano inadeguato od incompleto sulla base di informazioni o di conoscenze parziali.

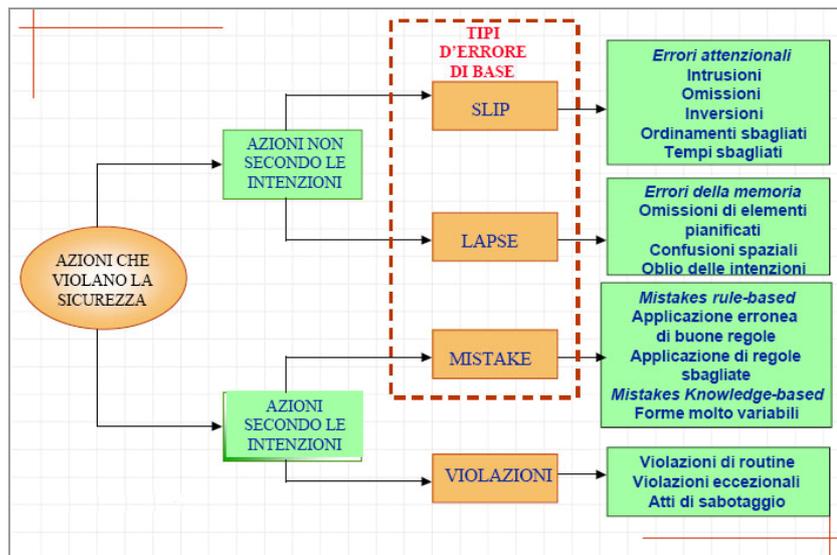


Fig. II.10 - Azioni che violano la sicurezza

L'errore umano è considerato in psicologia come una sorta di male necessario per il normale svolgersi di azioni molto complesse. Al fine di utilizzare al meglio le limitate risorse di calcolo, il cervello si serve di vere e proprie 'scorciatoie' per portare a termine un'azione: quando un gesto è considerato ripetitivo e conosciuto, si attiva una specie di 'pilota automatico' che consente di risparmiare potenza di calcolo. L'attivazione di simili procedure permette di svolgere molte azioni in modo veloce ed efficace, anche in diversi ambienti e circostanze senza un sovraccarico per l'attenzione cosciente. L'aspetto dolente di tale strategia di natura cognitiva consiste nella sua intrinseca rigidità e nella sua mancanza di flessibilità, che spesso impediscono di accorgersi di difficoltà inattese: è possibile, infatti, che si verifichi un'interpretazione sbagliata dell'azione giusta da eseguire proprio perché non ci si accorge che alcuni aspetti dell'ambiente sono cambiati oppure che l'azione sia interrotta da un elemento di distrazione che impedisce sia di mantenere l'attenzione su quanto si stava facendo sia di riprendere a farlo.

La facilità con cui questo sistema può fallire spingerebbe a pensare che le prestazioni completamente prive di errori siano molto poche, anche se un rapido calcolo delle azioni ordinariamente svolte in automatico porta a concludere diversamente che generalmente le cose vanno molto meglio del previsto. Esistono infatti dei meccanismi mentali che consentono il recupero o la compensazione anche delle azioni sbagliate ad ogni singolo passo di un'azione complessa, sfruttando la possibilità di seguire le diverse strade potenziali da percorrere per portare a termine con successo la stessa azione.

James Reason teorizza, tuttavia, che "la fallibilità è una caratteristica dell'essere umano. Non possiamo cambiare l'essere umano, ma possiamo cambiare le condizioni in cui gli esseri umani operano". L'obiettivo attuale di ingegneri, psicologi ed ergonomi coincide per l'appunto con la volontà di progettare sistemi più sicuri, anche considerando che l'errore umano possa

manifestarsi in forme e momenti molto diversi, per lo più imprevedibili. Progettare un sistema sicuro significa in senso letterale studiare protezioni a diversi livelli, per ciascuno degli elementi in gioco. Si tratta di prevedere e prevenire le possibili interazioni critiche tra singoli elementi, che da soli raramente sarebbero in grado di spiegare una situazione pericolosa. L'obiettivo ultimo dell'approccio si esplica con la volontà di impedire – o quanto meno rendere meno probabile – l'allineamento delle debolezze dei singoli 'layer' del sistema, su cui l'errore umano può trovarsi ad intervenire.

Le dinamiche sopra rappresentate vengono definite da James Reason mediante il cosiddetto *Swiss Cheese Model*, giacché tutte le possibili barriere di sicurezza preventive hanno delle lacune che non possono essere coperte totalmente. Lo scopo da prefissarsi qualora ci si accinga alla progettazione di un sistema complesso, quale può essere una strada, è di evitare che i vari "buchi" dei layer difensivi vadano a coincidere creando le condizioni perché avvenga l'incidente.

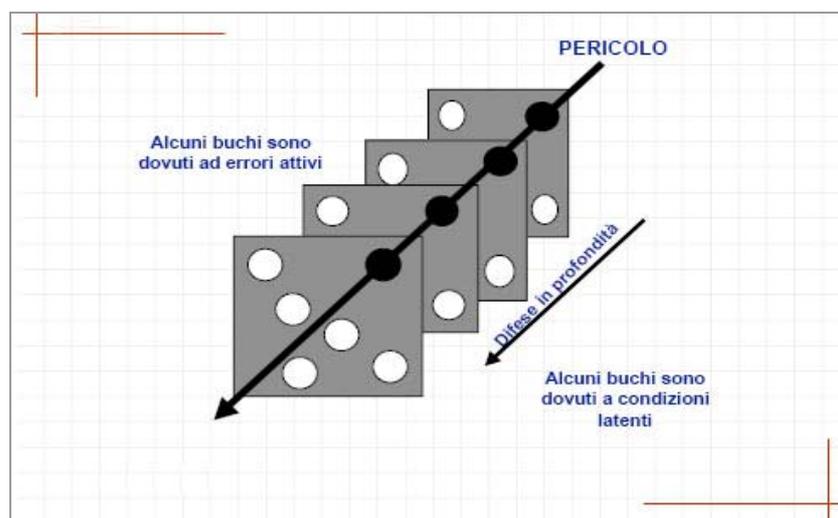


Fig. II.11 – Schematizzazione del modello dell'errore umano secondo Reason (1990).

L'approccio attuale alla sicurezza consiste nel considerare inevitabili gli errori umani, o le condizioni ambientali sfavorevoli come la nebbia; di conseguenza, non ha più senso parlare isolatamente di errori, problemi, fallimenti quanto piuttosto di diverse forme e fonti di variabilità che possono sommarsi (errore umano più nebbia più carenze sistemiche). L'obiettivo operativo si traduce nell'irrobustimento del sistema, in modo tale che possa tollerare anche queste interazioni. Questo approccio si basa sulla cosiddetta resilience dei sistemi, ovvero la capacità del sistema di rispondere in modo adeguato ad ogni possibile elemento di variabilità. All'interno di un sistema complesso, infatti, si generano in continuazione problemi poco evidenti che non possono mai essere affrontati da una struttura rigida, con una serie di barriere l'una dietro l'altra. La visione corretta dei sistemi complessi attuali è quella di una struttura in grado di rispondere agli attacchi esterni e

contemporaneamente evolversi in funzione delle modifiche in corso, allo scopo di ridurre flessibilmente le vulnerabilità latenti ed evitare al contempo sempre più la probabilità di allineamento delle stesse nelle ordinarie condizioni di esercizio.

Nei sistemi complessi i vari strati di difese possono essere oltrepassati solo a causa della connessione di diversi fattori casuali, spesso errori di tipo latente uniti a condizioni ambientali sfavorevoli e atipiche.

Capitolo 3

RAPPORTI TRA GEOMETRIA DELL'ASSE E COMPORTAMENTO DELL'UTENTE

3.1 Geometria dell'asse e fattori di rischio connessi.

La configurazione geometrica degli elementi circolari riveste un ruolo di fondamentale importanza ai fini della sicurezza stradale, sia in termini di curvature radiali che di pendenze trasversali. In molti casi, tuttavia, la scelta dei parametri geometrici delle curve circolari – e di conseguenza anche quella degli elementi di transizione ad esse collegati – viene messa a dura prova dalle condizioni operative cui le infrastrutture stradali sono soggette per effetto del comportamento degli utenti. Questo limite risulta particolarmente evidenziato nel caso delle strade appartenenti alle reti secondarie, e per lo più quelle di tipo C2 “extraurbane secondarie” e di tipo F “locali in ambito extraurbano” a carreggiata unica e doppia corsia di marcia, una per ciascuna delle direzioni dell'asse. Secondo quanto previsto dalle normative di settore per la progettazione e la costruzione delle strade, a tali categorie di opere viarie corrispondono standard geometrici e funzionali generalmente meno severi di quelli previsti per le reti stradali principali, anche se a tale differenziazione prestazionale non corrisponde – in molti casi – la stessa differenziazione dal punto di vista del comportamento degli utenti della strada. Spesso, infatti, gli elementi curvilinei dimensionati in funzione di certe velocità di progetto vengono percorsi a velocità S_{85} ben superiori e secondo traiettorie geometriche fuori-asse rispetto alla formulazione teorica dell'elemento. Tale aspetto si ripercuote inevitabilmente sia sull'assetto dinamico del veicolo sia – e soprattutto – sull'equilibrio del veicolo stesso in curva, con un conseguente incremento dell'impegno di aderenza trasversale, a geometria fissata (raggio, pendenze trasversali, lunghezza elementi transizione, parametri di scala, ecc.).

La scelta della velocità e della geometria di progetto degli elementi circolari si ripercuotono inevitabilmente anche nella verifica delle distanze di visibilità, nonché nelle verifiche di congruenza del diagramma delle velocità e della composizione planimetrica del tracciato. In altri termini, le massime condizioni di sicurezza risultano essere garantite *nelle condizioni di progetto*, seppur con un adeguato ed opportuno margine di sicurezza nella scelta dei parametri assunti. In condizioni operative differenti, gli stessi parametri possono non necessariamente ritenersi verificati. diversi studi presenti in letteratura, infatti, hanno

evidenziato come in molti casi il comportamento degli utenti della strada si discosti notevolmente da quello previsto dai modelli esemplificativi alla base delle normative per la progettazione stradale, sia in termini di velocità operative che in termini di geometria effettiva di marcia (traiettorie spontanee, raggi di curvatura naturale, ecc.).

Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi curvilinei, il maggior motivo di attenzione consiste nell'evidenza che i veicoli tipicamente percorrono le curve circolari ed anche le curve di transizione a velocità generalmente superiori a quelle previste in sede di progetto, specialmente nel caso delle strade di vecchia generazione, progettate secondo criteri diversi da quelli attuali. Ne consegue che, anche in virtù della maggiore libertà offerta ai progettisti in termini di vincoli progettuali cogenti, molte strade presentino curve circolari con raggi o pendenze inadeguati, rispetto alle quali le odierne condizioni operative di marcia risultano essere intrinsecamente al limite di sicurezza anche per le mutate caratteristiche dei veicoli, specialmente in presenza di pavimentazioni vetuste e poco performanti in termini di aderenza superficiale.

Esistono numerosi elementi relativi al coordinamento planimetrico che sono associati alla sicurezza delle curve circolari. La sinistrosità delle curve circolari – misurata in termini di frequenza oltre che di severità rispetto ad un prefissato parametro di riferimento (curvatura o raggio di curvatura) – risulta parzialmente riconducibile a cause di tipo *endogeno* (raggio di curvatura, sopraelevazione, presenza/assenza di curve di transizione, ecc.) e parzialmente a cause di tipo *esogeno* (caratteristiche geometriche del tracciato a monte delle singole curva, lunghezza degli elementi di transizione di ingresso alla curva, distanze di visibilità, ecc.) che influenzano direttamente la percezione e l'aspettativa a breve termine dell'utente e con esse la velocità di approccio all'elemento curvilineo.

Gli studi storicamente condotti per l'analisi dell'incidentalità nelle curve circolari rivelano la stretta dipendenza della geometria dell'elemento circolare con i sinistri computati. Leisch&Associates giunsero ad una descrizione particolarmente significativa del contributo della geometria sulla sicurezza delle curve circolari, attraverso l'elaborazione di numerosi dati sperimentali. La rappresentazione grafica dei tassi di incidentalità in funzione del raggio di curvatura dell'elemento circolare descrive un contesto tale per cui l'incremento differenziale di R da 200 a 300 m comporta una riduzione dei sinistri osservati ben superiore a quella osservata per un incremento di R da 900 a 1000 m. La diversa sensibilità della curva sperimentale trova corrispondenza nella presenza di un 'ginocchio' in corrispondenza del valore $R = 500$ m, al di sopra del quale l'incidentalità rilevata si mantiene trascurabile in termini sia di frequenza che di entità.

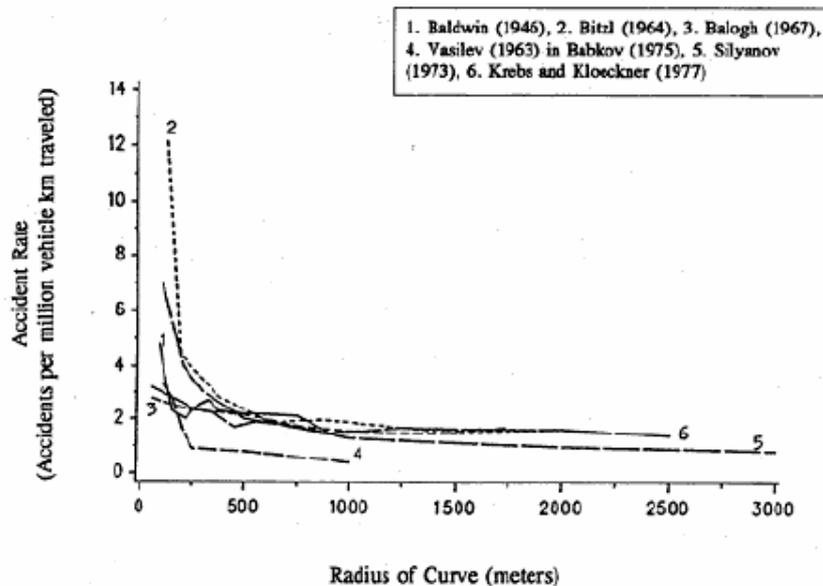


Fig. III.1 – Relazioni tra curvatura e tasso di incidentalità.

Solo successivamente, per merito di Lamm, è stata riconosciuta l'esistenza di due valori critici della curvatura rispetto all'incidentalità degli elementi circolari, consistenti nei valori di R pari a 354 m e 174 m, giacché è stato verificato che il tasso di sinistrosità di curve con raggio inferiore a 174 m risulta essere cinque volte superiore a quello di curve con raggio superiore a 354 m e che il tasso di sinistrosità corrispondente a curve con raggio compreso tra 174 m e 354 m è due volte superiore a quello di curve con raggio superiore a 354 m.

A conclusione dei numerosi studi in materia condotti finalizzata allo scopo di stabilire una relazione descrittiva dell'incidentalità in funzione della curvatura degli elementi circolari emergono senza dubbio le seguenti evidenze sperimentali:

- in numerosi studi, i tassi di incidentalità aumentano con andamento approssimativamente lineare con il grado di curvatura. Poiché il raggio di curvatura R è proporzionale al reciproco del grado di curvatura, i tassi di cui sopra evidenziano un andamento approssimativamente iperbolico rispetto al raggio di curvatura R.
- la tendenza all'aumento della sinistrosità in funzione del grado di curvatura aumenta non solo sulle strade a doppia corsia di tipo extraurbano ma anche sulle strade a corsie multiple ad accessi controllati, sia in ambito urbano che extraurbano.
- esistono pochi studi isolati che non si accordano con la tendenza poc'anzi descritta dell'aumento della sinistrosità con il grado di curvatura. Esistono altresì alcuni studi in cui tale tendenza non è lineare.

La consuetudine di collegare il grado di curvatura all'incidentalità comporta una sostanziale ambiguità. Poiché alle curve più 'strette' resta anche generalmente associato sviluppo planimetrico ridotto, dopo tutte le ricerche fin qui condotte permane ancora il dubbio se il maggior contributo alla sinistrosità debba essere ascrivibile più allo sviluppo della curva (che

è dunque minimo per curve con R piccoli) o più alle condizioni di ingresso ed uscita dell'elemento o se piuttosto sia la concorsualità di fattori ad instaurare le maggiori condizioni di insicurezza.

A margine degli studi sul contributo dei fattori endogeni alla sicurezza delle curve circolari – misurati attraverso il raggio di curvatura R degli elementi circolari – ulteriori ricerche statistico-sperimentali sono state condotte sul contributo dei fattori *esogeni* ed in particolare della lunghezza degli elementi di transizione di accesso alle curve circolari.

Infatti, oltre al contributo del grado di curvatura, si ritiene che anche le condizioni favorevoli all'incidentalità si instaurino per una più ampia concorsualità di fattori comprendenti la velocità, la capacità e le aspettative con cui gli utenti della strada si avvicinano all'inserimento nelle curve circolari, tutti fattori evidentemente influenzati dalla 'storia' pregressa e dalle informazioni geometriche ed ambientali che il tracciato ha fornito all'utente lungo il suo itinerario. Tale velocità di approccio, dunque, così come le aspettative dell'utente dipendono certamente da variabili quali la lunghezza della tangente in ingresso alla curva o la densità delle curve precedentemente affrontate, in termini di curvatura cumulata (o tortuosità del tracciato).

Una delle prime evidenze empiriche sull'importanza dei fattori esogeni alle curve rispetto alla sinistrosità delle stesse deriva da uno studio di Baldwin, ben rappresentato dalla seguente figura. In ascissa è espressa la lunghezza media di alcune tangenti esterne di approccio ad elementi curvilinei. Evidentemente, tangenti troppo lunghe anteposte a curve a raggio ridotto comportano un notevole incremento dell'incidentalità osservata.

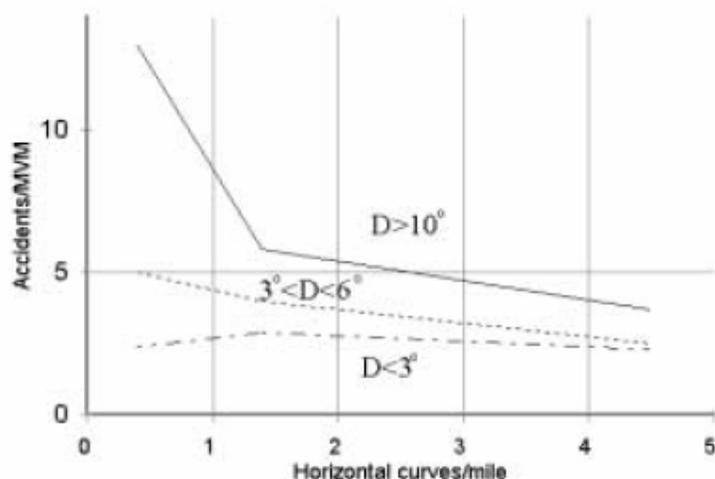


Fig. III.2 – Relazioni tra lunghezza delle tangenti di approccio e tassi di incidentalità osservati.

In tempi più recenti, si enumerano i risultati sperimentali di:

-
- Datta et al. (1983), secondo cui la lunghezza delle tangenti rappresenta un importante predittore dell'incidentalità,
 - Terhune e Parker (1986), secondo cui al contrario la lunghezza delle tangenti non contribuisce direttamente all'aumento dell'incidentalità osservata,
 - Zegeer et al. (1992), secondo cui le tangenti di lunghezza superiore ad una certa soglia possono contribuire all'innalzamento della sinistrosità della curva contigua.

Da ultimi, Fink e Krammes (1995), a conclusione dello studio sperimentale su 563 curve circolari tra New York, Washington e Texas – sempre ambientato in strade di tipo extraurbano di rango secondario a carreggiata singola e una corsia per senso di marcia - riportano che l'effetto della lunghezza delle tangenti sull'incidentalità si presenta più pronunciato e consistente in presenza di grandi gradi di curvatura. Parallelamente, i risultati conseguiti smentiscono l'ipotesi iniziale per cui tangenti di approccio più corte possano garantire margini di sicurezza maggiori.

Il significato delle evidenze sperimentali riportate si traduce operativamente nella constatazione del fatto che quando una lunga tangente è seguita da una curva a ridotto raggio di curvatura, i tassi di incidentalità tendono a crescere rapidamente. La conclusione è coerente con quanto già noto a proposito del comportamento dell'utente nella scelta delle velocità e della probabilità di errore umano di fronte a condizioni geometriche ed ambientali inaspettate.

E' chiaro, tuttavia, che la sicurezza dipende non soltanto o comunque non direttamente dalla curvatura della stessa quanto piuttosto dalle reali condizioni di esercizio del tracciato in termini di velocità praticate dagli utenti e dalle informazioni che il "sistema strada" in senso lato è in grado di fornire (rischi, pericoli, ma anche ingombri, geometrie, ecc.).

Nell'ambito della progettazione delle curve stradali, infatti, indipendentemente dalla verifica dei visibilità previste dalle normative vigenti, gli aspetti preponderanti da considerare riguardano la congruenza degli elementi modulari del tracciati immediatamente contigui alle curve in questione, nonché gli aspetti riguardanti la stabilità dei veicoli in curva, descritti dalle equazioni cardine della meccanica della locomozione e della fisica meccanica.

La congruenza del tracciato è strettamente connessa al comportamento umano, giacché è proprio dalle sue lacune che traggono origine le situazioni più rischiose - e cioè le situazioni di sorpresa – in cui l'utente spesso non è in grado di reagire tempestivamente e con la dovuta efficacia, adeguando il proprio comportamento e la propria velocità.

Alcuni autori hanno in più occasioni accertato l'opportunità di ricorrere alla velocità operativa praticata dagli utenti quale indicatore della congruenza dei tracciati stradali. Tale velocità deriva da un insieme di informazioni ed esperienze a medio e lungo periodo che suggeriscono all'utente i rischi e i pericoli connessi con la guida. In riferimento alla scelta

della velocità di approccio alle curve circolari, certamente il fattore determinante prioritario è rappresentato dall'aspettativa a breve termine – e cioè quella ereditata dal tratto immediatamente precedente – nonché dalla percezione dei rischi associati alla tipologia di curva.

Tradizionalmente, la sicurezza dinamica dei veicoli all'interno degli elementi curvilinei viene esaminata e garantita soltanto da un punto di vista meramente fisico-meccanico, prescindendo da qualsiasi induzione di tipo comportamentale, e tendendo alla sola verifica delle differenze tra i valori critici e progettuali delle accelerazioni trasversali, dell'aderenza impegnata o della velocità.

Solo di recente, alcuni ricercatori hanno manifestato l'esigenza di valutare la sicurezza delle curve circolari anche dal punto di vista comportamentali o – meglio ancora – da un punto di vista integrato tra comportamentistica e fisica-meccanica della locomozione. A tal proposito Bonneson ha studiato e verificato sperimentalmente che la velocità praticata dall'utente all'interno delle curve circolari e di conseguenza l'aderenza impegnata trasversalmente dipendono non solo dalle caratteristiche geometriche della curva ma anche dalla velocità di approccio all'elemento stesso, evidenziando così che l'aspetto comportamentale degli utenti risulta essere fondamentale per la sicurezza.

Se ne consegue che nell'ottica di una verifica più accorta ed opportuna della rischiosità delle curve circolari, le verifiche dei parametri geometrici dovrebbero essere condotte dal punto di vista della congruenza e della dinamica con una approccio unitario ed integrato non indistinto. A tal fine, l'AASHTO, sentendo l'esigenza di adeguare la normativa contenuta nel *Green Book* del 1994 ed ora del 2001 (attualmente vigente), ha commissionato un programma di ricerca che è confluito nel NCHRP Report no. 439 del 2000, a cura dello stesso Bonneson, i cui contenuti peraltro non sono ancora stati formalmente recepiti all'interno degli strumenti normativi vigenti, per quanto convalidati e pubblicati condivisi a livello internazionale.

Le modifiche che dovrebbero essere introdotte, decisamente innovative, rispetto alla normativa precedente, riguardano principalmente la scelta della velocità di progetto, la valutazione della velocità operativa, la definizione di nuovi valori per l'aderenza trasversale richiesta e la scelta della sopraelevazione. In tale modo, si riuscirebbe a garantire un'integrazione delle evidenze sperimentali conseguite nel corso degli ultimi anni riguardo l'approccio comportamentale degli utenti della strada agli elementi curvilinei dei tracciati, fin troppo spesso sottostimate in seno alle normative ed agli standard di sicurezza correntemente adottati.

Rispetto alle questioni relative all'efficacia dell'inserimento delle curve di raccordo di tipo clotoidico, le opinioni in seno alla comunità scientifica sono piuttosto contrastanti: alcuni autori sostengono che tali elementi di transizione possano contribuire significativamente alla

riduzione dell'incidentalità; altri ne evidenziano la pericolosità in termini di erronea percezione del tracciato (raggio effettivo/percepito, adeguamento della velocità, punto di ingresso in curva).

Alcuni recenti studi (Perco et al.) hanno evidenziato un effetto potenzialmente negativo sulla sicurezza della circolazione delle curve di transizione di tipo clotoidico sulla percezione e la sicurezza degli utenti della strada. I risultati sperimentali della ricerca condotta su strade di tipo extraurbano a carreggiata singola e due corsie di marcia hanno consentito di determinare la lunghezza ottimale degli elementi di transizione di accesso alle curve circolari, tali da minimizzare gli effetti negativi e potenzialmente rischiosi dovuti ad una erronea percezione della geometria del tracciato, con conseguente sottostima dei rischi ad essa connessi (adeguamento velocità, accelerazione trasversale, aderenza impegnata, ecc.).

Un compromesso tra gli esiti sperimentali dei diversi studi condotti pare essere il seguente: l'inserimento di elementi di transizione a raggio variabile (di tipo clotoidico) può avere un effetto positivo sulla sicurezza esclusivamente per curve con raggio inferiore ai 200 m (170 m per alcuni autori). Per R di curvatura superiori il contributo alla sicurezza è controverso (indifferente per alcuni autori o negativo per altri), ma sicuramente non positivo.

In accordo con diversi studi di natura statistica, si osserva come il tracciato entro cui ciascuna curva circolare è inserita abbia una notevole influenza sul grado di sicurezza (o specularmente il grado di rischio) della curva stessa. Uno studio inglese (condotto dal Road Research Laboratory dell'Her Majesty's Stationery Office già nel 1965) evidenzia come il tasso di incidentalità degli elementi curvilinei a piccolo-medio raggio di curvatura sia molto alto allorché la curvatura media dell'intero tracciato sia bassa. Tali risultati evidenziano allo stesso tempo che un tracciato caratterizzato da un grado di curvatura elevato può risultare più sicuro rispetto un tracciato essenzialmente rettilineo.

Alcuni altri studi, citati da Brenac, evidenziano che le differenze di tasso di incidentalità tra curve circolari a piccolo e grande raggio risultano fortemente ridotte al crescere degli elementi curvilinei per chilometro, ovvero al crescere della curvatura media. Più recentemente un modello ottenuto mediante una regressione (di Poisson) evidenzia che il tasso di incidentalità di un tratto curvilineo è condizionato da due importanti variabili: il raggio R e la *easy length* di approccio in entrambe le direzioni. La *easy length* è definita come la lunghezza del rettilineo o del tratto con raggio di curvatura $R > 1000$ m che precede l'elemento curvilineo di interesse. Il suo valore si desume dal calcolo della media dei valori misurati in ciascuna delle due direzioni di approccio. Evidentemente, il tasso di incidentalità cresce al diminuire di R e all'aumentare della *easy length*, confermando la rilevanza della curvatura pregressa del tracciato sulla sicurezza di ciascuna delle curve circolari.

Tali constatazioni trovano conferma ed accordo in ulteriori studi di carattere più prettamente analitico, citati ancora da Brenac: Trapp evidenzia che il principale fattore causale

dell'incidentalità in curva è il rapporto tra il raggio R della curva di interesse e quello delle curve immediatamente precedenti nella direzione di avanzamento. Altri studi di Yrpez e Ferrandez evidenziano come, lungo la rete stradale nazionale francese, le curve con raggio inferiore a 150 m precedute da rettifiche di lunghezza approssimativamente di 400 m inducono con facilità sinistri dovuti alla perdita di controllo del veicolo.

Solo di recente ci si è resi conto della rilevanza di altri fattori di rischio correlati alla sicurezza delle curve circolari, riconducibili agli aspetti più puramente percettivi e sensoriali da parte dell'utente. La visibilità in curva così come le informazioni che l'ambiente "strada" in senso lato forniscono all'utente durante la marcia rivestono un'importanza assolutamente innegabile e decisamente rilevante: ad esempio, nel caso in cui solo l'utente abbia solo una visione parziale di un tratto curvilineo (presenza di ostacoli interni od esterni alla piattaforma stradale, ecc.), è facilmente riscontrabile un errore di stima del raggio di curvatura reale della curva, con conseguenza sottostima dei rischi connessi, sia in termini di adeguamento della velocità che di impostazione della traiettoria di iscrizione in curva.

Evidentemente, la difettosità interna progettuale o manutentoria delle curve circolari ha un'incidenza determinante sulle curve a raggio medio-piccolo (<250-300 m). La principale causa di difettosità indotta si riconosce nell'irregolarità della curvatura all'interno del tratto considerato e specialmente nella presenza di raggi di curvatura localmente troppo piccoli ed incongruenti con il raggio di curvatura medio del tratto. Le irregolarità di curvatura hanno differenti spiegazioni a seconda che si tratti di strade storicizzate (prima dell'avvento dell'automobile, lo studio della congruenza degli elementi geometrici di tracciato aveva scarsa influenza), di tratti stradali caratterizzati da successioni di elementi circolari nella stessa direzione (curve composte, inviluppo di curve successive, ecc.) e tratti stradali con elementi di transizione a curvatura variabile (di tipo clotoidico) eccessivamente lunghi.

Altre difettosità di tipo endogeno degli elementi curvilinei sono riconoscibili nella larghezza delle corsie, nella presenza e nella consistenza degli elementi marginali e delle banchine e nella qualità delle caratteristiche superficiali della pavimentazione, sia in termini di aderenza che di regolarità, per quanto tali aspetti rivestano un ruolo generalmente subordinato alle verifiche di congruenza geometrica dell'intero tratto o – più opportunamente – dell'intero tracciato.

Non ultimi, meritano evidenza gli aspetti riconducibili alla percezione visiva ed informativa della pericolosità degli elementi circolari da parte dell'utente, spesso sottostimati a causa della presenza di ostacoli, di difetti di coordinamento plano-altimetrico (concavità, convessità, torsioni della piattaforma, incongruenze, ecc.), nonché per effetto dei condizionamenti ambientali dovuti alle condizioni meteorologiche, al grado di illuminazione (giorno, notte) ed all'efficacia della segnaletica stradale – sia orizzontale che verticale – quale strumento informativo degli effettivi rischi connessi alle condizioni funzionali delle diverse curve circolari.

3.2 Sinistrosità delle curve circolari rispetto alle condizioni operative osservate.

La sicurezza (o, specularmente, il rischio) delle curve circolari deriva dal corretto equilibrio tra geometria dell'asse, congruenza del tracciato, livello informativo dell'ambiente esterno e comportamento dell'utente in condizioni operative. L'introduzione del fattore "uomo" all'interno delle verifiche delle curve planimetriche rappresenta un sicuro ed importante passo in avanti nella direzione della sicurezza dei tracciati stradali, per quanto l'intrinseca aleatorietà dei fattori condizionanti il comportamento umano costituisca in ogni caso uno scoglio ineliminabile ai fini della prevenzione dell'incidentalità. Tuttavia, negli ultimi anni molti progressi sono stati compiuti sia in termini di comprensione del comportamento (traiettorie, velocità praticate, ecc.) che di analisi degli aspetti percettivi e sensoriali associati alle differenti condizioni ambientali ed ai diversi livelli di informazione e condizionamento imposti dal contesto all'utente rispetto alla sua sicurezza di marcia.

In quest'ottica, le ricerche condotte nel corso degli ultimi anni sono state espressamente orientate all'individuazione di nuovi criteri compositivi e di verifica dell'asse stradale, tali da consentire la costruzione di tracciati che meglio corrispondono alle attese degli utenti e nei quali i singoli elementi geometrici si susseguono in modo armonioso e coordinato, in modo da non costituire un fattore di sorpresa per l'utente.

Il parametro più semplice per la valutazione del comportamento degli utenti e la successiva formulazione dei criteri di congruenza dei tracciati è la velocità con la quale gli utenti percorrono gli elementi geometrici dell'asse stradale o particolari tratti omogenei di una strada.

I due criteri di congruenza comunemente utilizzati per la verifica della congruenza dei tracciati stradali (già operativamente integrati in seno ad alcune normative tecniche di settore, tra cui quella tedesca) sono quelli sperimentalmente stabiliti da Lamm nell'ambito delle sue storiche attività di ricerca.

Il primo criterio mira al raggiungimento della compatibilità di un tracciato attraverso il confronto tra la velocità di progetto V_p di un elemento o di un tronco stradale e la corrispondente velocità operativa V_{85} . Una volta ricordato che per *velocità di progetto* si intende quel valore della velocità con il quale si definiscono tutte le caratteristiche geometriche del tracciato (raggi di curvatura, distanze di visibilità, pendenze trasversali e longitudinali, ecc.), resta da definire più precisamente il concetto di *velocità operativa*: essa rappresenta la velocità praticata dagli utenti su strada, analiticamente descritta dall'85%-ile della distribuzione delle velocità rilevate su un elemento o su un tronco omogeneo di un tracciato. Le relazioni che legano la velocità operativa alle caratteristiche geometriche della strada sono di tipo empirico, desunte dalle osservazioni dirette effettuate in loco.

Il primo criterio individua dei valori di riferimento della differenza tra la velocità di progetto di un elemento (curva, rettilineo) e la corrispondente velocità operativa dell'elemento. Gli studi di

Lamm, integralmente assunti all'interno degli standard normativi tedeschi ma ben rappresentati dal punto di vista grafico dai diagrammi di velocità introdotti dalla vigente norma italiana in materia di progettazione stradale (DM 05/11/2001) per la verifica della congruenza dei tracciati, presentano tre situazioni cui corrispondono altrettanti giudizi di congruenza del tracciato:

Caso 1: Progetto buono	$ V_{85} - V_p \leq 10 \text{ km/h}$
Caso 2: Progetto tollerabile	$10 \text{ km/h} \leq V_{85} - V_p \leq 20 \text{ km/h}$
Caso 3: Progetto inadeguato	$ V_{85} - V_p \geq 20 \text{ km/h}$

Nel primo caso non si imporrà alcuna correzione e/o modifica del progetto o del tracciato in essere giacché le velocità sono perfettamente bilanciate anche nelle curve con raggio minimo. In altri termini, la congruenza del tracciato si giustifica nella corrispondenza delle condizioni operative osservate con quelle teoricamente ipotizzate in fase di progetto e dimensionamento della via, sia dal punto di vista geometrico che dal punto di vista dei dati di input (velocità). Nel secondo caso la tollerabilità del tracciato si caratterizza come accettabile pur richiedendo dei sistemi di limitazione e controllo delle velocità di esercizio, segnatamente per garantire la verifica delle visuali libere e la stabilità dinamica del veicolo in curva, sia in termini di accelerazioni trasversali ammesse che di aderenza ammissibile ed impegnabile. Nel terzo caso, la notevole discontinuità tra le due velocità comporta una situazione di potenziale pericolo, concretamente tradotta da uno stato di sollecitazione (velocità di esercizio) di entità superiore a quello per cui il tracciato è stato progettato con conseguente decadimento dei requisiti minimi di sicurezza dell'infrastruttura.

Il secondo criterio di congruenza si basa sul confronto diretto tra le velocità operative osservate negli elementi di tracciato contigui. Anche per questa fattispecie Lamm ha sperimentalmente verificato l'esistenza di tre condizioni operative cui corrispondono altrettanti giudizi di congruenza del tracciato:

Caso 1: Congruenza buona	$ V_{85,i} - V_{85,i+1} \leq 10 \text{ km/h}$
Caso 2: Congruenza tollerabile	$10 \text{ km/h} \leq V_{85,i} - V_{85,i+1} \leq 20 \text{ km/h}$
Caso 3: Congruenza inadeguata	$ V_{85,i} - V_{85,i+1} \geq 20 \text{ km/h}$

Nel primo caso la geometria dell'asse si caratterizza per il fatto di essere molto vicina alle aspettative ideali dell'utente. Il secondo è sede di potenziale rischio per alcune categorie di utenti e per determinate condizioni ambientali (condizioni meteorologiche sfavorevoli, scarsa visibilità, scarsa illuminazione, segnaletica insufficiente o poco leggibile, ecc.). Il terzo caso descrive, invece, un contesto caratterizzato da gravi difetti di coordinamento piano-altimetrico

che potrebbero tradursi in situazioni di grave rischiosità per l'utenza, sia in termini di frequenza accidentale che di severità dei rischi potenziali.

La compatibilità degli elementi geometrici elementari costituenti il tracciato plano-altimetrico nel suo complesso viene parzialmente garantita, in quasi tutte le normative di settore nei vari paesi, dall'impiego di grafici e abachi descrittivi del rapporto dei raggi circolari delle curve che si susseguono lungo lo sviluppo del tracciato, percorse in entrambe le direzioni di marcia. Tali vincoli sono per propria natura finalizzati ad assicurare variazioni minime (e dunque congruenti) delle velocità operative praticate nei tratti curvilinei dei tracciati stradali. Gli stessi grafici – eventualmente attraverso il ricorso a relazioni aggiuntive e complementari – prescrivono anche il raggio minimo che è necessario imporre in prosecuzione di un lungo rettilineo, al fine di garantirne la coerenza planimetrica e la congruenza geometrica.

Come già anticipato in precedenza, l'impiego della sola velocità di progetto nella composizione dell'asse di una strada non appare sufficientemente cautelativo ai fini del controllo e la riduzione dei tassi di incidentalità, giacché emerge sempre più chiaramente l'evidenza del fatto che le condizioni operativamente osservate su strada possono in taluni casi differire in maniera e misura sostanziale rispetto alle corrispondenti ipotesi di progetto, tal sì che non di rado si registra una notevole differenza tra la velocità per la quale un certo elemento stradale viene progettato e quella alla quale gli utenti la percorrono. Tale fenomeno trova la propria ragion d'essere nella concorsualità di fattori interni ed esterni talvolta ritenuti secondari ma comunque non trascurabili.

Ricercatori di tutto il mondo in periodi più o meno recenti hanno affrontato tale argomento esaminando con attenzione il comportamento dell'utente sui rettilineo, sulle curve circolari e sulle curve di transizione delle strade extraurbane a due corsie a doppio senso di marcia, analizzando statisticamente dapprima solo la distribuzione delle velocità e l'impostazione delle traiettorie e solo in un momento successivo addentrandosi anche all'interno degli aspetti relativi alla percezione umana ed i meccanismi di azione-reazione fisiologici alla base dei processi di "scelta" ed impostazione del proprio atteggiamento su strada in funzione delle differenti condizioni al contorno.

L'intento iniziale si è sempre ricondotto al tentativo di ricercare il valore della velocità più rappresentativo del comportamento degli utenti su certi tronchi stradali, anche di notevole lunghezza pur con caratteristiche geometriche affini. Solo successivamente si è cercato di correlare la V_{85} con le principali caratteristiche geometriche dei singoli elementi di un tracciato.

Le relazioni esistenti tra velocità operative e caratteristiche geometriche del tracciato vengono solitamente distinte in due gruppi distinti a seconda che la velocità venga messa in relazione con la geometria della sola curva circolare o dell'intero tracciato pregresso, attraverso la curvatura media. Evidentemente, le relazioni del primo tipo non rappresentano

la soluzione migliore giacché sono formulate in funzione delle sole ed esclusive variabili caratteristiche delle curve, indipendentemente dalle variabili condizionanti a monte di esse. Il pregio di tali relazioni è prevalentemente quello di garantire la continuità della funzione $V_{85} = V_{85}(R)$ tra rettilineo e curve circolari.

La seconda tipologia di relazioni è mirata alla derivazione delle velocità operative in funzione delle caratteristiche geometriche dell'intero tracciato di inserimento, attraverso la parametrizzazione della tortuosità del tracciato realizzata mediante la curvatura media. Molti autori - tra cui il già citato Brenac e McLean - sostengono con forza la tesi secondo cui il comportamento dell'utente all'interno delle curve circolari sia inevitabilmente condizionato dalla 'storia' geometrica del tracciato e - conseguentemente - dalle aspettative che l'utente si è creato nel corso dell'itinerario percorso. L'impostazione delle traiettorie e delle velocità in curva dipende - in conclusione - dalla velocità ambientale imposta dal tracciato all'utente in funzione della propria configurazione geometrica e funzionale. In questo senso, l'attribuzione di assegnate caratteristiche geometriche e funzionali al tracciato (sia a livello di coordinamento plano-altimetrico, che di congruenza e continuità degli elementi geometrici costitutivi, che del complesso informativo posto a corredo dell'infrastruttura) costituisce il presupposto secondo cui l'utente presceglie la propria velocità desiderata di marcia lungo il tracciato, ovvero quella velocità che l'utente stesso cercherà di conservare lungo l'intero itinerario, indipendentemente - o marginalmente in funzione - dalla geometria dei singoli elementi di tracciato. La circostanza può evidentemente rappresentare un fattore di rischio potenziale (e possibile) laddove si venga ad accertare che il sistema informativo a corredo del tracciato (segnaletica, illuminazione, ecc.) nonché la congruenza geometrica dello stesso non siano adeguati allo scopo e che al contrario possano contribuire alla persistenza delle condizioni di 'sorpresa' dell'utente in corrispondenza di alcuni punti singolari del tracciato, tipicamente riconosciuti nelle curve circolari di raggio inferiore ai 300 m, specialmente se non precedute da curve di transizione a raggio variabile di tipo clotoidico.

Gli studi sull'incidentalità, in relazione alle caratteristiche geometriche degli elementi costituenti i tracciati stradali, hanno messo chiaramente in evidenza che un'importante causa dell'aumento della sinistrosità rilevata non è dovuta al contributo dell'elemento isolatamente considerato quanto piuttosto a quello del contesto entro cui tale elemento è inserito. Una curva con un piccolo raggio non è, infatti, pericolosa in quanto tale ma lo diventa se è preceduta da un tracciato che consente all'utente la conservazione di una velocità eccessiva non compatibile con la sicurezza. Le verifiche di congruenza introdotte da Lamm rispondono più specificatamente allo scopo di attestare che i tracciati ben corrispondono alle aspettative dell'utente, poiché è ormai ampiamente verificata l'evidenza sperimentale secondo cui l'utente imposta la propria velocità sulla base della propria esperienza, in funzione delle

caratteristiche geometriche complessive del tracciato, cercando di mantenere tale velocità su tutti i tratti aventi caratteristiche uniformi (o non troppo difformi).

Negli ultimi anni hanno visto la luce diversi modelli descrittivi delle relazioni intercorrenti tra geometria e velocità operative, quasi tutti basati sulla formulazione di ipotesi di lavoro semplificate rispetto alle condizioni del moto, considerando che la velocità all'interno dei tratti curvilinei si mantenga costante e che le fasi di accelerazione e decelerazione rispettivamente in ingresso e in uscita dalle curve rimanga fissata in 0.85 m/s^2 .

Nell'ambito del progetto di ricerca IASPIS (1998-2000), gli studi condotti dalle unità operative dell'Università di Trieste hanno confermato le conclusioni già consolidate in letteratura secondo cui la velocità operativa V_{85} dipende da diversi parametri, in particolare dalla geometria della curva (curvatura CD) e degli elementi che la precedono (curvatura CD_p), efficacemente descritti da una curva polinomiale di secondo grado nello spazio $CD-V_{85}$ del tipo:

$$V_{85} = k_1 \cdot CD^2 + k_2 \cdot CD + k_3$$

L'osservazione sperimentale ha altresì evidenziato che in taluni casi – rispetto alle velocità di progetto corrispondenti alle caratteristiche geometriche del tracciato (spesso e volentieri riferiti a standard progettuali precedenti anche alle norme CNR n. 78/80) - le V_{85} risultano essere superiori anche del 30% per velocità inferiori ai 70 km/h. Inoltre, si è constatato che le velocità in curva dipendono dalla velocità V_{85} nelle curve precedenti e dalla lunghezza dei rettifili immediatamente precedenti, secondo espressioni analitiche del tipo:

rettifili corti $V_{85} = 34.4 + 0.032 \cdot L + 0.56 \cdot V_{85,cp}$

rettifili lunghi $V_{85} = -16.9 + 25.07 \cdot \text{Log}(L) + 0.587 \cdot V_{85,cp}$

Rispetto alle ipotesi semplificate già ricordate a proposito delle accelerazioni e decelerazioni praticate dagli utenti negli elementi di transizione delle curve circolari, si è sperimentalmente osservato che - al contrario - nel caso di rettifili lunghi, la decelerazione per l'ingresso in curva risulta scomposta in due quote: una prima quota consistente in una fase di decelerazione minimale ed una seconda quota più violenta ($1-1,4 \text{ m/s}^2$) registrata in corrispondenza del punto di riconoscimento reale della geometria dell'elemento da parte dell'utente in transito. In uscita le ipotesi formulate restano tendenzialmente confermate dalle evidenze sperimentali.

Un successivo ulteriore affinamento degli studi sperimentali ha portato alla formulazione delle seguenti relazioni empiriche (Marchionna et al.)

curve	$V_{85} = \frac{95}{\left(1 + \frac{450}{R^{1.5}}\right)}$
rettifili indip.	$V_{85} = k_1 \cdot V_{85,cp} + k_2 \cdot \text{Log}(L) + k_3$
rettifili dipend.	$V_{85} = k_1 \cdot V_{85,cp} + k_2 \cdot L + k_3$

Oltre agli studi predetti, la letteratura riferisce l'esistenza di ulteriori modelli predittivi della V_{85} nel caso degli elementi curvilinei, in funzione delle specifiche condizioni plano-altimetriche del tratto rispetto all'intero tracciato.

Tra essi i più famosi sono certamente quelli di Lamm, ma anche i modelli proposti da Anderson, Fitzpatrick et al (riassunti in tabella) hanno ottenuto notevole successo e guadagnato consensi da parte della comunità scientifica. Nell'ambito del progetto di ricerca intitolato "Evaluation od design consistency methods for two-lane rural highways", commissionato dalla FHWA tra il 1995 ed il 1999, sono state monitorate ben 200 curve circolari con caratteristiche plano-altimetriche differenti, al fine di ricostruire la dipendenza delle velocità operative praticate dagli utenti dalla geometria effettiva dei singoli elementi nonché per verificare la sensibilità dei differenti modelli descrittivi-predittivi all'influenza della geometria verticale dell'asse, valutata mediante la pendenza longitudinale e la presenza di sacche e dossi in corrispondenza della curva osservata.

Tab. III.1 – Quadro sinottico delle principali relazioni empiriche tra V_{85} e curvatura (FHWA, 2000).

Elemento geometrico	Equazione	Osserv.	R ²
Curva planimetrica con: -9% < i < -4%	$V_{85} = 102.10 \cdot \frac{3977.13}{R}$	21	0.58
Curva planimetrica con: -4% < i < 0%	$V_{85} = 105.98 \cdot \frac{3709.90}{R}$	25	0.76
Curva planimetrica con: 0% < i < 4%	$V_{85} = 104.82 \cdot \frac{3574.51}{R}$	25	0.76
Curva planimetrica con: 4% < i < 9%	$V_{85} = 96.61 \cdot \frac{2752.19}{R}$	23	0.53
Curva planimetrica ed altimetrica concava	$V_{85} = 105.32 \cdot \frac{3438.19}{R}$	25	0.92
Curva planimetrica ed altimetrica convessa (visibilità critica)	$V_{85} = 103.24 \cdot \frac{3576.51}{R}$	22	0.74

Per quanto riguarda gli autoveicoli, si è verificato che la variabile indipendente più attendibile all'interno delle equazioni di regressione è la curvatura, definita come il reciproco del raggio R di ciascuno degli elementi circolari. Le osservazioni sperimentali conseguenti alla vasta campagna di misura hanno portato alle seguenti conclusioni di carattere generale:

- 1) le velocità operative sulle curve circolari sono molto prossime a quelle registrate lungo le tangenti di approccio per $R > 800$ m;
- 2) in tale ipotesi ($R > 800$ m), l'influenza della pendenza longitudinale è trascurabile;
- 3) le velocità operative sulle curve circolari si attestano su valori particolarmente elevati in presenza di raggi $R < 250$ m.

Contestualmente alla verifica del comportamento dell'utente all'interno delle curve circolari, l'attenzione dei ricercatori si è focalizzata anche sul significato ed il ruolo delle curve di transizione di tipo clotoidico. Il confronto incrociato tra elementi di tracciato affini per caratteristiche geometriche generali ma distinti per la presenza (in alcuni casi) o assenza (in alcuni altri) di curve di transizione ha consentito di stabilire univocamente che l'impiego delle clotoidi non influisce in maniera così netta sulle velocità operative praticate dagli utenti.

Al fine di valutare la reale congruenza degli elementi geometrici di tracciato, il progetto di ricerca si è anche interessato dell'analisi sperimentale e conseguentemente della ricostruzione modellistica delle accelerazioni e decelerazioni realmente praticate (accettate) dagli utenti su strada, sia per valutare la percezione della geometria di tracciato da parte dell'utente (percezione del rischio, delle curvature, delle distanze, della visibilità) sia per valutare l'effettiva efficacia degli standard geometrici di comune impiego nell'ambito della progettazione dei tracciati stradali.

A seguito delle attività di ricerca e delle evidenze sperimentale derivate, le equazioni di congruenza dei tracciati stradali di Lamm sono state integrate degli aspetti relativi alle accelerazioni e decelerazioni ammesse nelle zone di transizione tra rettili e curve circolari.

Tab. III.2 – Espressione tabulare dei criteri di congruenza di Lamm.

Progetto	Variazione di velocità	Decelerazione (m/s^2)	Accelerazione (m/s^2)
Buono	$ V_{85} - V_p \leq 10$ km/h	1.00-1.48	0.54-0.89
Tollerabile	10 km/h $\leq V_{85} - V_p \leq 20$ km/h	1.48-2.00	0.89-1.25
Inadeguato	$ V_{85} - V_p \geq 20$ km/h	> 2.00	> 1.25

Nell'ambito delle proprie attività di ricerca – seguendo un approccio sperimentale del tutto peculiare basato anche sull'impegno di aderenza all'interno delle curve circolari - Bonneson è giunto alla formulazione di un modello predittivo delle velocità operative nelle curve basato sulla conoscenza delle velocità di approccio alle stesse, evidenziando come la conoscenza del comportamento dell'utente all'istante dell'ingresso in curva possa risultare fortemente condizionante per la previsione delle condizioni operative reali. Il modello è costruito in modo tale da considerare tanto gli aspetti geometrici dell'elemento curvilineo (attraverso il raggio R

e la sopraelevazione e) quanto quelli cinematica come la velocità di approccio V_c , definita come l'85%-ile della distribuzione delle velocità registrate in corrispondenza della sezione di ingresso in curva. Evidentemente, trattandosi di un modello basato su caratteristiche locali, per di più espressamente basato sulla velocità operativa di approccio alla curva, la sua applicazione è limitata al solo caso di misura diretta dei valori di velocità, rendendone impossibile l'astrazione soprattutto come via progettuale.

$$V_c = 63.5 \cdot R \cdot (-0.0133 + \sqrt{(0.0133)^2 + \frac{4 \cdot (e + 0.256 + 0.011 \cdot V_a)}{127 \cdot R}}) \leq V_a$$

L'idea consolidata secondo cui la velocità operativa praticata dagli utenti sul generico elemento circolare del tracciato dipende non solo dalla geometria dell'elemento stesso ma soprattutto dalle caratteristiche di tortuosità ed informazione ambientale del tracciato a monte dello stesso ha trovato concretamente applicazione nell'introduzione del concetto di *velocità ambientale* in affiancamento della già descritta velocità operativa.

La velocità ambientale rappresenta quel valore di velocità che l'utente sceglie di mantenere in un certo tratto in condizioni di flusso libero e non condizionato dalla geometria del tracciato. Esso corrisponde al valore massimo fra le velocità operative nei rettilinei più lunghi o nelle curve di raggio più ampio, appartenenti ad un unico tratto omogeneo. Essa è funzione delle caratteristiche generali di un certo tratto e non solo dell'elemento isolato ed è determinata in funzione del tipo di ambiente attraversato (pianeggiante, ondulato, collinare, ecc.) e dal raggio approssimativo delle curve contenute in tale tratto.

Uno dei principali riferimenti internazionali nella predizione della velocità ambientale in funzione delle caratteristiche del tracciato è quello costituito dal modello descritto da McLean nell'ambito delle proprie attività di ricerca. L'espressione generale del modello è di seguito riportata, in funzione del raggio di curvatura degli elementi geometrici di tracciato e della velocità ambientale, intesa come il massimo valore registrato fra le velocità operative nei rettilinei più lunghi o nelle curve di più ampio raggio, appartenenti ad unico tratto omogeneo.

$$V_{85} = 53.8 - 3.260 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) + 85.000 \cdot \left(\frac{1}{R^2}\right) + 0.464 \cdot V_{amb}$$

La velocità ambientale – così come definita ed intesa nel modello di McLean – rappresenta in buona sostanza la velocità desiderata che gli utenti scelgono di praticare e mantenere all'interno di un assegnato tratto di strada in condizioni di flusso libero e in assenza di condizionamento da parte delle caratteristiche geometriche del tracciato. Il valore della velocità ambientale deriva dalla parametrizzazione del tipo di ambiente attraversato e della

curvatura media degli elementi di tracciato contenuti nel singolo tratto. Una delle espressioni più immediate per la determinazione di tale valore è quello ricostruito a mezzo indagini sperimentali dall'Università di Trieste nell'ambito delle diverse attività di ricerca condotte nel corso degli ultimi anni.

$$V_{amb} = k \cdot CCR^{-0.1875}$$

Un ulteriore modello predittivo della V_{85} in funzione della V_{amb} e della curvatura è quello definito da Kanellaidis et al. (di seguito riportato), che – pur basandosi su realtà sperimentale e campioni di indagine differenti – trova un accordo piuttosto evidente con l'espressione di McLean sopra ricordata.

$$V_{85} = 17.4 - 3244.8 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) + 114078 \cdot \left(\frac{1}{R^2}\right) + 0.85 \cdot V_{amb}$$

Le osservazioni sperimentali formulate nell'ambito delle attività di ricerca sulla determinazione della velocità ambientale hanno portato alle seguenti conclusioni di carattere generale:

- tipicamente, le velocità operative V_{85} si attestano su valori superiori a quelli di progetto dei singoli elementi geometrici di tracciato, sia in rettilineo che in curva;
- in corrispondenza delle curve circolari con raggio $R < 250$ m, si riscontra un impegno di aderenza del tutto superiore a quello previsto per le stesse fattispecie dalle normative;
- la velocità ambientale risulta fortemente correlata alla tortuosità del tracciato attraverso il parametro 'curvatura media' da cui dipende linearmente;
- i modelli predittivi della V_{85} in funzione della V_{amb} e della curvatura (o del raggio di curvatura) presentano coefficienti di correlazione molto elevati rispetto alle osservazioni sperimentali rilevate, confermando l'efficacia della V_{amb} nella descrizione del comportamento dell'utente su strada.

3.3 Impegno di aderenza trasversale in condizioni operative e fattori di rischio conseguenti.

Storicamente la disamina del comportamento dell'utente sulle strade si è contraddistinto per il suo interesse verso le caratteristiche geometriche dell'asse, con particolare attenzione alle pendenze trasversali, alle sopraelevazioni in curva ed alle distanze di visibilità sia in curva che in rettilineo. Parallelamente ad esso, tuttavia, si ritiene di notevole interesse il tema

dell'analisi del comportamento dell'utente in relazione alle caratteristiche funzionali e prestazionali delle strade, con esplicito riferimento allo stato di manutenzione delle pavimentazioni, ai fini sia della sicurezza che del comfort di guida.

La funzionalità delle strade può condizionare la guida dell'utente in via *diretta*, ovvero imponendo delle anomalie nelle traiettorie o determinando l'insorgenza di comportamenti del tutto imprevisti sulla sede stradale, e per via *indiretta*, ovvero offrendo all'utente una percezione errata della strada stessa, con particolare riferimento alle caratteristiche di aderenza e sicurezza, condizionando in maniera controproducente il rapporto fiduciario tra utente e strada.

La sicurezza attiva delle infrastrutture stradali poggia in maniera determinante sul fenomeno dell'aderenza tra pneumatico e pavimentazione. Per aderenza si intende l'insieme di forze (normali e tangenziali) che si generano, durante il movimento del veicolo, nella zona di contatto tra pneumatico e superficie del fondo stradale. Le modalità con cui il pneumatico genera e trasmette queste forze determina il tipo di risposta del veicolo in manovre tipo la frenata, l'accelerazione longitudinale e trasversale, la marcia in pendenza, nelle più svariate condizioni ambientali .

Il fenomeno dell'aderenza risulta essere condizionato da diversi fattori quali il regime dinamico rototraslatorio del pneumatico (carichi ed effetti elasto-viscosi), le condizioni e proprietà dei corpi a contatto, la relativa geometria (micro- e macrotessitura, spessore del battistrada, ecc.), nonché la presenza eventuale di fluidi, detriti e polveri e la relativa caratterizzazione geometrico-meccanica (altezza, densità e pressione dei fluidi, ecc.).

La reazione complessivamente esercitata dal piano di via sul pneumatico è la risultante di un sistema di azioni tangenziali e normali generalmente non simmetrici: in particolare, le tensioni normali hanno risultante non passante per il baricentro del pneumatico ma, al contrario, traslata "in avanti", nella direzione del moto del veicolo. In altri termini, esse crescono sino a raggiungere un massimo nella parte anteriore della superficie di contatto. Le tensioni tangenziali, invece, aumentano quasi linearmente nella direzione opposta. Al crescere della velocità, la porzione di interfaccia in cui le tensioni di aderenza riescono ad eguagliare quelle trasmesse dal pneumatico tende a diminuire e, in termini macroscopici, ciò costituisce una causa della diminuzione del coefficiente di aderenza longitudinale con la velocità del veicolo. A parità di condizioni di sollecitazione imposta, dunque, la risposta della pavimentazione in relazione all'aderenza dipende pressoché esclusivamente ai microfenomeni che si realizzano all'interno dell'area di contatto pneumatico-fondo stradale, i quali restano inevitabilmente associati (a parità di condizioni) alle caratteristiche superficiali di tessitura della pavimentazione.

L'aderenza in condizioni di fondo bagnato dipende dai fenomeni di adesione molecolare, di isteresi della gomma nella deformazione del pneumatico nonché dalla capacità drenante

della superficie stradale. L'adesione molecolare si instaura tra i due corpi a contatto (battistrada e asperità degli inerti) determinando un effetto di *grip* allo scivolamento del pneumatico. Per ovvie ragioni, il contatto tra i due corpi deve essere "asciutto", pena la diminuzione della resistenza allo scivolamento della superficie. L'adesione molecolare è ascrivibile principalmente alla microtessitura superficiale delle pavimentazioni.

Il fenomeno dell'isteresi del pneumatico è associato alla deformabilità visco-elastica dello stesso nel superamento delle asperità della superficie, la quale comporta una distribuzione asimmetrica di pressioni sulla superficie, aventi componente orizzontale in opposizione allo slittamento. Il predetto fenomeno è del tutto indipendente dalla presenza di acqua od altri agenti disturbanti sul piano viabile, in presenza dei quali l'aderenza disponibile risulterà essere diminuita ma mai del tutto eliminata.

L'ultimo fenomeno riguarda il comportamento della superficie in condizioni di pioggia o, in maniera più precisa, analizza l'interazione del pneumatico e della pavimentazione in presenza di acqua. Secondo la suddivisione di Gough e Moore, l'area di contatto tra il pneumatico e la superficie stradale bagnata è distinguibile nelle tre zone di penetrazione, di transizione e di contatto. Nella prima, l'acqua presente sulla superficie viene progressivamente espulsa attraverso i microcanali naturalmente formati dalla macro-tessitura della pavimentazione, dipendendo dalla forma e dalla scolpitura del pneumatico e dalle caratteristiche tessiturali stesse. In questa zona, il pneumatico non è a diretto contatto con la superficie e di conseguenza l'aderenza è nulla.

La seconda zona è quella in cui, pur in presenza di un velo idrico residuo, inizia ad instaurarsi un contatto diretto tra le asperità della pavimentazione ed il pneumatico, con l'insorgenza di forze reagenti e resistenti da parte del piano viabile rispetto alle sollecitazioni dinamiche del moto del veicolo. Nella terza zona, si verifica il contatto completo tra i due corpi con lo sviluppo quasi totale delle forze di aderenza in condizioni di asciutto.

A livello microscopico, l'aderenza è principalmente connessa ai campi della micro- e della macro-tessitura: le forti pressioni di contatto che si generano tra le asperità degli inerti (microtessitura) ed il pneumatico favoriscono la rottura del velo idrico e di conseguenza il contatto asciutto tra i due corpi, innescando il meccanismo dell'adesione molecolare anche in condizioni di fondo bagnato. Per velocità ridotte (inferiori ai 50 m/h) la microtessitura costituisce il fattore di aderenza prevalente nella determinazione dei valori di aderenza. La macro-tessitura, invece, risulta essere determinante nel fenomeno dell'isteresi del pneumatico e del conseguente sviluppo di forze orizzontali di reazione che si oppongono allo slittamento delle ruote. In corrispondenza di velocità elevate (superiori ai 50 km/h), il tempo di contatto dei pneumatici con la pavimentazione è talmente ridotto che l'isteresi diventa il fattore dominante per l'aderenza, essendo sempre più difficile penetrare il film d'acqua nel tempo disponibile. A velocità elevate, la macro-rugosità superficiale deve essere

tale da far “sentire” le asperità della pavimentazione anche in presenza di veli idrici non rotti. Tuttavia, alcuni spunti di ricerca hanno evidenziato l’influenza della macrotessitura anche per valori di velocità di tipo urbano, e specialmente per velocità comprese tra i 20 ed i 50 km/h, in corrispondenza delle quali si osserva una diminuzione dell’aderenza disponibile anche a parità di microtessitura ed in dipendenza dalla sola macrotessitura. La macrotessitura riveste anche un ruolo fondamentale in virtù della naturale predisposizione alla formazione di microcanali tra le vacuosità della tessitura superficiale, aventi la funzione di serbatoio e di drenaggio delle acque superficiali di piattaforma. Il beneficio risulterà essere tanto più marcato tanto maggiore sarà la MTD della superficie, anche se in realtà a parità di profondità media della tessitura possono non corrispondere le stesse proprietà drenanti, dipendendo quest’ultima maniera più specifica dalla geometria della macrotessitura piuttosto che dalla sola ampiezza.

Per quanto appena evidenziato, i principali fattori di rischio associati alla tessitura delle pavimentazioni stradali constano nell’usura della macrotessitura e nella levigabilità della microtessitura. Per ovvie ragioni temporali, la maturazione e poi l’invecchiamento dei conglomerati bituminosi superficiali delle infrastrutture stradali comportano il decadimento delle prestazioni funzionali in termini di aderenza, misurabile in termini di resistenza allo scivolamento attraverso l’apparecchio portatile a pendolo e attraverso il metodo volumetrico dell’altezza in sabbia, tipicamente riservato al rilievo della MTD della superficie. Il deterioramento delle prestazioni funzionali iniziali della superficie dipende da diversi fattori non esclusivi e talvolta concomitanti come la qualità, la geometria e le caratteristiche petrografiche degli inerti, la qualità e la quantità del legante, la geometria effettiva dell’infrastruttura. A tal fine, negli ultimi anni sono stati definiti diversi modelli di degrado dell’aderenza superficiale, con particolare riferimento alla microtessitura superficiale, essendo quest’ultima eminentemente coinvolta nelle misure di aderenza ad alto rendimento. Tuttavia, essi si prestano ad essere di notevole utilità e rigore in termini di *sicurezza intrinseca* della strada, ovvero in termini di *sicurezza assoluta* della pavimentazione.

Una prima riflessione maturata in proposito si riferisce al *rapporto fiduciario* tra l’utente e la pavimentazione, specialmente in condizioni di bagnato. Nella maggior parte dei casi, l’utente della strada non ha coscienza dello stato effettivo di manutenzione della pavimentazione e dunque delle caratteristiche superficiali di aderenza e regolarità che conseguono (tale aspetto potrebbe prestarsi anche alla conduzione di interviste mirate su campioni significativi di utenti). Di conseguenza, il comportamento dell’utente si caratterizza per l’essere prevalentemente condizionato dalla geometria della strada (larghezza piattaforma, larghezza corsie, distanze di visibilità, raggi planimetrici) ma in misura trascurabile dallo stato di manutenzione delle strade: una prima ipotesi di sviluppo di tale aspetto potrebbe essere quella di verificare le velocità di percorrenza e le traiettorie preferenziali dei veicoli su

strade con caratteristiche superficiali e stato di manutenzione del tutto diversi al fine di stabilire una relazione (se esiste) tra comportamento e funzionalità.

In condizioni di bagnato, ad esempio, il rapporto fiduciario dell'utente nei confronti della strada denota una parziale diminuzione, soprattutto nel caso di superfici stradali molto "chiuse" e poco permeabili. Tuttavia, la ricerca condotta nell'ambito del progetto di ricerca VERT diversi anni fa aveva portato a concludere che il comportamento dell'utente su fondo asciutto e su fondo bagnato, dal punto di vista delle traiettorie e delle velocità di percorrenza (accelerazioni centrifughe), non differisce in maniera e misura sostanziale. Ne deriva che:

1. l'utente non percepisce la differenza prestazionale della pavimentazione nelle due condizioni di asciutto e bagnato, con riferimento alle proprietà di aderenza della tessitura;
2. la necessità di garantire elevati standard prestazionali in termini di tessitura anche sulle strade minori, caratterizzate troppo spesso da standard di sicurezza del tutto inadeguati alla tipologia di traffico servito.

Rispetto a quanto appena evidenziato acquistano maggior peso e rilevanza le conclusioni riferite dal progetto di ricerca IASPIS al capitolo 2 ("Fattori condizionanti il comportamento e l'incidentalità") in merito al comportamento dell'utente nelle fasi di avvicinamento alle curve circolari, specialmente quelle con raggi minori: un primo fatto è che in molti casi la velocità operativa nei tratti curvilinei risulta essere apprezzabilmente superiore a quella prevista in fase di progetto e descritta nei diagrammi di velocità di cui al D.M. 5 novembre 2001. Un secondo fatto, evidenziato per l'appunto dagli esiti del progetto di ricerca IASPIS, consiste nell'aleatorietà e diversità statistica delle traiettorie degli utenti nella fase di ingresso in curva, ovvero nella fase di decelerazione: i dati riferiti all'epoca dalla ricerca riportavano valori di decelerazione ben superiori a quelli previsti dai modelli di progetto, con indubbie conseguenze dal punto di vista del dimensionamento geometrico degli elementi di tracciato. Ciò che preme sottolineare ai fini delle considerazioni di cui sopra è che la composizione dei tre fattori *velocità operativa-azioni dinamiche di decelerazione-stato della pavimentazione* risulta si caratterizza per l'essere di fondamentale importanza nell'ottica della sicurezza stradale attiva, a pari livello con la disamina delle caratteristiche prettamente geometriche e progettuali.

Il controllo del veicolo all'interno degli elementi curvilinei di tracciato dipende fortemente dalla percezione della curvatura e del rischio da parte dell'utente. La semplificazione del moto veicolare all'interno delle curve circolari riconduce alle leggi della fisica meccanica elementari, composte dai due contributi di accelerazione centrifuga ed accelerazione tangenziale.

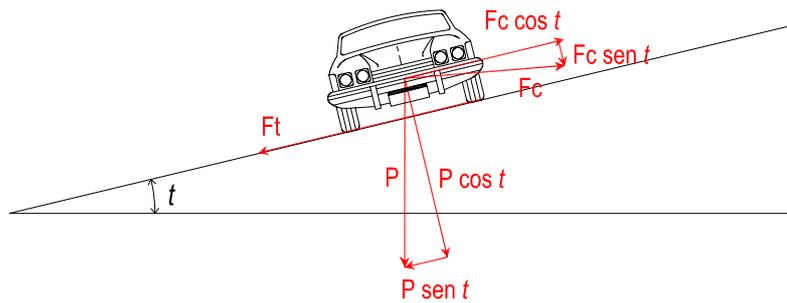


FIG. III.3 - Forze di equilibrio agenti sul veicolo in curva.

In campo stradale, lo schema tradizionalmente adottato nell'analisi dell'equilibrio allo sbandamento dei veicoli in curva consiste nell'assimilazione del veicolo isolato ad una sua sezione piana, soggetta all'azione di forze diverse. In questa approssimazione, le forze prese in esame sono applicate rispettivamente al baricentro del veicolo, per quanto concerne le forze di massa (forza centrifuga e forza-peso) ed alle tracce delle sezioni di appoggio delle ruote, per quanto riguarda le forze di contatto (aderenza). In questo modo, il problema dell'equilibrio e della sicurezza della circolazione viene espresso dal seguente postulato: occorre assicurare che la somma vettoriale delle componenti (delle forze di massa), parallele alla piattaforma stradale, risulti – in ogni momento – inferiore od al limite uguale all'aderenza offerta dal contatto tra pneumatici e pavimentazione. Si ritiene generalmente valida, in sostanza, l'asserzione per cui la compensazione dell'accelerazione trasversale centrifuga ($a_t = V^2/R$) come somma di due contributi, riconducibili rispettivamente alla componente dell'accelerazione di gravità parallela alla piattaforma stradale ($g \cdot \tan \alpha$) ed al termine di aderenza ($g \cdot f_t$), secondo la consueta legge descrittiva:

$$\frac{V^2}{R} = 127(\tan t + f_t)$$

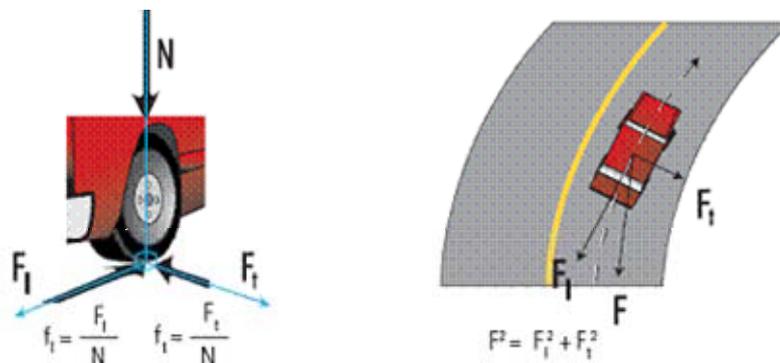


FIG. III.4 - Schematizzazione delle forze di aderenza attive all'interno delle curve circolari.

Rispetto ai valori numerici che possono assumere q e f_t , valgono le seguenti considerazioni. Se tutti i veicoli marciassero alla stessa velocità, ad esempio elevata, si potrebbe assegnare una certa sopraelevazione trasversale - collegata alla velocità stessa attraverso la legge precedentemente descritta - tale da consentire, per un dato raggio R , la totale compensazione della forza centrifuga.

Nella realtà operativa delle strade in esercizio, i veicoli si muovono con una distribuzione delle velocità altamente variabile e variegata. In particolar modo, per i veicoli pesanti, sussiste il rischio concreto del ribaltamento in curva dovuto alla sopraelevazione, anche a velocità basse, ragion per cui si impone di individuare un corretto ed efficace bilanciamento tra pendenza e aderenza in senso trasversale.

La relazione di equilibrio allo sbandamento si può anche scrivere nella seguente forma:

$$(q + f_t) = \frac{v^2}{g} \cdot \frac{1}{R}$$

in cui il contributo combinato della sopraelevazione e dell'aderenza trasversale (stabilizzanti)

variano in funzione della curvatura $\frac{1}{R}$ attraverso la costante di velocità $\frac{v^2}{g}$.

Tuttavia, in molti casi tale schematizzazione rischia di sottostimare la reale vulnerabilità dell'equilibrio dinamico in curva poiché le forze di massa e di aderenza si caratterizzano per l'essere qualitativamente diverse, benché quantitativamente confrontabili: il peso, infatti, rappresenta una grandezza intrinseca ed invariante del corpo in movimento, non così per le forze di aderenza che risultano affette da possibili improvvisi decadimenti, per via di vari fattori esogeni, come già ricordato.

In riferimento all'analisi delle condizioni operativamente riscontrabili lungo le curve circolari della rete stradale esistente, è importante sottolineare l'importanza del fattore 'uomo', misurata attraverso il suo comportamento di approccio ai diversi elementi di tracciato.

Nel corso della sezione dedicata alla disamina delle velocità operative, si è più volte insistito sul fatto che il comportamento dell'utente è fortemente condizionato dalle informazioni e dal grado di rischi percepiti lungo lo sviluppo plano-altimetrico della via. Si noti che il rapporto di subordinazione tra utente e geometria di tracciato rappresenta il fulcro reale di molti dei progetti di ricerca tuttora in corso, finalizzati per l'appunto alla verifica del fatto che sia effettivamente il tracciato a dover dettare le condizioni di marcia all'utente o piuttosto che sia l'utente a suggerire i criteri e le modalità di progettazione di tracciati sicuri ed adeguati alle condizioni di esercizio per essi vengono concepiti. Nel caso delle curve circolari, ad esempio, l'adeguamento della velocità avviene allorquando le forze centrifughe avvertite dall'utente informano relativamente ad un rischio potenziale in cui si sta incorrendo nel corso della marcia. Ne consegue che la percezione di tale rischio è strettamente dipendente

dal grado di accettazione di accelerazione trasversale, tal sì che a grandi accelerazioni trasversali accettate corrispondono generalmente velocità di percorrenza più elevate ed un impegno di aderenza trasversale imprevisto ed eccessivo rispetto a quanto previsto dagli standard di progettazione. In più occasioni si è sperimentalmente evidenziato che in corrispondenza di curve con raggio $R > 400$ m la decelerazione dell'utente termina a metà dello sviluppo della curva poiché l'utente percepisce un rischio basso o comunque è disposto a tollerare delle forze centrifughe di entità superiore a quelle per cui tali elementi sono stati dimensionati (sopraelevazione, coefficienti di aderenza trasversale)

Ne consegue che la progettazione delle curve circolari in 'senso moderno' non possa prescindere dalla considerazione degli aspetti riguardanti l'operatività di tali elementi rispetto al comportamento dell'utente in condizioni affini. Anche per l'assegnazione dei coefficienti di aderenza disponibile sulla base dei quali dimensionare la geometria delle curve, emerge senza dubbio l'esigenza di considerare i potenziali rischi indotti da un comportamento anomalo dell'utente in condizioni operative.

Le osservazioni sperimentali derivanti dal monitoraggio di alcune curve circolari esistenti (sia in presenza che in assenza di curve di transizione) riferiscono che in corrispondenza di geometrie particolarmente sfavorevoli (generalmente curve con R ridotto) il margine tra l'aderenza impegnata e l'aderenza disponibile risulta essere fortemente ridotto tal sì qualsiasi perturbazione esterna può potenzialmente comportare la perdita di controllo del veicolo, anche considerando una minima compensazione da parte dell'aderenza longitudinale. Nell'ambito di tali considerazioni,

Lamm ha individuato due valori di raggi planimetrici meritevoli di evidenza ($R=354$ m e $R=174$ m), rispetto ai quali si individuano maggiori o minori fattori di rischio legati all'incidentalità potenziale, comunque direttamente conseguenti dal rapporto tra geometria-comportamento dell'utente e livello di informazione/condizionamento ambientale lungo il tracciato.

Come già anticipato nel corso della sezione precedente, relativa all'analisi delle velocità operative, gli studi di Bonneson si basano sulle ipotesi di lavoro secondo cui la velocità operativa, e con essa, l'aderenza impegnata in curva dipendono dall'approccio alla curva stessa, denotando quanto l'aspetto comportamentale sia rilevante anche dal punto di vista delle verifiche di aderenza.

I presupposti teorici degli studi di Bonneson fondano su precedenti evidenze sperimentali di Chowdhury, Fitzpatrick ed altri che – in momenti diversi – hanno riscontrato quanto segue:

- 1) gli utenti più veloci sono tipicamente maggiormente disposti ad accettare un impegno di aderenza trasversale in eccesso rispetto al limite di comfort generalmente convenuto;
- 2) detti utenti tendono eventualmente ad adeguare la propria velocità all'istante dell'ingresso in curva ma non prima;

3) a maggiori riduzioni di velocità corrispondono maggiori aliquote di aderenza impegnata in senso trasversale.

Il maggior motivo di interesse dello studio di Bonneson consiste non solo – e non tanto - nella definizione e successiva validazione di un modello predittivo della V_{85} all'interno delle curve circolari in funzione della velocità di approccio V_a (già descritto in precedenza), quanto nella conseguenziale e parallela definizione di un modello predittivo dell'impegno di aderenza trasversale all'interno delle curve circolari, come prima dipendente dalla differenza tra le velocità di approccio e quella operativa rilevata in curva.

Le ipotesi di partenza sono, dunque, che ad una maggiore decelerazione corrisponda un maggior impegno di aderenza secondo una legge generale del tipo:

$$f_d = b_0 - b_1 \cdot V_a + b_2 \cdot V_a - V_c \cdot I_v$$

in cui f_d è l'85%-ile della distribuzione dei coefficienti di aderenza trasversale richiesti, V_a è l'85%-ile della distribuzione delle velocità di approccio alla curva circolare (in km/h), V_c è l'85%-ile della distribuzione delle velocità all'interno della curva circolare (in km/h), b_0 , b_1 e b_2 sono opportuni coefficienti di calibrazione del modello e I_v è un indicatore variabile che vale 1 nel caso in cui $V_a > V_c$ e 0 altrimenti.

Tuttavia, dalla relazione generale dell'equilibrio del veicolo in curva si ottiene anche che:

$$f_d = \frac{v^2}{g \cdot R} - q$$

In cui f_d è il generico coefficiente di aderenza trasversale della piattaforma, V è la velocità del veicolo in curva (in km/h), q è la sopraelevazione della piattaforma, g è l'accelerazione inerziale di gravità (in m/s^2) ed R il raggio di curvatura planimetrica dell'elemento.

Da cui, esplicitando in funzione della velocità V , intesa come velocità V_{85} in curva, si ottiene un'espressione generale del modello integrato del tipo:

$$V_c = 63.5 \cdot R \cdot (-b_2 + \sqrt{b_2^2 + \frac{4c}{127 \cdot R}}) \leq V_a$$

con

$$c = \frac{q}{100} + b_0 + (b_2 - b_1) \cdot V_a$$

Il rilievo strumentale della velocità e delle caratteristiche geometriche in corrispondenza di 55 curve circolari ritenute rilevanti per lo studio ha consentito a Bonneson di determinare i coefficienti di calibrazione più opportuni con un coefficiente di correlazione elevatissimo ($R^2 = 0.96$), giungendo allo stesso tempo alla definizione del modello predittivo della velocità V85 (o V_c) e a quello predittivo dell'impegno di aderenza, entrambi in funzione dello scarto tra le velocità di approccio ed operativa all'interno della curva.

$$f_d = 0.256 - 0.0022 \cdot V_a + 0.0133 \cdot (V_a - V_c)$$
$$V_c = 63.5 \cdot R \cdot \left(-0.0133 + \sqrt{0.0133^2 + \frac{4c}{127 \cdot R}} \right) \leq V_a$$

con

$$c = \frac{q}{100} + 0.256 + 0.0111 \cdot V_a$$

La definizione di tale modello si dimostrerà particolarmente utile ai fini delle attività di ricerca oggetto del presente studio, poiché consente di disporre di uno strumento analitico-sperimentale ampiamente validato in grado di correlare in maniera efficace e quanto mai realistica le condizioni operative strettamente correlate alle velocità con quelle relative alla verifica delle condizioni di aderenza e – dunque – allo stato funzionale delle pavimentazioni nei tratti curvilinei oggetti di indagine.

Ai fini delle verifiche di sicurezza degli elementi curvilinei, il maggior motivo di attenzione consiste nell'evidenza che i veicoli tipicamente percorrono le curve circolari ed anche le curve di transizione a velocità generalmente superiori a quelle previste in sede di progetto, specialmente nel caso delle strade di vecchia generazione, non ancora progettate secondo criteri e standard votati alla sicurezza stradale. Ne consegue che, anche in virtù della maggiore libertà offerta ai progettisti, molte strade presentino curve circolari con raggi o pendenze inadeguati, rispetto alle quali le odierne condizioni operative di marcia risultano essere intrinsecamente al limite di sicurezza, specialmente in presenza di pavimentazioni vetuste e poco performanti in termini di aderenza superficiale.

L'analisi di sicurezza degli elementi curvilinei interessa – dunque - direttamente la verifica della congruenza tra i requisiti di aderenza offerta e quelli di aderenza impegnata per effetto della geometria e del comportamento degli utenti della strada. Per quanto detto, una volta che siano stati fissati i parametri geometrici e funzionali del tracciato (soprattutto in termini di aderenza delle pavimentazioni stradali), la conservazione degli standard di sicurezza prefissati per l'opera dipende da quanto le condizioni operative dell'infrastruttura si

avvicinano alle condizioni-limite di aderenza originariamente previste per ciascuno degli elementi geometrici.

Le condizioni ottimali di aderenza dei veicoli sul piano viabile dipendono intrinsecamente, per loro natura, dalle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stesse, descritte dai domini della micro- e della macrotessitura nel campo delle lunghezze d'onda caratteristiche di ciascuna superficie stradale. Il rilievo delle grandezze strumentali descrittive di tali domini consente la determinazione indiretta del livello funzionale della pavimentazione rispetto alle sue caratteristiche di aderenza offerta. Tuttavia, risulta di fondamentale importanza confrontare l'aderenza offerta dalla pavimentazione in virtù delle proprie caratteristiche superficiali con l'aderenza richiesta dal veicolo in marcia per la propria stabilità, dipendente dalle caratteristiche del moto e dal comportamento dell'utente (velocità, traiettorie, imprudenze, etc.).

Allo scopo predetto, si impone la necessità fattiva di rilevare ed analizzare lo stato funzionale delle pavimentazioni stradali in corrispondenza degli elementi curvilinei sotto il profilo delle caratteristiche superficiali. Allo scopo, nell'ambito del presente studio si procederà al rilievo dei parametri descrittivi di microtessitura e macrotessitura mediante prove strumentali su strada standardizzate a livello internazionale, le sole a garantire l'univocità della rappresentazione parametrica dello stato funzionale delle superfici stradali. In particolare, si farà ricorso al rugosimetro portatile a pendolo per la valutazione della microtessitura superficiale (PVT) ed al metodo volumetrico dell'altezza in sabbia per la determinazione della macrotessitura (MTD). Il ricorso all'International Friction Index – definito dal PIARC e normalizzato dall'ASTM per quanto riguarda le modalità di calcolo e derivazione analitica (ASTM E-1960-98 - Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface) – offre l'opportunità di garantire una lettura integrata dei due parametri per una migliore e più efficace valutazione dello stato funzionale del piano viabile.

L'aggregazione dei due indici in un unico parametro dipendente dalla velocità di servizio consente, da questo punto di vista, di interpretare in maniera più corretta le reali modalità di attuazione del fenomeno dell'aderenza, attraverso il bilanciamento dei diversi contributi tessiturali delle pavimentazioni.

L'aderenza disponibile dipende in senso stretto dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione attraverso la micro- e la macrotessitura. La microtessitura contribuisce a rompere il velo idrico superficiale in presenza di acqua mentre la macrotessitura garantisce il maggior contributo alla realizzazione delle condizioni di aderenza in virtù dei fenomeni di adesione molecolare e di isteresi. Alle basse velocità è prevalente il contributo della microtessitura, mentre per velocità superiori ai 50 km/h diventa prevalente il contributo della

macrotessitura. Ad ogni modo, entrambi concorrono alla realizzazione e alla conservazione delle condizioni ottimali di aderenza del veicolo in marcia.

Una volta misurate le caratteristiche tessiturali delle superfici stradali e una volta derivate le grandezze e gli indici descrittivi rispettivi, è possibile ricostruire attraverso l'indice IFI l'andamento del coefficiente di aderenza disponibile al variare della velocità di percorrenza. In virtù delle modalità secondo cui si esplica il fenomeno dell'aderenza tra pneumatico e pavimentazione, è prevedibile un decadimento del coefficiente di aderenza disponibile all'aumentare della velocità, proprio per il fatto che alle alte velocità il contatto tra pneumatico e fondo stradale risulta essere troppo breve, dal punto di vista temporale, e troppo poco esteso, dal punto di vista dell'area di contatto, per poter realizzare delle condizioni ottimali di aderenza. Di conseguenza, più la velocità cresce, più aumenta il rischio di sbandamento del veicolo in condizioni-limite.

Da questo punto di vista, e a partire da queste considerazioni, si rivela particolarmente interessante indagare il coefficiente di sicurezza funzionale delle strade esistenti rispetto alle condizioni di aderenza nei tratti curvilinei a geometria fissata, in diverse condizioni della pavimentazione stradale. Il confronto grafico e numerico tra i coefficienti di aderenza impegnata trasversalmente e i coefficienti di aderenza disponibili alle diverse velocità consente di individuare il grado di sicurezza dell'elemento curvilineo esaminato rispetto alle velocità operative realmente praticate dagli utenti, nonché di individuare eventuali interventi migliorativi dal punto di vista delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali, tali da traslare il punto di equilibrio tra aderenza impegnata e disponibile e da elevare, di conseguenza, il grado di sicurezza dell'elemento considerato.

Capitolo 4

ASPETTI PSICO-COMPORTAMENTALI CONNATURATI CON LA GUIDA SU STRADA

4.1 Visibilità, visione e percezione durante la guida

E' comunemente stimato che oltre il 90% delle informazioni utili alla guida derivino dalla vista. Ne consegue che sia pressoché inevitabile che la visione e la percezione abbiano un ruolo-chiave nell'ambito del sistema guidatore-veicolo-strada, indipendentemente dall'età anagrafica e/o dalla presenza di capacità visive differenziate e potenzialmente difettose in certi casi.

Gli aspetti della visibilità, della visione e della percezione durante la guida costituiscono motivo di notevole interesse in virtù delle diverse forme in cui essi possono presentarsi e manifestarsi nelle diverse condizioni operative di esercizio delle infrastrutture stradali.

Un evento incidentale individuale non è generalmente dovuto ad una singola causa efficiente ma piuttosto è il risultato di una combinazione di cause efficienti interagenti e concorsuali. Non è così raro che esso possa coinvolgere anche più di quindici fattori indipendenti (Hills, 1980). Nel recente passato, McKnight (1972) giunse ad individuare finanche 1300 fattori indipendenti – riguardanti sia il guidatore che il veicolo che la strada – in grado di condizionare il comportamento di guida degli utenti stradali.

Tradizionalmente, l'analisi statistica sulle cause incidentalità si basa sui rilievi "in sito" a seguito dei sinistri, sia nell'ambito delle indagini di polizia che parallelamente ad esse, senza che tuttavia possano essere ricostruite tutte le dinamiche ambientali che possono aver influito o condizionato il comportamento di guida dell'utente negli istanti precedenti all'evento incidentale. Negli scorsi decenni, il gruppo di lavoro così chiamato 'On-the-spot' del TRRL concluse uno studio su vasta scala teso all'analisi delle cause prevalenti dei sinistri stradali mediante la ricostruzione degli scenari di incidente in sito e mediante questionari specificamente mirati indirizzati agli stessi automobilisti incidentati a distanza di tempo. I risultati di maggior rilievo dello studio evidenziarono il contributo determinante dell'errore umano nel 95% dei casi, mentre il fattore veicolo ed il condizionamento ambientale si attestarono su percentuali di contribuzione inferiori (9% e 28%) e quasi sempre tramite azione concorsuale rispetto al contributo umano.

Tab. IV.1 – Percentuale di incidenti in cui i tre fattori primari furono giudicati determinanti (TRRL)

Fattore condizionante	Contributo percentuale
Errore del guidatore	95
Veicolo	9
Strada/Ambiente	28

Entrando nel merito delle caratteristiche dell'errore umano nei casi rilevati, nell'ambito dello stesso studio emerse che ben il 44% degli errori corrispondeva a difetti percettivi, tra cui i due maggiori contributi furono identificati nel 'sembrava ma non era così' (17%) e nella 'distrazione' (16%). Il fattore 'alterazione psico-fisica' del guidatore include l'assunzione di alcol (24%), anche se il fattore 'alcol' da solo fu giudicato determinante solo nel 6% degli eventi incidentali. Gli errori comportamentali nella guida comprendono la 'mancanza di attenzione' (40%) e l'eccesso di velocità (23%).

Tab.IV.2 – Contributo percentuale delle cause efficienti rientranti nel fattore umano (TRRL)

Fattore 'umano' condizionante	Contributo percentuale
Inesperienza	16
Alterazione psico-fisica	33
Comportamento di guida	75
Errori percettivi	44
<i>distrazione</i>	16
<i>sembrava ma non era così</i>	17
<i>mancanza di attenzione/allerta</i>	6
<i>errata interpretazione</i>	5
<i>sottostima della velocità e delle distanze</i>	5

Lo studio del TRRL, corroborato da altre esperienze successive, conferma che gli errori di natura percettiva commessi dal guidatore costituiscano il fattore causale prevalente degli incidenti stradali. Di particolare e notevole interesse è la categoria di errori catalogabili come 'sembrava ma non era così', alla base di una consistente proporzione di eventi incidentali lungo le strade. Un elenco delle possibili cause del soprarichiamato errore valutativo è fornito da Hills e riassunto qui di seguito:

- **presenza di difetti visivi del guidatore**
- **limitazioni visive e percettive del guidatore ordinario**
 - limitazioni nel campo della visione centrale o periferica*
 - limitazioni nella sensibilità cromatica, nella sensibilità al contrasto, ecc.*
 - esigenze particolari*

limitazioni dell'attenzione umana
aspettativa
problemi di interpretazione

- **restrizioni fiche alla visibilità ed alla riconoscibilità**

riduzione della visibilità dovuta alla luminosità (notte), alla nebbia, alla pioggia, ecc.
visuale ostruita dalla presenza del proprio veicolo o di un passeggero
ostruzione visuale da parte del traffico
ostruzione visuale dovuta alla geometria stradale, alla presenza di elementi esterni
alla carreggiata, ecc.

- **interazione tra le diverse cause**

Gli aspetti relativi alla percezione – nel senso letterale di *sensazione visiva* - sono, inoltre, fortemente correlati alla valutazione soggettiva del rischio da parte dei singoli guidatori durante la guida poiché è proprio dall'analisi delle informazioni derivanti dallo spazio stradale che l'utente imposta od adatta il proprio comportamento di guida: errori di informazione o di valutazione si prestano ad essere facilmente tradotti in comportamenti inappropriati, determinando l'insorgenza di elementi di vulnerabilità latenti, sedi potenziali di rischio se associati ad altri fattori di insicurezza concorsuali che vadano ad interagire secondo il modello dell'errore umano teorizzato da James Reason, già descritto nell'ambito dei precedenti capitoli.

A tal proposito, alcuni studi riportati da Kanellaidis (2000) pongono in evidenza il fatto che la sicurezza nella guida dipenda essenzialmente dall'abilità dell'utente nella valutazione del rischio e dal susseguente adattamento della velocità e del comportamento di guida. Elvik nel 1989 e McKenna nel 1991, invece, evidenziarono come una corretta percezione dei rischi della strada si traduca operativamente nella riduzione dei tassi di incidentalità registrati, così come la maggiore o minore familiarità con un certo tronco stradale. Un'ulteriore variabile è rappresentata dall'età del guidatore o – secondo altre versioni - dall'esperienza di guida, rispetto alla quale si osserva non solo una diversa reattività agli impulsi visivi ma anche una maggiore o minore propensione alla ricerca volontaria delle informazioni derivanti dallo spazio stradale (Makishita, 2007; Shinoda et al. 2001).

Un aspetto di particolare interesse è però costituito dalla demarcazione del contributo degli effetti percettivi ed attenzionali nell'impostazione del comportamento dell'utente lungo le strade, a parità di geometria (Charlton, 2004). Da uno studio riferito da Charlton (Drory&Shinar, 1982) sull'attenzione degli utenti ai segnali di pericolo posizionati sul lato strada emerse come solamente il 6% dei soggetti intervistati avesse realmente visto i segnali e solo il 9% avesse interpretato correttamente il messaggio da essi riportato. Allo stesso modo, lo stesso Charlton richiamò come la sensazione di pericolo dei guidatori dovuta alla

propria velocità di marcia sembra basata sia su input impliciti di tipo visivo che da un controllo esplicito del tachimetro (Salvatore, 1968; Recarte and Nunes, 1996). In questo senso è stato ipotizzato che buona parte del comparto informativo proveniente dal campo della visione periferica abbia effetto sulla percezione delle velocità da parte del guidatore (Gibson, 1979; Lee, 1974; Warren, 1982), come ben documentato dagli studi condotti sull'effetto-tunnel – in cui l'effetto di costrizione della carreggiata comporta un notevole decremento delle velocità praticate dagli utenti – piuttosto che dagli studi condotti lungo strade sviluppate in contesti aperti, con grandi banchine, corsie molto larghe e contesti molto ariosi – in cui si è accertata una sostanziale sottostima della propria velocità in rapporto alla tipologia di strada di transito (Fambro, 1981; Smiley, 1997). Questo fenomeno è da tempo alla base della categoria di trattamenti segnaletici finalizzati alla riduzione delle velocità attraverso l'incremento della velocità apparente di transito da parte degli utenti (Fildes e Jarvis, 1994; Godley, 1999).

L'evidenza del fatto che l'attenzione esplicita gioca un ruolo importante nella conservazione della velocità operativa degli utenti deriva da alcuni studi sulle distrazioni da parte degli utenti durante la guida. L'introduzione di fattori attenzionali secondari durante la guida quali l'autoradio accesa, la presenza di un passeggero in conversazione, l'utilizzo del telefono cellulare (anche in viva voce o in auricolare) sembra produrre come conseguenza un'apprezzabile riduzione dell'attenzione attiva nel controllo della velocità, nella scansione delle variazioni della geometria stradale, nel posizionamento in corsia e nell'individuazione/riconoscimento dei rischi potenziali presenti in carreggiata, quali semafori, veicoli lenti o in fase di arresto (Alm e Nilsson, 1995; Charlton, 2002; Hancock, 2003; McKnight, 1993). Una nota di particolare rilievo si riconosce nell'accertamento del fatto che l'introduzione dei predetti fattori attenzionali secondari produce risultati molto diversi dal punto di vista del comportamento di guida accertato da parte degli utenti, talvolti associati a velocità inferiori rispetto a quelle osservate in assenza di stimoli secondari (Alm e Nilsson, 1995), altre volte associati a velocità significativamente più elevate e maggiormente variabili (Charlton, 2002).

Di conseguenza, la velocità selezionata dagli utenti stradali – specialmente in approccio alle curve circolari – pare dipendere congiuntamente da fattori attenzionali di tipo esplicito e da fattori percettivi di tipo implicito, in grado di condizionare in maniera molto diversificata l'atteggiamento di guida del guidatore. Collegato a questo, merita senz'altro attenzione la netta distinzione *in litterae* tra la visibilità, la visione e la percezione degli impulsi provenienti dalla strada nel corso della marcia degli utenti su strada: un messaggio (od un segnale od un elemento di pericolo) può infatti essere non visibile, ma anche visibile e non visto ma addirittura visibile, visto e non percepito nella sua essenza.

4.2 Analisi del rapporto tra utente stradale e spazio stradale (geometria, segnaletica).

La velocità di marcia praticata dal generico conducente lungo una strada deriva dall'attuazione di un compromesso tra il condizionamento derivante da una serie di fattori esterni (condizioni geometriche della strada, condizioni del traffico, ambientali, climatiche, ecc.) e da un insieme di fattori che riguardano il guidatore stesso (prudenza, capacità ed esperienza di guida, stato psico-fisico, ecc.). Di conseguenza – nella generalità dei casi – in condizioni di traffico libero e di condizioni ambientali favorevoli, la velocità adottata dall'utente della strada scaturisce dall'interazione di stimoli interni ed esterni, suggeriti dal contesto e diversamente percepiti ed interpretati dagli utenti della strada.

Il rapporto tra uomo ed ambiente durante l'attività di guida dei veicoli è eminentemente composto da due fasi: la prima riguarda il trasferimento delle informazioni dall'ambiente all'uomo, la seconda realizza l'attività psicomotoria dell'individuo. Il processo che – partendo dall'acquisizione delle informazioni – giunge all'attività motoria è costituito, a sua volta, da una molteplicità di sottoprocessi che interessano diverse attività funzionali umane. In relazione alla guida dei veicoli, è proprio la prima fase – e cioè la percezione delle informazioni provenienti dall'esterno – che condiziona in gran parte la diversità dei comportamenti di guida sperimentabili nell'utenza stradale. Una migliore conoscenza di tali aspetti costituisce – in buona sostanza – un obiettivo di prioritario interesse nell'ambito degli studi sulla sicurezza stradale, con particolare ed esplicito riferimento agli interventi di tipo 'attivo', intendendo come tali gli accorgimenti ed i sistemi di tipo strutturale, geometrico, ottico, ecc. idonei a ridurre la probabilità di incidente sulla rete stradale esistente.

E' pratica consolidata che durante la guida tutti gli apparati sensoriali restino più o meno coinvolti nei processi percettivi. Peraltro, c'è da rilevare che diversi studi di ricerca nel campo dell'ottica e dell'oculistica hanno evidenziato come il sistema visivo umano non sia naturalmente e filogeneticamente preparato alle velocità delle attuali automobili, per quanto il miglioramento delle strade, delle auto, della preparazione tecnica e delle condizioni fisiche degli automobilisti rendano oggi sicure andature molto più sostenute di quelle ritenute accettabili in passato. Per praticare una guida veloce in tutta sicurezza è comunque necessario ottimizzare molti parametri anatomici e funzionali del sistema visivo, sfruttandone al meglio le grandissime potenzialità e non intralciandone l'efficacia con distrazioni ed informazioni inutili e fuorvianti. A corredo di tali aspetti introduttivi, pare opportuno precisare che per 'visione' si suole generalmente intendere il complesso dei meccanismi ottici, fotoelettrici, biodinamici, neurologici e psicologici che permette di acquisire l'immagine del mondo esterno e trasformarla nella sua ricostruzione a livello cerebrale. Si rimarca, inoltre, che il sistema visivo rappresenta la 'porta di ingresso' del 90% delle informazioni necessarie alla guida. Evidentemente, la sensibilità e la reattività agli impulsi rientrano nel campo dell'aleatorietà soggettiva di ciascun individuo, rendendo impossibile ed impraticabile la

generalizzazione delle questioni relative alla percezione degli stimoli sensoriali degli utenti su strada.

Il comportamento dell'utente durante la guida è determinato, in larga misura, da informazioni di natura visiva che egli trae dall'ambiente in cui si muove. Di conseguenza, dovendo progettare un'infrastruttura viaria sicura, diviene particolarmente utile poter prevedere e valutare le reazioni del conducente di fronte ai diversi input visivi cui egli può essere soggetto (visibilità del tracciato o degli eventuali ostacoli, visione in condizioni avverse per opacità dell'aria, abbagliamento).

La sicurezza di guida richiede, innanzitutto:

- la percezione, ad una “sufficiente” distanza, dei limiti di corsia, carreggiata o piattaforma (i piedritti, nel caso di sezione in galleria), a prescindere dalla geometria del tracciato (andamento planimetrico, tortuosità, andamento altimetrico, ecc...) e dalle condizioni di esercizio (giorno o notte, pioggia o nebbia, forte livello di inquinamento, ecc...);
- la visibilità e il riconoscimento, con sufficiente anticipo, di segnaletica orizzontale, verticale e luminosa presente lungo il tracciato;
- la visibilità e il riconoscimento di reali o potenziali ostacoli lungo il tracciato stesso (altri veicoli, velocipedi, pedoni, animali, oggetti).

In questo contesto, i “modelli per la determinazione della visibilità” devono fornire indicazioni sulle distanze di avvistamento ostacoli, in relazione alle varieguate situazioni che si possono presentare durante la conduzione del veicolo. Nella pratica, i modelli in questione dovrebbero “assicurare il legame tra il cammino ottico della luce nei dintorni del guidatore e le prestazioni visuali di quest'ultimo, in modo da determinare per ogni oggetto, pertinente alla condotta dei veicoli, dei criteri di visibilità, esprimibili tramite indici, livelli o distanze”.

Come evidenziato da vari ricercatori, i modelli in questione si fondano su dati fotometrici e studi fisiologici, aventi base teorica e riscontro sperimentale, principalmente impostati sulla “sensibilità al contrasto” dell'osservatore.

Esistono svariati modelli in letteratura, applicabili in situazioni diverse e con un molteplice livello di approfondimento del problema della percezione visiva. Questo, di fatto, presenta una poco agevole soluzione, poiché si basa su un processo sensoriale complesso, diverso per ogni guidatore, in quanto influenzato, oltre che da ciò che viene esternamente percepito, anche da ciò che è elaborato dal cervello.

Durante la guida, tuttavia, assume un'importanza quasi esclusiva la valutazione soggettiva dei parametri di moto, effettuata a livello inconscio e fuori dalla sfera volitiva. Ed è proprio a questa soggettività – ed alla valutazione inconscia che ne consegue – che è affidata in buona misura la percezione dei rischi della strada, da cui dipende direttamente l'assunzione di determinati comportamenti virtuosi o viziosi in corrispondenza delle situazioni di pericolo.

Ne discende che le attività percettive inconsapevoli, esercitate dal conducente durante la marcia dei veicoli, svolgono un ruolo fondamentale nell'atto della guida. Sarà pertanto interessante orientare l'obiettivo del presente progetto di ricerca verso la disamina della reale efficacia nonché del condizionamento indotto di tutti quegli elementi – detti 'ambientali' – (segnaletica orizzontale e verticale, arredo stradale, inserimento di ostacoli visivi, ecc.) che possono influenzare il comportamento umano a livello inconscio, avendo preliminarmente acquisito una migliore conoscenza della rispettiva rilevanza qualitativa e quantitativa ai fini della condotta di guida degli utenti stradali.

Gli aspetti relativi alla percezione umana sono diventati oggetto di studio solo nel recente passato e quasi limitatamente al caso della geometria stradale, allo scopo di definire degli standard normativi maggiormente idonei a descrivere le reali e potenziali situazioni di rischio in seno ai tracciati stradali. Le verifiche delle visuali e del coordinamento plano-altimetrico dei singoli tracciati discendono propriamente da alcuni studi sulla percezione sensoriale degli utenti agli impulsi della strada, indagati mediante il meccanismo dell'*azione-reazione*. Gli studi sul condizionamento ambientale degli utenti della strada, tuttavia, sono finalizzati alla valutazione della reale percezione dei rischi e pericoli della strada in condizioni diverse, analizzando ad esempio l'incidenza dei fattori climatici, dello stato di manutenzione e dell'efficacia della segnaletica e la presenza di ulteriori elementi di ostacolo o di arredo che possono in qualche modo alterare – in certi casi – o migliorare – in altri casi – il complesso delle informazioni e degli stimoli che l'ambiente 'strada' fornisce all'utente in transito, al fine della sua sicurezza.

L'elemento-chiave e più rappresentativo del comportamento dell'utente in condizioni diverse è ancora una volta la velocità operativa, definita come l'85%-ile della distribuzione delle velocità di transito dei veicoli in corrispondenza di una certa sezione di controllo.

Storicamente, molti degli studi presenti in letteratura si sono concentrati sull'esame delle sole relazioni esistenti tra velocità veicolare e caratteristiche geometriche del tracciato senza in alcun modo considerare altri fattori concomitanti come le variabili fisiologiche degli utenti monitorati (età, sesso, ecc.) e la percezione dell'ambiente stradale da parte degli utenti stessi.

Scallen and Carmody (1999), tra tutti, hanno indagato gli effetti di alcune caratteristiche dell'ambiente stradale sul comportamento umano a Tofte, in Minnesota, giungendo all'interessante conclusione che l'impiego di pavimentazioni chiare (o bianche) si traduce nella pratica di velocità più moderate così come la cura dell'arredo della strada dal punto di vista percettivo (spartitraffico, margini esterni) induce effetti altamente desiderabili nel processo selettivo delle velocità da parte dell'utente.

Un rapporto del Transportation Research Board (1998) relativo alla gestione delle velocità sulle strade riporta quanto segue:

"In many speed zones, it is common practice to establish the speed limit near the 85th percentile speed, that is, the speed at or below which 85 percent of drivers travel in free-flow conditions at representative locations on the highway or roadway section. This approach assumes that most drivers are capable of judging the speed at which they can safely travel."

Tale approccio non può tuttavia raccomandarsi in ambito urbano a causa sia della promiscuità delle categorie di traffico ammesse, sia dei flussi di traffico in questione, sia dell'entità delle attività comunque presenti lungo le strade con accesso diretto.

La percezione della velocità di sicurezza è influenzata dal giudizio soggettivo sulle prestazioni del mezzo veicolare in uso, dal grado di anticipazione ed informazione fornito dalla strada (generalmente influenzato dalla familiarità con la strada), dalla stanchezza o fattori affini, nonché dalla percezione della propria velocità di marcia rispetto al rischio di incidente, sia in termini di probabilità di accadimento che di severità presunta dell'impatto, cosa che – nella maggioranza dei casi – si realizza con difficoltà per via della presunzione da parte degli automobilisti di considerarsi ottimi guidatori e dell'incapacità di giudizio del reale rischio associato alla velocità praticata.

Generalmente, gli utenti della strada giustificano la propria velocità sulla base dei seguenti parametri:

- le caratteristiche della strada (geometria)
- il livello di servizio della strada e condizioni di traffico
- le condizioni climatiche (pioggia, nebbia, neve, ecc.)
- l'ora del giorno (condizioni di visibilità diurna e notturna)
- il limite di velocità (per via del rischio associato ai controlli di polizia)
- la lunghezza e lo scopo del percorso
- le caratteristiche prestazionali del veicolo
- sensibilità dell'utente e propensione al rischio associate alla velocità

E' tuttavia possibile individuare dei sistemi e delle contromisure in grado di influenzare la percezione della velocità da parte degli utenti, appoggiandosi ad esempio a diverse configurazioni delle superfici stradali, a specifici trattamenti delle strisce segnaletiche centrali o marginali, alla riduzione della larghezza delle corsie, ad interventi mirati sulla geometria del tracciato od all'inserimento di specifici delineatori.

Nell'ambito di uno studio sui processi selettivi della velocità in Corea, Kang (1998) è giunto alla conclusione sperimentale che gli uomini con macchine più costose tendono a guidare più velocemente degli altri, così come i guidatori più esperti (o presunti tale). Inoltre, si è sperimentalmente verificato che la lunghezza del viaggio e la frequenza dell'utilizzo della

strada come via di comunicazione costituiscono elementi importanti nella scelta del comportamento e della velocità praticata.

Poe e altri (1996) si sono, invece, concentrati sullo studio delle relazioni esistenti tra velocità operative e caratteristiche dell'ambiente 'strada' nell'ambito di reti stradali urbane a basso volume di traffico. Nello studio, hanno trovato spazio le valutazioni sia sulle caratteristiche dei guidatori che quelle sui veicoli, che hanno portato a concludere che né il sesso, né il numero dei passeggeri né la tipologia veicolare costituiscono variabili rilevanti ai fini dello studio. L'analisi ha, invece, rimarcato l'evidenza secondo cui i guidatori più anziani viaggiano tendenzialmente più lenti rispetto a quelli più giovani (circa 2 km/h).

Nello stesso studio si è anche cercato di valutare come la vista prospettica delle curve orizzontali possa influenzare la relazione tra velocità percepita, velocità praticata a velocità di progetto. Gli esiti sperimentali confermano quanto atteso e cioè che una corretta visione prospettica - e dunque una corretta percezione del tracciato - può rappresentare un fattore discriminante nella scelta della velocità di percorrenza più appropriata.

Sulla base degli studi effettuati in proposito, Hassan e altri (2000) giunsero alla conclusione che il coordinamento plano-altimetrico tra curvatura orizzontale e verticale possa rappresentare un fattore di sicurezza nell'interpretazione degli elementi curvilinei di tracciato, evitando il rischio di percezioni distorte dell'andamento del tracciato da parte dell'utente. Nell'ambito degli studi condotti, i ricercatori evidenziarono come una curvatura orizzontale possa apparire ben diversa dalla realtà in presenza di dossi o sacche verticali non coordinati. Gibree e altri (2001) verificarono anche che il coordinamento plano-altimetrico del tracciato si ripercuote direttamente sulle velocità praticate dagli utenti: in particolare, i risultati degli studi condotti evidenziarono che gli utenti tendono ad adottare velocità operative più elevate in corrispondenza di curve orizzontali combinate con curve verticali concave piuttosto che in corrispondenza di curve verticali convesse.

Sulla base dei dati sperimentali relativi agli automobilisti svedesi lungo alcune strade con limite di velocità fissato in 88 km/h, alcuni ricercatori hanno cercato di valutare la tendenza degli utenti a farsi condizionare dall'ambiente esterno e dagli altri utenti nella scelta delle velocità da praticare. Nell'ambito di uno studio di questo tipo, Haglund (2000) è giunto alla conclusione che gli utenti stradali possono effettivamente adattarsi alla configurazione di marcia suggerita dagli altri utenti della strada e che esiste una certa forma di auto-regolazione delle velocità, tale per cui gli utenti tendono ad omogeneizzare il proprio comportamento in certe condizioni di traffico ed ambientali.

Elslände (1997) evidenziò, invece, una maggiore propensione al rischio nei soggetti più esperti, anche in assenza di visuali completamente libere ed in presenza di situazioni di rischio potenziale evidenziate da segnali informativi e prescrittivi, che tali utenti tendono ad ignorare. Tali problemi possono essere associati ad una reale e conscia negligenza

percettiva piuttosto che ad errore di interpretazioni o temporanee distrazioni contingenti durante la marcia.

Nell'ambito di uno studio sui processi percettivi degli utenti stradali, Alison Smiley (1999) evidenziò che le principali informazioni sulla velocità praticata dall'utente derivano dagli impulsi provenienti dalla visione periferica, ovvero dagli oggetti presenti lungo la strada e rientranti nel campo della visione.

Quando la visione periferica dovesse risultare eliminata (o fortemente ridotta), gli automobilisti utilizzano solamente il campo di visione centrale per determinare la velocità, perdendo molte delle informazioni utili per il controllo della stessa. Inoltre, la velocità risulta essere fortemente influenzata dalle caratteristiche geometriche del tracciato (distanze di visibilità, grado di curvatura del tracciato, pendenze, ecc.)

Evidentemente, le capacità reattive e sensoriali dell'utente sono strettamente connesse con la velocità del veicolo. In particolare, la maggiore attenzione in questa direzione spetta alla variazione del campo visivo ed in definitiva alla variazione dello spazio stradale percepito dal conducente dell' autoveicolo, il quale risulta essere notevolmente diverso da quello percepito da un osservatore fisso posto a centro o bordo strada.

La distanza dall'osservatore di punti su cui l'occhio normalmente si fissa si definisce distanza di accomodamento l_0 . Essa aumenta tipicamente con la velocità, passando da una distanza di circa 200 m in corrispondenza dei 40 km/h ad una distanza di circa 600 m per velocità prossime ai 100 km/h.

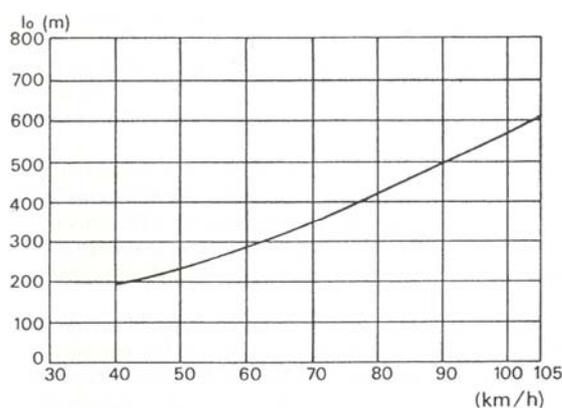


Fig. IV.1 - Distanza di accomodamento dell'occhio in funzione della velocità.

Con l'aumentare della velocità e la conseguenziale estensione in profondità della distanza di accomodamento dell'occhio del guidatore, si osserva per contro una restrizione del campo della visione periferica ovvero del campo di visibilità laterale entro cui un oggetto deve essere contenuto per poter essere visto e riconosciuto dall'utente in movimento a velocità v (km/h).

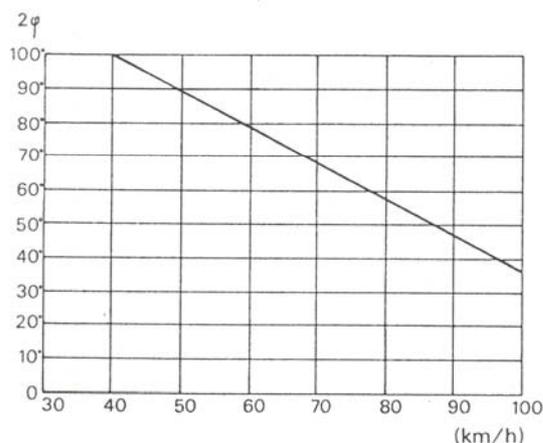


Fig. IV.2 - Campo della visione periferica in funzione della velocità.

Oltre ai fenomeni percettivi legati al campo della visione, è di sicuro e notevole interesse lo studio della percezione del rischio da parte dell'utente in condizioni non ideali di marcia. Uno specifico studio condotto da Lamm e altri nel 1989 - e finalizzato alla valutazione comparativa delle velocità operative praticate dagli utenti in condizioni di strada asciutta e di strada bagnata su strade di tipo extraurbano a due corsie a doppio senso di marcia in corrispondenza di 24 curve circolari - ha evidenziato che la presenza di acqua sulla superficie stradale (condizione di pioggia latente) non si rispecchia in sostanziali variazioni delle velocità operative osservate e che gli utenti non paiono adeguare la propria velocità ed il proprio comportamento in curva alle diverse condizioni di strada bagnata e strada asciutta. Di conseguenza, i risultati delle regressioni statistiche tra velocità operative e curvatura dei tracciati, sviluppati nel caso di pavimentazioni asciutte, si confermano validi anche in condizioni di pavimentazioni bagnate, fintanto che la visibilità non sia affetta dall'intensità di pioggia. L'aspetto speculare - ed intrinsecamente più grave - è la constatazione del fatto che gli utenti non hanno coscienza del decadimento delle proprietà di aderenza delle pavimentazioni bagnate rispetto alle corrispondenti condizioni di asciutto. Peraltro, mantenendo immutato il proprio comportamento in curva - e non adeguandolo alle diverse condizioni ambientali - l'utente stesso presceglie più o meno consapevolmente di accettare un livello di rischio di entità superiore, confidando sui margini di sicurezza che la geometria e le caratteristiche superficiali della pavimentazione dovrebbero generalmente ammettere, senza tuttavia conoscerne l'entità ed il limite.

Nell'ambito di alcuni studi sui rapporti intercorrenti tra condizioni climatiche, percezione visiva dello spazio stradale ed incidentalità, Green evidenziò il fatto che la pioggia riduce la percezione dell'utente in diverse forme e maniere, specialmente nel periodo notturno. Essa condiziona sia la percezione umana in senso stretto (e cioè la visibilità attraverso la pioggia) sia la percezione delle variazioni di visibilità dovute all'illuminazione, alla strada stessa ed alla segnaletica. Tendenzialmente, i guidatori percepiscono la presenza di un oggetto

attraverso il meccanismo della riflessione degli impulsi luminosi a partire da una sorgente, dalla luce solare, dagli impianti di pubblica illuminazione. La presenza della pioggia durante la marcia non consente all'utente di avere una percezione ottimale degli impulsi luminosi. La pioggia si comporta, infatti, come una lente che seleziona gli impulsi luminosi in frequenza ed intensità, distorcendo in molti casi la percezione del contesto ambientale. La segnaletica stradale, ad esempio, è particolarmente vulnerabile rispetto alla presenza della pioggia: le vernici utilizzate per la realizzazione delle strisce segnaletiche orizzontali contengono generalmente materiale retroriflettente di varia natura ed entità. In condizioni di strada asciutta, l'illuminazione dei fari dei veicoli incide sul piano viabile – e dunque sulle vernici retroriflettenti – e viene riflessa a ritroso verso l'occhio dell'utente, consentendone la lettura in velocità durante la marcia.

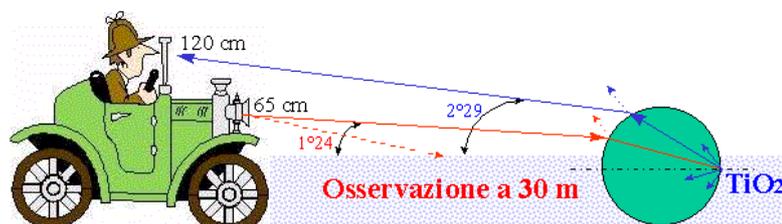


Fig. IV. 3 - Schematizzazione del meccanismo del fenomeno della retroriflessione dovuta alla segnaletica orizzontale.



Fig. IV.4 - Esempio di segnaletica stradale retroriflettente in condizioni di strada asciutta e bagnata.

L'acqua, invece, agisce come una lente disperdente, così che la luce incidente proveniente dai fari viene riflessa in più direzione e non più concentrata verso l'utente. Il risultato è che generalmente le strisce segnaletiche diventano pressoché invisibili – o quantomeno difficilmente leggibili – all'occhio dell'utente.

La presenza dell'acqua sulla superficie stradale – responsabile dell'effetto di dispersione luminosa poc'anzi ricordato – è all'origine del fenomeno dell'oscuramento della sede stradale, che appare più scura e più difficilmente individuabile da parte dell'utente. In condizioni di strada asciutta, la rugosità superficiale della pavimentazione consente in qualche modo di riflettere gli impulsi luminosi incidenti, favorendo il processo percettivo visivo

da parte dell'utente nel corso del moto. La presenza di acqua piovana all'interno delle vacuosità e delle irregolarità superficiali si traduce operativamente nella formazione di un piano riflettente lungo l'intera estensione della via, responsabile della dispersione di tutti gli impulsi luminosi incidenti, particolarmente quelli provenienti dai fari dei veicoli. Di conseguenza, la strada appare più scura e – in ambito urbano – diventa più difficile riconoscere oggetti, ostacoli o persone all'interno della carreggiata, specialmente se il contrasto cromatico è sfavorevole.

Un altro fattore climatico altamente sfavorevole alla sicurezza della circolazione è la nebbia. Essa comporta elevati tassi di incidentalità legati non solo alle condizioni di bassa visibilità degli utenti durante la marcia – spiegazione fin troppo intuitiva – ma anche e soprattutto perché essa interferisce con i meccanismi percettivi della velocità e della distanza, per via della riduzione del contrasto cromatico tra i colori ambientali degli oggetti. Durante la marcia veicolare, gli utenti non percepiscono gli oggetti per via del proprio colore o della propria luminosità quanto piuttosto in virtù del contrasto rispetto alla monotonia di fondo o alla luminosità degli oggetti attigui (tale fenomeno si spiega essenzialmente con il fatto che il processo informativo-percettivo avviene in velocità ed è tale da consentire l'acquisizione delle informazioni ritenute rilevanti rispetto al contesto ambientale e non di tutte le informazioni disponibili in valore assoluto). Sostanzialmente la presenza della nebbia agisce negativamente sui fenomeni percettivi attraverso l'inibizione parziale o totale dei contrasti cromatici e luminosi, interferendo con i processi di distinzione degli oggetti e delle informazioni di guida.

Le ragioni fisiche alla base della diminuzione del contrasto sono riconducibili al medesimo effetto di dispersione selettiva della luce in presenza di pioggia, proprio perché la nebbia è naturalmente costituita da minuscole goccioline di aerosol acquoso, la cui dimensione media si riflette inevitabilmente sui fenomeni ottici di interesse. L'entità della diminuzione di contrasto è strettamente interconnesso con la distanza dell'oggetto da visualizzare ed il coefficiente di luce riflessa, dipendente dalla dimensione e dalla densità volumetrica delle gocce in sospensione.

Quando le particelle in aria diventano molto piccole, la situazione si presenta maggiormente complicata poiché non tutte le lunghezze d'onda del campo luminoso vengono riflesse, rifratte e disperse allo stesso modo. Le molecole naturalmente presenti nell'atmosfera diffondono più facilmente le lunghezze d'onda più corte, lasciando percepire il cielo con una colorazione blu-azzurrata. Di qui la ragione per cui gli esperti considerano il giallo il colore anti-nebbia per eccellenza.

Gli effetti collaterali associati alle condizioni di bassa visibilità e di basso contrasto sono diversi: un primo effetto consiste nella difficoltà di riconoscimento degli oggetti in movimento rispetto a quelli fermi (specialmente al di fuori del campo visivo). Un secondo sicuro effetto

consiste nell'erronea percezione della propria velocità da parte dell'utente: tipicamente, gli automobilisti acquisiscono informazioni relativamente alla velocità praticata attraverso il movimento relativo degli oggetti presenti all'interno del campo visivo. In presenza di nebbia (e dunque di scarsa visibilità), l'utente riceve un'informazione parziale o del tutto nulla dagli oggetti presenti all'interno del campo visivo, sia per la difficoltà di riconoscimento degli stessi sia per il motivo poc'anzi ricordato della difficoltà di giudizio relativamente alle condizioni di moto relativo del veicolo rispetto all'ambiente circostante. Un ulteriore elemento critico associato alla presenza della nebbia consiste nella sottostima dei tempi di arresto e di frenatura, con la conseguente difficoltà operativa nell'adeguamento delle velocità rispetto alle condizioni di sicurezza dettate dal tracciato.

I processi percettivi dell'utente nel corso della guida sono stati indagati attentamente anche dal punto di vista delle informazioni (tipologia, configurazione) fornite dall'ambiente circostante nel corso della marcia veicolare. Tra essi, particolare interesse ha destato lo studio delle configurazioni spaziali e cromatiche della segnaletica orizzontale e verticale.

Nel corso di alcuni studi condotti ancora agli inizi degli anni '70, Denton giunse alla determinazione sperimentale – sia mediante simulatore di guida che in condizioni reali su strada – che la percezione della velocità di marcia da parte dell'utente dipende strettamente dagli impulsi visivi che giungono all'occhio del guidatore. A livello di sperimentale, furono introdotte alcune bande segnaletiche orizzontali trasversalmente alla direzione di marcia in corrispondenza di alcune rotatorie nel Regno Unito al fine di indurre gli utenti a moderare la propria velocità in prossimità delle intersezioni. Gli studi di monitoraggio dell'allestimento sperimentale denotarono subito un abbassamento della distribuzione delle velocità in valore assoluto ed una variazione sostanziale dello scartamento laterale dei veicoli in avvicinamento, benché tali effetti si manifestarono solo in via transitoria all'atto dell'introduzione dell'elemento di novità.

L'accuratezza e la sensibilità con la quale gli automobilisti percepiscono l'ambiente circostante si è evidenziata altamente variabile a seconda delle diverse condizioni della strada e dell'arredo stradale ai margini della carreggiata. Fildes e altri studiosi evidenziarono nel corso degli anni '80 che l'influenza delle caratteristiche dello spazio stradale può fattivamente condizionare la percezione del rischio e della velocità di marcia, così come il grado di illuminazione notturna e l'esperienza nella guida.

Le più celebri e diffuse misure di moderazione della velocità attraverso l'informazione percettiva sono probabilmente quelle incarnate dalle diverse tipologie di segnaletica orizzontale. Oltre alla sperimentazione di Denton (già citata), molti altri ricercatori si sono posti l'obiettivo di verificare la sensibilità e l'efficacia dei prodotti per segnaletica orizzontale rispetto alla percezione delle velocità operative su strada.

Nel 1989, Jarvis descrisse gli effetti delle bande segnaletiche gialle sulla velocità operativa e sul comportamento nelle fasi di frenatura a Victoria, giungendo alla conferma sperimentale del fatto che i dispositivi segnaletici impiegati producessero effettivamente una riduzione della velocità, in questo caso per una durata anche superiore ai 12 mesi. Tuttavia, l'autore ammise che tale risultato non avesse alcun collegamento con la modifica del campo visivo (e dunque con la percezione della velocità), quanto piuttosto con il fatto che all'inserimento di siffatti sistemi segnaletici solitamente corrispondono dei rischi concreti che l'utente non può non considerare.

Uber (1992) studiò con particolare interesse i diversi effetti sulla percezione della segnaletica orizzontale di colorazione bianca e gialla. In entrambi i casi si osservarono sostanziali riduzioni della velocità media e della velocità operativa per quanto il colore bianco si dimostrò più efficace rispetto al giallo in tutte le circostanze di prova. Questo fatto confermò da questo punto di vista anche la possibilità che gli effetti percettivi possano essere fortemente condizionati dai colori oltre che dalle misure in sé.

Se, come detto, la superficie stradale gioca un ruolo di primaria importanza all'interno dei fenomeni percettivi dell'utente stradale, appare altresì logico attendersi che anche la larghezza delle corsie di marcia possa avere una notevole influenza sulla percezione e sulla velocità di marcia. Infatti, uno specifico progetto di ricerca sulla percezione della velocità condotto da Fildes, Fletcher e Corrigan nel 1987 evidenziò il fatto che le corsie di larghezza ridotta ed una basso numero di corsie sono generalmente associate a valori puntuali di velocità operativa mediamente più contenuti, per quanto sia stata riscontrata una notevole dispersione di dati dovuti ai diversi contributi delle categorie di traffico monitorate. McLean e Hoffman (1972) riscontrarono un diverso comportamento nella fase di sterzata tra alcune strade con corsie da 3.7m a bassa velocità di marcia (42 km/h) e strade con corsie da 2.5 m e alta velocità di marcia (80 km/h): gli autori attribuiscono tale differenza interamente alla percezione del veicolo nelle due condizioni operative osservate. Peraltro, Lum (1984) verificò che il raddoppio in spessore delle strisce di demarcazione marginale non sortisce alcun effetto sulla velocità veicolare.

Le conclusioni più consistenti riguardo le misure potenziali per il condizionamento percettivo della velocità veicolare si possono riassumere nei seguenti punti:

la segnaletica orizzontale trasversale sembra avere un'influenza durevole sulla percezione del rischio e della velocità da parte dell'utente che si traduce in una riduzione dei tassi di incidentalità registrati in corrispondenza dei siti monitorati;

l'inserimento di elementi segnaletici in banchina può comportare effetti sostanzialmente positivi sulle velocità veicolari in contesti ritenuti critici;

esistono evidenze sperimentali che testimoniano la riduzione delle velocità e dei sinistri in presenza di corsie di larghezza ridotta, benché tali effetti possano dipendere fortemente dall'entità di tali larghezze nonché dalla classe stradale di riferimento;

l'introduzione di frecce di pericolo con opportuna sagomatura ed evidenza retroriflettente (sia orizzontali che verticali) si traduce operativamente in una sostanziale riduzione delle velocità operative registrate, purché esse si trovino all'interno dello spazio stradale e non esterne;

esistono diverse forme di segnaletica efficaci nel breve-medio periodo, che diventano del tutto inefficaci nel lungo periodo, una volta esaurito l'effetto-sorpresa per l'utente.

Uno studio specificatamente mirato all'individuazione delle misure più efficaci per la riduzione delle velocità operative in curva fu condotto da Stamataidis e Vest. Le constatazioni di base dello studio consistettero nel fatto che la tradizionale segnaletica orizzontale e verticale di preavviso o pericolo viene solitamente male interpretata od addirittura ignorata dagli utenti della strada. Di conseguenza, la reale efficacia dei segnali verticali e delle segnaletica orizzontale risulta fortemente ridotta e spesso l'obiettivo della riduzione delle velocità operative risulta disatteso.

Lo studio si concentrò prioritariamente sulla determinazione delle soluzioni geometriche e delle combinazioni cromatiche maggiormente efficaci in termini di riduzione delle velocità, attraverso la predisposizione e la posa in opera di trattamenti di diversa tipologia comprendenti l'inserimento di frecce segnaletiche (sia a terra che in curva), di segnali verticali di preavviso, di bandiere rosse in aggiunta ai segnali già esistenti, di luci segnaletiche ad intermittenza e di strisce trasversali nelle zone di transizione delle curve circolari. Tutti i trattamenti furono applicati al caso di tre curve circolari che furono monitorate per più di due giorni dopo un periodo di almeno cinque giorni dall'esecuzione degli interventi – al fine di consentire l'adattamento alla novità ed escludere i comportamenti contingenti dovuti all'effetto-sorpresa - in quattro postazioni, sia all'interno delle curve che nelle zone di approccio alle curve.

I risultati della sperimentazione suggerirono che i trattamenti più efficaci e promettenti sul lungo periodo al fine della riduzione della velocità osservata si riconoscevano nelle luci intermittenti e nell'inserimento delle bande segnaletiche trasversali nelle zone di transizione.

Tali trattamenti generalmente si rispecchiarono in una riduzione tendenziale della V_{85} dell'ordine del 5-10%. Un'analisi più attenta del diagramma di distribuzione delle velocità operative consentì anche di attestare una riduzione più che significativa (12-18%) delle velocità di percorrenza superiori alla V_{85} : evidentemente quest'ultima considerazione portò i due ricercatori ad osservare che l'impatto maggiore di tali interventi fosse concentrato sulle velocità di picco piuttosto che sulle velocità medie, con evidenti benefici in termini di sicurezza della circolazione rispetto alla vulnerabilità potenziale delle curve esaminate.

Tale studio si contraddistingue per il fatto di prospettare alcune soluzioni realisticamente attuabili al fine della riduzione delle velocità operative in curva, attraverso l'incentivazione delle informazioni visive percepite fornite (e percepibili) dall'utente. In questo senso, il significato dell'applicazione dei diversi interventi segnaletici ha consentito di rispondere in maniera coordinata al duplice quesito sulla reale percezione dei rischi da parte degli utenti della strada e – di conseguenza – sull'adattamento del comportamento di guida assunto in funzione dei rischi rilevati e delle informazioni ambientali percepite.

L'impiego delle luci intermittenti come delimitazione delle curve circolari, ad esempio, si è evidenziato il sistema più favorevole ed efficace in tal senso, pur essendo intrinsecamente affetto dalla limitazione dovuta al contrasto luminoso in condizione di luce diurna e notturna. Nondimeno, la combinazione di luci ad intermittenza e strisce segnaletica trasversali si è caratterizzata per l'essere particolarmente efficace anche in condizioni di luminosità diffusa diurna, specialmente alle alte velocità. Anche l'impiego di segnali verticali più grandi ed evidenti si è evidenziato marginalmente efficace in termini di adeguamento della velocità, per via della maggiore visibilità degli stessi o comunque per via di una migliore percezione del rischio e delle informazioni dovuta alla presenza di segnali non tradizionali.

Capitolo 5

CRITERI E METODOLOGIE SPERIMENTALI

5.1 Obiettivi.

Il progetto di ricerca è stato strutturato in funzione dell'obiettivo prioritario dello studio della percezione del rischio durante la guida da parte degli utenti stradali, valutata in diverse condizioni di esercizio, anche in presenza di modifiche dello spazio stradale (sia di tipo geometrico che di tipo informativo).

Per il raggiungimento del predetto obiettivo, si è fatto ricorso ad alcune tecniche di indagine mutuata dal settore psicologico, con particolare interesse per gli aspetti riguardanti la psicologia cognitiva e l'ergonomia applicata, che hanno consentito di approfondire in maniera sistematica e completa le attività sperimentali condotte nell'ambito del corrente progetto e che hanno costituito esse stesse delle funzioni obiettivo secondarie cui si è teso nell'ambito della fasi operative di seguito riassunte.

Gli obiettivi collaterali del progetto hanno riguardato:

- 1) la valutazione dell'efficacia della segnaletica stradale di tipo 'percettivo' in termini di condizionamento comportamentale dell'utenza stradale durante la guida;
- 2) la costruzione e la validazione di un modello in realtà virtuale di tipo immersivo per lo studio del comportamento di guida degli utenti stradali in condizioni operative differenziate.

Gli obiettivi sopra richiamati sono discesi direttamente dall'analisi di sicurezza del contesto di studio prescelto per le attività sperimentali, sui cui risultati sono stati strutturati e calibrati i successivi studi.

5.2 Approccio metodologico.

Il progetto è stato articolato in due distinte fasi sperimentali nell'ambito delle quali si è cercato di corrispondere agli obiettivi specifici preassegnati alle attività sperimentali programmate.

Nell'ambito della prima fase sperimentale, le attività sono state finalizzate all'identificazione ed alla caratterizzazione del contesto di studio individuato allo scopo, qui comprendendo anche i rilievi strumentali condotti mediante videocamera volti all'acquisizione dei dati sperimentali sulle velocità praticate dagli utenti in corrispondenza di assegnate sezioni ritenute critiche per l'ambito di studio. I rilievi di velocità sono stati condotti sia in condizioni di illuminazione diurna che in condizioni di illuminazione notturna al fine di caratterizzare il comportamento di guida degli utenti stradali in relazione agli aspetti geometrici e funzionali dell'ambiente di guida in funzione anche del fattore ambientale 'luce'.

La seconda fase sperimentale ha riguardato la ricostruzione in 3D dell'ambiente stradale oggetto di studio entro un applicativo specificatamente costruito per la creazione di modelli dinamici interattivi in realtà virtuale. Il modello virtuale così costruito è stato calibrato sulla base dei dati sperimentali reali al fine di restituire un ambiente di guida sufficientemente rappresentativo delle condizioni effettive di guida, sia in condizioni diurne che notturne. A partire dal modello virtuale così strutturato sono stati definiti diversi ambienti di guida, differenziati l'uno dall'altro da una sola variabile, al fine di valutare il comportamento di guida virtuale dei *testers* coinvolti nelle diverse condizioni di prova in relazione con la modifica strutturale o funzionale di volta in volta isolatamente introdotta.

Gli esiti della seconda fase sperimentale hanno consentito non solamente di acquisire una mole notevole di informazioni relative al comportamento di guida ed alla percezione del rischio degli utenti sia reali che virtuali, ma anche di fornire indicazioni di pregevole interesse in merito all'efficacia delle cosiddette 'contromisure pedagogico-percettive' in termini di riduzione della velocità e condizionamento imposto del comportamento di guida degli utenti stradali.

5.3 Organizzazione delle attività.

Le attività di ciascuna delle due fasi sperimentali sono state organizzate in maniera coordinata ed integrata al fine di consentire il raggiungimento degli obiettivi specifici assegnati a ciascun sottoprogetto e di stabilire delle relazioni trasversali tra gli ambienti di studio reale e virtuale, oggetto di ricerca.

Nell'ambito della **prima fase** sono state previste e completate le seguenti attività, cronologicamente riportate:

-
- I. *individuazione* del contesto di studio;
 - II. *caratterizzazione funzionale e geometrica* del tronco stradale, compresa la ricostruzione geometrica del tracciato a partire dal progetto esecutivo appaltato dell'opera e la caratterizzazione della segnaletica stradale (orizzontale/verticale) e degli impianti di illuminazione esistenti in loco;
 - III. *analisi di sicurezza del tronco stradale* con conseguente evidenziazione degli elementi oggettivi di rischio per la sicurezza della circolazione;
 - IV. *pianificazione dei rilievi* video in funzione delle criticità infrastrutturali rilevate e contestuale localizzazione delle sezioni di monitoraggio ritenute maggiormente significative;
 - V. *acquisizione di dati strumentali (video) descrittivi della condotta di guida* degli utenti stradali in ambo le direzioni di marcia, in condizioni ambientali diverse (luce diurna/notturna);
 - VI. *parametrizzazione ed analisi dei dati* descrittivi della condotta di guida degli utenti stradali in condizioni operative di esercizio *in relazione con gli elementi di rischio e/o emergenti* dell'ambiente stradale (segnaletica, geometria)

I risultati derivati nell'ambito della prima fase del progetto hanno supportato le attività previste e completate nell'ambito della successiva parte sperimentale, concernente la ricostruzione modellistica dell'ambiente di guida in realtà virtuale. Nello specifico, le attività sperimentali condotte nella **seconda fase** si possono riassumere nelle seguenti voci:

- I. *ricostruzione modellistica tridimensionale del contesto di studio*, a partire dal progetto tridimensionale del tronco stradale, previa conduzione di rilievi in situ per la descrizione degli elementi esterni e di arredo dello spazio stradale (edifici, vegetazione, infrastrutture diverse, colori e punti-luce naturali, ecc.);
- II. *importazione* del modello tridimensionale del contesto di studio *in un applicativo operante in realtà virtuale* entro cui sono state previste le successive attività;
- III. *definizione, costruzione e calibrazione del modello virtuale di veicolo* da implementare entro l'ambiente di guida oggetto di prova, previa concertazione sulle implicazioni di tipo ergonomico correlate alla scelta della natura e della tipologia dell'ambiente di guida prescelto;
- IV. *calibrazione del modello* in funzione dei dati sperimentali relativi alla condotta di guida reale desunti dalla prima fase del progetto, allo scopo di conferire all'ambiente virtuale le caratteristiche di massima verosimiglianza con l'ambiente reale già studiato;
- V. *definizione di cinque diversi ambienti di guida*, distinti l'uno dall'altro da una sola variabile indipendente (segnaletica verticale od orizzontale od entrambe, geometria

dell'asse), da sottoporre a prova di feedback da parte di alcuni volontari appositamente ricercati;

- VI. *introduzione della variabile indipendente* successiva consistente nelle condizioni di *luminosità dell'ambiente di guida* (luce diurna/notturna);
- VII. *conduzione delle prove di guida su soggetti volontari* in tutti gli ambienti di guida previsti;
- VIII. *parametrizzazione ed analisi dei risultati ottenuti*, in relazione con le diverse condizioni di guida e con l'ambiente reale di origine.

Alla ricongiunzione dei risultati sperimentali delle due fasi condotte sono conseguite le considerazioni finali e conclusive del progetto.

5.4 Descrizione del caso-studio.

Per ambiente di guida va inteso l'insieme di fattori che determina in ogni situazione il comportamento degli utenti ed il conseguente stato di rischio. L'ambiente di studio ricercato è stato conseguentemente valutato in funzione di diversi parametri, ben descritti in letteratura come potenzialmente condizionati il comportamento spontaneo di guida da parte degli utenti stradali. Tra essi, quelli prioritariamente considerati nella fase di individuazione del contesto di studio sono riassunti tra le seguenti voci:

- caratteristiche geometriche dell'asse (raggi di curvatura, rettifili, presenza/assenza di raccordi a curva variabile);
- caratteristiche geometriche della piattaforma stradale;
- caratteristiche funzionali della superficie stradale;
- caratteristiche di servizio del tronco stradale (flussi veicolari, livello di servizio, velocità);
- caratteristiche degli impianti di illuminazione;
- caratteristiche della segnaletica verticale ed orizzontale;

Dopo un confronto tra diverse ipotesi alternative, la scelta definitiva è caduta su un tratto di rilevante interesse della S.P. n. 57 ' di Carpane', appartenente alla rete stradale della Provincia di Padova. L'asse viario dell'infrastruttura di interesse si snoda in direzione est-ovest tra i Comuni di Vigenza (ad ovest) e Pianga (ad est), mantenendo un andamento pseudo-parallelo alla linea ferroviaria Venezia-Padova, posizionata a sud dell'asta stradale. In particolare, il tronco stradale di interesse si colloca tra le progressive chilometriche 1+700 (in località Carpane di Vigonza) e 2+500 (in località Barbariga di Vigonza).

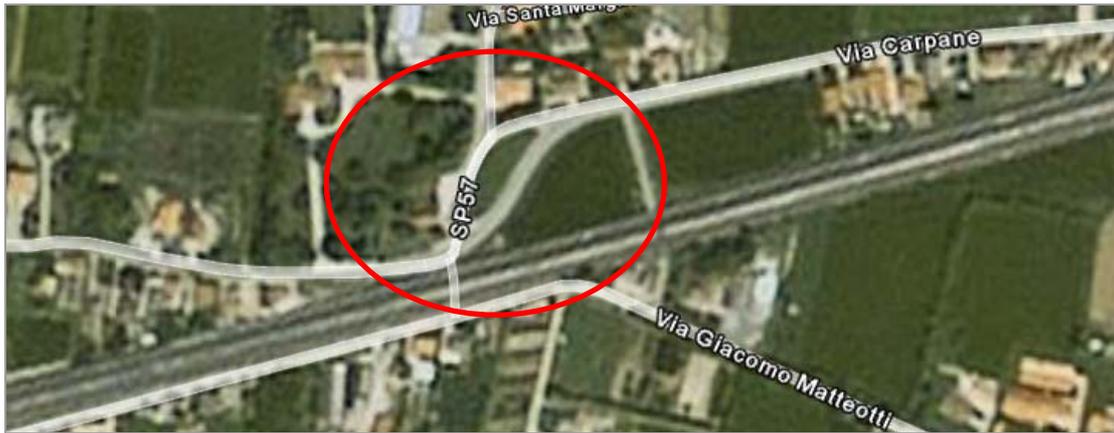


Fig. V.1 – Ortofoto del contesto di studio.

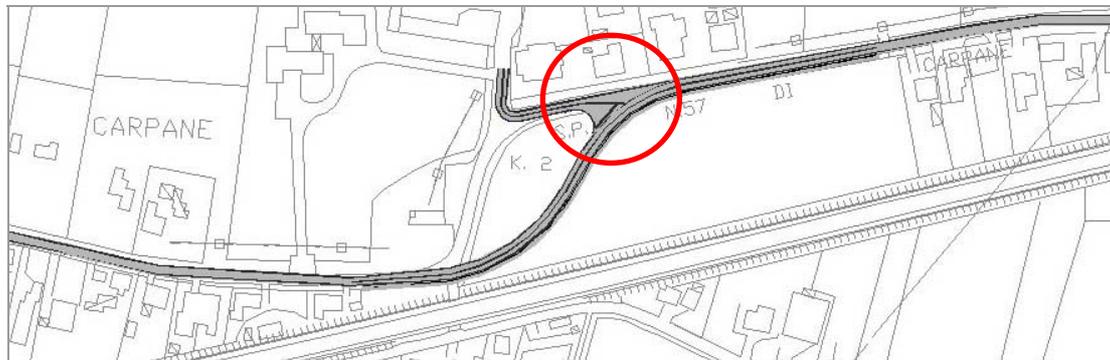


Fig. V.2 – Ricostruzione planimetrica (fuori scala) del tronco stradale.

Il tracciato é composto da due lunghi rettili tra cui è stata più recentemente realizzata una variante planimetrica ad S, avente caratteristiche geometrico-funzionali assimilabili a quelle delle strade di tipo E “urbane di quartiere” ai sensi della vigente normativa italiana in materia di progettazione e costruzione delle strade. I raggi di curvatura della variante progettuale si misurano in 96 m ($S_v = 83.9$ m) e 81 m ($S_v = 69.5$ m) rispettivamente procedendo da ovest verso est nella caratterizzazione geometrica dell’asse. A precedere la curva circolare di raggio pari a 96 m è stato introdotto un elemento circolare a più grande curvatura ($R = 245$ m, $S_v = 56$ m) avente la funzione di raccordo curvilineo (pseudo-clotoidico) tra i due elementi geometrici esistente e di nuova realizzazione. Tra le due controcurve è inserito un rettillo di lunghezza pari a 26,2 m. I due rettili di approccio sono misurati in 166, 3 m sul lato ovest e 404,6 m sul lato est.

Il progetto esecutivo dell’intervento in variante è stato redatto nel gennaio 2001 e realizzato nell’arco dello stesso anno, nell’ambito degli interventi di compensazione territoriale attuati per la realizzazione della linea AC/AV lungo la direttrice Venezia-Padova. Di conseguenza per la sua verifica geometrica non è applicabile quanto statuito a norma di legge dal D.M. 5 novembre 2001. L’assenza di curve di transizione tra gli elementi rettilinei e quelli circolari e

tra le due controcurve non costituisce dunque deroga del succitato decreto rispetto al quale nessuna considerazione di merito può essere condotta.

Tab. V.1 – Quadro sinottico degli elementi geometrici elementari del tracciato stradale.

Elemento geometrico	Sviluppo(m)	Raggio(m)
Rettifilo R1	166,3	-
Curva C1	56,04	295,44
Curva C2	83,9	96,49
Rettifilo R2	26,2	-
Curva C3	69,57	81,03
Rettifilo R3	404,6	-

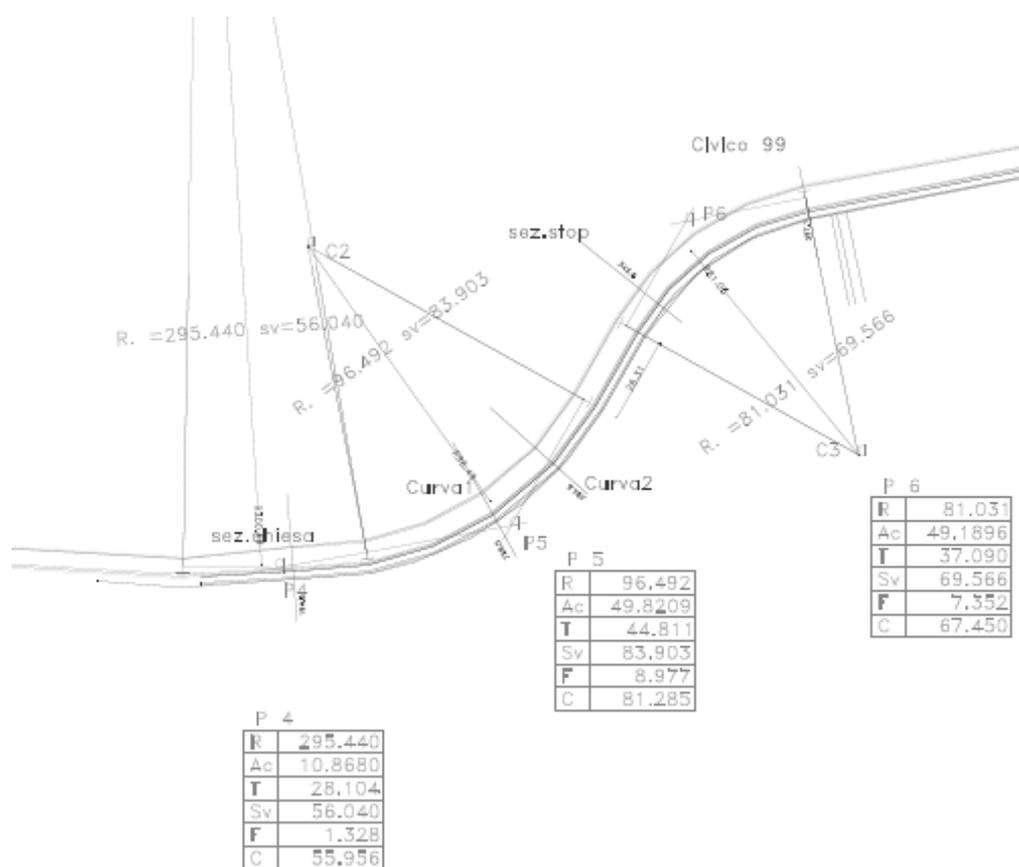


Fig. V.3 – Caratteristiche geometriche effettive del tratto a curvatura mista del tronco stradale.

Gli elementi di maggior interesse dal punto di vista della valutazione comportamentale si riconoscono nella presenza di un'intersezione stradale di nuova collocazione in corrispondenza della sezione 6 (Fig. V.4), che introduce un errore di carattere percettivo nella lettura del tracciato provenendo da est, ulteriormente aggravato dalla posizione della pubblica illuminazione che non consente un'efficace interpretazione della fisionomia del

tracciato in condizioni di guida notturna. Di notevole interesse è anche la valutazione dell'efficacia della segnaletica verticale, collocata in punti poco visibili durante la guida. Si riscontra anche una sostanziale insufficienza delle distanze di visibilità nel tratto curvilineo, tali per cui non è assicurata la mutua visibilità tra i veicoli entranti nelle controcurve da entrambe le direzioni. Gli elementi ritenuti critici sopra descritti traggono giustificazione dalla campagna sperimentale condotta nella realtà, sulle cui risultanze è stato possibile individuare un set di interventi progettuali migliorativi a livello sia strutturale (planimetria della strada) che funzionale (segnaletica orizzontale/verticale), da verificare in ambiente virtuale secondo le modalità descritte nel seguito.

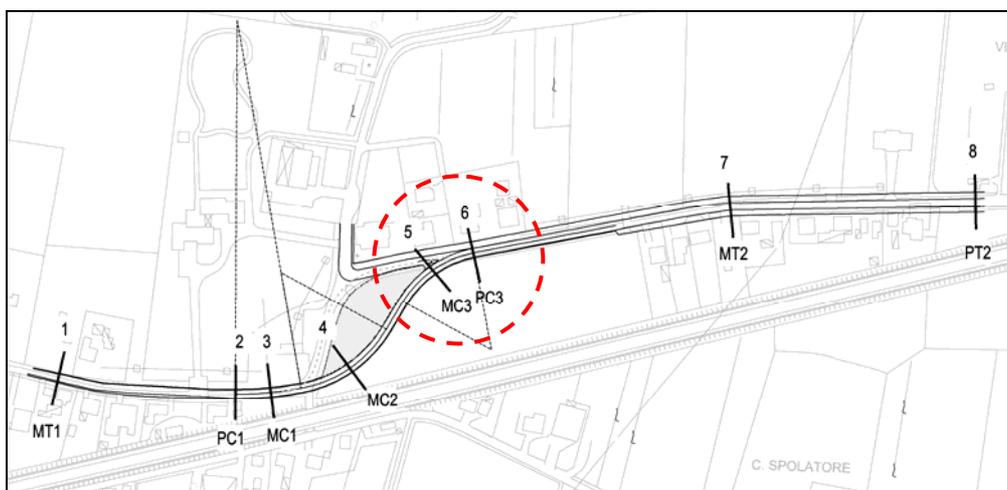


Fig V.4 – Planimetria di dettaglio del tronco stradale.

Dal punto di vista funzionale, le caratteristiche superficiali del manto stradale sono state rilevate ed indirettamente aggregate, allo scopo di restituire un indice prestazionale univoco per i diversi elementi geometrici di interesse, sfruttando le relazioni analitiche indirette per la derivazione dell'International Friction Index e dello Skid Number, già illustrate nell'ambito delle precedenti sezioni del presente rapporto.

I risultati sintetici descrittivi dello stato funzionale della pavimentazione stradale attualmente in esercizio lungo il tronco stradale oggetto di studio si riassumono come riportato nella seguente tabella sinottica:

Tab. V.2 – Indici indiretti di aderenza nei tratti rettilinei e curvilinei del tracciato.

SN - IFI (a 50 km/h)			
Sezione	Descrizione	SN	IFI
Rettifilo R1	Provenienza Vigonza (Ovest)	0,32	0,32
Centro curva C2	Provenienza Vigonza (Ovest)	0,35	0,40
Centro curva C3	Provenienza Stazione (Est)	0,39	0,42
Rettifilo R3	Provenienza Stazione (Est)	0,33	0,34

Tra le caratteristiche funzionali particolare evidenza è stata tributata alla segnaletica stradale sia orizzontale che verticale: la prima è stata analizzata secondo quanto previsto in seno alla norma UNI EN 1436:2007 “Materiali per segnaletica orizzontale - Prestazioni della segnaletica orizzontale per gli utenti della strada” attraverso la determinazione del coefficiente di luminanza retroriflessa R_L delle strisce di margine e di mezzzeria lungo l'intero sviluppo del tronco stradale di interesse. I valori così determinati – caratteristici della visibilità notturna della segnaletica così come percepiti dagli utenti stradali durante la guida – sono stati riferiti ai valori-soglia tipicamente descritti in letteratura (Zhwalen et al., 2000) di 100 mcd $lx^{-1} m^2$. I coefficienti di retroriflessione sono stati acquisiti mediante retroriflettometro laser del tipo “DELTA LTL2000S Retrometer” e sintetizzati nella seguente tabella riassuntiva. Per ciascun tratto è riportato il valore del coefficiente medio tra le due strisce di margine, le cui caratteristiche sono state rilevate con passo di campionamento pari a 10 m.

Tab. V.3 – Coefficienti di luminanza retroriflessa medi della segnaletica stradale nei tratti rettilinei e curvilinei del tracciato.

Coefficiente di luminanza retroriflessa R_L (mcd $lx^{-1} m^2$)			
Tratto	Descrizione	$R_{L, medio}$	$R_{L, rif}$
Rettifilo R1	Provenienza Vigonza (Ovest)	86	< 100
Centro curva C2	Provenienza Vigonza (Ovest)	77	< 100
Centro curva C3	Provenienza Stazione (Est)	81	< 100
Rettifilo R3	Provenienza Stazione (Est)	184	> 100

La descrizione dello stato funzionale della segnaletica orizzontale, condotta nelle predette modalità, evidenzia una sostanziale insufficienza lungo lo sviluppo dell'intero tronco stradale ad eccezione del tratto est recentemente ripavimentato su cui è stato applicato un prodotto verniciante con post-spruzzatura vetrosa ad alta visibilità.

La segnaletica verticale consta di un segnale di doppia curva (C.d.S. fig.II 6 art. 86 e fig.II 7 art. 86), un segnale di limite di velocità 50 km/h (C.d.S. figII 50 art. 116) unito ad un divieto di sorpasso (fig.II 48 art. 116) posti rispettivamente a 60 m e 100 m dalla curva stessa provenendo da entrambe le direzioni. Per segnalare il restringimento della carreggiata all'uscita da entrambe le curve è presente un segnale di strettoia simmetrica (fig II 17 art. 90). In corrispondenza all'immissione della strada secondaria sono posti un delineatore di curva stretta (fig.II 466 art. 174) e sei delineatori modulari di curva (fig. II 468 art. 174) con lo scopo di distinguere l'effettivo tracciato stradale. Lungo il lato destro della carreggiata provenendo da Barbariga con un passo di circa 15 m sono posti dei delineatori normali di

marginie (C.d.S. fig.II 463 art. 173), i quali avendo un effetto rifrangente sono particolarmente utili durante la guida notturna.

L' illuminazione è piuttosto varia lungo tutto il percorso, nel tratto centrale costituito dalla doppia curva il passo tra i lampioni varia dai 20 ai 30 metri e la luce ha una potenza piuttosto elevata e riconoscibile da lunga distanza. Nell'immissione in curva però vi è una sovrapposizione tra la vecchia illuminazione, più debole, e quella della doppia curva costruita recentemente al momento della risistemazione del tracciato con l'aggiunta della pista ciclopedonale. L'illuminazione precedente segue il vecchio tracciato stradale che proseguiva in via S. Margherita e in questo modo accentua l'errata percezione del tracciato da parte dell'utenza. I guidatori che provengono in entrambe le direzioni da una strada poco illuminata, piuttosto stretta e priva di segnaletica orizzontale di divisione delle corsie si trovano per il breve tratto curvilineo in una situazione completamente diversa e percepita come favorevole alla guida anche di notte per la grande illuminazione e questo li porta a sottovalutare la pericolosità del tracciato, tanto più che questo " miglioramento" ha uno sviluppo molto limitato e subito si torna alla situazione di provenienza.

5.5 Analisi di sicurezza del tronco stradale e criticità conseguenti.

Gli elementi rilevanti dal punto di vista della sicurezza del tronco stradale oggetto di studio si possono riassumere nei seguenti punti:

1) Occlusione visuale nei tratti di approccio alla S



Fig. V.5 – Viste prospettive delle sezioni di ingresso in curva nelle due direzioni di marcia.

2) *Posizionamento in nuova sede dell'intersezione con la viabilità comunale*



Fig. V.6 – Vista dell'intersezione di nuova collocazione in corrispondenza della sezione n. 6

3) *Segnaletica orizzontale e verticale non efficace per i veicoli provenienti da est*



Fig. V.7 – Vista del tronco a curvatura mista dalla tangente di approccio n. 2

4) *Variazione della geometria trasversale di piattaforma in corrispondenza dei punti di ingresso in curva*



Fig. V.8 – Vista del restringimento di carreggiata in uscita dalla curva 1 nella direzione di marcia B.

-
- 5) *Lunghi rettifili (o pseudo-rettifili) di approccio alla S in condizioni di traffico libero (basso volume di traffico nelle due direzioni) ed in assenza di intersezioni per almeno 1 km in entrambe le direzioni (solo accessi privati).*



Fig. V.9 – Vista dei rettifili di approccio nelle due direzioni di marcia.

- 6) *Illuminazione pubblica solo in corrispondenza della S.*



Fig. V.10 – Vista del tronco stradale a curvatura mista dalla sezione n. 2

- 7) *Nuovo percorso ciclo-pedonale in affiancamento della variante viabilistica (con separazione fisica realizzata mediante cordona ed archetti metallici)*
- 8) *Area frequentemente soggetta a nebbia.*

L'analisi di sicurezza condotta evidenzia che il tronco stradale è sede potenziale di rischio di errori di percezione visiva associati alla concorsualità degli effetti sopra richiamati.

Capitolo 6

ATTIVITÀ SPERIMENTALI NELL'AMBIENTE 'FISICO'

6.1 Obiettivi specifici della ricerca.

Gli obiettivi specifici della fase sperimentale sull'ambiente reale corrispondono alla volontà di descrivere la condotta di guida degli utenti stradali in corrispondenza di uno sviluppo curvilineo ad S, lungo un tracciato stradale esistente non conforme ai requisiti geometrici previsti dalla vigente normativa italiana in materia di progettazione e costruzione delle infrastrutture stradali (D.M. 5 novembre 2001).

L'obiettivo appena descritto si configura altresì come corrispondente alla volontà di analizzare la propensione al rischio durante la guida in diverse condizioni di esercizio entro un ambiente stradale affetto da alcune criticità sia di tipo funzionale che geometrico. In particolare, sono stati individuati due sotto-obiettivi, finalizzati a:

- la determinazione delle relazioni – se esistenti – tra comportamento di guida ed elementi singoli/puntuali dello spazio stradale (quali, ad esempio, la segnaletica verticale, i punti-luce, ecc.) e
- la valutazione dell'impatto psico-percettivo sul comportamento di guida dell'intersezione stradale collocata in corrispondenza della sezione di ingresso in curva provenendo da est (curva 3), con particolare interesse per la direzione di marcia est-ovest, specie durante il periodo notturno.

Le ragioni di interesse per l'ambiente sono presto spiegate dalla naturale enfaticizzazione delle criticità strutturali del tronco stradale (sia geometriche che funzionali), a maggior ragione se associate ad elementi di rischio ulteriori presenti nel corso del periodo notturno, quali l'errato posizionamento della pubblica illuminazione rispetto all'attuale configurazione geometrica della strada.

Più precisamente, a seguito dell'intervento di adeguamento geometrico della curva ad S realizzato nel corso del 2001, è stata riposizionata la pubblica illuminazione lungo il lato sud del tracciato ma non sul lato nord, sicché allo stato attuale delle cose i punti-luce sul lato nord continuano ad illuminare lo sviluppo del tracciato storico, anche nel tratto ormai dimesso. Per conseguenza, nell'arco del periodo notturno i veicoli provenienti da est si trovano a dover leggere, interpretare ed affrontare sia il difetto di tipo geometrico associato alla presenza

dell'intersezione all'ingresso della curva 3 (che induce a proseguire diritti anziché mantenere la traiettoria lungo l'arco curvilineo incipiente) sia quello legato alla presenza dell'illuminazione errata, tale da assecondare gli utenti nell'errore di tipo percettivo poc'anzi ricordato. Una volta richiamata l'importanza dell'illuminazione e della segnaletica orizzontale quali guide ottiche durante la guida notturna, è chiaro che laddove i predetti elementi risultino essere lacunosi se non addirittura impropri il rischio che tali vulnerabilità si possano tradurre in errori durante la guida - nell'impostazione delle curve o delle traiettorie - cresce notevolmente.

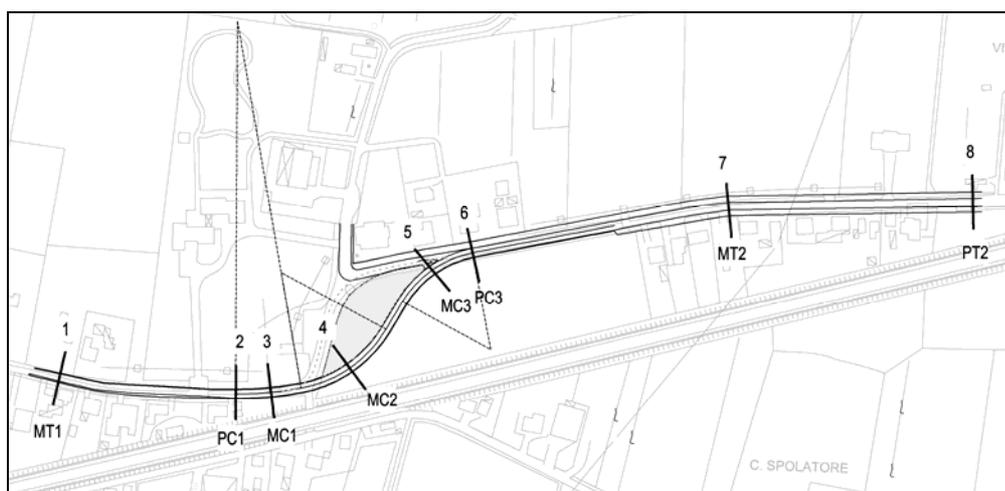


Fig. VI.1 – Planimetria del tronco stradale con individuazione delle sezioni di monitoraggio.

6.2 Metodologie di prova.

Al fine di conseguire gli obiettivi sopra richiamati, traendo spunto da quanto riportato in letteratura in riferimento a casi omologhi od affini, si è operato individuando una serie di sezioni di monitoraggio delle velocità in posizioni strategiche, strettamente correlate agli aspetti di criticità strutturale evidenziati nelle sezioni precedenti.

In particolare, sono state individuate 8 sezioni di controllo: le sezioni 1,7 e 8 sono collocate in rettilineo, le restanti nel tratto a curvatura mista dello sviluppo ad S. Nello specifico:

Tab. VI.1 – Quadro di corrispondenza delle sezioni di monitoraggio con gli elementi geometrici salienti del tracciato stradale.

N.ro	Elemento geometrico	Sezione
1	Rettilineo	Centrale
2	Curva 1	Ingresso/uscita
3	Curva 2	Centrale
4	Rettilineo	Centrale

5	Curva 3	Centrale
6	Curva 3	Ingresso/uscita
7	Rettifilo	Centrale
8	Rettifilo	Centrale

Per ciascuna delle sezioni è stato stabilito di rilevare entrambe le direzioni di marcia. Le condizioni operative nel corso dei rilievi sono state stabilite nel cielo sereno, in presenza di traffico scorrevole e limitate ai soli veicoli isolati (con intertempo non inferiore a 4 s) della categoria autovetture. I rilievi sono stati condotti su un numero sufficientemente rappresentativo di veicoli in ciascuna delle sezioni, sia in condizioni diurne che notturne. In presenza di dati incerti, non validi o scarsamente rappresentativi i rilievi sono stati reiterati fino a convergenza per affinità con le restanti sezioni di monitoraggio.

I rilievi di velocità sono stati condotti mediante la tecnica dei filmati con successiva analisi cinefotogrammetrica mediante appositi software di elaborazione-video disponibili sul mercato. I filmati sono stati acquisiti mediante videocamere di ordinario utilizzo, appositamente occultate al traffico passante al fine di non interferire con la condotta spontanea di guida degli utenti della strada.

Le caratteristiche della strumentazione utilizzata è di seguito riassunta:

1) videocamera digitale Panasonic NV-DS55:

- tipo mirino: Monitor a cristalli liquidi
- zoom ottico: 15 x
- tipo supporto: MiniDV
- peso: 490 g
- display LCD: 2,5 pollici
- fattore di forma display: Rotante (120°)
- sensore ottico: CCD
- dimensione sensore ottico: 1/4"
- stabilizzatore immagine: Senza stabilizzatore immagine
- apertura lente: F/1.8
- lunghezza focale minima: 3,7 mm
- lunghezza focale massima: 55500 mm
- formato immagini: JPEG
- tipo memoria: MultiMediaCard
- capacità memoria flash: 4 MB
- durata batteria: 80 min
- larghezza: 4,7 cm

-
- profondità: 12,9 cm
 - altezza: 9,4 cm



Fig VI.2 - Videocamera digitale Panasonic NV-DS55

2) videocamera digitale JVC GR-D720:

- zoom ottico (28x)
- modalità Wide 16:9 (alta qualità)
- riduzione del rumore 3D (3D NR)
- monitor "Clear LCD" da 2,7" Wide
- stick Control per agevolare l'utilizzo
- informazioni batteria (Data Battery)
- funzionamento Power-Linked
- tasto DATA/tasto AUTO
- CCD da 1/6" con 800.000 pixel
- zoom ottico 28x/Zoom digitale 800x
- monitor LCD da 2,7" Wide
- mirino B/N
- uscita DV



Fig VI.3 - Videocamera digitale JVC GR-D720

I dispositivi di rilevazione sono stati posti su appositi treppiedi (opportunamente occultati alla vista) od altrimenti appoggiati su una superficie stabile. In considerazione dell'elevata qualità video dei dispositivi, si è ritenuto che essi occasionalmente potessero essere posizionati anche ad elevata distanza dal ciglio stradale. Si è comunque sempre rispettato l'obiettivo minimo prioritario per ciascuna sezione corrispondente alla necessità di riprendere al minimo le ruote dei veicoli, sulla base delle quali sono state successivamente calcolate le velocità di transito dei veicoli.

Dal punto di vista operativo, il metodo di acquisizione ha previsto che preventivamente fosse fissata la lunghezza del tratto di rilievo - ovvero fosse segnata sulla pavimentazione l'estensione dello stesso mediante segni di acquisizione a distanza nota ortogonali al senso di marcia. In una fase successiva si è provveduto a calcolare tramite analisi fotogrammetrica il tempo che ciascun veicolo ha impiegato per passare da un segno a quelli successivi, avvalendosi di software commerciali per l'elaborazione-video.

La procedura operativa attuata per l'acquisizione delle velocità può sintetizzarsi nei seguenti punti fondamentali:

- tracciamento sulla pavimentazione del campo di visuale della fotocamera;
- tracciamento entro il campo predetto di almeno 5 tratti, in banchina o su cordone fuori carreggiata, distanti 50 cm l'uno dall'altro, in modo tale da ottenere in fase di rielaborazione un reticolo di linee ortogonali alla direzione di marcia (fig. VI.4).

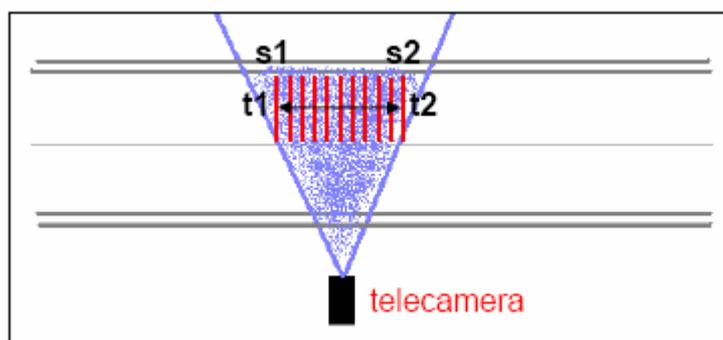


Fig. VI.4 – Schema operativo per il calcolo della velocità istantanea di transito dei veicoli

- tracciamento del reticolo di acquisizione tramite software commerciale
- analisi fotogrammetrica dei filmati acquisiti

La deduzione della velocità veicolare istantanea dei veicoli monitorati deriva dall'implementazione delle leggi del moto elementare, rispetto a grandezze note e rilevate per via diretta - e cioè lo spazio (tra segni di acquisizione successivi) ed il tempo (progressive temporali della scansione-video). Tra due sezioni successive, la velocità istantanea conseguirà all'applicazione della legge elementare del moto:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$$

in cui S è una grandezza nota (rispetto ai riferimenti assunti) e t è misurata.

Per quanto concerne l'elaborazione dei filmati rilevati, tra le diverse possibilità offerte dal mercato si è optato per avvalersi delle funzionalità del software Adobe Premiere Pro, le cui caratteristiche e modalità specifiche di impiego risultano presto richiamate.

6.3 Modalità di elaborazione fotogrammetrica dei video.

Un video è costituito da una sequenza di immagini individuali, riprodotte ad una velocità ben determinata, chiamate *frames* o fotogrammi. Per rendere maggiormente la sensazione del movimento, è indispensabile che il video sia realizzato almeno a 24 fotogrammi per ogni secondo (*fps*). Da 24 a 30 c'è un miglioramento della qualità video in riproduzione che non è tuttavia normalmente determinante. Le moderne videocamere digitali catturano le immagini inquadrare dall'obiettivo con una frequenza di acquisizione corrispondente alla taratura fotogrammetrica impostata dal produttore o dall'utilizzatore, convertendole in formato digitale. In fase di acquisizione i colori naturali delle immagini vengono tradotti in combinazioni dei tre primari: rosso (Red), verde (Green) e blu (Blue) secondo la procedura per l'appunto detta RGB.

Esiste tuttavia un'altra modalità di acquisizione che cattura le immagini attraverso informazioni di cromaticità (saturazione del colore) di luminanza (brillantezza dell'immagine) e di sincronismo. Questa procedura è fornita e codificata da un segnale composito. Negli USA e in Giappone il segnale composito standard è il NTSC (National Television Standard Committee). Questo segnale ha un frame rate di 29.97 fps, arrotondato a 30. La risoluzione video è di 720 x 486 px (pixel). In gran parte dell'Europa invece il segnale utilizzato è il PAL (Phase Alternating Line), con un frame rate di 25 fps e una risoluzione di 720 x 576 px. Per completezza è bene citare il SECAM, segnale composito francese, che sta appunto per *Système Couleur Avec Memoire*. Esso è incompatibile con i sistemi PAL e NTSC.

Per timecode di un filmato - utilizzato da SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) – si intende schema di codici rappresentato con numeri, avente la funzione di determinare con massima precisione la lunghezza di un intero filmato in termini non solo di unità di tempo fondamentali (ore, minuti, secondi) ma anche mediante il conteggio dei fotogrammi correnti in fase di riproduzione.

La procedura utilizzata per la determinazione delle velocità operative dei veicoli a partire dai filmati acquisiti a bordo strada ha richiesto l'utilizzo di un apposito software di elaborazione video, disponibile sul mercato e riconosciuto nell'Adobe Premiere Pro CS3. Le funzioni principali del software utilizzate in fase di analisi video sono presto riassunte.

Una volta aperto il programma e selezionata l'opzione 'Nuovo Progetto', viene richiesta l'impostazione del tipo di segnale composito da attribuire al filmato da uploadare all'interno dell'applicativo per la successiva analisi, in relazione alle caratteristiche di acquisizione dei filmati impostate sulle videocamere in fase di rilievo. Visto che il sistema utilizzato dalle videocamere è il PAL, è stata selezionata all'interno del software l'opzione PAL - Widescreen 48kHz in quanto all'opzione Widescreen corrisponde la proporzione standard dello schermo, in rapporto 16:9.

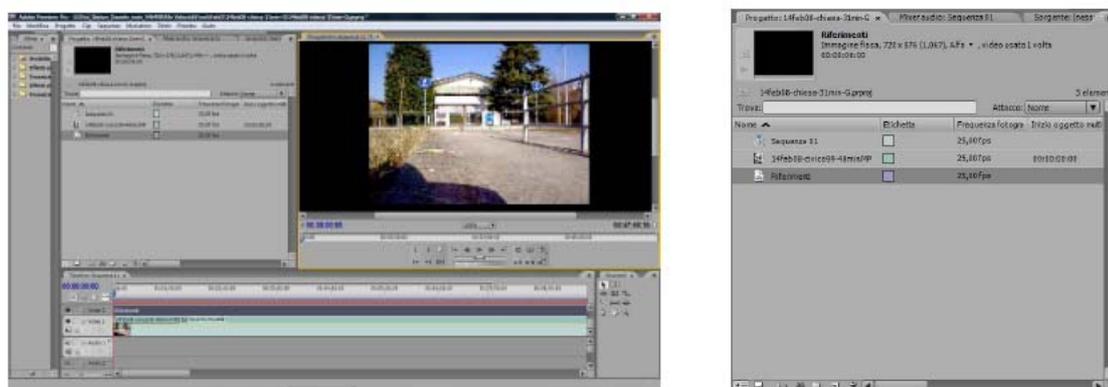


Fig. VI.5 –Esempio di schermata del software utilizzato per l'elaborazione video dei filmati acquisiti.

L'importazione dei filmati si realizza all'interno della maschera 'Progetto'. La timeline contiene una sorta di "linea del tempo", scandita orizzontalmente da un codice temporale chiamato timecode che permette di definire una successione cronologica dei filmati, a seconda della posizione che gli stessi occupano. Sulla timeline, possono essere inserite più clip in successione, semplicemente trascinando le rispettive icone dalla finestra 'Progetto' e rilasciandole sulle tracce desiderate.

La fase successiva consiste nel tracciamento di barre reciprocamente parallele e ortogonali alla direzione di marcia in corrispondenza dei segni di acquisizione marcati durante l'acquisizione dei filmati sulla sezione di rilievo. I segni di riferimento marcati in sito sono posti ad intervalli di 0.50 m in senso longitudinale lungo la direzione di marcia per un'estensione di 3 m (7 segni) in posizione centrata rispetto alla posizione della videocamera. Di conseguenza, la videocamera è posizionata al centro dell'allineamento in proiezione ortogonale alla direzione di marcia, in maniera tale da limitare l'effetto di aberrazione ottica conseguente alla prospettiva delle linee di costruzione. Per comodità di calcolo sono state

tracciate anche delle linee intermedie con passo 0.25 m (colore verde), aventi lo scopo di intensificare la maglia del reticolo di calcolo esemplificato nella seguente figura VI.6.

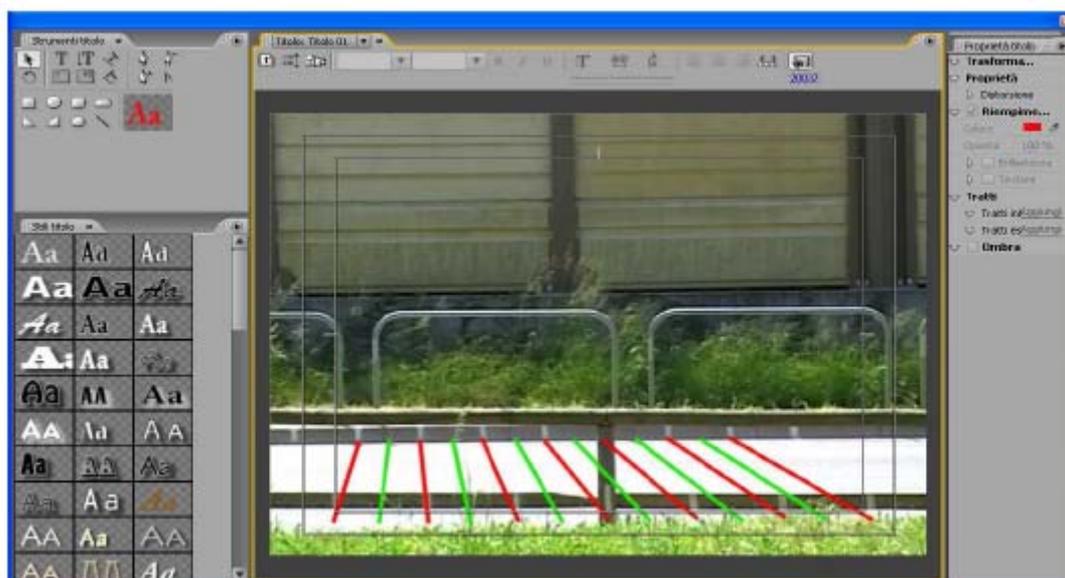


Fig. VI.6 – Esempio di reticolazione per il calcolo delle velocità di transito da video

6.4 Rilievo ed analisi delle velocità operative.

Una volta ricostruite le linee di acquisizione e di riferimento per il calcolo delle velocità di transito dei veicoli secondo la modalità dell'analisi fotogrammetrica dei filmati, è stato possibile procedere operativamente all'analisi dei singoli video rilevati, riferiti a tutte le sezioni di monitoraggio (dalla 1 alla 8) in entrambe le direzioni di marcia (il regolo di calcolo è comune) e nelle diverse condizioni operative di interesse (luce diurna e notturna).

La fase di analisi ha richiesto l'utilizzo di un computer portatile (modello Asus A4) dotato di processore AMD Athlon 64, con sistema operativo Windows XP, nel quale è stato installato Adobe Premiere Pro CS3 per poter elaborare i video e Microsoft Excel, con cui è stato possibile quantificare le velocità di ogni singolo veicolo.

Utilizzando i controlli di riproduzione è stato possibile interrompere il video al passaggio dei veicoli sopra ciascuno dei riferimenti individuati (ruota anteriore destra o sinistra, a seconda delle direzioni di marcia) cui è conseguita la trascrizione degli intervalli temporali t_1 e t_2 e delle distanze progressive s_1 ed s_2 , riferite all'inizio del video (in questo caso vengono trascritti i frames).

Fatte le opportune conversioni (le distanze vanno trasformate in chilometri, mentre i frames in ore ricordando che 1 frame corrisponde a 1/25 secondi), la determinazione della velocità di ogni singolo veicolo, per entrambi i metodi, è subito determinata :

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1}$$

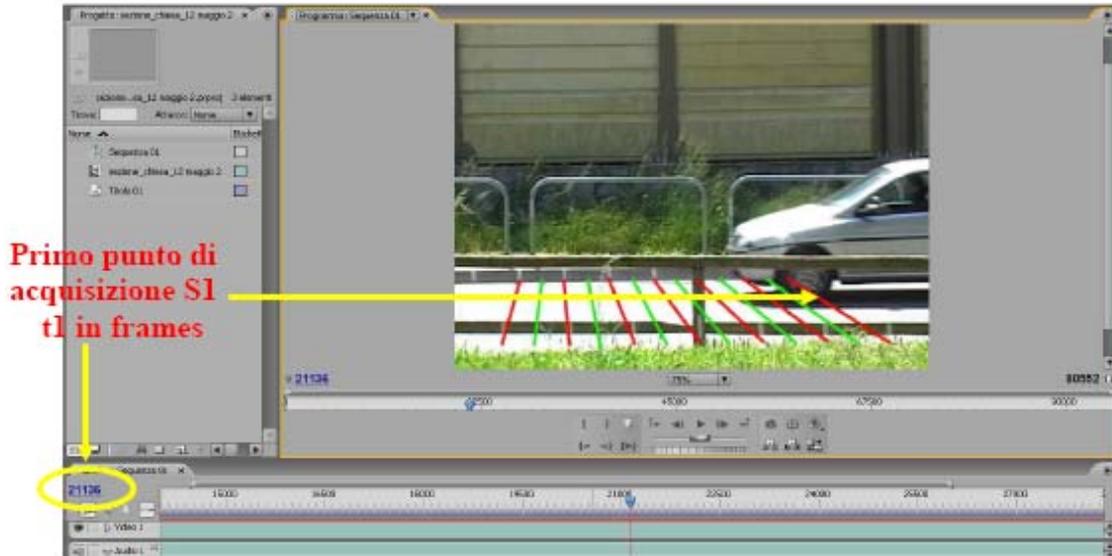


Fig. VI.7 – Istantanea del transito di un veicolo in corrispondenza del primo punto di riferimento.

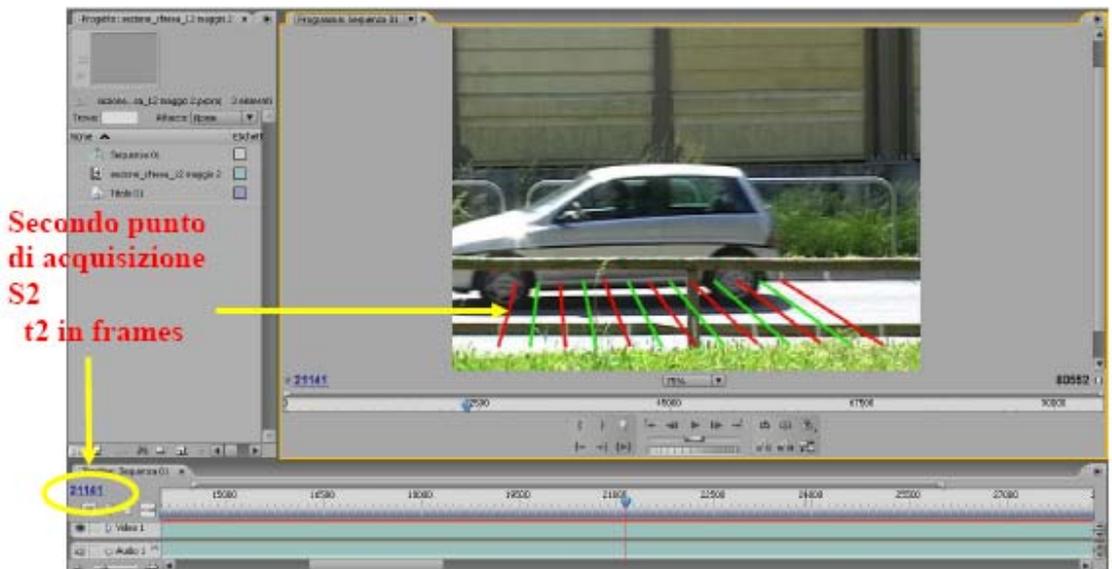


Fig. VI.8 – Istantanea del transito di un veicolo in corrispondenza del secondo punto di riferimento.

La seguente tabella rappresenta un esempio delle modalità di calcolo delle velocità di percorrenza di 10 veicoli in transito in corrispondenza della sezione 1 (Direzione B). Per ciascun veicolo transitato si sono riportati i riferimenti temporali tra ingresso ed uscita rispetto alle linee di demarcazione dell'intervallo spaziale.

Tab. VI.2 – Esempio di calcolo delle velocità di transito dei veicoli mediante elaborazione fotogrammetrica dei video.

SEZIONE_CASA COSTRUZIONE direzione Vigonza										
	X1 (m)	X2 (m)	T1 [frame]	T2 [frame]	delta X (m)	delta T (frame)	velocità (m/s)	velocità (km/h)	i.tempo (s)	v con it > 4s (km/h)
1	0,250	2,750	81	84	2,50	3,00	20,83	75,00		75,00
2	0,250	2,750	2099	2102	2,50	3,00	20,83	75,00	80,72	75,00
3	0,500	3,250	4101	4105	2,75	4,00	17,19	61,88	80,08	61,88
4	0,000	3,000	4209	4214	3,00	5,00	15,00	54,00	4,32	54,00
5	0,750	3,375	5192	5195	2,63	3,00	21,88	78,75	39,32	78,75
6	0,250	2,500	6476	6479	2,25	3,00	18,75	67,50	51,36	67,50
7	0,375	2,875	6854	6857	2,50	3,00	20,83	75,00	15,12	75,00
8	0,125	3,125	7514	7518	3,00	4,00	18,75	67,50	26,4	67,50
9	0,000	3,250	7796	7800	3,25	4,00	20,31	73,13	11,28	73,13
10	0,500	2,500	8002	8005	2,00	3,00	16,67	60,00	8,24	60,00

Si ricorda che, affinché non sussistano interferenze mutue tra i veicoli in maniera tale da poter considerare valida per ciascuno di essi la definizione di “veicolo isolato”, deve verificarsi tra due passaggi successivi un distanziamento temporale di 4 secondi al minimo. Nel caso specifico, tuttavia, i flussi veicolari risultano essere poco rilevanti, attestandosi su una media oraria di 250 veicoli per direzione, con un flusso massimo medio giornaliero di 450 veic/h in coincidenza con l’ora di punta del mattino (tra le 7.30 e le 8.30). In condizioni normali di traffico (metà mattina), le condizioni di implonamento veicolare risultano estremamente rare e tale per cui il tasso di rappresentatività dei veicoli isolati sul totale dei veicoli osservati si attesta in percentuale variabile tra il 75% e l’82% a seconda delle sezioni, delle direzioni di marcia e delle giornate di prova. La circostanza osservata assicura non solo una buona quantità di dati validi rispetto al totale ma anche che le condizioni di traffico si approssimano a quelle massimamente ideali di esercizio, in cui gli utenti tendono ad adottare comportamenti spontanei e scarsamente condizionati, anche a livello di carico mentale e di motivazioni di natura psicologica, estremamente rilevanti in presenza di traffico ed in ambito urbano.

Nottetempo, la rappresentatività statistica dei veicoli isolati sul totale supera il 90% in quasi tutte le sezioni, in ambo le direzioni di marcia, essendo riferita ad un valore medio di flusso orario di 85 veic/ora nella direzione di marcia A e di 94 veic/ora nella direzione di marcia B.

Per ciascuna delle 8 sezioni, sono stati valutati i principali parametri di interesse ai fini della ricostruzione statistica delle distribuzioni delle velocità di percorrenza e della determinazione delle velocità operative. La seguente tabella VI.3 illustra un esempio di calcolo degli indici statistici determinati in riferimento al caso della sezione 1 nella direzione di marcia B.

La deviazione standard mostra la dispersione del campione attorno al valore medio e fornisce una misura statistica dell’attendibilità del rilievo, oltre a determinare la forma della curva di distribuzione delle velocità. A partire dagli stessi dati (sempre in riferimento alla

sezione 1 – Direzione B), sono stati realizzati i diagrammi cumulativi relativi alla frequenza di classe, esemplificati dalla seguente tabella VI.4.

Tab. VI.3 – Parametri statistici calcolati per ciascuna delle sezioni di monitoraggio nelle condizioni operative di esercizio considerate.

Parametro	Valore
Media	64,09
Mediana	63,75
Moda	67,50
Deviazione standard	9,68
Varianza campionaria	93,72
Curtosi	-0,24
Asimmetria	0,026
Intervallo	49,13
Minimo	39,38
Massimo	88,50
Somma	12177,89
Conteggio veicoli	265

Tab. VI.4 – Esempio di calcolo della curva cumulativa delle frequenze cumulate.

	classe	freq. ass.	freq. relat.	freq.ass.cum.	freq. relat. cum.
15	15-20	0	0,00%	0	0,00%
20	20-25	0	0,00%	0	0,00%
25	25-30	0	0,00%	0	0,00%
30	30-35	0	0,00%	0	0,00%
35	35-40	1	0,53%	1	0,53%
40	40-45	4	2,11%	5	2,63%
45	45-50	8	4,21%	13	6,84%
50	50-55	22	11,58%	35	18,42%
55	55-60	32	16,84%	67	35,26%
60	60-65	36	18,95%	103	54,21%
65	65-70	36	18,95%	139	73,16%
70	70-75	30	15,79%	169	88,95%
75	75-80	9	4,74%	178	93,68%
80	80-85	10	5,26%	188	98,95%
85	85-90	2	1,05%	190	100,00%
	totale	190	100,00%	190	100,00%

La densità di frequenza f_i relativa di classe è stata calcolata con la seguente relazione:

$$f_i = \frac{n_i}{n \cdot A}$$

Dalla frequenza relativa si è poi passati alla frequenza cumulata attraverso l'equazione:

$$F_i = A \cdot \sum f_i$$

intesa come la frequenza alla quale i veicoli viaggiano alla velocità minore o uguale alla velocità considerata. In questo modo è stato possibile ricostruire l'andamento delle distribuzioni della frequenza in relazione alla posizione di ciascuna sezione.

Per descrivere statisticamente il comportamento degli utenti stradali in corrispondenza di una certa sezione di monitoraggio in termini di velocità, viene generalmente fatto ricorso alla distribuzione di probabilità Normale (distribuzione di Gauss). La curva di distribuzione Normale è facilmente tracciabile una volta noti il valore medio μ (velocità media) delle velocità i -esime v_i e la deviazione standard σ del campione:

$$f(v_i, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{v_i - \mu}{2\sigma^2}\right)}$$

Sommando i prodotti delle ampiezze delle classi di velocità per le frequenze relative, è stato possibile tracciare la curva delle frequenze cumulate, costruita in maniera tale da riportare in ascissa i valori di velocità e in ordinata le corrispondenti percentuali dei veicoli la cui velocità è minore o uguale ad essi. A partire dalla curva delle frequenze cumulate è stato rapidamente desunto il ricercato valore della velocità dell'85° percentile (V_{85}), inteso letteralmente come valore di velocità che viene superato solamente dal 15% degli utenti rilevati in corrispondenza della sezione e che viene ordinariamente considerato il parametro descrittore più efficace del comportamento di guida non condizionato degli utenti stradali su strada in condizioni ideali di esercizio.

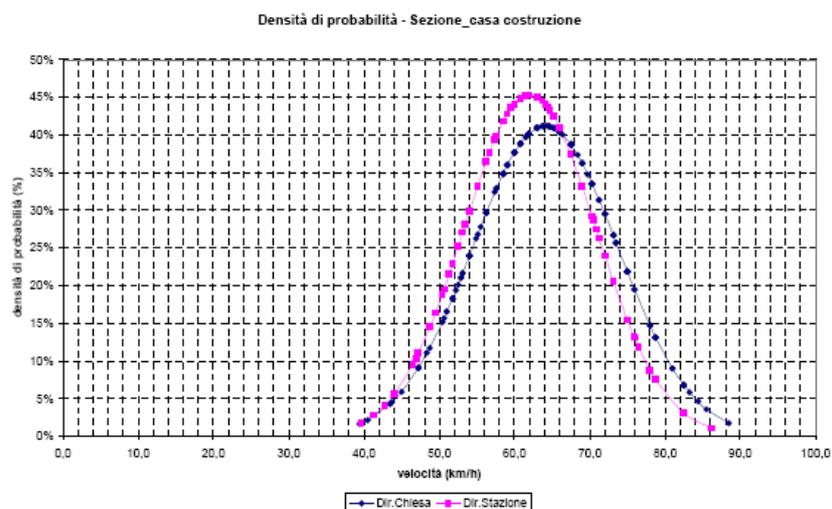


Fig. VI.9 – Curva di distribuzione cumulativa delle velocità nelle due direzioni di marcia riferite ad una delle sezioni di controllo.

Capitolo 7

ATTIVITÀ SPERIMENTALI IN AMBIENTE 'VIRTUALE'.

7.1 Limiti e potenzialità della realtà virtuale di tipo immersivo ad uso ingegneristico.

Se é impossibile dare una definizione esaustiva e univocamente riconosciuta di realtà virtuale, è al contrario possibile elencare alcune importanti caratteristiche che la distinguono dalle altre forme di utilizzo del computer:

- il *tempo reale*: il mondo virtuale è generato da dati non precalcolati ma elaborati dall'hardware in tempo reale;
- l'*interattività*: l'utente non è uno spettatore passivo, potenzialmente si muove senza nessuna limitazione stabilita;
- la *rappresentazione della scena*: è possibile ricreare una buona scenografia;
- l'*immersione*: il senso di presenza fisica nel mondo simulato e quindi il coinvolgimento.

Lo scopo della realtà virtuale è quello di ricreare, tramite un computer, mondi e oggetti che sono la trasposizione digitale di ambienti reali o di fantasia. Si tratta di una simulazione che viene percepita totalmente dai nostri sensi, in particolare dalla vista, seguita dall'udito e dal tatto.

Esistono vari tipi di realtà virtuale, che cambiano in base alla qualità e al livello di interazione permessa:

Immersiva

L'utente è completamente isolato dall'ambiente reale che viene sostituito dagli stimoli generati dalla simulazione, questo tipo di realtà virtuale è però possibile solo con l'uso di interfacce fisiche molto sofisticate. La realtà virtuale immersiva secondo il livello tecnologico attuale e secondo le previsioni possibili per il prossimo futuro potrà essere utilizzata dalla massa grazie ad alcune periferiche:

- *visore*: un casco o dei semplici occhiali in cui gli schermi vicini agli occhi annullano il mondo reale dalla visuale dell'utente. Il visore può inoltre contenere dei sistemi per la rilevazione dei movimenti, in modo che girando la testa da un lato, ad esempio, si ottenga la stessa azione anche nell'ambiente virtuale. Tra i visori più moderni troviamo gli HMD (Head Mounted Display) : sono caschi che contengono dei display per la visualizzazione delle

immagini. Al loro interno sono pure integrate delle cuffie stereofoniche di alta qualità per permettere l'utilizzo di audio tridimensionale;

- *auricolari*: trasferiscono i suoni all'utente;
- *wired gloves* (guanti): i guanti rimpiazzano mouse, tastiera, joystick, trackball e gli altri sistemi manuali di input. Possono essere utilizzati per i movimenti, per impartire comandi, digitare su tastiere virtuali, etc.;
- *cybertuta*: una tuta che avvolge il corpo. Può avere molteplici utilizzi: può simulare il tatto flettendo su se stessa grazie al tessuto elastico, può realizzare una scansione tridimensionale del corpo dell'utente e trasferirla nell'ambiente virtuale.

Alcuni ipotizzano che queste periferiche potranno un giorno essere sostituite da sistemi collegati direttamente al cervello dell'utente (wetware).



Fig. VII.1 – Attrezzature tipiche per le attività sperimentali in ambiente immersivo.

Aumentata

Consiste nel sovrapporre alla realtà percepita dal soggetto una realtà virtuale generata dal computer. La percezione del mondo dell'utilizzatore viene "aumentata" da oggetti virtuali che forniscono informazioni supplementari sull'ambiente reale.

A proiezione

L'utente è modellizzato nell'ambiente virtuale e diventa un'entità interattiva.

Telepresenza

Collega ad esempio sensori remoti in un robot ai sensi di un operatore umano.

A simulazione

L'utente è posto all'interno di un'imitazione di veicolo con comandi e montato su piattaforme mobili.

Da scrivania (o Desktop VR)

Primitiva immersione in un ambiente virtuale senza interfacce particolari, il monitor diventa finestra sul mondo simulato.

Il computer per essere motore di realtà virtuale deve elaborare simulazioni tridimensionali interattive, cioè converte database numerici e alfanumerici in un mondo virtuale secondo specifiche simulazioni definite dall'utente. Si richiedono pertanto tre caratteristiche fondamentali al processore: velocità, capacità e versatilità. Gli studi sulla realtà virtuale hanno dimostrato come tra le tre sia da mettere in primo piano una più elevata velocità di movimento e quindi una maggiore velocità di aggiornamento delle immagini. Un ambiente virtuale formato da n oggetti, ognuno dei quali è costituito da m poligoni deve riuscire a trasformare $25 \times n \times m$ poligoni al secondo (dove 25 è lo standard europeo di frame al secondo per dare all'osservatore l'effetto di continuità nelle immagini in movimento).

Nella realtà virtuale, è l'utente che decide ciò che vuole vedere, può scegliere il punto di vista a lui più congeniale, può posizionarsi in un qualsiasi punto dello spazio, può selezionare un oggetto, ruotarlo, cambiarne le dimensioni, i colori, e, se abilitato, può interagire con tutto l'ambiente circostante.

Gli oggetti visualizzati sullo schermo da un'applicazione di realtà virtuale sono oggetti tridimensionali. Gli elementi di partenza hanno coordinate tridimensionali ma vengono tracciati su un piano bidimensionale. Ogni punto dell'oggetto da disegnare, identificabile dalle coordinate (x,y,z) , viene mappato su un punto (a,b) nel piano bidimensionale dello schermo. Le tre tecniche fondamentali per la rappresentazione di oggetti tridimensionali su un piano bidimensionale sono la proiezione, l'assonometria e la prospettiva.

Le proiezioni ortogonali

Si fanno assumere alle coordinate bidimensionali dello schermo solamente due delle coordinate tridimensionali dell'oggetto. Si elimina quindi una delle tre coordinate spaziali. Si ottengono tre tipi di proiezione:

- piano orizzontale: quando si elimina la coordinata z ;
- piano verticale: quando si elimina la coordinata x ;
- piano laterale: quando si elimina la coordinata y .

L'assonometria

Nell'assonometria l'osservatore vede l'oggetto da un punto a distanza infinita da una posizione qualsiasi dello spazio caratterizzata da due angoli: la latitudine a e la longitudine b . La vista che si ottiene non è realistica in quanto le dimensioni degli oggetti che si vedono non vengono sfalsate con il variare della distanza.

Sia (x,y,z) il punto nello spazio tridimensionale. Il punto (a,b) ad esso corrispondente sul piano dello schermo è dato dalle seguenti formule:

$$a = -x * \cos a + y * \cos b$$
$$b = x * \sin a + y * \sin b + z$$

La prospettiva

La prospettiva consente una visione più realistica rispetto all'assonometria. Essa tiene conto della variazione delle dimensioni apparenti degli oggetti con il variare della distanza fra questi e l'osservatore. Siano:

- E : la distanza fra l'osservatore e il piano del disegno;
- G : la distanza tra l'osservatore e l'oggetto disegnato;
- (x, y, z) : il punto nello spazio tridimensionale;
- a : la longitudine dell'osservatore;
- b : la latitudine dell'osservatore.

Il punto corrispondente (a,b) nello spazio bidimensionale è dato dalle seguenti formule:

$$x_1 = -x * (\cos a) * (\cos b) + y * (\sin b) - z * (\sin a) * (\cos b)$$
$$y_1 = -x * (\sin a) + z * (\cos b)$$
$$z_1 = -x * (\cos a) * (\sin b) + y * (\cos b) - z * (\sin a) * (\sin b) + G$$

$$a = E * (x_1 / z_1) + 1$$
$$b = -E * (y_1 / z_1) + 1$$

I tool di realtà virtuale, anche se con qualche variante, utilizzano la prospettiva per visualizzare le immagini.

Il movimento in uno spazio tridimensionale può avvenire in tre direzioni:

- asse x (orizzontale);
- asse y (profondità);
- asse z (verticale).

È pure possibile eseguire una rotazione su ognuno dei tre assi. I movimenti possibili sono quindi sei (tre di traslazione e tre di rotazione). Si dice che in un ambiente tridimensionale ci sono sei gradi di libertà.

Per ottenere un valido livello di interazione con l'utente, in luogo di un mouse o di un joystick, è preferibile l'utilizzo di un dispositivo di puntamento in grado di operare a sei gradi di libertà che riconosca, quindi, tutti i tipi di movimento e li trasferisca direttamente al computer.

Nonostante siano stati creati dei mouse tridimensionali, il dispositivo migliore per operare in un ambiente 3D è la mano dell'operatore. Si sono quindi sviluppati dei dispositivi in grado di tracciare la posizione e l'orientamento della mano in relazione agli oggetti virtuali visualizzati sullo schermo o sull'HMD. Si tratta di speciali guanti sui quali sono disposti dei sensori in grado di intercettare la posizione e il movimento di ogni singolo dito. Alcuni di questi device sono in grado di fornire una risposta tattile alle azioni dell'utente. Per far ciò utilizzano delle piccole scariche elettriche per stimolare le connessioni nervose sottocutanee oppure utilizzano dei materiali in grado di flettersi quando sono sottoposti all'azione di un campo elettrico. In questo modo è possibile fornire all'utente la sensazione di impugnare realmente un oggetto.

Uno dei linguaggi più diffusi per la creazione di mondi virtuali è il VRML (Virtual Reality Modeling Language), capace di rappresentazioni 3D interattive e fruibili anche attraverso il web. Fra le sue caratteristiche principali si ricordano la possibilità di definire vertici e spigoli di poligoni tridimensionali, insieme ad informazioni sul colore, opacità e brillantezza delle superfici, le fonti luminose. È anche possibile l'associazione di URL agli oggetti per consentire la navigazione verso pagine HTML o altre pagine VRML. Molto utile è la possibilità di gestire animazioni e suoni attraverso procedure attivabili da eventi esterni. Ad oggi i browser più diffusi non supportano direttamente i contenuti VRML, è quindi necessario ricorrere ad opportuni plug-in per poterne fruire. Un esempio molto semplice di questo linguaggio potrebbe essere il seguente:

```
#VRML V2.0 utf8
# primo mondo vrml
Shape {
  appearance Appearance {
    material Material {
      emissiveColor 1 0 0
    }
  }
  geometry Sphere {
    radius 1
  }
}
```

Il risultato di questi pochi comandi è una sfera di colore rosso. La realtà virtuale ha diversi campi di applicazione:

Architettura

Attraverso la realtà virtuale è possibile “passeggiare” tra gli edifici o al loro interno, permette di testare la resistenza delle strutture alle sollecitazioni e valutare l’orientamento preferibile in funzione della luce solare e del calore.

Educazione

La realtà virtuale può offrire coinvolgenti esperienze di apprendimento come ad esempio l’esplorazione di paesi stranieri e il loro studio sui libri.

Disabilità

La maggior parte delle applicazioni della realtà virtuale alla disabilità si rivolge a soggetti rimasti vittime di lesioni in seguito ad incidenti o malattie.

Medicina

Strumento di indagine e addestramento in campo medico con simulazioni di interventi chirurgici, esplorazioni del corpo umano o creazioni di pazienti “modello” virtuali.

Divertimento

Giochi di realtà virtuale.

Arte

Possibilità di creare nuove forme d’arte interattiva o guidare gli utenti alla scoperta della realtà tradizionale esistente con visite ai musei o alle gallerie.

Scienza

Visualizzazione di dati tridimensionali o creazione di simulazioni interattive dei fenomeni scientifici.

7.2 Potenzialità dei modelli virtuali di tipo immersivo.

La realtà virtuale permette di verificare la validità degli interventi di adeguamento previsti per i tratti di strada con problematiche di sicurezza ed idoneità. Tra i diversi modelli, quello di tipo immersivo risulta essere il più adatto per gli studi sul comportamento di guida e sugli interventi finalizzati alla sicurezza stradale, in quanto garantisce un grado di immedesimazione da parte dei soggetti di prova ben superiore alle altre tipologie di realtà virtuale. I più moderni computer inoltre permettono di raggiungere un livello di fedeltà

assoluto tra l'ambiente virtuale e quello reale. E' per questi motivi che i modelli di tipo immersivo si prestano all'applicazione nei nuovi settori di ricerca, in particolare in quello stradale, consentendo l'approfondimento di tematiche relative al comportamento di guida che i tradizionali simulatori di guida non sono in grado di assicurare.

Le potenzialità degli studi in realtà virtuale in termini di immedesimazione da parte dei soggetti di prova e di fedeltà rispetto agli ambienti 'reali' di origine - ben si prestano all'applicazione in nuovi settori di ricerca quale quello stradale, consentendo l'approfondimento di tematiche relative al comportamento di guida che i tradizionali simulatori di guida non sono in grado di assicurare.

7.3 Trasferimento dell'ambiente 'fisico' in realtà 'virtuale'.

La traduzione in realtà virtuale dell'ambiente 'fisico' di studio è stata realizzata mediante il ricorso a due particolari software commerciali di grafica tridimensionale.

Il primo dei due - Autodesk 3DStudio.Max 8 - è un programma di grafica vettoriale tridimensionale e animazione attraverso il quale si sono uniti la rappresentazione tridimensionale dei volumi ottenuta con Autocad e le texture create con Photoshop. La prima operazione è stata importare il file .dwg in ambiente 3ds Max avendo l'accortezza di fare in modo che l'UCS del file autocad fosse globale così che in caso di modifiche od aggiunte l'importazione di nuovi elementi sia fatta automaticamente con il loro posizionamento corretto. Generalmente il numero di facce che è preferibile avere per non incorrere in successivi problemi con Virtools si aggira attorno alle 100000, in questo caso si è raggiunto circa 140000 facce, anche attuando delle rappresentazioni semplificate come sopra spiegato.

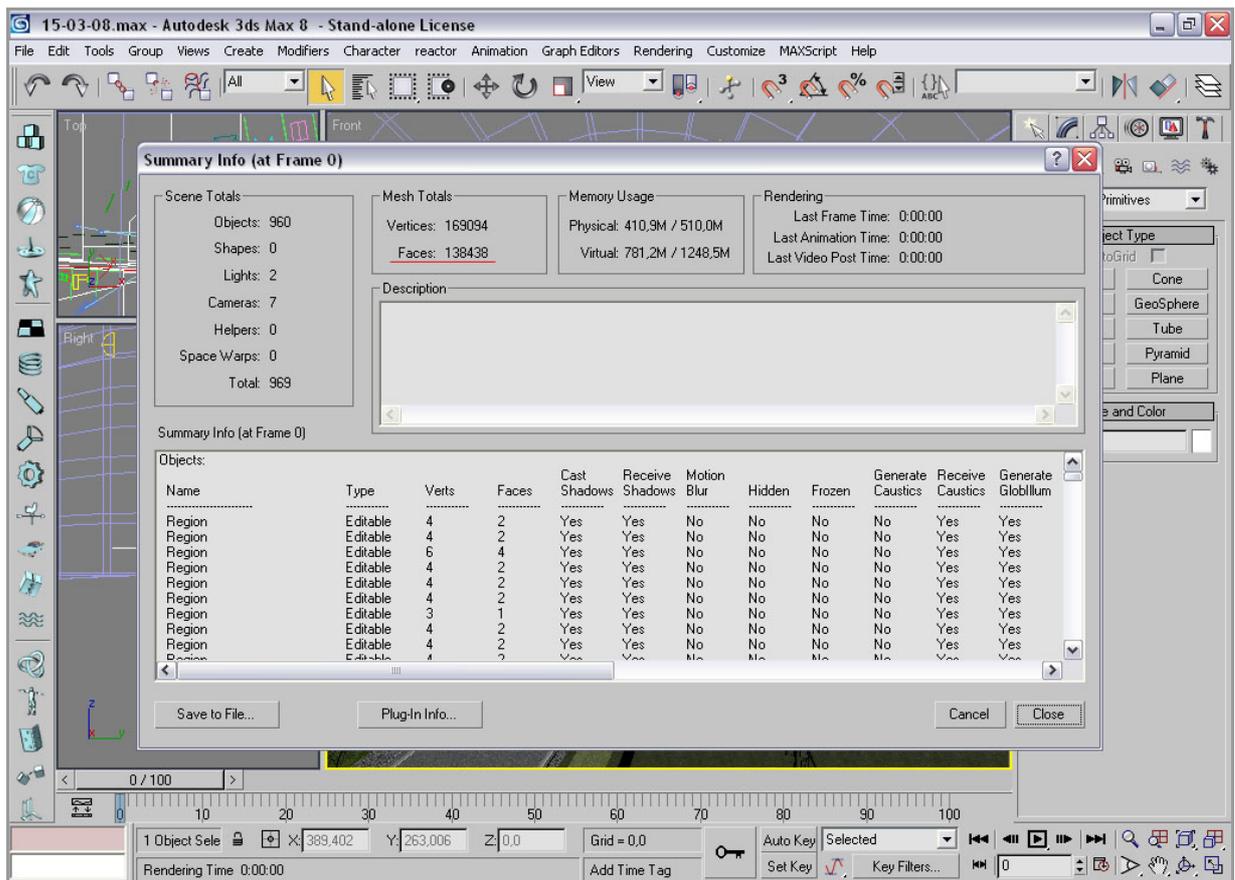


Fig. VII.2 - Summary info del file di 3ds.max con numero di facce presenti

3ds Max presenta un'interfaccia di Material Editor che fornisce un'anteprima dei materiali applicati nella scena attraverso delle slot campione, con questa interfaccia si importano le texture precedentemente create e si attribuiscono alle varie regioni. E' fondamentale che le immagini .jpg siano salvate all'interno della stessa cartella in cui si salva il file .max in modo che ad ogni apertura venga riconosciuto il percorso e le immagini si carichino automaticamente nella scena. Le slot campione sono in numero limitato di 24 massimo ma si è riscontrata la necessità di immetterne un numero molto superiore. Vi è la possibilità di salvare tutti i materiali che si immettono nella scena in una libreria materiali in modo poi da poterli richiamare all'occorrenza nelle slot senza ricaricarli.

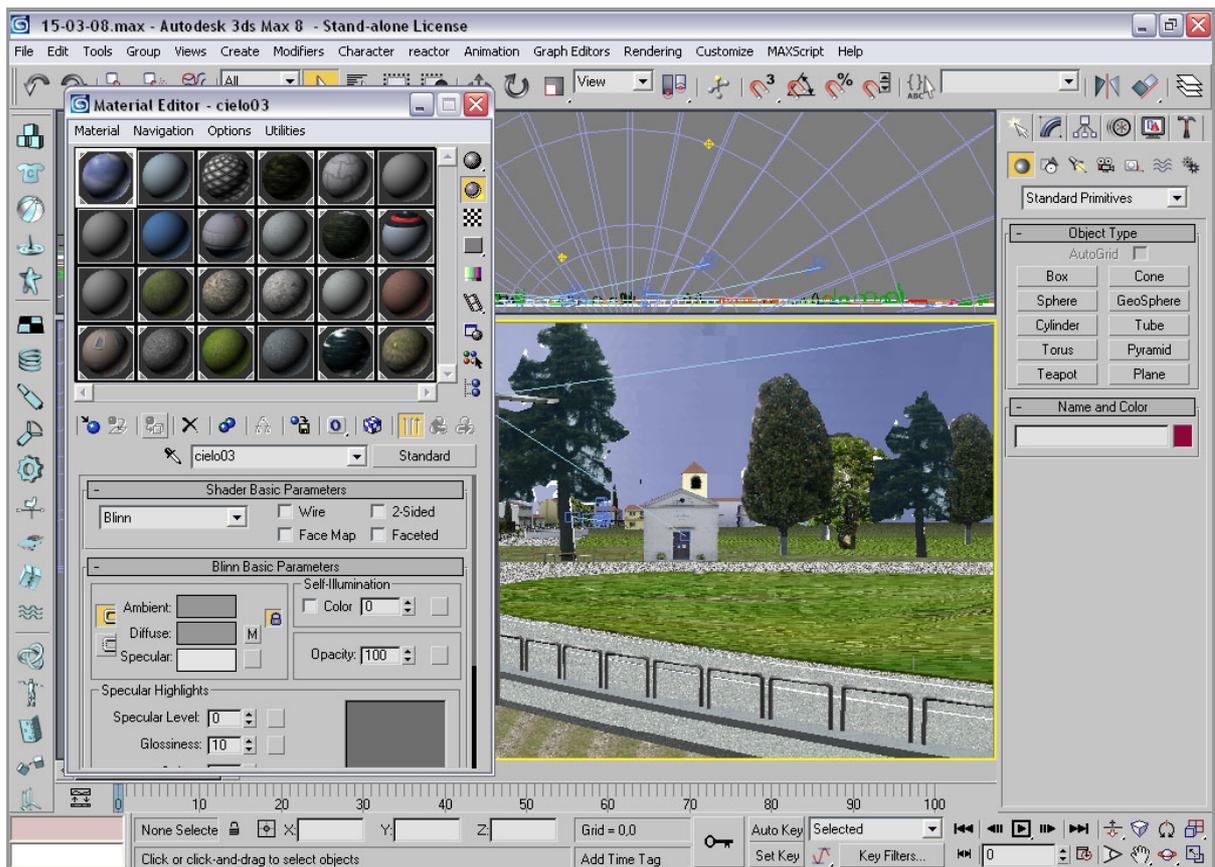


Fig. VII.3 - Material editor del file 3ds.max

Per posizionare correttamente le texture sulle superfici degli oggetti si utilizza il modificatore UVW MAP, al posto di utilizzare le coordinate XY si usano le coordinate UV per identificare la posizione in uno spazio superficiale. La direzione U è orizzontale, quella V verticale; l'area UV della texture è compresa tra 0 e 1 in ciascuna dimensione perché le misure U e V vanno intese non come valori fissi ma come percentuali di distanza. Il modificatore UVW Map consente di assegnare coordinate di mappa, di scalarle, ruotarle e scegliere fra vari tipi di coordinate a seconda dell'oggetto a cui è applicata la texture. Per svolgere queste operazioni si utilizza il gizmo, il quale può essere definito come un proiettore per il materiale applicato, quindi la sua posizione ed orientamento determinano la distribuzione del materiale sulla superficie. Per Default il gizmo è impostato su planar ma poiché il materiale viene proiettato dalla superficie del gizmo occorre scegliere la forma più adatta al tipo di superficie da mappare. E' possibile scegliere tra le seguenti forme: planar, box, cylindrical, spherical, face e xyz to uvw. La forma "face" applica una copia della mappa ad ogni faccia visibile dell'oggetto mentre la forma "xyz to uvw" trasforma le coordinate 3D procedurali in coordinate in coordinate uvw. Nell'applicazione delle mappe per lo più si è utilizzato la forma box che meglio si adattava alle facciate di edifici e alle recinzioni e si è proceduto poi a scalarle e spostarle adeguandole all'oggetto.

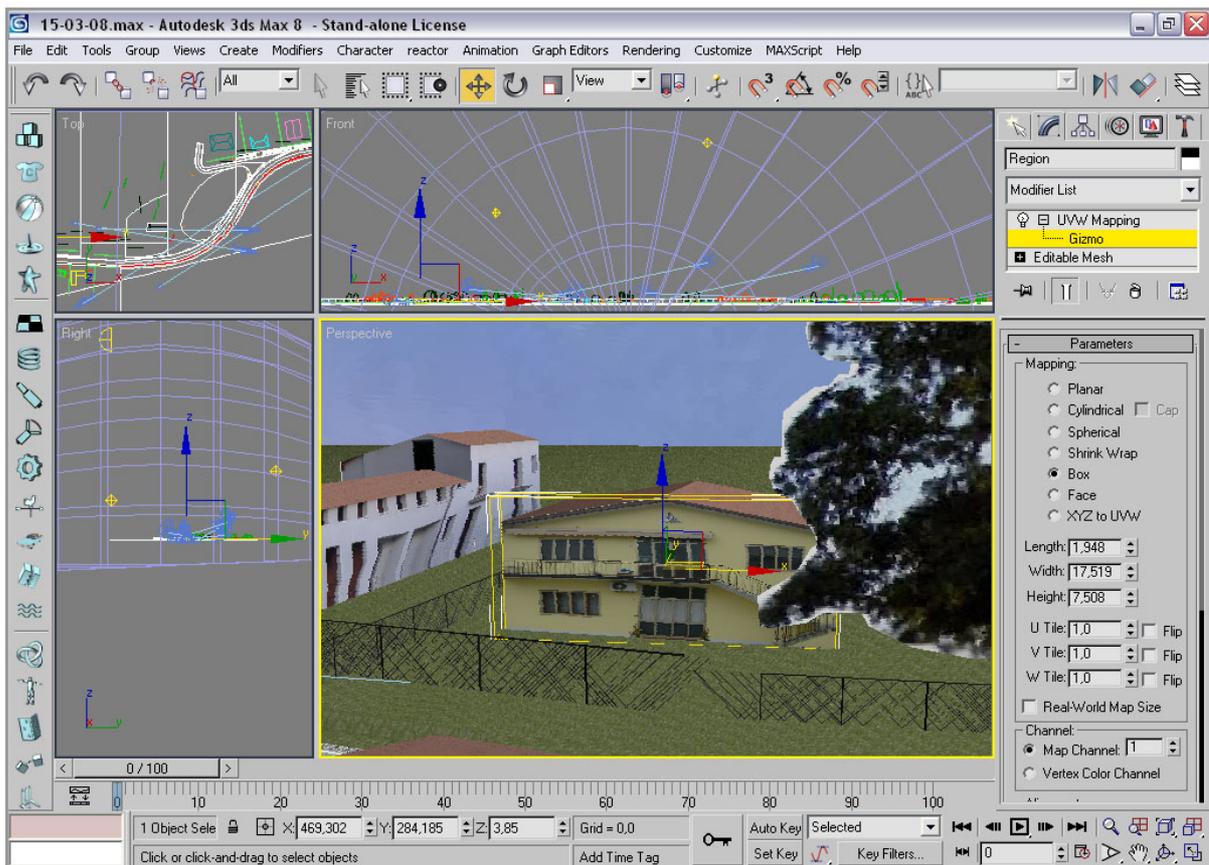


Fig. VII.4 - Modificatore UVW map

In ambiente 3ds Max si è provveduto a rappresentare l'ambiente in esame nel modo più fedele possibile alla realtà in modo che la verifica della validità degli esperimenti in realtà virtuale non riscontri delle anomalie che possano inficiarla. Allo stesso file si sono poi apportate le modifiche di geometria e segnaletica necessarie per il miglioramento delle condizioni di guida così che le condizioni al contorno siano perfettamente identiche e si possano fare delle sperimentazioni che rispecchino quella che sarebbe la reale condizione della strada con le modifiche. Al fine di rappresentare al meglio le condizioni reali in cui si percorre una strada nello stesso file si è inserito un emiciclo che ricoprisse l'ambiente al quale si è applicata una texture raffigurante il cielo, così anche le condizioni al contorno permettono all'utente di immergersi al meglio nell'ambiente virtuale.

Sempre con 3ds Max si è potuto ricreare un modello di automobile in modo che i soggetti sottoposti alla sperimentazione vedano davanti a se il cruscotto e la parte anteriore del loro veicolo così come avviene nella realtà.

L'autovettura scelta è una Mercedes, di media cilindrata; si è preferito utilizzare un'automobile esistente e in commercio – e non un semplice modello "astratto" - per rendere ancor più verosimile la prova di guida.

Definiti l'ambiente e il veicolo nel modo più credibile possibile si è esportato il file di 3DStudio.Max ed importato in Virtools, l'applicazione che ha permesso di "navigare"

nell'ambiente virtuale in modo attivo e non semplicemente da spettatori passivi e quindi di procedere con le sperimentazioni di guida in laboratorio.

Virtools è un'applicazione che permette di creare composizioni ricche di contenuti 3D interattivi, non permette la modellazione ma è possibile creare elementi semplici come telecamere e luci. Una volta importato il modello di 3ds Max in Virtools è infatti possibile attribuirgli luce solare o in caso di esperimenti da svolgersi in ambiente notturno luce proveniente dai lampioni. Inoltre creando la telecamera è possibile navigare all'interno dell'ambiente.

Virtools può anche essere definito come un motore comportamentale, in altre parole elabora i comportamenti, cioè le descrizioni di come un certo elemento agisce nell'ambiente. Esiste una collezione di blocchi "Behavior Building Blocks" che rappresenta varie azioni e che possono essere attribuiti agli oggetti senza la necessità di creare codici appositi. Ad esempio per far sì che gli alberi rappresentati solo come elementi bidimensionali siano sempre visibili dal guidatore gli si attribuisce la capacità di ruotare in modo da essere sempre frontali alla camera. All'oggetto che rappresenta l'automobile in cui il guidatore si trova si associa un blocco che rappresenta al meglio le azioni di guida.



Fig. VII.5 – Render della strada in ambiente virtuale

Per l'effettuazione delle prove è stato utilizzato un PC con le seguenti caratteristiche:

- processore Intel Core 2 Duo @ 2.40GHz (E6600 Conroe, 65nm);
- Cache L1 2x32KB, L2 2x32KB, Level2 4096KB;
- RAM DDR2 1024MB;
- Scheda Video GeForce 7600 GT;
- DirectX 9.0c.

Al computer sono state poi collegate le seguenti periferiche:

1) Logitech MOMO® Racing Force Feedback Wheel

Si tratta di un volante per PC disegnato da MOMO®. Permette di avvertire i dossi, le curve, le piccole buche e anche le minime collisioni grazie alla tecnologia del ritorno di forza realistico. Migliora il controllo con pedali e leve del cambio realistici disegnati dai professionisti delle gare automobiliste MOMO®.

Caratteristiche:

- Ritorno di forza: permette al conducente di disporre di un autentico sistema direzionale;
- Sei pulsanti programmabili: per un controllo totale durante la guida;
- Pedali del freno e dell'acceleratore: danno risposta e feedback immediati; dotati di tecnologia antisdrucchiolo;
- Opzioni di cambio marcia: le leve al volante consentono di non staccare mai le mani dal volante; la leva del cambio, invece, garantisce un cambio marcia sequenziale di precisione;
- Volante interamente in gomma: volante senza impunture da 27 cm per il massimo comfort delle mani;
- Sistema di fissaggio triplo: impedisce di sbandare o scivolare durante la simulazione di guida.



Fig. VII.5 – Volante e pedaliera Logitech MOMO® Racing Force Feedback Wheel

2) **HMD Virtual V8 Research**

Si tratta di un casco della Virtual Research System, azienda leader nella produzione di strumentazioni per la realtà virtuale.

Caratteristiche

- doppio display a cristalli liquidi;
- risoluzione per occhio 640x480;
- campo visivo 60° diagonale;
- tracker Intersense;
- dimensioni : 43 x 20 x 15 cm;
- peso : 1.0 kg.



Fig. VII.6 – Casco HMD Virtual V8 Research

7.4 Calibrazione del modello virtuale.

La calibrazione del modello virtuale (fase II.4) è stata condotta sulla base dei dati sperimentali sulle velocità operative acquisiti nell'ambito della precedente fase operativa sulla realtà 'fisica'. Nello specifico, una volta individuate in realtà virtuale le stesse sezioni di controllo delle velocità di transito degli utenti già individuate nella realtà 'fisica' come postazioni di rilevante interesse (cfr. figura VI.1), sono state impostate ed iterativamente adeguate sia le caratteristiche dell'ambiente che del veicolo in modo da assicurare una buona fedeltà dell'ambiente di prova, anche in considerazione delle successive modifiche di tipo strutturale e/o funzionale previste per il modello virtuale immersivo.

I dati di velocità rilevati in ciascuna sezione sono stati processati ed elaborati alla stregua di quelli reali, allo scopo di determinare per ciascuna sezione un valore di velocità operativa statisticamente valido – inteso come 85° percentile - e commensurabile con quello desunto

dalle curve di distribuzione della velocità calcolate nel contesto reale, ragione per cui si è preferito non riferirsi al valore medio.

La calibrazione del modello è stata condotta in ambo le direzioni di marcia (dette A e B secondo quanto illustrato in fig. VII.7, in considerazione delle sole velocità operative reali diurne, in modo tale da preservare la possibilità di valutare l'effetto delle condizioni di guida notturna anche in ambiente virtuale, come già ricercato nell'ambiente 'reale'. Di conseguenza il comportamento di guida notturno nello scenario A è un'incognita così come quello degli altri scenari (variabile dipendente) e non costituisce una variabile nota del problema (variabile indipendente).

L'esito della fase di calibrazione condotta è riassunto nelle seguenti tabelle e nei seguenti grafici comparativi. Si osserva, tuttavia, una sostanziale sovrastima delle velocità operative in curva per via dell'assenza delle forze dinamiche destabilizzanti che consentono la conservazione di velocità statisticamente superiori a quelle reali - seppur di poco - a parità di velocità di origine lungo le tangenti di approccio all'elemento curvilineo.

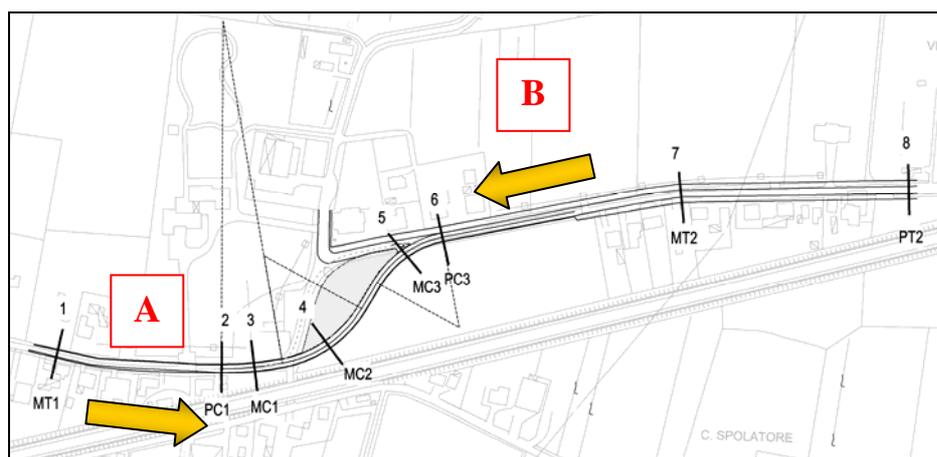


Fig. VII.7 – Schematizzazione delle sezioni di monitoraggio delle velocità in relazione alle caratteristiche geometriche del tronco stradale.

Direzione A – Velocità operative diurne

Tab. VII.1 – Quadro di raffronto tra velocità operative diurne reali e virtuali nella direzione di marcia A.

Sezione	V85 [km/h]		Δ	
	Reale	Virtuale	[km/h]	[%]
1	69.79	66.90	2.89	4.14%
2	60.00	61.30	-1.30	-2.17%
3	59.70	59.85	-0.15	-0.25%
4	58.50	58.25	0.25	0.43%
5	59.20	58.55	0.65	1.10%
6	60.20	61.50	-1.30	-2.16%
7	70.31	69.15	1.16	1.65%
8	72.00	72.55	-0.55	-0.76%

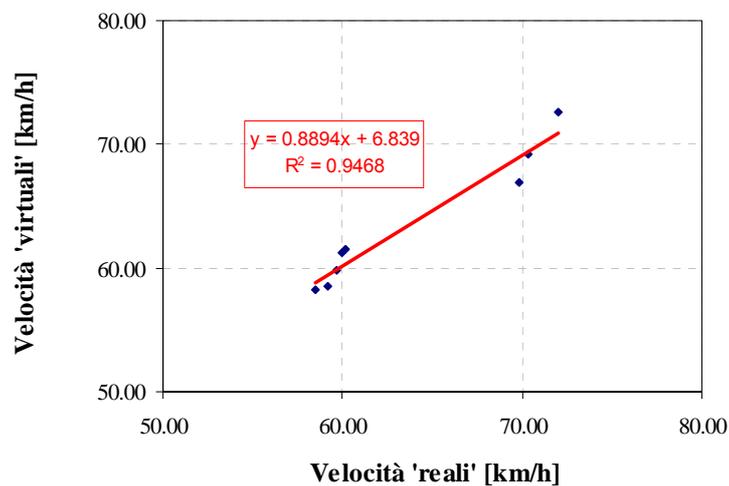


Fig. VII.8 – Regressione lineare e coefficiente di correlazione tra le restituzioni modellistiche rispetto al dataset di calibrazione reale nella direzione di marcia A.

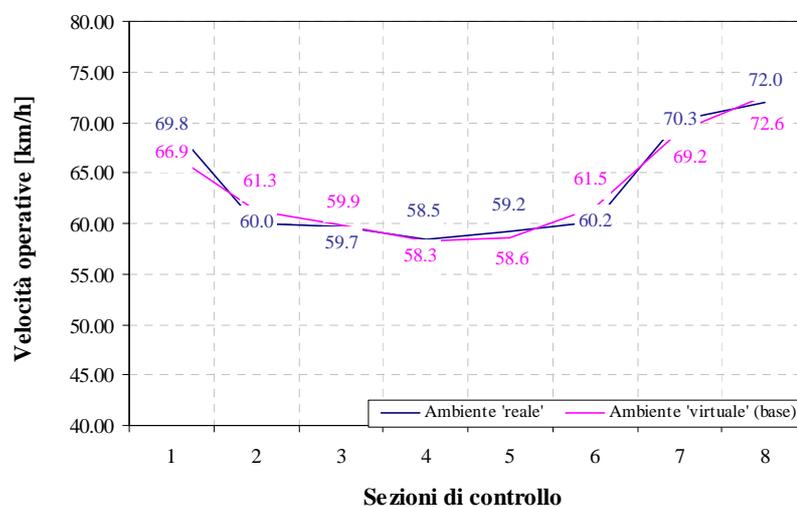


Fig. VII.9 – Sovrapposizione dei profili di velocità reale e virtuale nella direzione di marcia A.

Direzione B – Velocità operative diurne

Tab. VII.2 – Quadro di raffronto tra velocità operative diurne nella direzione di marcia B.

Sezione	V85 [km/h]		Δ	
	Reale	Virtuale	[km/h]	[%]
8	76.50	73.65	2.85	3.73%
7	73.50	72.50	1.00	1.36%
6	61.88	62.35	-0.47	-0.76%
5	60.06	62.95	-2.89	-4.81%
4	56.25	59.25	-3.00	-5.33%
3	58.50	59.60	-1.10	-1.88%
2	60.13	60.45	-0.32	-0.53%
1	75.00	75.30	-0.30	-0.40%

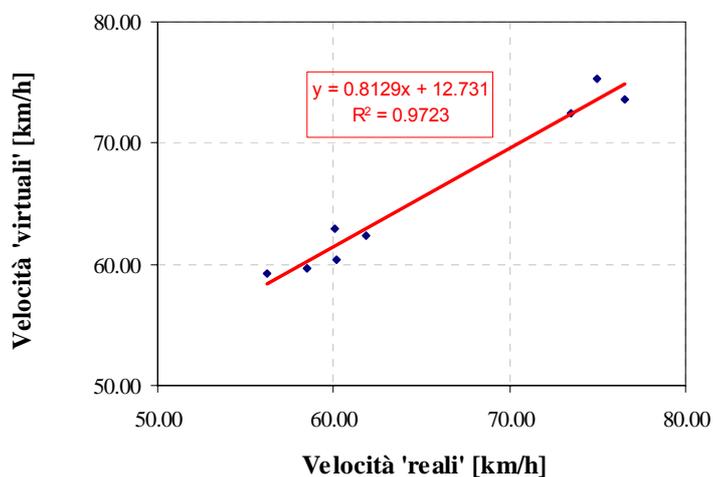


Fig. VII.10 - Regressione lineare e coefficiente di correlazione tra le restituzioni modellistiche rispetto al dataset di calibrazione reale nella direzione di marcia B.

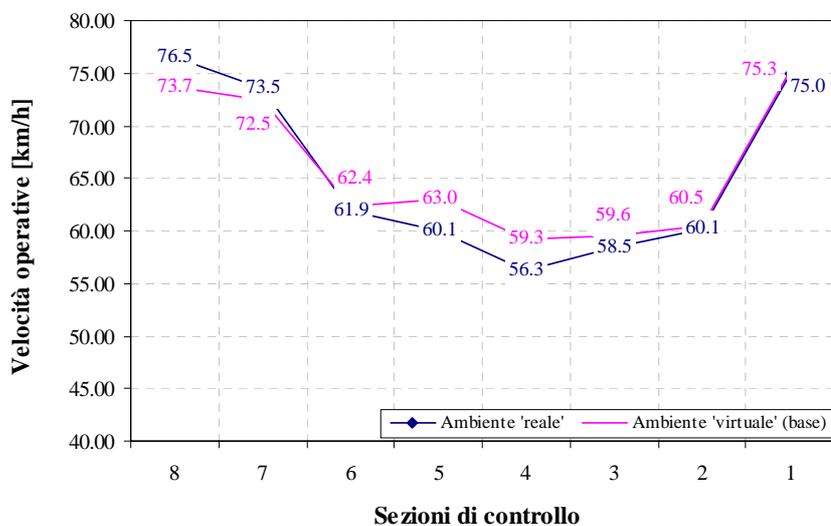


Fig. VII.11 - Sovrapposizione dei profili di velocità reale e virtuale nella direzione di marcia B.

7.5 Definizione e costruzione degli ambienti di guida.

Dopo aver calibrato le caratteristiche del modello virtuale sulla base di quelle rilevate nella realtà 'fisica' del tronco stradale oggetto di studio, sfruttando le potenzialità dell'ambiente virtuale, sono stati definiti e ricostruiti cinque diversi scenari di guida, differenti l'uno dall'altra per una sola caratteristica (variabile indipendente). Le caratteristiche dei diversi ambienti di guida – con la descrizione delle variabili modificate rispetto all'ambiente-base (uguale a quello reale) - sono riassunte nella seguente tabella.

Tab. VII.3 – Quadro descrittivo degli scenari di guida standard e modificati implementati nel modello virtuale di prova.

Lettera	Variabili modificate	Note
A	-	
B	Segnaletica verticale	
C	Segnaletica orizzontale	
D	Segnaletica orizzontale e verticale	Combinazione di B e C
E	Progetto planimetrico	

I cinque ambienti di prova sono stati denominati con lettere progressive dalla A alla E a partire dal primo (detto A), corrispondente in tutto e per tutto alle caratteristiche dell'ambiente reale, fino all'ambiente E, costruito in maniera tale da apportare una sostanziale modifica della geometria planimetrica del tracciato, mediante l'addolcimento delle curvature.

Le modifiche introdotte sulla segnaletica verticale (scenario di guida B) corrispondono all'applicazione dei segnali descritti nella seguente figura VII.12, collocati rispettivamente da sinistra a destra ad una distanza di 150 m, 100 m e 50 m rispetto al punto di ingresso nella curva con sviluppo ad S, in entrambe le direzioni di marcia. I segnali prescelti appartengono alla categoria dei 'segnali percettivi', aventi efficacia ben documentata in letteratura.



Fig. VII.12 - Tipologia di segnali verticali inseriti nell'ambiente di guida B.

Il terzo ambiente corrisponde all'introduzione di modifiche alla segnaletica orizzontale in termini di retroriflessione della stessa (visibilità notturna) e attraverso l'inserimento dei markers ottici lungo le strisce longitudinali marginali della carreggiata, con passo pari a 10 m in senso longitudinale. Alcuni studi precedenti hanno dimostrato come l'introduzione di tali

dispositivi possa in qualche misura condizionare l'impostazione della velocità nei tratti curvilinei oltre che migliorare la percezione della geometria planimetrica dell'asse stradale.



Fig. VII.13 – Dispositivi integrativi per segnaletica orizzontale lungo le strisce di demarcazione laterale e di separazione di corsia.

L'ambiente di guida detto 'E' rappresenta la ristrutturazione geometrica del tronco stradale in conformità con quanto prescritto dal D.M. 5/11/2001 "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" in relazione alle caratteristiche funzionali ed operative dell'infrastruttura, sia in termini di traffico che di velocità documentate.

Il progetto planimetrico è stato impostato sulla base delle specifiche previste per la categoria di strada di tipo E 'urbana di quartiere', avente intervallo di velocità di progetto compreso tra i 40 ed i 60 km/h. Il tracciato risultante – convenzionalmente descritto secondo la direzione di marcia A - risulta composto da:

- un rettilo di lunghezza 80 m;
- una clotoide di transizione avente parametro $A=76$ e lunghezza 28,8 m;
- una curva circolare di raggio 200 m e sviluppo 115,793 m;
- una clotoide di flesso avente parametro $A=99,315$ e sviluppo 98.634 m;
- una curva circolare di raggio 200 m e sviluppo 66.571;
- una clotoide di transizione con parametro $A=76$ e lunghezza 28.88 m;
- un rettilo di lunghezza 86,83 m.

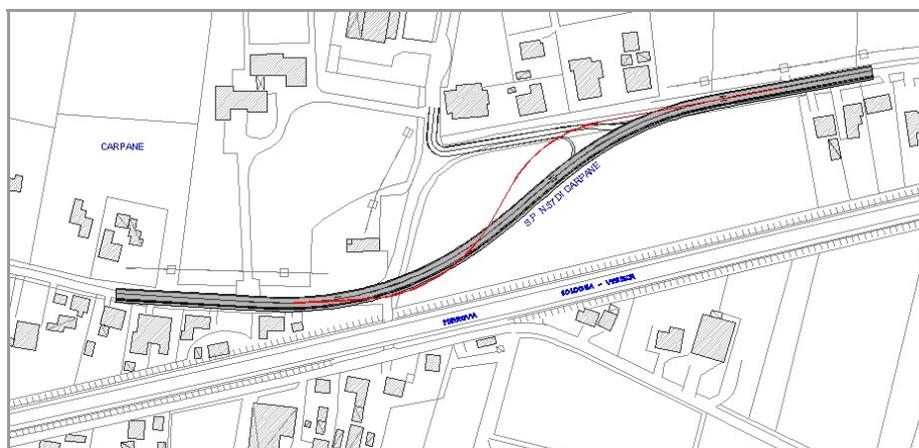


Fig. VII.14 – Planimetria illustrativa della modifica geometrica prevista nell'ambiente di guida E.

7.6 Metodologie di prova.

Le sessioni di prova in realtà virtuale hanno riguardato due diversi campioni di soggetti, assegnati l'uno alle prove in condizioni di illuminazione diurna e l'altro in condizioni di guida notturna.

Per la guida nei diversi scenari di prova in condizioni di illuminazione diurna è stato selezionato un campione di 65 volontari aventi età media pari a 26,3 anni (D.S. = 4,6), in possesso di patente di guida da almeno cinque anni. Il campione è risultato composto da soggetti di ambo i sessi (39 maschi e 26 femmine) ed anche da portatori di occhiali (4 maschio ed 1 femmina).

Per la guida nei diversi scenari in condizioni di illuminazione notturna è stato selezionato un campione di 83 volontari aventi età media pari a 24,4 anni (D.S. = 6,2), in possesso di patente di guida. Il campione risulta essere composto da soggetto di ambo i sessi, in particolare 64 maschi (77,11 %) e 19 femmine (22,89 %).

In totale, le prove di guida hanno riguardato 148 volontari, aventi età media di 25,3 ani (D.S. = 5.3), composti da 103 maschi (69,6%) e 45 femmine (30,4%).

Tutti i soggetti – sia nelle sessioni ‘diurne’ che ‘notturne’ - sono stati istruiti sulle modalità di svolgimento della prova, rimarcando la necessità di mantenere la massima naturalezza ed il massimo confort di guida; tutti sono stati poi sottoposti ad uno specifico percorso di training, avente caratteristiche simili con l'ambiente di prova, con il solo scopo di acquisizione della necessaria confidenza con l'apparecchiatura di prova.

A tutti i soggetti è stato richiesto di guidare in due ambienti (con ordine casuale) ed in entrambe le direzioni di marcia in ciascuno di essi. I soggetti sono stati invitati ad indossare un caschetto, dotato di cuffie per la riproduzione sonora dell'acustica di guida, al fine di riprodurre le condizioni di prova in ambiente immersivo in visione stereoscopica. A ciascun tester è stato messo a disposizione uno sterzo ed una pedaliera dotata di freno ed acceleratore, la cui sensibilità è stata opportunamente calibrata al fine di riprodurre la massima affinità con l'ambiente di guida reale.



Fig. VII.15 – Caschetto di prova per la guida immersiva.

La casualità nella sequenza degli ambienti di guida per ciascuno degli utenti è corrisposta alla volontà di eliminare per quanto possibile l'effetto di assuefazione e aspettativa nel secondo dei due ambienti descritto dalla psicologia cognitiva nel caso di prove ripetute in contesti di prova simili (memoria a breve termine).

Le prove di guida in condizioni di illuminazione notturna sono state programmate nel corso del secondo pomeriggio (a partire dalle ore 16.30) per assecondare la tendenza alla stanchezza dei soggetti, certamente meno riposati che non al mattino. Per ragioni tecniche non è stato possibile condurre le prove in orari diversi da quelli di apertura al pubblico dei laboratori entro cui si è operato.



Fig. VII.16 – Istantanee dell'ambiente di guida notturno A nella direzione di marcia A.

Dopo aver acquisito padronanza delle attrezzature in un ambiente di training, i soggetti sono stati invitati a percorrere il tracciato di prova in entrambe le direzioni nell'ambiente di volta in volta prescelto. Nel corso della prova, il modello assicurava la registrazione di record di testo con la velocità, l'accelerazione, frenatura e le coordinate spaziali istantanee di ciascun utente, utili per il successivo studio cinematico del comportamento di guida, di cui si riporta un esempio riferito alla direzione di marcia A nell'ambiente di guida diurno A.

casa costruzione	65
chiesa	63
curva1	56
curva2	54
stop	61
civico99	67
intermedia FS	72
parcheggio FS	78

00m 27s 099ms -0.0898604,-0.523461 -248.076,0.2591,50.0952 30

00m 27s 375ms	-0.140642,-0.523461	-242.393,0.2591,48.7455	31
00m 27s 576ms	-0.185565,-0.523461	-238.262,0.2591,47.7971	31
00m 27s 790ms	-0.20705,-0.523461	-233.82,0.2591,46.8253	31
00m 28s 028ms	-0.287129,-0.523461	-228.889,0.2591,45.8066	31
00m 28s 234ms	-0.369162,-0.523461	-224.603,0.2591,44.9837	31
00m 28s 482ms	-0.427756,-0.523461	-219.427,0.2591,44.0935	31
00m 28s 723ms	-0.425803,-0.523461	-214.378,0.2591,43.3388	31
00m 28s 964ms	-0.414084,-0.523461	-209.318,0.2591,42.6909	31
00m 29s 205ms	-0.337911,-0.523461	-204.246,0.2591,42.1431	31

Per assicurare la massima verosimiglianza dell'ambiente virtuale con quello reale di origine, inizialmente era stata prevista l'introduzione di alcune autovetture marcianti in direzione controversa a quella del tester. In fase di calibrazione però ci si è accorti che il limite imposto dalla capacità grafica dei processori alla variabilità delle sagome e delle geometrie del momento imponeva come conseguenza che i veicoli provenienti dalla direzione opposta a quella di marcia erano sempre uguali per colori, caratteristiche e velocità. La circostanza presentava delle inverosimiglianze con la realtà notevoli per almeno due ragioni:

- 1) nella realtà è altamente improbabile incontrare sempre la stessa tipologia di veicolo;
- 2) i testers percepivano una componente di distrazione aggiuntiva, in virtù del fatto che incrociavano sempre lo stesso veicolo.

In conclusione si è deciso di escludere dagli ambienti di guida i veicoli marcianti in direzione controversa rispetto a quella di prova.

Capitolo 8

RISULTATI CONSEGUITI

8.1 Risultati delle attività sperimentali nell'ambiente 'fisico'.

I rilievi di velocità condotti in condizioni diurne hanno riguardato un totale di 4215 veicoli, con una media di circa 250 per direzione di marcia in ciascuna sezione. Per quanto riguarda le ore notturne, la proiezione dei risultati si basa su un totale di 2885 veicoli, corrispondente ad una media di circa 180 passaggi per direzione in ciascuna delle sezioni.

Per ciascuna sezione sono state calcolate le curve di distribuzione cumulativa delle velocità praticate dagli utenti da cui è stato tratto il valore dell'85° percentile delle velocità, descrittivo della velocità operativa dell'elemento geometrico considerato e tipicamente utilizzato in letteratura per descrivere il comportamento di guida degli utenti stradali.

8.1.1 Direzione A

Il profilo delle velocità desunto per la direzione di marcia A evidenzia per i due periodi diurno e notturno una netta discrepanza nella condotta di guida entro il tratto a doppia curvatura (da MC1 a MC3), passando da valori mediamente prossimi ai 60 km/h in condizioni di illuminazione diurna a valori compresi tra 50 e 55 km/h nell'arco del periodo notturno.

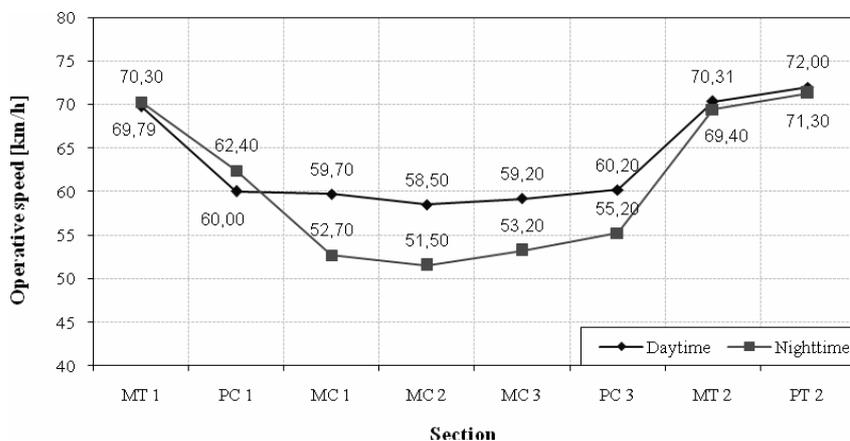


Fig. VIII.1 - Profilo delle velocità operative nella direzione di marcia A.

La tabella di calcolo delle accelerazioni medie calcolate tra le sezioni di rilievo, evidenzia quanto detto a proposito dell'adeguamento della velocità in curva (PC1 – MC1) nell'arco del periodo diurno cui corrisponde, tuttavia, una decelerazione accettabile in valore assoluto su valori accettabili in valore assoluto. Da notare la forte accelerazione impressa dagli utenti in uscita dall'ultima curva (PC3 – MT2) nel corso del periodo notturno, cui corrisponde una velocità finale presso MT2 quasi uguale a quella diurna, probabilmente considerata come la più confortevole ed adeguata per la tipologia di strada in questione, anche durante il periodo notturno.

Tab. VIII.1 - Quadro riassuntivo delle accelerazioni medie tra sezioni successive nella direzione A.

Section No.	Description	Acceleration/Deceleration [m/s ²]			
		Daytime	Nighttime	Difference	%
1 - 2	MT 1 - PC 1	-0.37	-0.30	0.07	-19.3%
2 - 3	PC 1 - MC 1	-0.01	-0.16	-0.16	3133.3%
3 - 4	MC 1 - MC 2	-0.09	-0.09	0.00	0.0%
4 - 5	MC 2 - MC 3	0.10	0.24	0.14	142.9%
5 - 6	MC 3 - PC 3	0.18	0.37	0.18	100.0%
6 - 7	PC 3 - MT 2	0.78	1.10	0.32	40.5%
7 - 8	MT 2 - PT 2	0.05	0.05	0.01	12.4%

8.1.2 Direzione B

Nella direzione di marcia opposta, gli utenti vengono a scontrarsi con la criticità di tipo percettivo collocata in corrispondenza della sezione MC3, a causa della presenza dell'intersezione di nuova realizzazione (vedi figura xxx) e della posizione dell'illuminazione stradale che – su quel lato – prosegue lungo il ramo in uscita dell'intersezione anziché lungo lo sviluppo della curva. Le velocità rilevate nel corso dei due periodi di riferimento evidenziano chiaramente l'impatto percettivo prodotto dalle difettosità descritte (tratta PC3 – MC3) rispetto a quanto osservato in condizioni di illuminazione naturale diurna.

Il seguente grafico conferma, tuttavia, come gli utenti tendano a voler mantenere velocità operative in rettilineo dello stesso ordine di grandezza di quelle diurne, come dimostrato anche dalla brusca accelerazione in uscita dalla curva (PC1 – MT1), cui corrisponde un valore di velocità finale addirittura superiore a quello rilevato nel corso delle ore diurne. I valori di velocità all'interno della S si mantengono su valori inferiori mediamente del 15% rispetto a quelli rilevati nel corso del periodo diurno. Nelle due tangenti i valori osservati risultano al contrario superiori mediamente del 3-5%.

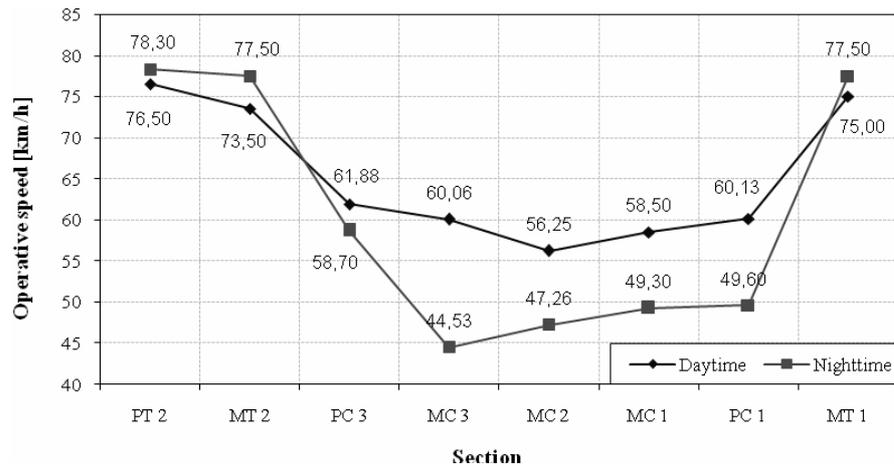


Fig. VIII.2 - Profilo delle velocità operative nella direzione di marcia B.

Il quadro riassuntivo delle accelerazioni evidenzia come gli utenti tendano a sottostimare il rischio imposto dalla doppia curva fino almeno al punto di curvatura, in corrispondenza del quale – di fronte all’equivoco di tipo percettivo dettato dalla geometria della strada – attuano una decelerazione del tutto significativa (-2.66 m/s^2) riportando la propria velocità su valori ritenuti più consoni al rischio tardivamente percepito.

Tab. VIII.2 - Quadro riassuntivo delle accelerazioni medie tra sezioni successive nella direzione B.

Section No.	Description	Acceleration/Deceleration [m/s ²]			
		Daytime	Nighttime	Difference	%
8 - 7	PT 2 - MT 2	-0.09	-0.02	0.07	-73.3%
7 - 6	MT 2 - PC 3	-0.93	-1.51	-0.58	61.8%
6 - 5	PC 3 - MC 3	-0.34	-2.66	-2.31	678.6%
5 - 4	MC 3 - MC 2	-0.53	0.38	0.92	-171.7%
4 - 3	MC 2 - MC 1	0.17	0.15	-0.02	-9.3%
3 - 2	MC 1 - PC 1	0.03	0.01	-0.02	-81.6%
2 - 1	PC 1 - MT 1	0.59	1.10	0.51	87.6%

La capacità da parte degli utenti di negoziare correttamente la propria velocità in approccio alle curve è strettamente correlata alla numerosità ed all’entità degli eventi incidentali lungo le curve circolari, specialmente in condizioni di ridotta visibilità. La sensibilità visiva nell’arco delle ore notturne risulta peraltro essere fortemente ridotta e statisticamente concentrata ai soli impulsi provenienti dal piano viabile, meglio se derivanti dalla segnaletica orizzontale e dall’illuminazione (Wonho Suh et al., 2006). E’ evidente che se tali impulsi risultano essere erronei o di difficile interpretazione il rischio di errore umano aumenta considerevolmente come ben documentato dall’impostazione della curva 3 lungo la direzione B in riferimento alla quale si può osservare quanto segue: a partire da una velocità di rettilineo (PT2) notevole,

superiore anche a quella registrata nel corso del periodo diurno sulla stessa sezione, l'utente tende a conservare la propria condotta (MT2) anche in presenza della segnaletica verticale di pericolo (MT2) riferita alla doppia curva, attuando una trascurabile decelerazione tra le due sezioni (-0.02 m/s^2). All'avvicinarsi del punto di curvatura (PC3), l'utente attua una decelerazione significativa (-1.51 m/s^2) riportandosi su valori di velocità prossimi a quelli diurni (58.70 km/h), ritenuti tuttavia ancora eccessivi rispetto al rischio percepito in quel punto tanto da comportare un'ulteriore rilevante decelerazione (-2.66 m/s^2) all'interno della curva circolare (PC3 – MC3) cui consegue un corrispondente notevole impegno di aderenza trasversale. Nel resto della S l'utente adegua marginalmente la propria velocità, accrescendola fino al punto di uscita della curva 1 (PC1) in corrispondenza del quale accelera in maniera decisa per riportarsi alla velocità ritenuta maggiormente idonea e confortevole (77.50 km/h) nel rispetto dei rischi vissuti e percepiti lungo il percorso indagato. Nel corso delle ore diurne, a parità di velocità operativa lungo le tangenti, l'utente adotta un comportamento più omogeneo (per quanto associato a valori di velocità superiori). In particolare, si osserva come la riduzione della velocità – e dunque la negoziazione della velocità in curva in relazione al rischio percepito – avvenga per l'86% tra le sezioni MT2 e PC3 e solo per il 14% all'interno della curva circolare, a testimonianza di una maggiore e migliore interpretazione delle informazioni (per quanto erronee) provenienti dallo spazio stradale. Nel corso delle ore notturne, al contrario, la decelerazione lungo il tratto di transizione (MT2 – PC3) avviene solo per il 57% mentre il restante 43% risulta essere dissipato all'interno della curva 3, a testimonianza di come le informazioni erronee provenienti dallo spazio stradale (intersezione ed illuminazione) possano alterare la percezione durante la guida, specie quando l'utente non ha altri elementi utili all'interpretazione dei rischi provenienti dal background.

Nella direzione opposta (direzione A), la differenza tra gli due scenari di studio diurno e notturno dal punto di vista della percezione del rischio e del comportamento di guida si materializza nelle seguenti considerazioni: come già anticipato e descritto in riferimento al caso precedente, la velocità operativa rilevata lungo le due tangenti risulta essere dello stesso ordine di grandezza di quella diurna se non addirittura superiore (MT1); la velocità praticata lungo la S si attesta su valori inferiori mediamente del 10% rispetto a quelli diurni (in media 51-52 km/h); la percezione della curvatura è ritardata a tal punto che la decelerazione tra le velocità di approccio e quella poi praticata per la percorrenza della curva avviene solo per il 45% lungo la tangente e per ben il 55% entro la curva circolare. Durante il periodo diurno, al contrario, a fronte di una velocità in curva superiore (circa 59 km/h), la decelerazione avviene in toto entro la tangente, mentre la S viene percorsa e velocità praticamente costante.

In conclusione, le osservazioni sperimentali paiono confermare la preferenza da parte dell'utente di guidare di notte come di giorno se non adottando velocità addirittura superiori. La presenza di curve a raggio ridotto – per le quali è richiesta una maggiore attenzione ed abilità nella fase di negoziazione della velocità da praticare – dopo lunghe tangenti rettilinee evidenzia una notevole discrepanza nel comportamento di guida tra le ore diurne e notturne: mentre in rettilineo le velocità operative diurne equivalgono mediamente a quelle notturne, in curva la differenza è abbastanza netta con valori diurni superiori di circa il 10-15% rispetto a quelli notturni. Il maggior rischio è tuttavia associato alla difficoltà di lettura ed interpretazione della geometria di tracciato da parte degli utenti che tendono ad adeguare la propria velocità non più lungo la tangente (come di giorno) ma anche dentro la stessa curva circolare, evidenziando da un lato l'eccessiva sottostima dei rischi associati alla guida notturna da parte dell'utente e dall'altro l'estrema vulnerabilità di alcune configurazioni geometriche in condizioni diverse da quelle ideali.

8.2 Risultati delle attività sperimentali in ambiente 'virtuale'.

Una volta richiamato che il comportamento di guida degli utenti virtuali in condizioni di illuminazione notturna costituisce un'incognita del progetto di ricerca in virtù del fatto che la calibrazione è stata condotta sui soli dati diurni, si illustrano qui di seguito i risultati dei test di guida condotti nei diversi ambienti allo scopo di verificare l'esistenza - oltre che la consistenza - di un differente approccio comportamentale alla guida su strada nelle diverse condizioni osservate.

Il primo elemento di osservazione è costituito - per ragioni di complementarità – dalla disamina del comportamento di guida osservato nel periodo notturno negli ambienti 'reale' e 'virtuale' ordinatamente, allo scopo di verificare se esista una correlazione significativa tra i risultati conseguiti nei due casi anche in riferimento a condizioni diverse rispetto a quelle di calibrazione.

La verifica della validità del modello virtuale – misurata per l'appunto nel confronto indiretto degli output notturni rispetto ai dati reali che costituiscono in questo senso il termine noto di comparazione – costituisce essa stessa un primo importante risultato giacché rassicura sull'effettiva validità dei risultati condotti in condizioni diverse da quelle riprodotte delle scenario-base di guida.

I dati relativi alle velocità operative notturne nei due ambienti di guida – reale e virtuale – riferiti alle consuete otto sezioni di monitoraggio nella direzione di marcia convenzionalmente definita come 'A', sono riportati nella seguente tabella riassuntiva, in cui sono evidenziati anche gli scarti assoluti e percentuali riferiti a ciascuna sezione.

Tab. VIII.3 – Quadro di raffronto tra velocità operative reali e virtuali nel periodo notturno nella direzione di marcia A.

Sezione	V85 [km/h]		Δ	
	Reale	Virtuale	[km/h]	[%]
1	70.30	68.35	1.95	2.77%
2	62.40	57.70	4.70	7.53%
3	52.70	51.35	1.35	2.56%
4	51.50	51.00	0.50	0.97%
5	53.20	50.35	2.85	5.36%
6	55.20	56.35	-1.15	-2.08%
7	69.40	72.30	-2.90	-4.18%
8	71.30	75.40	-4.10	-5.75%

I dati sopra illustrati riferiti ai due ambienti di guida – reale e virtuale – si traducono nel seguente grafico di confronto, da cui emerge senz'altro la buona resa del modello virtuale anche nelle condizioni di guida notturne, pur se associato ad una sostanziale sottostima dei valori di velocità rilevati rispetto a quelli misurati nella realtà fisica. La validità dei dati è tuttavia certificata dal R^2 superiore a 0.90 ($R^2 = 0.9294$), cui si associa un significativo *fitting* del modello in coincidenza dell'elemento doppio-curvilineo, più ancora che in rettilifo.

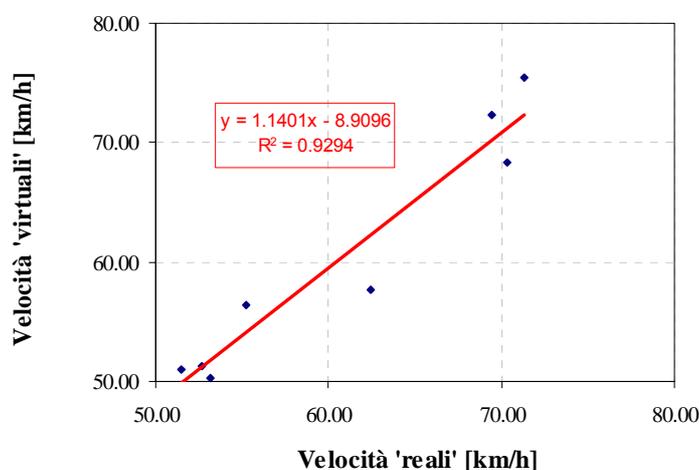


Fig. VIII.3 – Retta di correlazione tra le restituzioni modellistiche relative al periodo notturno ed i dati reali corrispondenti nella direzione di marcia A.

I due profili di velocità risultanti si presentano così sovrapposti in funzione della posizione lungo il tracciato (Scenario A – Notturno – Direzione di marcia A). Si riconfermano, di conseguenza, le stesse osservazioni già formulate a proposito del comportamento di guida degli utenti rispetto agli elementi geometrici salienti del tracciato (in particolare tra le sezioni 2 e 3).

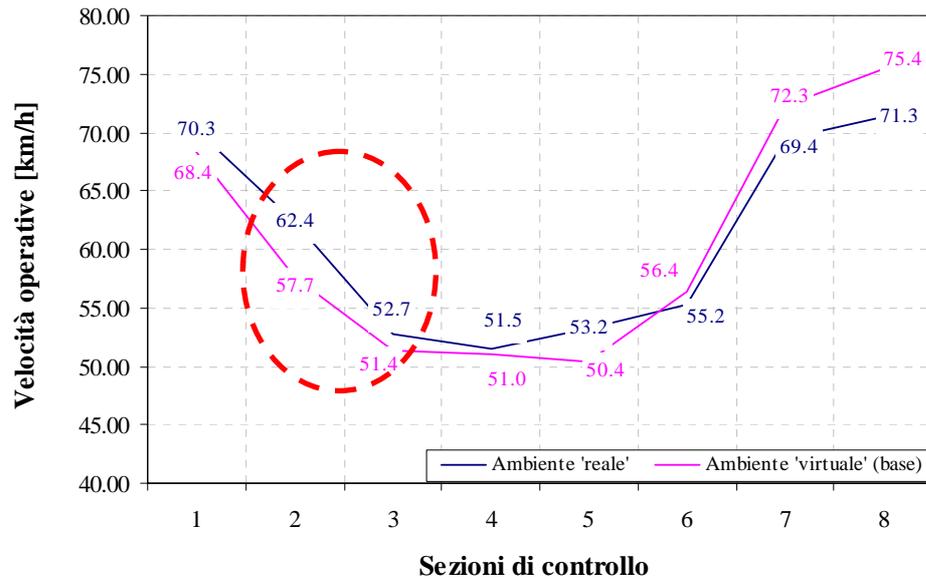


Fig. VIII.4 – Sovrapposizione dei profili di velocità reale e virtuale riferiti allo scenario notturno nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta il modello restituisce valori di velocità leggermente sottostimati – nella prima metà dell’ambiente – e allo stesso modo sovrastimati – nella seconda metà. La maggiore evidenza di ciò si circoscrive a quanto osservato nel tratto PC3 – MC3 (sezioni 6 e 5 ordinatamente) in cui si perde inevitabilmente il ‘salto’ nei valori di velocità già rilevato nel contesto di prova reale: nella fattispecie, ad una differenza assoluta di 14 km/h nella realtà, in realtà virtuale corrisponde una forbice corrispondente all’incirca alla metà (6 km/h).

La seguente tabella evidenzia, tuttavia, una buona corrispondenza in senso generale tra i valori reali e quelli virtuali, cui corrisponde un errore massimo percentuale sempre inferiore al 10% e comunque mediamente attestato sul 6%.

Tab. VIII.4 – Quadro di raffronto tra velocità operative reali e virtuali nel periodo notturno nella direzione di marcia B.

Sezione	V85 [km/h]		Δ	
	Reale	Virtuale	[km/h]	[%]
8	78.30	75.00	3.30	4.21%
7	77.50	72.35	5.15	6.65%
6	58.70	53.00	5.70	9.71%
5	44.53	47.35	-2.82	-6.33%
4	47.26	48.00	-0.74	-1.57%
3	49.30	52.35	-3.05	-6.19%
2	49.60	54.00	-4.40	-8.87%
1	77.50	74.00	3.50	4.52%

Il grafico di correlazione tra i due *dataset* evidenzia quanto già riferito a proposito della parziale sottostima e/o sovrastima dei valori virtuali rispetto a quelli reali (cosicché la retta di interpolazione non è una bisettrice), peraltro rassicurato da un R^2 pari circa a 0.96.

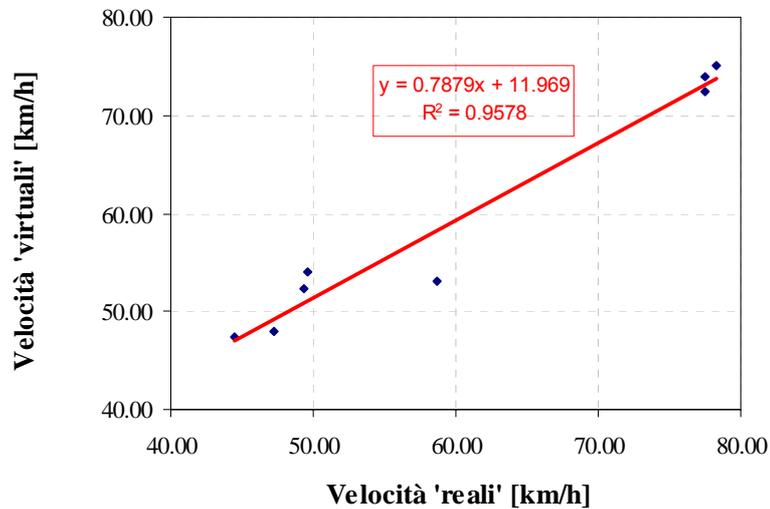


Fig. VIII.5 - Retta di correlazione tra le restituzioni modellistiche relative al periodo notturno ed i dati reali corrispondenti nella direzione di marcia B.

La sovrapposizione dei due profili di velocità – reale e virtuale – ben evidenzia la sottostima dei valori di velocità nel primo tratto dell’ambiente di guida, seguita da una lieve sovrastima nel secondo tratto, a partire dal settore a curvatura mista.

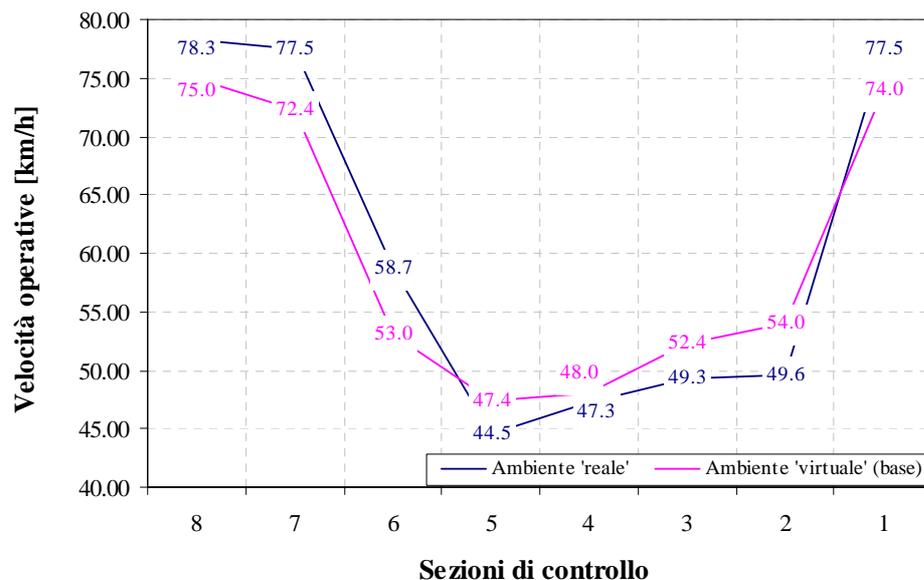


Fig. VIII.6 - Sovrapposizione dei profili di velocità reale e virtuale riferiti allo scenario notturno nella direzione di marcia B.

Una volta accertata l'attendibilità del modello sulla base del confronto tra dati reali e virtuali, è possibile passare alla discussione dei risultati per singolo scenario, valutando dapprima l'impatto del fattore notturno sul comportamento di guida isolatamente considerato nei diversi ambienti (a parità di ambiente di guida) e poi la diversa efficacia in termini di condizionamento percettiva di guida sugli utenti dei diversi ambienti a parità di altre condizioni (e cioè solo di giorno o solo di notte).

L'interpretazione dei dati è favorita dal fatto che in ciascun caso, la variabile modificata è unica e tale da poter giustificare le eventuali differenze riscontrate nei risultati conseguiti.

8.2.1 *Impatto del fattore 'notte' sul comportamento di guida.*

L'influenza del fattore 'notte' sul comportamento di guida degli utenti virtuali è stato valutato mediante la sovrapposizione dei profili di velocità diurni e notturni nelle due direzioni di marcia in tutti gli scenari di guida definiti, al fine di verificare la resistenza della divaricazione comportamentale già osservata nell'ambiente di guida reale in coincidenza con il tratto a curvatura mista del tronco stradale.

Si vuole ricordare, a tal proposito, che il modello virtuale è stato calibrato esclusivamente sui dati diurni dello scenario di guida A, di conseguenza sia i profili di velocità diurni che quelli notturni degli scenari da B ad E risultano essere tutti un risultato del modello e non un termine noto, così come il profilo notturno dello scenario A stesso.

Scenario A

I profili di velocità diurno e notturno sono stati calcolati e ricostruiti secondo le modalità operative illustrate nel precedente capitolo, riferiti alle sezioni critiche di monitoraggio definite in fase di pianificazione metodologica della campagna sperimentale.

Già ad un'osservazione qualitativa dei due profili di velocità trova conferma l'andamento tendenziale già riscontrato in riferimento ai dati reali, contraddistinto da una sostanziale coincidenza dei valori di velocità in rettilineo – sia in ingresso che in uscita dal tratto a curvatura mista – e da una netta divaricazione comportamentale nell'approccio alla controcurva, che si misura in una variazione di circa 8-10 km/h rispetto ai corrispondenti valori puntuali di velocità diurni (10-15% rispetto al valore iniziale diurno).

Analogamente a quanto già rilevato in riferimento all'ambiente di guida reale, si osserva che circa il 40% (=37,1%) della decelerazione si materializza all'interno della curva 1 (tra PC1 e MC1) e che all'uscita dal tratto a curvatura mista, gli utenti tendono a riportarsi ben presto su

valori di velocità ritenuti più consoni ed adatti al contesto di guida, accettando di praticate accelerazioni superiori ad 1.5 m/s^2 .

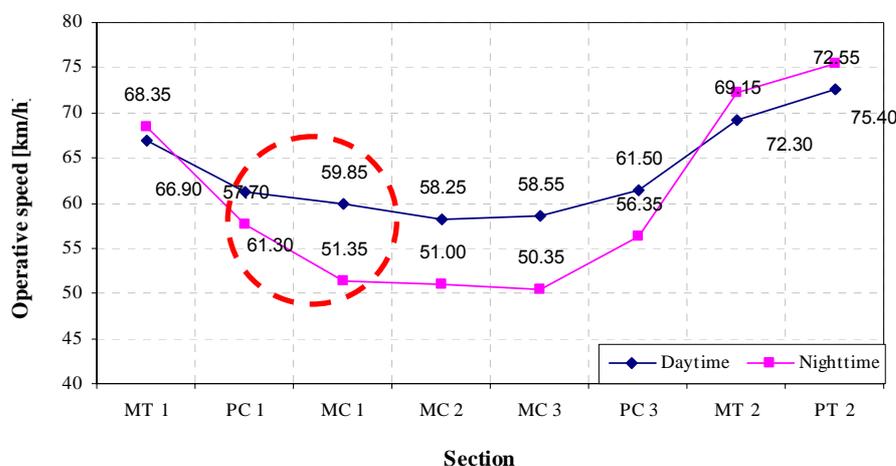


Fig. VIII.7 – Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida A nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta trova sostanzialmente conferma la tendenza da parte degli utenti stradale a voler conservare la stessa condotta di guida in rettilineo tanto di giorno quanto di notte - ben documentata dai valori di velocità rilevati in corrispondenza delle sezioni PT2, MT2 e MT1 – rispetto ai quali il tratto a curvatura mista viene percepito come un elemento di discontinuità puntuale da affrontare e superare rapidamente per riportarsi quanto prima alle condizioni di marcia ritenute maggiormente adeguate e congruenti con le caratteristiche geometriche ed ambientali del tracciato, indipendentemente dal grado di illuminazione.

Procedendo da PT2 in direzione MT1, si osserva una sostanziale coerenza dei valori puntuali di velocità nelle sezioni in rettilineo cui fa seguito un diverso approccio alla curva 3 tra i due ambienti diurno e notturno: se è vero che la velocità operativa a centro curva adottata dagli utenti equivale a 62.95 km/h – che risulta essere congruente con le caratteristiche geometriche del tracciato secondo quanto descritto dai criteri di Lamm (-9.55 km/h rispetto alla velocità della tangente di approccio) – non lo stesso può dirsi dello scenario notturno, cui resta associata una velocità operativa a centro curva di 47.35 km/h (-25.00 km/h) per raggiungere viene attuata una prima decelerazione di velocità lungo la tangente equivalente al 77% dell'intero differenziale di velocità ed una seconda decelerazione (33%) nel tratto compreso tra la sezione di ingresso in curva (PC3) e la sezione centrale della curva (MT3). I due tassi di decelerazione risultano equivalere a 1.55 e 1.09 m/s^2 rispettivamente lungo la tangente ed all'interno della curva (sezioni PC3 e MC3).

La differenza tra i due profili si attenua lievemente proseguendo nella marcia lungo la curva 2 per ridursi a soli $6-8 \text{ km/h}$ (= $10-12\%$ rispetto al valore diurno) per poi riallinearsi in uscita dal

tratto a curvatura mista (sezione MT1), evidenziando peraltro che la percezione del rischio da parte degli utenti resta localizzata in coincidenza di elementi puntuali di natura fisica (geometria o caratteristiche dello spazio stradale) ma non costituisce un elemento di condizionamento continuativo nel corso della guida.

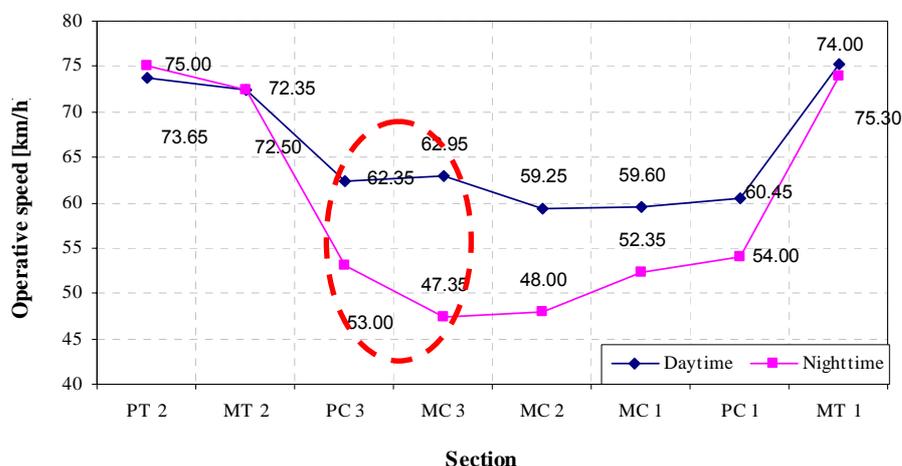


Fig. VIII.8 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida A nella direzione di marcia B.

In riferimento allo scenario di guida A, in entrambe le direzioni di marcia, trovano sostanzialmente conferma le osservazioni già espresse a commento dei dati di velocità reali (diurni e notturni) secondo cui:

- gli utenti tendono a mantenere in rettilineo un comportamento di guida indifferente tra il giorno e la notte, se non marginalmente più spregiudicato (in termini di velocità osservata);
- il comportamento notturno in curva è frutto di un adattamento sequenziale attuato in corrispondenza dell'ingresso in curva, dettato tanto dalla geometria (curvatura effettiva, sviluppo percepito, presenza di veicoli nella direzione controversa) quanto dalla presenza di elementi di distrazione di varia natura, in relazione ai quali l'utente presceglie una combinazione comportamentale "velocità-posizione laterale" atta ad assicurare una condotta di guida percepita come sicura;
- la presenza di discontinuità di tipo puntuale che impongono un adattamento comportamentale in termini di velocità o traiettoria viene percepita solo nell'immediata prossimità della stessa nonostante la presenza di un presegnalamento del pericolo imminente;
- al preavviso delle condizioni di pericolo associate alla geometria planimetrica del tracciato (doppia curva), alla sezione trasversale variabile (restringimento carreggiata) ed alla

limitazione di velocità in curva (a 50 km/h) non corrisponde alcuna modifica del comportamento di guida osservato, specialmente durante la guida notturna.

Scenario B

Lo scenario di guida B prevede l'introduzione di alcune modifiche alla segnaletica verticale mediante l'introduzione di segnali di pericolo lampeggianti (con effetto percettivo) associati ad un dissuasore di velocità rispettivamente all'inizio ed a metà delle tangenti rettilinee di approccio alle curve circolari di ingresso al tratto a curvatura mista nelle due direzioni di marcia.

Nella direzione di marcia A si verifica un'inversione comportamentale tra i due ambienti diurno e notturno tale per cui nottetempo i valori di velocità in rettilineo risultano essere superiori anche del 5% rispetto ai corrispondenti valori diurni mentre in curva risultano differirne di circa il 15-20%.

In riferimento alla condotta di guida nella negoziazione della velocità di ingresso in curva si osserva una divaricazione tra i due casi osservati, per quanto meno netta del caso descritto in relazione allo scenario A: a fronte di una differenza di velocità tra tangente e centro curva pari a soli 5.20 km/h nel periodo diurno, nel periodo notturno la differenza si misura in circa 15 km/h (= 14.95 km/h) descrivendo un'operatività del tracciato non più 'buona' ma 'tollerabile' sulla base dei criteri di congruenza di Lamm.

Da osservare che i profili di velocità diurni dello scenario A e B risultano essere sostanzialmente speculari, nonostante la modifica introdotta nel secondo dei due ambienti di guida. Più marcata la differenza negli scenari di guida notturni poiché - a parità di velocità di provenienza e di velocità operativa in curva - il dato rilevato in corrispondenza della sezione in ingresso in curva nello scenario B notturno, appena a valle delle modifiche alla segnaletica verticale di tipo psico-pedagogico, evidenzia una diminuzione percentuale della velocità pari al 10% (circa 7 km/h), consentendo in sostanza di anticipare la manovra di decelerazione all'esterno della curva e di favorire l'ingresso in curva degli utenti virtuali ad una velocità più moderata e più consona alle caratteristiche geometrico-funzionali del tratto curvilineo.

Infatti, la decelerazione diurna - per quanto modesta - si materializza per il 70% della sua entità all'esterno della curva lungo lo sviluppo della tangente. La decelerazione notturna - a parità di differenziale totale tra la tangente e la curva negli scenari A e B (16 km/h vs. 15 km/h) - si compone di una quota del 80% lungo la tangente (contro il 60% dello scenario A) e di una rimanente quota-parte (20%) all'interno della curva, precisamente tra le sezioni PC1 e MT1.

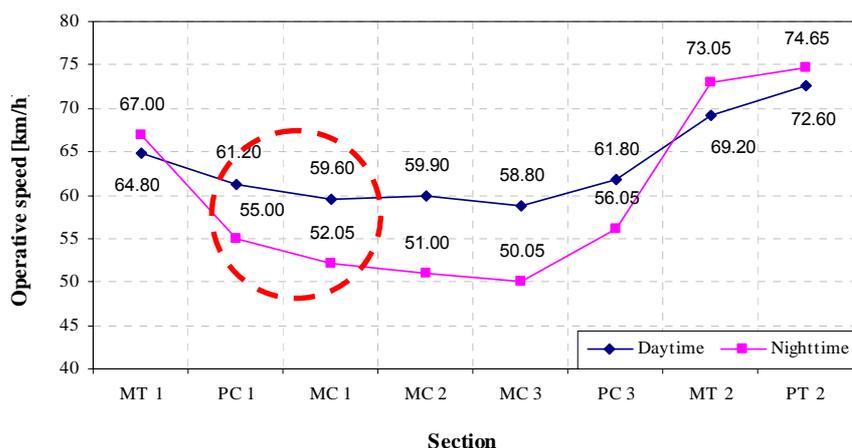


Fig. VIII.9 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida B nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta si osserva una maggiore efficacia delle modifiche introdotte anche durante il periodo diurno anche di modesta entità (-3% in corrispondenza della sezione PC3) che si conferma anche nelle sezioni di monitoraggio successive all'interno del tratto curvilineo. Così come nello scenario A, anche nello scenario diurno B il tronco stradale si descrive come 'tollerabile' secondo i criteri di giudizio espressi da Lamm in merito alla congruenza geometrica del tracciato assiale.

La tollerabilità in termini di congruenza geometrica del tracciato risalta in misura più netta quando riferita allo scenario di guida notturno giacché la differenza tra le velocità operative calcolate lungo la tangente di approccio ed al centro della curva circolare di ingresso al settore a curvatura mista risulta equivalere a 18 km/h, associata tuttavia ad una ancora più brusca decelerazione a monte della sezione di ingresso in curva seguita da un parziale recupero di velocità all'interno dello stesso elemento curvilineo.

L'efficacia della modifica introdotta mediante la segnaletica si misura nella capacità di anticipare all'esterno dell'elemento curvilineo la fase decelerazione operativa finalizzata all'adeguamento della velocità di provenienza di rettilineo fino al valore selezionato e ritenuto adeguato alla tipologia di curvatura ed al grado di rischiosità dello spazio stradale nelle condizioni di guida assegnate: mentre, infatti, nello scenario notturno A si era osservato che la decelerazione trovava attuazione per il 77% lungo la tangente e per il restante 33% all'interno della curva (tra PC3 e MC3), nello scenario notturno B la decelerazione si materializza integralmente a monte della sezione PC3, consentendo all'utente di inscrivere nella curva 3 con una velocità sostanzialmente equivalente con quelle finalmente adottata per la percorrenza in sicurezza dell'elemento geometrico, misurata sia a centro curva che in corrispondenza della successiva sezione MC2. Il tasso di decelerazione corrispondente lungo la tangente equivale a 1.50 m/s^2 a seguito del quale l'utente tende ad attuare

un'accelerazione costante e progressiva fino all'uscita dalla variante planimetrica a curvatura mista.

La differenza tra le velocità diurne e notturne nello scenario B si quantifica percentualmente in una proporzione variabile tra il 12% (MC1) ed il 20% (MC3), riducendosi peraltro di entità al passare dalla prima curva circolare alle successive per riportarsi su valori superiori ai 60 km/h già a metà della tangente di uscita dalla curva circolare 1. Il tracciato si configura geometricamente 'tollerabile' anche nelle sezioni a valle dello sviluppo planimetrico ad S secondo quanto descritto dai criteri di congruenza di Lamm.

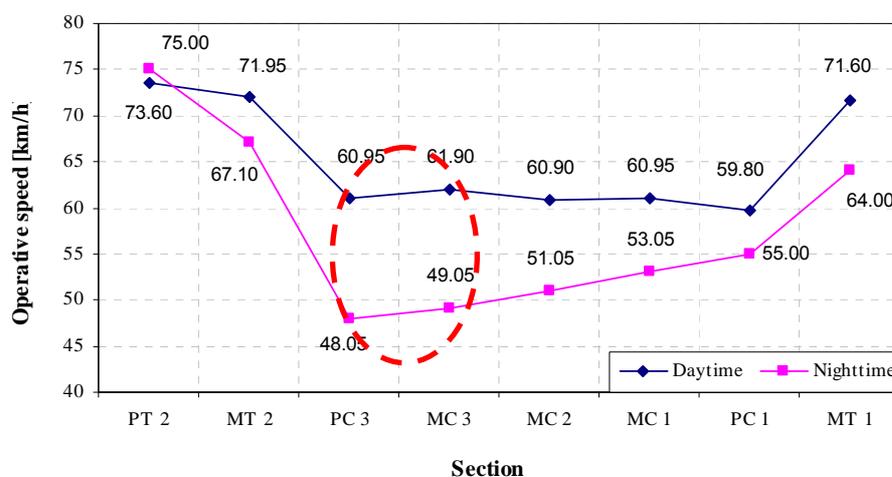


Fig. VIII.10 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida B nella direzione di marcia B.

Le osservazioni che trovano riscontro nei risultati sperimentali sopra illustrati si possono così riassumere:

- trova conferma la tendenza secondo cui le condizioni di guida percepite dall'utente stradale siano omeostatiche in assenza di elementi di discontinuità soggettivamente ritenuti rischiosi o meritevoli di considerazione;
- la segnaletica di pericolo – sia orizzontale che verticale – risulta scarsamente percepita/considerata (cfr. scenario A), specialmente laddove raffrontata con i dispositivi di tipo percettivo con efficacia psico-pedagogica (dissuasore di velocità, segnaletica ottica e/o lampeggiante di tipo attenzionale), come ben documentato in corrispondenza delle sezioni di ingresso in curva nelle due direzioni marcia;
- la validità delle misure segnaletiche di cui al punto precedente è tuttavia contraddistinta da un rapporto durata/efficacia molto piccolo, poiché l'effetto sull'utenza stradale risulta essere circoscritto e limitato ad un breve tratto a cavallo dell'intervento stesso (dell'ordine

di poche decine di metri) a seguito del quale la condotta di guida tende a riportarsi all'omeostasi comportamentale;

- il maggior elemento di interesse per i dispositivi di tipo ottico o percettivo corrisponde alla capacità di consentire un'anticipazione della manovra di decelerazione laddove all'esterno della curva circolare, limitandone la quota residuale all'interno della stessa in condizioni intrinsecamente più rischiose sotto il profilo della stabilità veicolare e della sicurezza della marcia.

Scenario C

Lo scenario C è contraddistinto dalla presenza di alcune modifiche di natura funzionale alla segnaletica orizzontale, realizzate mediante il miglioramento della visibilità della strisce marginali e spartitraffico e l'inserimento di dispositivi integrativi per segnaletica orizzontale continua del tipo "occhi di gatto" lungo le delineazioni marginali della carreggiata. Per ragioni di carattere psico-percettivo, la massima efficacia in termini prestazionali delle modifiche introdotte è atteso durante le ore notturne nel corso delle quali risulta massimo il contributo della segnaletica stradale al corretto posizionamento in corsia ed alla corretta interpretazione della geometria del tracciato nonché dei rischi e dei pericoli connessi alla guida.

Nella direzione di marcia, si conferma ancora una volta la netta divaricazione tra il comportamento di guida diurno e notturno, tale per cui lo stesso tracciato risulta essere descritto sotto il profilo della congruenza geometrica come 'buono' in un caso (di giorno) e come 'tollerabile' nel secondo (di notte), stante la differenza tra le velocità operative in rettilineo ed a centro curva pari a 7 km/h e 15.8 km/h ordinatamente nei due casi.

La differenza percentuale tra le velocità operative in corrispondenza delle tre sezioni centrali dello sviluppo planimetrico ad S si attesta su un intervallo statistico compreso tra il 17 ed il 20%, equivalendo in valore assoluto ad una gap di circa 8-10 km/h sia in MC1 che in MC2 ed in MC3.

Un risultato significativo si identifica nella capacità della segnaletica orizzontale di tipo ottico di indurre un'anticipazione della decelerazione operativa all'esterno della curva circolare, a parità di altre condizioni rispetto allo scenario di guida A, in particolar modo nel corso delle ore notturne. In tali condizioni, in particolare, a fronte di una decelerazione lungo la tangente pari al 62% nello scenario notturno A, nello scenario C la percentuale si accresce fino all'85% demandando al tratto curvilineo compreso tra le sezioni PC1 e MC1 una quota del 15% pari ad appena 2 km/h.

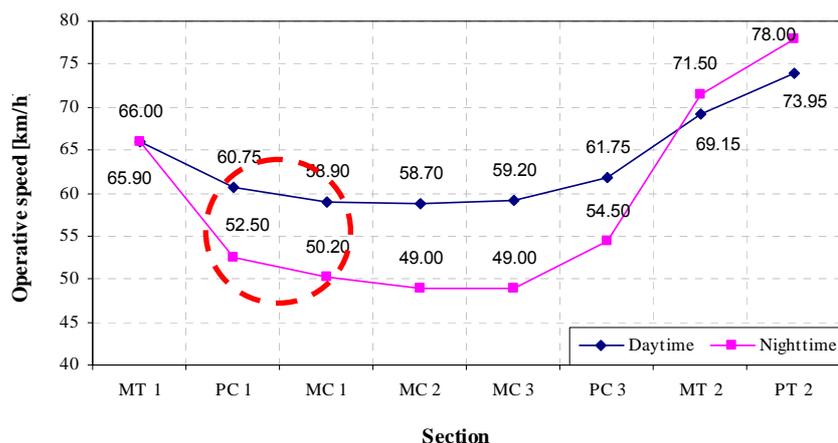


Fig. VIII.11 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida C nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta si conferma la tendenza all'adozione di una condotta di guida di tipo omeostatico rispetto ai rischi connessi alla guida ed alle condizioni di guida dettate dallo spazio stradale, tale per cui le velocità in rettilineo notturne si confermano allineate con quelle diurne sia a monte che a valle della variante planimetrica a curvatura mista. Quest'ultima invece viene affrontata diversamente nei due casi seppur in maniera più omogenea rispetto a quanto registrato in relazione allo scenario di guida A.

Il tracciato risulta essere geometricamente classificato come 'buono/tollerabile' nel corso del periodo diurno ($\Delta = 10.8$ km/h) e come 'inadeguato' nel corso delle ore notturne ($\Delta = 20.5$ km/h), così come già riferito in relazione allo scenario di guida A. La differenza tra le velocità operative diurne e notturne si attesta sugli 8-10 km/h – percentualmente equivalenti al 15-20% del valore diurno – in PC3, in MC3 ed in MC2, mentre tende a ridursi a 5 km/h (8%) in coincidenza con la sezione di controllo MC1. In uscita dalla curva le velocità diurne e notturne tendono a riallinearsi.

L'efficacia delle modifiche introdotte si traduce, analogamente a quanto già evidenziato in riferimento alla direzione di marcia opposta, nell'anticipazione della manovra di decelerazione integralmente all'esterno della curva circolare tale per cui la velocità di percorrenza dell'elemento curvilineo in MC3 risulta sostanzialmente essere invariata rispetto a quella rilevata in PC3. La decelerazione lungo la tangente passa dal 77% dello scenario A al 93% dello scenario C cui corrisponde peraltro un approccio di tipo conservativo della velocità operativa all'interno della curva, che si mantiene pressoché costante fino ad MC1 per poi riportarsi su valori prossimi a quelli diurni e dunque indifferenti alle caratteristiche geometrico-funzionali dell'ambiente stradale. Il tasso di decelerazione lungo la tangente si misura in 1.48 m/s^2 mentre la quota residuale maturata all'interno della curva (sezioni PC3-MC3) equivale a 0.28 m/s^2 .

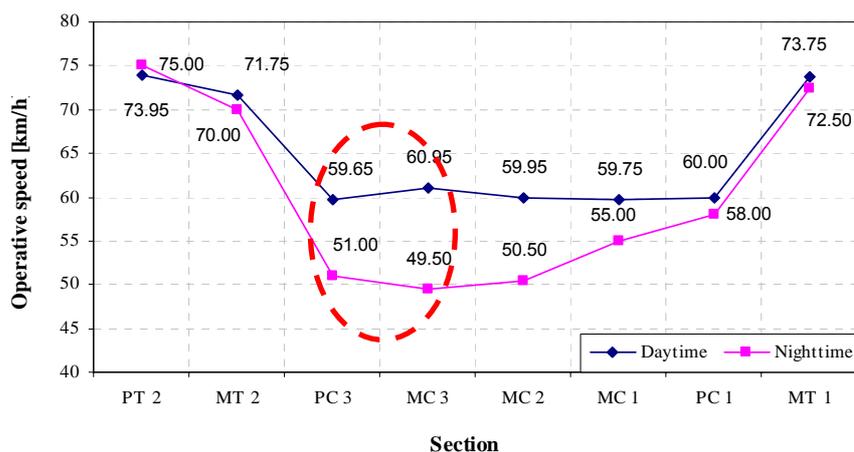


Fig. VIII.12 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida C nella direzione di marcia B.

Le osservazioni di carattere generale derivanti dall'analisi dello scenario di guida C si possono così riassumere:

- trova ulteriore conferma l'ipotesi secondo cui l'utente stradale tende ad affrontare isolatamente i rischi connessi alla guida valutando di volta in volta la condotta da adottare in relazione agli impulsi ed alle informazioni disponibili provenienti dallo spazio stradale;
- le velocità di rettilineo diurne e notturne a monte ed a valle della variante planimetrica si equivalgono in entrambe le direzioni, attestando la preferenza da parte dell'utente ad adottare velocità elevate, anche in presenza di discontinuità di tipo geometrico e/o funzionale, a valle delle quali la condotta di guida si riporta alla teoria dell'omeostasi;
- analogamente a quanto osservato nei casi precedenti, la valutazione della congruenza geometrica del tracciato risulta essere discorde a seconda che essa venga attuata sulla base dei dati diurni e/o notturni. In particolare, le condizioni maggiormente sfavorevoli di verifica risultano associate alle condizioni operative di guida notturna;
- l'efficacia delle modifiche di tipo funzionale introdotte si misura nella capacità di indurre sull'utente un'anticipazione della fase di decelerazione, minimizzandone l'entità all'interno delle curve circolari.

Scenario D

Nello scenario D sono state introdotte alcune modifiche di tipo funzionale alla segnaletica, derivanti dalla composizione degli interventi previsti nello scenario B e di quelli attuati nello scenario C. Il corredo informativo dell'ambiente di guida originario risulta di conseguenza

arricchito di segnali verticali di pericolo di tipo lampeggiante, di due dissuasori di velocità (uno per direzione), di una segnaletica orizzontale a tratto continuo ad alta visibilità (sia in mezzera che lungo i margini di corsia) nonché di una serie di dispositivi integrativi per segnaletica orizzontale del tipo “occhi di gatto” dislocati con passo 10 m lungo le strisce di delineazione laterale della carreggiata.

Nella direzione di marcia A, si segnala una condotta di guida del tutto affine a quelle già illustrate ed analizzate in riferimento agli ambienti di guida precedenti, contraddistinta da velocità notturne in rettilineo uguali od addirittura superiori rispetto a quelle rilevate nel corso del periodo diurno. Le velocità operative selezionate per le tre curve circolari (MC1, MC2 ed MC3) risultano sostanzialmente allineate con quelle già illustrate in precedenza, confermando la differenza tra ore diurne ed ore notturne misurata in valore assoluto in circa 8-10 km/h, mediamente equivalenti al 15% del valore diurno.

Si conferma ancora una volta la diversità di approccio comportamentale nell'impostazione della curva tale per cui lo stesso tracciato risulta essere geometricamente assumibile come 'buono' o 'tollerabile' di giorno ($\Delta = 6.7$ km/h) mentre risulta essere 'inadeguato' se riferito alle condizioni operative accertate nottetempo ($\Delta = 20$ km/h), in relazione alle velocità operative rilevate lungo il rettilineo d'approccio al primo elemento curvilineo ed a metà dello sviluppo di quest'ultimo ordinatamente.

In condizioni di illuminazione diurna, la differenza di velocità tra tangente e centro curva viene colmata per il 62% lungo la tangente e per il restante 28% dentro lo sviluppo curvilineo (tra le sezioni PC3 e MC3), mentre in condizioni di illuminazione notturna la decelerazione si concentra maggiormente lungo la tangente (80%), agevolata anche dall'introduzione delle modifiche alla segnaletica verticale ed orizzontale. Si ricorda, infatti, che nello scenario 'non modificato' A le percentuali con cui il gap tra rettilineo e curva (17 km/h) veniva colmato risultavano equivalere al 60% lungo la tangente ed al 40% all'interno della curva.

Le modifiche introdotte, in sostanza, non inducono l'utente ad una condotta più cauta o comunque differente nella negoziazione della velocità in curva ma denotano tuttavia il non trascurabile effetto di anticipare per quanto possibile la fase di decelerazione lungo la tangente consentendo infine l'iscrizione in curva a velocità più moderate rispetto a quanto rilevato nello scenario e più prossime al valore operativamente selezionato per la percorrenza della curva (MC1).

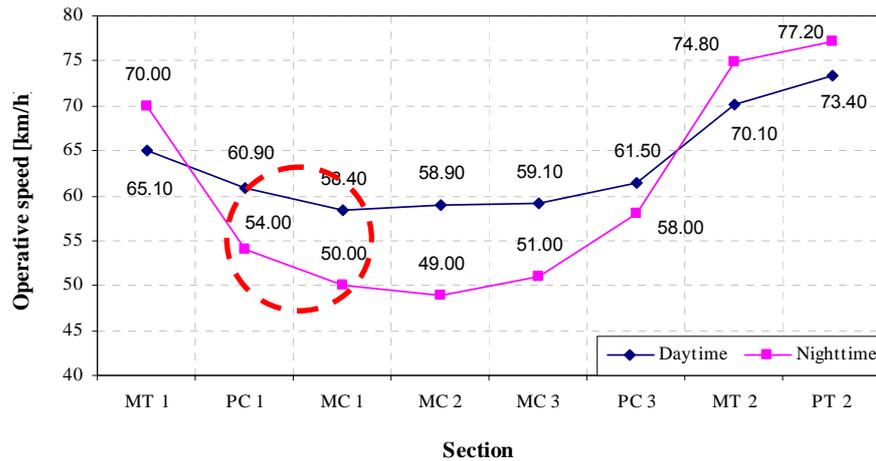


Fig. VIII.13 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida D nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta, si rileva diversamente dai casi precedenti un sostanziale scostamento delle velocità notturne rispetto a quelle diurne anche in rettilineo, misurate mediamente in una proporzione del 15% sul valore diurno (circa 6 km/h).

Il tracciato si conferma tuttavia come 'tollerabile' dal punto di vista della congruenza geometrica sia in condizioni di illuminazione diurna ($\Delta = 12.5$ km/h) che notturna ($\Delta = 16$ km/h), in riferimento alle velocità operative registrate lungo la tangente (MT2) ed al centro della curva circolare 3 (MC3).

Mentre la fase di decelerazione diurna avviene pressoché totalmente lungo la tangente, nelle ore notturne la distribuzione percentuale delle variazioni della velocità si localizza per l'80% lungo la tangente e per il restante 20% nel tratto curvilineo compreso tra le sezioni PC3 e MC3. Considerando come elemento certamente positivo il fatto che la decelerazione resti comunque concentrata lungo la tangente piuttosto che all'interno della curva, vale tuttavia l'osservazione secondo cui la velocità operativa in ingresso in curva risulta essere tale da richiedere una successiva repentina correzione di velocità per riportarsi nelle condizioni soggettivamente ritenute di sicurezza nella marcia, corrispondenti ad un valore di velocità equivalente a circa 50 km/h come già quantificato anche in riferimento ai casi precedentemente descritti. La decelerazione residua all'interno della curva si misura infatti in 0.56 m/s^2 a fronte di un tasso di decelerazione già maturato lungo la tangente di 1.00 m/s^2 .

Si osserva tuttavia che l'efficacia dei segnali verticali di tipo percettivo (dissuasore di velocità, ecc.) posti lungo la tangente a monte della sezione di ingresso della curva circolare (PC3) risulta essere ridotta rispetto a quanto evidenziato in riferimento allo scenario B in cui tale modifica era stata introdotta isolatamente.

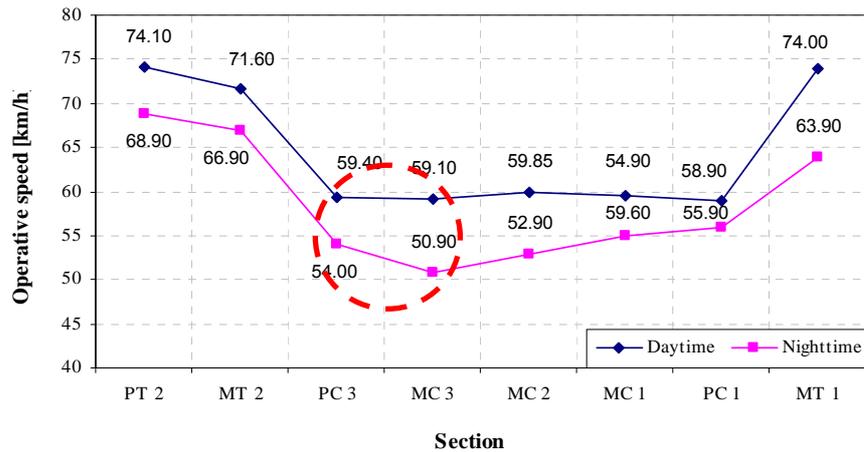


Fig. VIII.14 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida D nella direzione di marcia B.

Le osservazioni di carattere generale che possono essere formulate sulla base dei risultati sperimentali conseguiti nello scenario di guida D si riconducono essenzialmente alle seguenti:

- nel confermare quanto già evidenziato in riferimento ai precedenti scenari, si rileva come i profili di velocità diurni risultino sostanzialmente indifferenti alle modifiche funzionali introdotte. Ne consegue che l'azione sulle misure di tipo psico-percettivo non possa ritenersi sufficiente a condizionare il comportamento di guida dell'utente se non nottetempo;
- il profilo di velocità notturno dello scenario D risulta essere più affine a quello già illustrato dello scenario C piuttosto che a quello precedente dello scenario B, attestando come l'efficacia delle misure di tipo psico-percettivo di tipo estensivo (segnaletica continua) si misuri non tanto e non solo in termini di feedback puntuale ma anche in termini di durata: assegnare la funzione di moderazione della velocità e della condotta di guida ad un solo pannello verticale può risultare rischioso laddove sussista la possibilità che tale elemento non venga colto, visto o percepito nella sua essenza o che venga sottostimato dall'utente stradale per ragioni anche accidentali. Diversamente il contributo della segnaletica orizzontale di tipo ottico può meglio corrispondere allo scopo di segnalare ed informare l'utente sui rischi effettivamente connessi allo stato geometrico-funzionale dell'ambiente di guida, assistendone l'interpretazione nelle condizioni più sfavorevoli di marcia;
- trova conferma ancora una volta la tendenza da parte dell'utente a posticipare la correzione della propria velocità/traiettoria di guida anche fino all'immediata prossimità degli elementi soggettivamente ritenuti rischiosi per la guida in sicurezza.

Scenario E

Lo scenario E è contraddistinto dall'introduzione di una variante planimetrica al tracciato tale da riportarne le caratteristiche geometriche congruenti con quanto statuito dal D.M. 5 novembre 2001 in materia di progettazione e costruzione delle strade.

La verifica delle condizioni operative di esercizio del tronco stradale costituisce un elemento di notevole interesse dal punto di vista della sicurezza anche per lo scenario E, in virtù della diversità di comportamento dell'utenza stradale in corrispondenza degli elementi ritenuti critici durante la marcia già evidenziata in riferimento ai casi precedentemente illustrati.

La descrizione dei profili di velocità diurni e notturni nella direzione di marcia A evidenzia da subito una notevole affinità nei valori di velocità selezionati in curva, specialmente in corrispondenza delle sezioni MC2 ed MC3 dove la coincidenza è pressoché assoluta. Lievi scostamenti in eccesso si rilevano per le velocità notturne sia in rettilineo che nelle sezioni di ingresso in curva. Il tracciato risulta, contrariamente ai casi precedentemente illustrati, operativamente classificato come 'congruente' giacché la differenza tra le velocità di approccio lungo il tratto rettilineo a monte della clotoide di raccordo con la curva 1 e quella rilevata al centro della prima curva circolare (MC1) risulta essere inferiore a 10 km/h (9.35 km/h). La fase di decelerazione si esaurisce per l'80% della sua durata lungo il tratto di transizione mediante l'attuazione di un tasso corrispondente di 0.28 m/s^2 , mentre solo per il 20% si materializza all'interno dell'elemento circolare. Detto che la condotta di guida risalta per la netta affinità tra periodo diurno e notturno tra le sezioni MC2 e PC3, si segnala un comportamento marcatamente meno cauto all'uscita dalla variante planimetrica durante le ore notturne, associato ad un tasso di accelerazione di 0.87 m/s^2 , forse incoraggiato dal maggiore grado di sicurezza e confort di marcia dettato dalla modifica geometrica introdotta in corrispondenza dello sviluppo ad S.

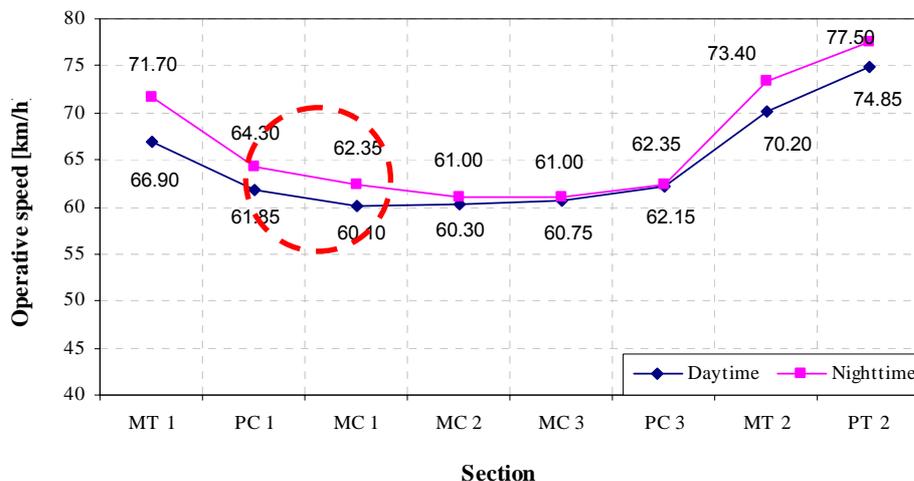


Fig. VIII.15 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida E nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta, il comportamento di guida notturno risulta essere addirittura in controtendenza rispetto a quanto evidenziato in riferimento ai casi precedentemente illustrati e tale da descrivere un approccio marcatamente più spregiudicato rispetto a quanto rilevato a parità di altre condizioni nello scenario di guida diurno corrispondente.

Gli aspetti certamente positivi evidenziati da entrambe le circostanze è la costanza della velocità operativa in curva nel tratto compreso tra PC3 e PC1 – salvo rare e circostanziate variazioni, specialmente in condizioni di illuminazione notturna – cui corrisponde la conferma dell'efficacia dell'intervento in termini di anticipazione della fase di decelerazione integralmente all'esterno delle curve circolari.

Nello scenario diurno, infatti, il 91% della riduzione della velocità di marcia si materializza nel tratto di transizione compreso tra le sezioni MT2 e PC3, corrispondente ad un tasso di decelerazione medio di 0.79 m/s^2 praticamente coincidente con quello teorico previsto dal D.M. 5 novembre 2001 per il dimensionamento delle curve a raggio variabile. Il restante 9% si localizza all'interno della curva circolare nella forma di assestamento della velocità, peraltro associato ad un tasso di decelerazione di soli 0.17 m/s^2 . Nottetempo la velocità operativa selezionata per la percorrenza in sicurezza della variante planimetrica si individua in circa 65-66 km/h mantenuti quasi costantemente fino alla sezione di uscita (PC1). Solo in coincidenza della sezione MC1 si osserva una lieve flessione della velocità di significato trascurabile. Il tasso di decelerazione lungo il tratto di transizione si misura in 0.46 m/s^2 cui va seguito un'alternanza di accelerazioni e decelerazioni di lieve entità fino alla sezione PC1 a valle della quale si registra una nuova più importante fase di accelerazione contraddistinta da un tasso cinematico di 0.28 m/s^2 . Le velocità notturne si mantengono su valori evidentemente superiori a quelli diurni nella misura di 5-6 km/h, corrispondenti ad un eccesso statistico di circa il 10% in percentuale rispetto al valore diurno assunto come riferimento.

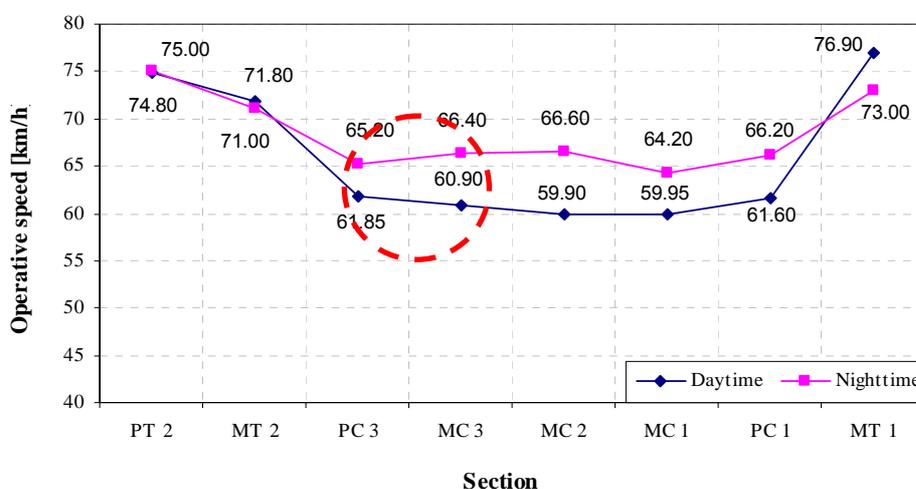


Fig. VIII.16 - Velocità operative diurne e notturne a confronto nello scenario di guida E nella direzione di marcia B.

Le osservazioni di carattere riassuntivo relative allo scenario di guida E si possono così riassumere:

- l'introduzione delle dette modifiche al tracciato stradale ha riportato le condizioni operative entro i termini di accettabilità in termini di congruenza geometrica, per quanto ancora borderline tra 'buone' e 'tollerabili' secondo quanto previsto dai criteri di Lamm;
- sussiste una minima discrepanza tra la propensione al rischio durante la guida diurna e notturna, ben documentata dalla differenza di velocità in curva, specialmente nella direzione di marcia B (oggettivamente la più rischiosa per le ragioni illustrate in più sede della dissertazione);
- l'introduzione delle modifiche planimetriche al tracciato pare denotare un effetto imprevisto, tale per cui l'utente tende a sentirsi talmente rassicurato dalle caratteristiche geometriche del tronco stradale da non curarsi della presenza di altri elementi di rischio comunque presenti (intersezione stradale, limitazione di velocità, visibilità occultata dalle presistenze a bordo strada, ecc.), specialmente nottetempo. Troverebbe in qualche modo conferma l'indicazione secondo cui l'oscurità non rappresenta un elemento di attenzione da parte dell'utente né costituisce un deterrente dal punto di vista della condotta di guida;
- a fronte di un intervallo di velocità di progetto per il tracciato modificato di 40-60 km/h (piattaforma di tipo E ai sensi del D.M. 05.11.2001) e di un limite di velocità di 50 km/h attualmente in essere e confermato nello scenario modificato E, le velocità operative risultano essere comunque marcatamente in eccesso rispetto a quanto desiderabile per il tronco stradale in relazione tanto alle sue caratteristiche geometriche quanto alle quelle funzionali ed operative di esercizio.

8.2.2 Il fattore 'modifiche funzionali'

L'efficacia delle modifiche funzionali introdotte (segnaletica verticale e/o orizzontale) a parità di altre condizioni viene valutata mediante il confronto diretto dei profili di velocità diurni e notturni di ciascuno degli scenari modificati con quello 'base' non modificato (scenario A), riproduzione in virtuale del contesto reale già discusso ed analizzato nel paragrafo di apertura del capitolo corrente.

Per quanto già evidenziato nell'ambito delle precedenti discussioni inerenti l'influenza del fattore 'notte' sulla condotta di guida degli utenti, si ricorda che la massima efficacia attesa per le modifiche introdotte si circoscrive alle condizioni di guida notturne, ritenendo queste ultime le condizioni operative più critiche dal punto di vista della sicurezza e della percezione

del rischio da parte degli utenti stradali durante la marcia. La deduzione di tale osservazione consegue direttamente dall'analisi dei dati sperimentali relativi al contesto reale, confermati anche dai dati validati nell'ambiente di guida virtuale (scenario A).

Scenario B

Nella direzione di marcia di marcia A si conferma quanto atteso in riferimento allo scenario diurno, poiché non si osservano apprezzabili scostamenti tra i valori di velocità nei due casi. In buona sostanza, la presenza di segnali di pericolo lampeggianti e del dissuasore di velocità non dà risposta in condizioni di illuminazione diurna.

In condizioni di illuminazione notturna al contrario si segnala che - a parità di altre condizioni - la presenza del dissuasore di velocità a monte della sezione di ingresso in curva induce un'anticipazione della fase di decelerazione all'esterno dell'elemento curvilineo tale per cui la velocità operativa nella sezione PC1 risulta essere inferiore a quella rilevata nello scenario A. Il differenziale di velocità tra tangente e centro curva si misura in 17 km/h nello scenario e circa 15 km/h nello scenario B, tuttavia nel primo caso la fase di decelerazione si concentra per il 62% della sua durata lungo la tangente e per il restante 38% all'interno dello sviluppo curvilineo mentre nel secondo caso l'80% della decelerazione viene attuata lungo la tangente e solo il 20% tra le sezioni PC1 e MC1. I tassi di decelerazione cinematica lungo la tangente crescono da 0.39 m/s² a 0.44 m/s² mentre si riducono apprezzabilmente quelli calcolati all'interno dell'elemento curvilineo che passano da 0.10 m/s² (scenario A) a 0.05 m/s² (scenario B).

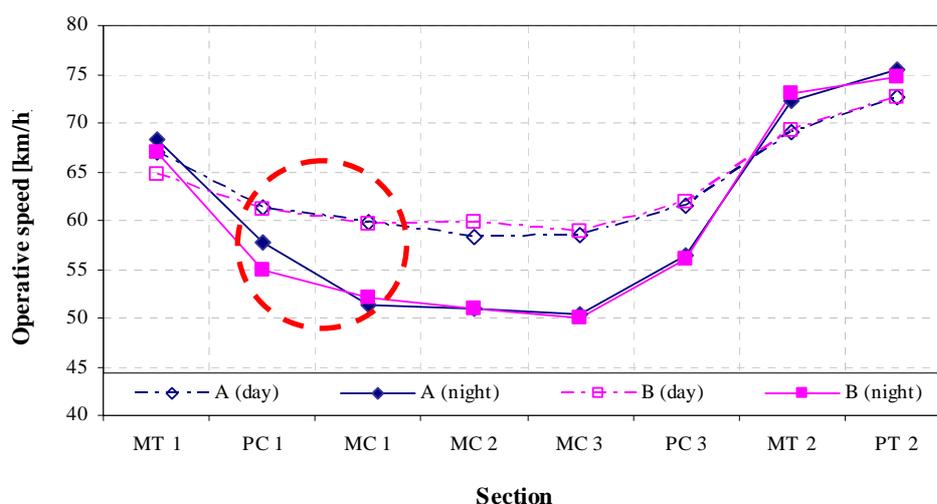


Fig. VIII.17 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e B nella direzione di marcia A.

La maggiore efficacia della modifica introdotta – per quanto detto maggiormente valida nottetempo – si misura tanto nella riduzione della velocità di ingresso in curva quanto nella minimizzazione della decelerazione residuale all'interno della curva giacché la velocità operativa infine selezionata in PC1 approssima molto bene il valore finale di velocità adottato per la percorrenza dell'intera estensione del tronco curvilineo fino alla sezione MC3, assicurando una condotta di guida più composta e congruente con le caratteristiche geometriche e funzionali del tronco stradale.

Analogamente a quanto evidenziato in riferimento alla direzione di marcia opposta, nella direzione B si conferma la sostanziale inefficacia dei dispositivi di tipo ottico durante la guida diurna, ben documentata dalla pressoché costante invarianza dei valori di velocità istantanei sulle sezioni di monitoraggio dei scenari A e B.

Nello scenario notturno, al contrario, il beneficio indotto dalle modifiche funzionali introdotte risulta massimo giacché la velocità di ingresso in curva (PC3) si attesta su valori nettamente inferiori a quelli dello scenario non modificato (circa il 10%), traslando peraltro l'intera fase di decelerazione all'esterno della curva circolare visto che il valore di velocità infine prescelto in PC3 è addirittura inferiore rispetto a quello poi rilevato nel resto del tratto.

I tassi di decelerazione si misurano in 1.54 m/s² e 1.50 m/s² ordinatamente nei casi dello scenario A e B in considerazione anche del fatto che la velocità istantanea notturna in MT2 risulta comunque leggermente inferiore rispetto a quella diurna, presumibilmente per via del segnale lampeggiante di pericolo posto immediatamente a valle di detta sezione.

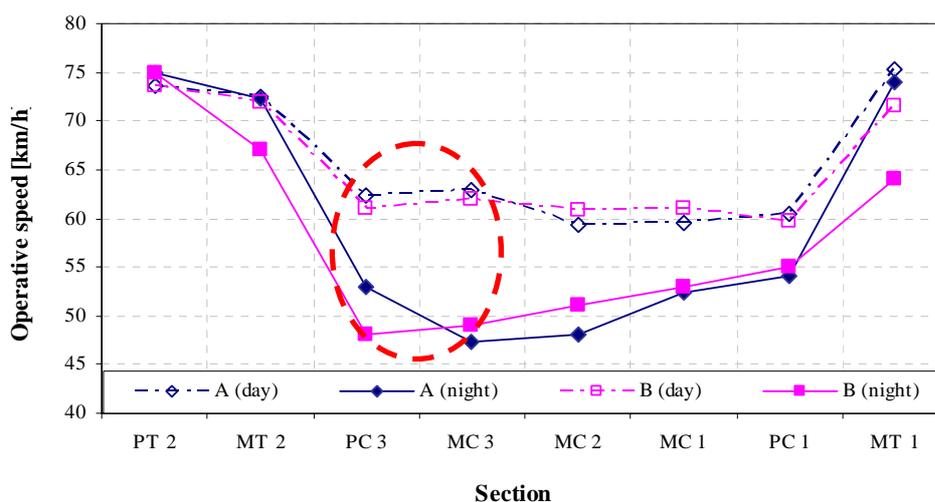


Fig. VIII.18 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e B nella direzione di marcia B.

Va tuttavia segnalato che la differenza di velocità tra la sezione in rettilineo (MT2) e la sezione centrale della curva 3 si conserva su valori prossimi ai 20 km/h (18 km/h rispetto alla sezione PC3), confermando la necessità di favorire una più efficace negoziazione della velocità lungo la tangente, allo scopo di minimizzare le successive correzioni di velocità e traiettoria all'interno del tratto curvilineo (si ricorda, infatti, che la curva circolare 3 è caratterizzata da un raggio di soli 81,03 m).

Scenario C

Come già nel caso precedente, anche nel caso delle modifiche funzionali introdotte nello scenario di guida C (segnaletica orizzontale ad effetto ottico) la maggiore efficacia dell'intervento si rileva in condizioni di illuminazione notturna.

Nella direzione di marcia A, infatti, la sovrapposibilità dei profili di velocità diurni degli scenari A e B è pressoché totale mentre nottetempo i due profili evidenziano un andamento differente specialmente in approccio alla curva circolare.

Una volta considerate comparabili e dunque sostanzialmente invariate le velocità in rettilineo – sia a monte che a valle del tratto curvilineo – e nelle sezioni centrali delle curve circolari (MC1, MC2 e MC3), la diversità dei due profili si localizza nel tratto compreso tra le sezioni MT1, PC1 ed MC1. A parità di differenziale di velocità operativa tra la tangente (MT1) e la sezione centrale della curva 1 (MC1) – equivalenti a 17 km/h nello scenario A e a 16 km/h nello scenario C – nel secondo dei due ambienti di guida si osserva una netta anticipazione della fase di decelerazione all'esterno della curva tale per cui ben l'85% della riduzione della velocità di marcia si materializza lungo la tangente mentre solo il 15% si localizza all'interno della curva tra le sezioni PC1 e MC1. Nello scenario A, invece, la ripartizione percentuale delle variazioni di velocità risultava maggiormente spostata verso l'elemento curvilineo tale per cui – a parità di altre condizioni – lungo la tangente veniva attuato solo il 62% della decelerazione mentre una consistente quota di quest'ultima restava localizzata nella prima metà dello sviluppo curvilineo.

Di conseguenza, lo scenario C induce l'utente ad attuare una maggiore decelerazione lungo la tangente (da 0.39 m/s^2 a 0.49 m/s^2) riducendone nettamente la quota residua in curva (da 0.1 m/s^2 a 0.03 m/s^2).

In considerazione dell'intervallo di variabilità tra le velocità operative in rettilineo e quelle in curva – nel tratto considerato – si ritiene di notevole interesse anche il solo fatto di riuscire a minimizzare il contributo delle decelerazione in curva favorendo il completamento della fase di impostazione della velocità finale lungo la tangente.

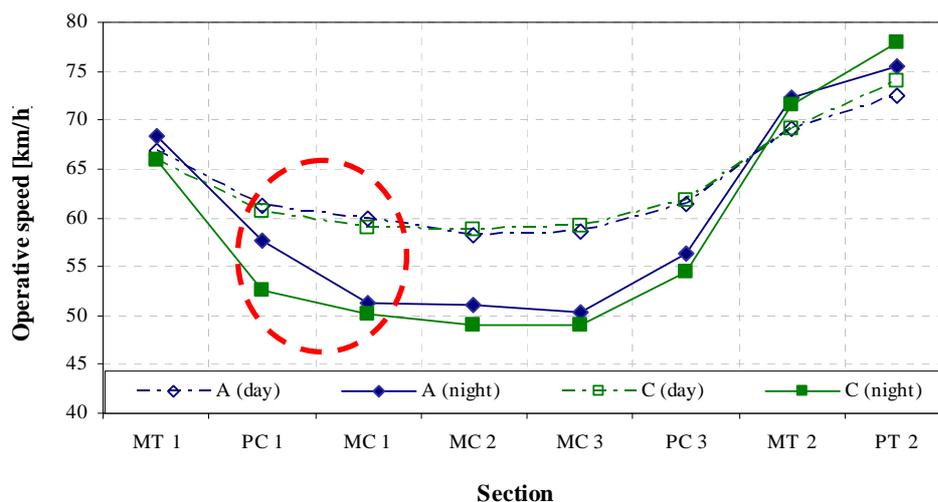


Fig. VIII.19 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e C nella direzione di marcia A.

Nella direzione di marcia opposta le indicazioni sull'efficacia delle modifiche introdotte in termini di selezione della velocità e di anticipazione della fase di decelerazione lungo la tangente trovano la conferma tanto nello scenario diurno quanto in quello notturno.

In condizioni di illuminazione diurna, infatti, a fronte di una differenza di velocità assoluta tra la sezione in rettilo (MT2) e la sezione centrale in curva (MC3) pari a 10.8 km/h, si segnala che l'intera riduzione della velocità si materializza lungo la tangente mediante attraverso una decelerazione di 0.94 m/s^2 cui fa seguito una lieve accelerazione (0.2 m/s^2) per riportare la velocità al valore soggettivamente ritenuto idoneo alla percorrenza in sicurezza dell'elemento curvilineo. Il valore di velocità adottato in corrispondenza della sezione di ingresso dello sviluppo curvilineo si mantiene, tuttavia, sostanzialmente costante fino alla sezione di uscita (PC1) a valle della quale l'utente tende a riportarsi sulle velocità già praticate a monte della variante planimetrica a curvatura mista.

In condizioni di illuminazione notturna si conferma la diversità di approccio al tratto curvilineo rispetto a quanto rilevato nello scenario base A. A partire da velocità di rettilo sostanzialmente allineate con quelle diurne, l'utente attua una decelerazione di 1.48 m/s^2 lungo la tangente per riportarsi al valore di velocità operativa selezionato per la guida in sicurezza entro lo sviluppo curvilineo (mediamente 50 km/h). Pur essendo in lieve eccesso rispetto alla velocità praticata in curva nello scenario A, si segnala come elemento rilevante per lo scenario C la costanza della stessa tra le sezioni PC3 e MC2 a testimonianza di migliore percezione delle caratteristiche del tracciato a monte della curva rispetto alle quali l'utente adatta il proprio comportamento conservandolo fino all'individuazione della sezione in uscita, a partire dalla quale la condotta di guida di guida si riporta alle condizioni di omeostasi di rettilo.

Nello scenario A, al contrario, la negoziazione della velocità e dunque l'adattamento della condotta di guida proseguiva per il 38% della sua durata all'interno della curva stessa a testimonianza di una minore efficacia interpretativa dello spazio stradale nello scenario non modificato.

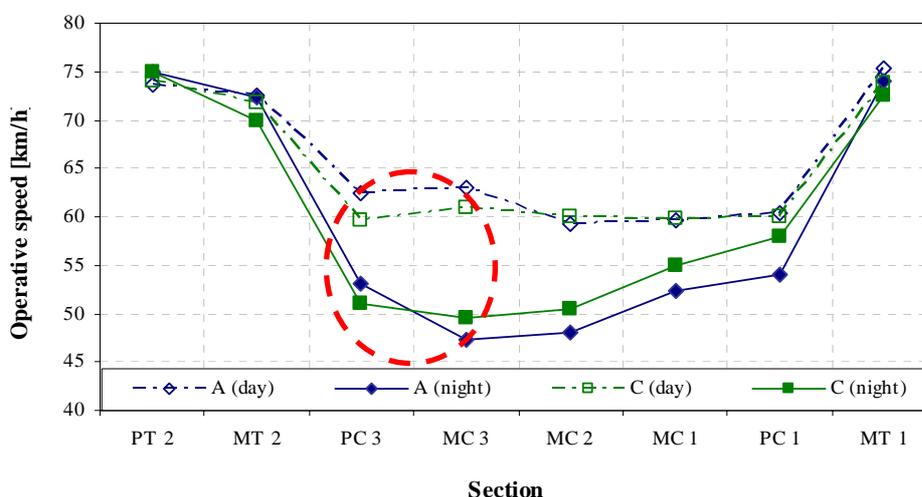


Fig. VIII.20 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e C nella direzione di marcia B.

Scenario D

Lo scenario D conferma quanto già evidenziato in riferimento ai precedenti scenari a proposito dell'efficacia delle modifiche funzionali introdotte nel corso della guida notturna.

Nella direzione di marcia A trova ulteriore riscontro la pressoché coincidenza dei profili di velocità diurni degli scenari A e D a testimonianza della sostanziale inefficacia degli interventi introdotti in condizioni di illuminazione naturale.

In condizione di illuminazione notturna, al contrario, si segnala una diversa impostazione della curva circolare 1, ben descritta dai dati sperimentali riportati nelle sezioni di controllo MT1, PC1 e MC1. A fronte di un differenziale assoluto tra le sezioni MT1 e MC1 di 20 km/h si osserva che l'80% della riduzione della velocità risulta localizzato lungo la tangente mediante l'attuazione di una decelerazione pari a 0.58 m/s^2 , mentre il restante 20% si materializza all'interno della curva mediante l'applicazione di un'ulteriore minima decelerazione di 0.06 m/s^2 , sufficiente a riportare la velocità operativa sul valore infine individuato per la percorrenza in sicurezza dell'elemento curvilineo (mediamente 50 km/h). Detta velocità risulta peraltro costantemente conservata fino alla sezione MC3 oltre la quale viene imposta una brusca accelerazione ($> 1 \text{ m/s}^2$) per riportare la condotta di guida in condizioni omeostatiche di rettilineo.

A parità di altre condizioni – e cioè le condizioni operative, le velocità di rettilo e le velocità finali in curva – il beneficio prodotto dalle modifiche introdotte si misura nell’ausilio percettivo finalizzato all’adozione della più opportuna velocità di ingresso in curva (pressoché costantemente mantenuta per tutto lo sviluppo del tratto a curvatura mista), cui corrisponde un’anticipazione della fase di decelerazione lungo la tangente piuttosto che all’interno dell’elemento curvilineo stesso.

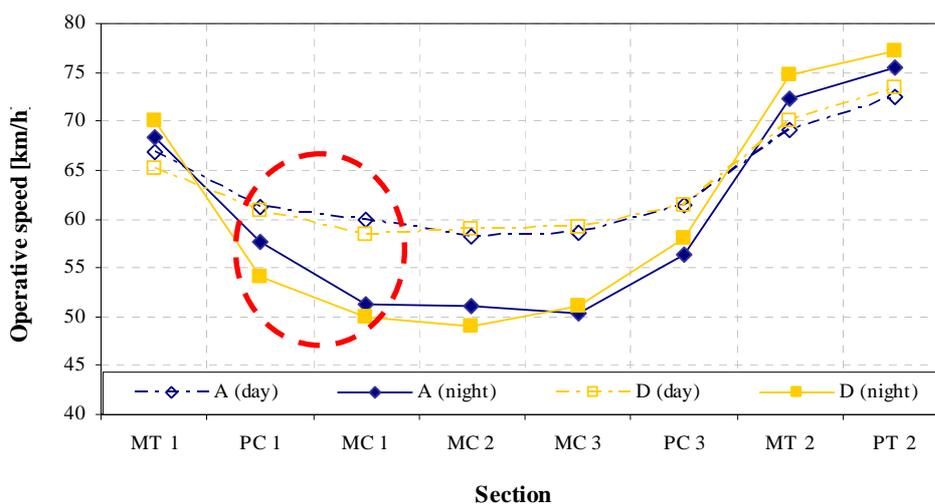


Fig. VIII.21 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e D nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta si segnala un’apprezzabile divergenza dei due profili di velocità diurni riferiti agli scenari A e D, nella direzione voluta del miglioramento percettivo delle caratteristiche geometriche del tracciato tale da ridurre le accelerazioni/decelerazioni all’interno dello sviluppo curvilineo concentrandole lungo le tangenti di approccio.

Mentre nello scenario base A in condizioni di illuminazione diurna si osserva una decelerazione di 0.8 m/s² che consente di ridurre la velocità iniziale di rettilo ai 62 km/h inizialmente prescelti per percorrere l’elemento curvilineo (poi ulteriormente ribassati ai 60 km/h tra le sezioni MC3 e MC2 mediante l’applicazione di una decelerazione di 0.5 m/s²), nello scenario D si osserva una maggiore decelerazione lungo la tangente (0.9 m/s²) a partire dallo stessa velocità in MT2, tale da consentire la riduzione della stessa fino al valore ritenuto soggettivamente sicuro per la percorrenza dello sviluppo curvilineo (mediamente 60 km/h), valore che viene conservato per l’intera estensione dello stesso fino alla sezione PC1. A fronte dunque di una maggiore decelerazione sulla tangente non si riscontrano ulteriori adattamenti della condotta di guida all’interno degli elementi circolari, escludendo di fatto un elemento di rischio per la sicurezza durante la guida.

In condizioni di illuminazione notturna, i due profili di velocità dello scenario A e D risultano comunque sostanzialmente divergenti e tali da riportare valori di velocità nell'ambiente D finanche superiori a quelli rilevati nell'ambiente non modificato assunto come riferimento.

Gli elementi a favore della sicurezza si riconoscono certamente nella riduzione dei differenziali di velocità tra MT2 e MC3 nello scenario D ($\Delta = 16$ km/h) rispetto a quanto rilevato nella scenario A ($\Delta = 25$ km/h), verosimilmente associati alla presenza del segnale lampeggiante ad effetto ottico di pericolo posto immediatamente a valle della sezione MT2, in grado dunque di condizionare la velocità istantanea rilevata in corrispondenza della predetta sezione di controllo. Se, infatti, nel caso dello scenario A il valore istantaneo di velocità in MT2 valeva 72.3 km/h, nello scenario D lo stesso risulta ridimensionato a 66.9 km/h.

Un secondo elemento di sicuro interesse si riconosce nella riduzione della quota residuale di decelerazione all'interno dello sviluppo curvilineo: nel caso dello scenario A, infatti, la riduzione di velocità risultava concentrata per il 77% lungo la tangente e realizzata mediante l'applicazione di una decelerazione di 1.5 m/s^2 ; all'interno della curva (tra le sezioni PC3 e MC3) si dissipava il restante 23% del differenziale cinematico mediante l'imposizione di un'ulteriore decelerazione pari a 1.1 m/s^2 . Diversamente, nel caso dello scenario D la negoziazione della velocità si concentra per l'80% lungo la tangente e ancora per il 20% all'interno dell'elemento curvilineo ma i tassi di decelerazione risultano ridotti a 1.0 m/s^2 nel primo tratto e 0.6 m/s^2 nel secondo.

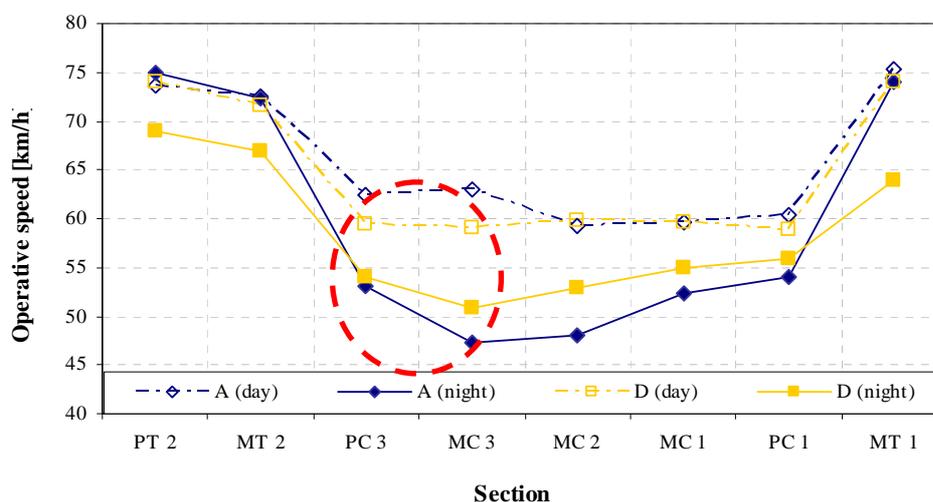


Fig. VIII.22 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e D nella direzione di marcia B.

Per quanto il profilo delle velocità notturne dello scenario D riporti valori istantanei di velocità lievemente in eccesso rispetto a quelli del corrispondente scenario A, si segnala che i primi si mantengono sostanzialmente costanti lungo l'intero sviluppo dell'elemento curvilineo, mentre i secondi restano associati ad una più ampia variabilità, a testimonianza di una diversa e

meno efficace percezione delle caratteristiche geometriche e funzionali del tracciato nelle condizioni operative descritte nell'ambiente di guida non modificato.

Si segnala peraltro un terzo elemento di interesse per il contesto di studio riconosciuto nella maggiore somiglianza dei profili di velocità diurno e notturno nello scenario di guida D, per cui la divaricazione tra condotta di guida nelle due condizioni risulta essere meno netta, specie in riferimento alla seconda metà dello sviluppo curvilineo ad S. La differenza media in valore assoluto tra le velocità operative di transito lungo le sezioni di controllo si misura in circa 6 km/h equivalenti mediamente ad una variazione del 9-10% rispetto ai valori diurni assunti come riferimento.

8.2.3 Il fattore 'modifiche strutturali'

Le modifiche introdotte nello scenario di guida sono di natura strutturale giacché intervengono sulla geometria stessa del tracciato adeguandone le caratteristiche ai dettami del D.M. 5 novembre 2001 sulla progettazione e costruzione delle strade.

I principali spunti di interesse vanno ricercati nella verifica del comportamento dell'utente nelle due condizioni di guida diurna e notturna nell'avvicinamento al settore curvilineo ad S oggetto del corrente studio. Si vuole ricordare, infatti, che lo scenario E introduce due curve circolari di raggio pari a 200 m mutuamente raccordate da una clotoide di flesso ed a loro volta raccordate con curve di transizione di tipo clotoidico con i due rettifili di approccio nelle due direzioni di marcia. Le sezioni di controllo delle velocità risultano conseguentemente dislocate lungo il nuovo tracciato in maniera tale da coincidere con il centro delle curve circolari (MC1 e MC3) e con il punto centrale della clotoide di continuità tra i due elementi curvilinei (MC2). Le sezioni MT1 e MT2 sono individuate nella medesima posizione del tracciato originario e coincidono con il punto di ingresso degli elementi di transizione provenendo dai rettifili di approccio. I due tratti MT1-PC1 e MT2-PC3 corrispondono conseguentemente allo sviluppo delle nuove curve a raggio variabile introdotte per effetto dell'adeguamento planimetrico del tracciato. Il tracciato di progetto è stato dimensionato in relazione alle specifiche previste dalla norma per le piattaforme stradali di tipo E 'urbane di quartiere', contraddistinte da un intervallo di velocità di progetto compreso tra i 40 ed i 60 km/h. Le curve circolari risultano verificate per una velocità pari a quella massima di progetto (60 km/h per l'appunto), prevedendo per le clotoidi una decelerazione massima di 0.8 m/s^2 come richiesto da normativa.

Scenario E

Una prima indicazione di carattere generale inerente i dati sperimentali condotti in condizioni di illuminazione diurna in entrambe le direzioni è la coincidenza pressoché totale dei profili delle velocità operative nei due scenari modificato (E) e non modificato (A). In entrambi i casi, infatti, si rilevano velocità operative in curva dell'ordine dei 60 km/h e in rettilineo comprese tra i 70 e gli 80 km/h. Una prima interpretazione di quanto evidenziato porta a ritenere certamente più sicura la condotta di guida nello scenario E, cui corrispondono caratteristiche geometriche maggiormente confortevoli e congruenti rispetto a quelle dello scenario di base. In curva, infatti, la condotta dell'utente rispecchia quella teorica tracciata dal diagramma delle velocità di progetto, da cui si discosta solamente lungo i rettilineari. Le decelerazioni/accelerazioni lungo le due curve di transizione in ingresso ed in uscita dalle curve 1 e 3 risultano peraltro inferiori o al più allineate con quelle previste dalla normativa (0.2 m/s^2 in ingresso e 0.6 m/s^2 in uscita).

Nella direzione opposta si rileva la stessa tendenza, confermata tanto dal valore della velocità operativa adottato in curva (costantemente mantenuto pari a 60 km/h) quanto dall'entità dei tassi di decelerazione praticati lungo i tratti di transizioni in entrambe i casi uguali od inferiori a quello previsto dalla normativa (0.8 m/s^2 in ingresso e 0.6 m/s^2 in uscita).

Per quanto concerne la guida in condizioni di illuminazione notturna, i risultati sperimentali nella direzione di marcia A evidenziano una sostanziale coerenza con quelli diurni a testimonianza di una maggiore e più efficace percezione delle caratteristiche del tracciato a seguito delle modifiche introdotte. Oltre a confermare gli spunti positivi in termini di sicurezza già illustrati poco sopra, si segnala come elemento di rilevante importanza il fatto che l'azione sulla geometria è in grado di eliminare la divaricazione comportamentale più volte riscontrata tra notte e giorno nell'approccio alle curve circolari nelle due direzioni.

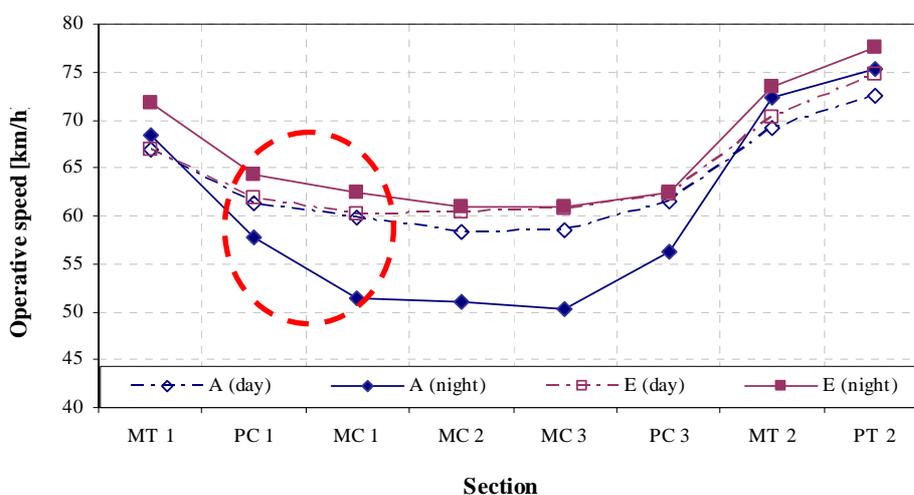


Fig. VIII.23 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e E nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta – contraddistinta da un maggior numero di fattori di rischio durante la guida (intersezione, illuminazione, occultamento delle visuali libere per effetto delle preesistenze a bordo strada) – si segnala al contrario un ingiustificato incremento delle velocità operative in curva (mediamente del 10%) a testimonianza di una maggiore propensione al rischio rispetto a quanto rilevato in condizioni di illuminazione diurna, forse dettata dalla maggiore tranquillità e guidabilità del tracciato modificato.

Un'ulteriore possibile interpretazione dei risultati si riferisce tanto alla già documentata tendenza da parte dell'utente a sottovalutare i rischi non imminenti guidando secondo un approccio di tipo quanto più conservativo possibile rispetto alle condizioni più favorevoli di marcia. In questo senso l'eccesso delle velocità notturne nella direzione di marcia B rispetto ai corrispondenti valori diurni sembra suggerire una maggiore sottostima della propria velocità di marcia da parte dell'utente, da valutare in relazione ai rischi comunque presenti. E' verosimile, infatti, che alla diminuzione del carico mentale associato all'interpretazione geometrica del tracciato sia corrisposta anche un abbassamento della soglia di attenzione e della sensibilità al rischio durante la guida notturna, ovvero nelle condizioni in cui al contrario l'attenzione dovrebbe risultare massima.

Si segnala, tuttavia, quale elemento positivo nella disamina della condotta di guida che anche nella direzione di marcia B, la velocità operativa si conserva pressoché costante all'interno dell'intero tratto curvilineo (da PC3 a PC1) e resta associato a tassi di decelerazione lungo le curve di transizione del tutto compatibile con quello massimo previsto dalla normativa (0.5 m/s² in ingresso e 0.3 m/s² in uscita).

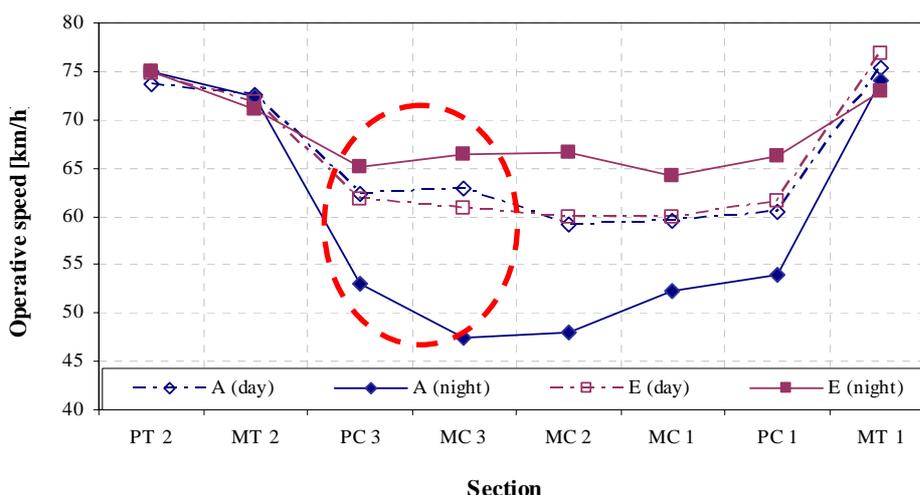


Fig. VIII.24 - Velocità operative diurne e notturne a confronto negli scenari di guida A e E nella direzione di marcia B.

8.2.4 Traiettorie di guida nel periodo notturno

Ad integrazione dei dati sperimentali sulle velocità operative in condizioni di illuminazione notturna, è stata condotta un'analisi delle traiettorie di guida degli utenti virtuali nei diversi ambienti di guida, al fine di descrivere più efficacemente il comportamento di guida dei soggetti nelle diverse condizioni di esercizio in funzione della combinazione velocità/posizionamento laterale rispetto all'asse di corsia in ciascuna delle due direzioni di marcia. Tale approfondimento è stato limitato ai soli scenari notturni per i quali è stata valutata massima l'efficacia delle modifiche funzionali e strutturali apportate agli scenari di guida.

Per quanto già illustrato nel corso del capitolo 7 in riferimento alle restituzioni testuali del modello virtuale dopo ciascun test di prova, è stato possibile ricavare e successivamente analizzare le coordinate spaziali mantenute dagli utenti virtuali durante le diverse prove, acquisite con intervallo pari a 200 millisecondi. Per la restituzione della traiettoria ai minimi quadrati dei diversi soggetti operanti negli ambienti di guida si è optato per limitare lo studio al tratto a doppia curvatura, comprensivo delle due tangenti rettilinee, escludendo di fatto i due rettilinei a monte delle sezioni MT1 e MT2 nelle due direzioni rispettivamente. Sul piano di proiezione XY, il tronco stradale considerato risulta essere limitato all'intervallo [-200.000; +300.000] in ascissa e [00.000; +200.000] in ordinata, con la conseguente esclusione dei valori esterni.

Per ragioni pratiche si è optato per un'analisi ad intervalli discreti tale per cui le traiettorie medie dei diversi scenari sono state approssimate con delle linee di interpolazione definite dai punti corrispondenti alle seguenti ascisse [-200; -150; -100; ; +200; +250; +300] per i quali è stato calcolato il valore medio delle ordinate di tutto il campione.

La stessa ricostruzione è stata condotta sulla traiettoria teorica, riferita per quanto già ricordato all'asse della corsia di ciascuna delle due direzioni di marcia. In considerazione delle convenzioni grafiche assunte (cfr. Fig. VIII.25), si considera positivo o negativo lo scostamento laterale a seconda che:

- nella direzione di marcia A, il veicolo tenda ad accentrarsi verso il centro della carreggiata (segno +) o decentrarsi verso la banchina (segno -);
- nella direzione di marcia B, il veicolo tenda ad accentrarsi verso il centro della carreggiata (segno -) o decentrarsi verso la banchina (segno +).

Si ricorda, ulteriormente, che la traiettoria considerata si riferisce alla linea descritta sul piano XY dal baricentro del veicolo virtuale considerato come punto materiale. Nel tratto curvilineo, caratterizzato dalla presenza di due corsie di marcia separate, aventi larghezza pari a 3.50 m, la traiettoria teorica corrisponde alla traccia sul piano XY equidistante 1.75 m dalla linea di

margin e dalla linea spartitraffico in entrambe le direzioni di marcia. Nei tratti rettilinei, ove la carreggiata è unica senza individuazione di corsia, la traiettoria teorica nelle due direzioni coincide con il luogo dei punti equidistanti dalla striscia di margine e dal limite della semicarreggiata (pur non essendo esso individuato da apposita segnaletica).

Le seguenti Fig. VIII.25 e Fig. VIII.26 esemplificano la sovrapposizione delle traiettorie medie notturne dello scenario di guida A con quelle teoriche calcolate per le direzioni di marcia A e B ordinatamente.

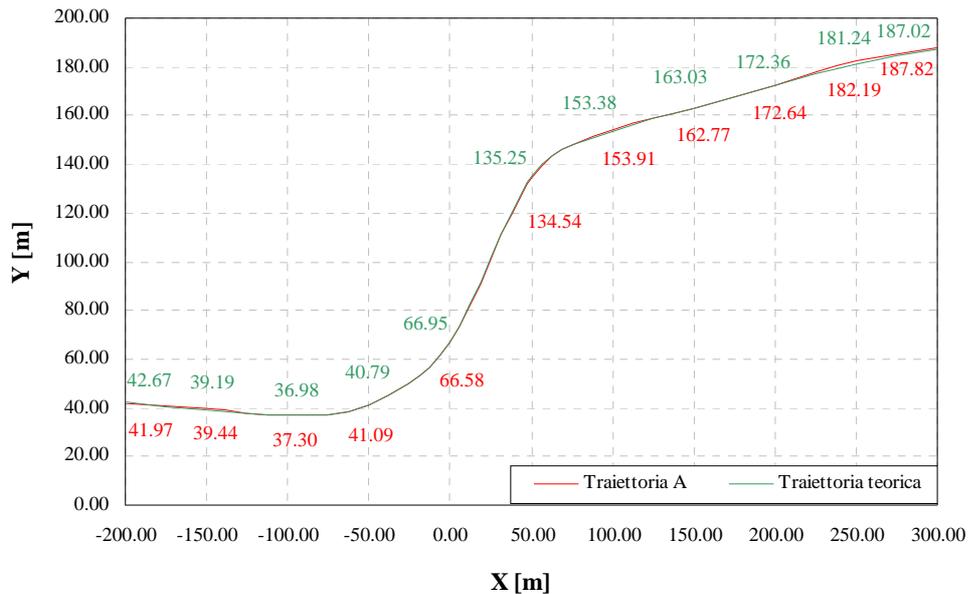


Fig. VIII.25 – Tracciamento della traiettoria di guida nell'ambiente di guida notturno A nella direzione di marcia A sul piano XY.

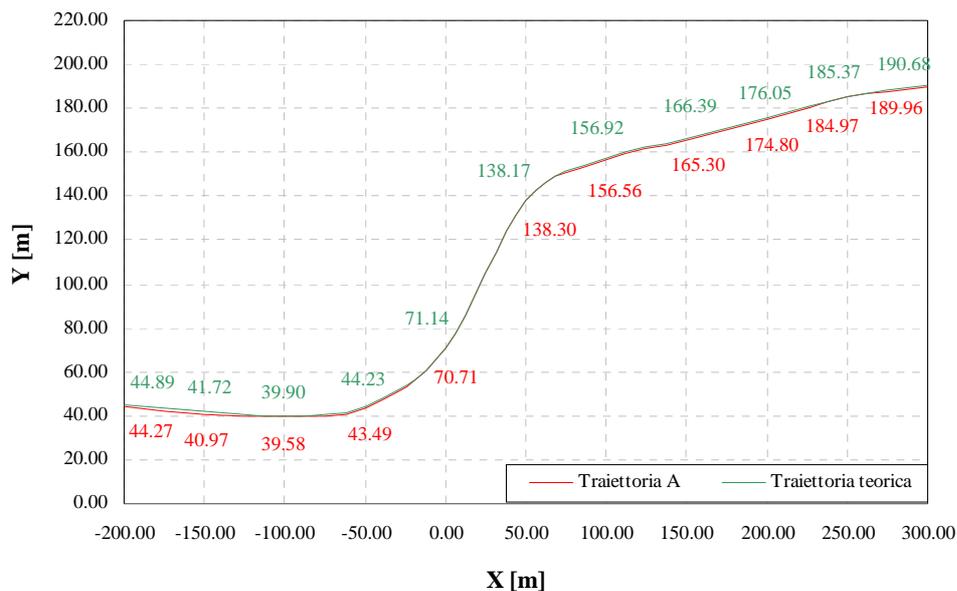


Fig. VIII.26 – Tracciamento della traiettoria di guida nell'ambiente di guida notturno A nella direzione di marcia B sul piano XY.

Per tutti gli scenari di guida è stato conseguentemente possibile calcolare le coordinate medie dei punti di controllo individuati nel dominio di definizione, rapportate in un secondo momento a quelle teoriche assunte come riferimento. Lo scenario E costituisce un caso a se stante per via delle modifiche geometriche introdotte, esigendo conseguentemente il calcolo di una diversa traiettoria di riferimento rispetto a cui calcolare gli scostamenti laterali secondo le convenzioni di segno già richiamate, in funzione della direzione di marcia.

Le tabelle a seguire descrivono il dettaglio delle coordinate spaziali dei punti di riferimento per il calcolo delle traiettorie di guida negli scenari A, B, C e D (Tab. VIII.5) e nello scenario E (Tab. VIII.6) nella direzione di marcia A.

Tab. VIII.5 – Quadro sinottico delle coordinate spaziali discretizzate nei diversi ambienti di guida nella direzione di marcia A riferite alle coordinate teoriche di asse corsia.

X [m]	Coordinate spaziali				
	Y [m]				
	Riferimento	A	B	C	D
-200.00	42.67	41.97	42.50	42.46	42.21
-150.00	39.19	39.44	39.67	39.71	39.53
-100.00	36.98	37.30	37.12	37.58	37.44
-50.00	40.79	41.09	41.41	41.36	41.18
0.00	66.95	66.58	66.43	66.28	66.20
50.00	135.25	134.54	134.74	135.07	134.66
100.00	153.38	153.91	154.59	154.51	154.61
150.00	163.03	162.77	163.14	163.40	163.13
200.00	172.36	172.64	173.17	173.35	172.84
250.00	181.24	182.19	182.36	182.44	182.49
300.00	187.02	187.82	188.02	188.20	188.09

Tab. VIII.6 – Quadro sinottico delle coordinate spaziali discretizzate nell'ambiente di guida E nella direzione di marcia A riferite alle coordinate teoriche di asse corsia.

X [m]	Coordinate spaziali	
	Y [m]	
	Riferimento	E
-200.00	-84.98	-83.81
-150.00	-53.73	-54.11
-100.00	-13.41	-12.44
-50.00	15.11	16.37
0.00	29.76	29.40
50.00	38.84	38.72
100.00	48.00	47.82
150.00	50.91	50.86
200.00	51.90	52.02
250.00	52.93	52.96
300.00	53.80	53.87

Allo stesso modo, le seguenti due tabelle riassumono le coordinate spaziali dei punti di riferimento per il calcolo delle traiettorie di guida negli scenari A, B, C e D (Tab. VIII.7) e nello scenario E (Tab. VIII.8) nella direzione di marcia B.

Tab. VIII.7 – Quadro sinottico delle coordinate spaziali discretizzate nei diversi ambienti di guida nella direzione di marcia B riferite alle coordinate teoriche di asse corsia.

X [m]	Coordinate spaziali				
	Y [m]				
	Riferimento	A	B	C	D
300.00	190.68	189.96	189.88	189.67	189.78
250.00	185.37	184.97	184.85	185.00	184.80
200.00	176.05	174.80	174.88	174.91	174.78
150.00	166.39	165.30	165.30	165.22	165.21
100.00	156.92	156.56	156.61	156.25	156.23
50.00	138.17	138.30	138.24	138.10	137.70
0.00	71.14	70.71	70.06	69.96	69.81
-50.00	44.23	43.49	43.57	43.60	43.13
-100.00	39.90	39.58	39.33	39.44	39.53
-150.00	41.72	40.97	40.97	40.91	40.47
-200.00	44.89	44.27	44.25	44.02	43.82

Tab. VIII.8 – Quadro sinottico delle coordinate spaziali discretizzate nell'ambiente di guida E nella direzione di marcia B riferite alle coordinate teoriche di asse corsia.

X [m]	Coordinate spaziali	
	Y [m]	
	Riferimento	E
200.00	54.78	53.97
150.00	54.29	53.56
100.00	50.59	50.79
50.00	41.86	42.18
0.00	33.19	32.00
-50.00	18.89	19.18
-100.00	-9.37	-9.74
-150.00	-49.45	-52.19
-200.00	-80.96	-81.52
-250.00	-94.09	-94.16
-300.00	-94.91	-95.56

Una volta calcolati gli scostamenti laterali rispetto alla traiettoria teorica di ciascuno degli ambienti di guida in ciascuna delle due direzioni di marcia è possibile procedere alla discussione incrociata dei risultati, assumendo come riferimento lo scenario di guida non modificato A, riproduzione in virtuale del contesto di studio reale.

Scenari A e B

Il Grafico VIII.27 mette a confronto gli scostamenti laterali (riferiti alla stessa traiettoria teorica di asse corsia) degli scenari A e B nella direzione di marcia A.

Lo scenario B evidenzia una maggiore propensione al 'taglio' della curva 1 (MC1) rispetto a quanto rilevato per lo scenario non modificato A, tuttavia il comportamento di guida si mantiene sostanzialmente confrontabile in quasi tutte le sezioni intermedie, evidenziando in entrambi i casi la tendenza a voler percorrere le due curve circolari sulla tangente interna delle corsie, costituita dalla linea di spartitraffico nella curva 1 e dalla striscia marginale nella curva 3. Nello scenario B, tuttavia, la posizione in corsia risulta apprezzabilmente più scomposta in corrispondenza della sezione PC3 rispetto a quanto rilevato nello scenario di guida A. Va segnalato anche in corrispondenza della sezione di ingresso nella curva circolare 1 lo scostamento laterale verso il centro della carreggiata risulta ridotto e pressoché trascurabile nello scenario B. La combinazione della velocità operativa di ingresso ridotta rispetto ad A (-10%) con il posizionamento laterale più composto in asse corsia descrive una condotta di guida più cauta nella fase di impostazione della propria traiettoria all'interno dello sviluppo curvilineo del tronco stradale. Si ricorda, peraltro, che a partire dalla sezione MC1 in poi i valori di velocità operativa dei due scenari risultano pressoché speculari e comunque costanti tra le sezioni MC1 ed MC3.

Si segnala anche che il comportamento caratteristico descritto dal grafico risulta in buon accordo con le osservazioni di carattere speditivo condotte sul contesto reale.

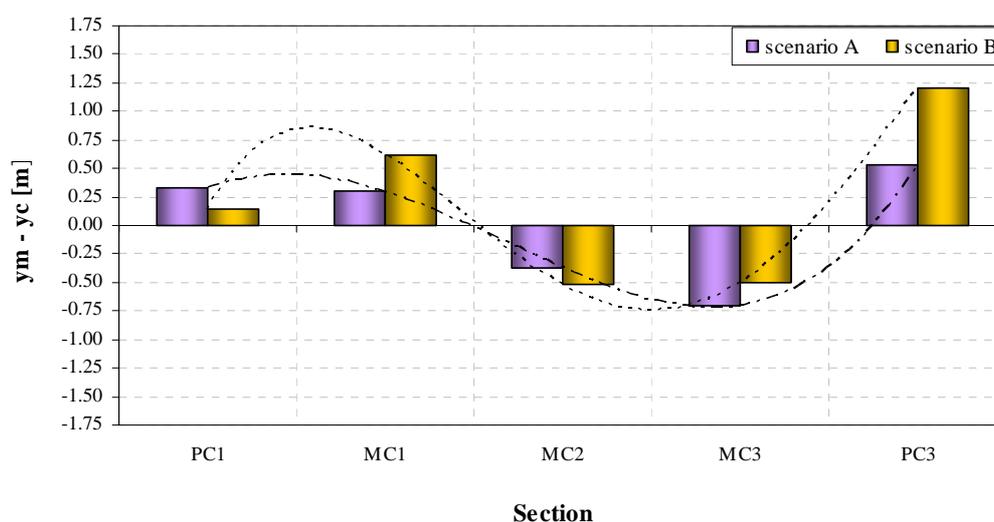


Fig. VIII.27 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e B nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta l'istogramma degli scostamenti laterali risulta pressoché identico nei due scenari di guida, pur in presenza di velocità operative significativamente diverse, specie

nell'impostazione della curva circolare 3. L'utente tende mediamente a conservare una posizione più centrata in carreggiata rispetto a quella corrispondente all'asse corsia, presumibilmente per assicurarsi la possibilità di mantenere velocità di percorrenza più elevate attraverso il taglio della curva reale. In effetti, la composizione della deviazione laterale in PC3, MC3, MC2 ed MC1 descrive una traiettoria dalla curvatura più ampia rispetto a quella imposta dalla geometria reale del tracciato.

Nella direzione di marcia B, i risultati sperimentali sulle traiettorie sembrano in buona sostanza limitare l'effetto benefico della segnaletica verticale ad effetto ottico (o psicopedagogico) alla sola riduzione della velocità di ingresso in curva senza che questo comporti alcunché in termini di impostazione di traiettoria e/o di scostamento laterale. Si ricorda, peraltro, che la variazione delle caratteristiche geometriche e compositivi della piattaforma in ingresso ed in uscita del tratto a doppia curvatura costituisce essa stessa un elemento critico del tronco stradale – specie se associato a condizioni di limitata visibilità come nel caso in oggetto – in rapporto al quale l'utente dovrebbe essere in grado di attuare un adattamento della condotta di guida, non sempre accertato.

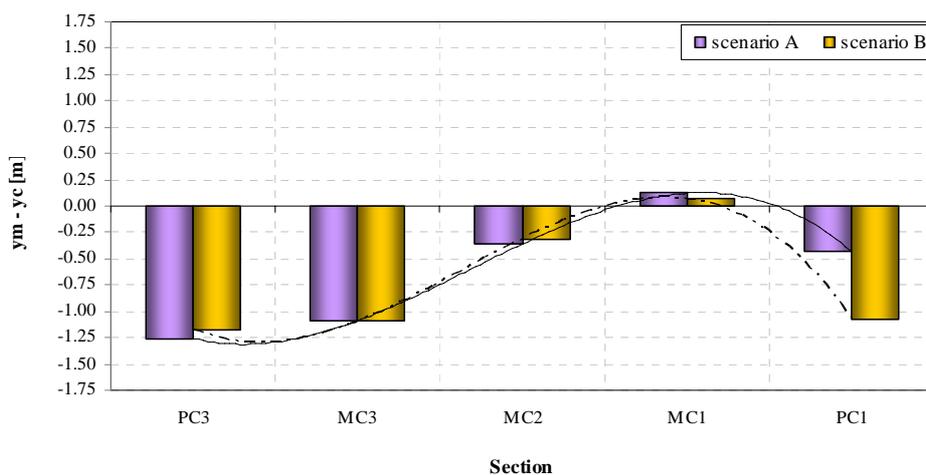


Fig. VIII.28 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e B nella direzione di marcia B.

Scenari A e C

Il Grafico VIII.29 mette a confronto gli scostamenti laterali calcolati in riferimento agli scenari A e C. Gli spunti che traggono origine dall'osservazione dei diagrammi possono riassumersi nei due seguenti: 1) in combinazione la riduzione di velocità già illustrata nei paragrafi precedenti, l'utente tende ad accentrarsi maggiormente rispetto a quanto rilevato nello scenario A verso il centro della carreggiata scopo di percorrere l'elemento circolare 1 lungo la tangente della striscia di separazione di corsia; 2) il 'taglio' della curva circolare 3 viene

anticipato alla sezione MC2 allo scopo di assicurare nel punto di massima curvatura (MC3, corrispondente al centro della curva circolare con $R = 81.03$ m) la posizione più stabile possibile e tale per cui la predetta curva circolare viene percorsa lungo la tangente al punto di curvatura anziché lungo una traiettoria curvilinea dello stesso raggio.

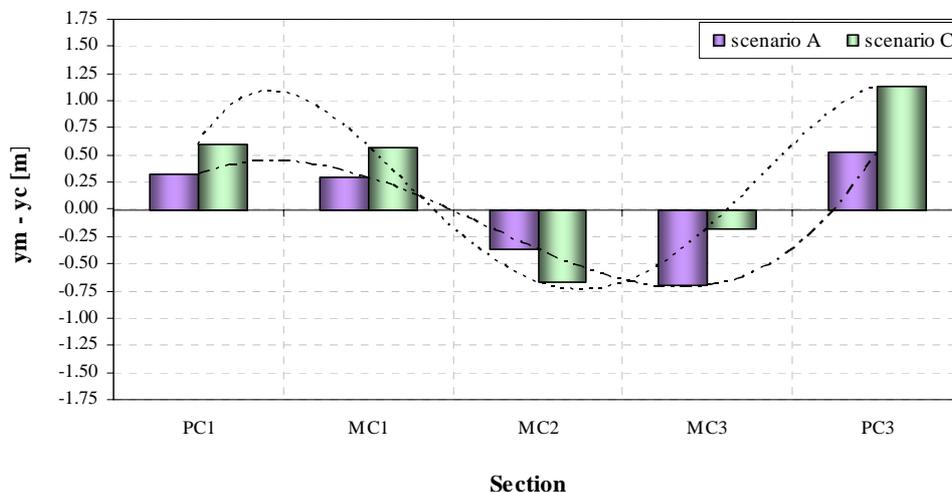


Fig. VIII.29 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e C nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta, la traiettoria di guida si mantiene sostanzialmente coerente con quella calcolata nello scenario A tranne che per l'ultima curva, in corrispondenza della quale si osserva la tendenza da parte dell'utente a volersi mantenere più centrati in carreggiata – sebbene sempre nella propria corsia – per impostare una traiettoria con curvatura più ampia rispetto a quella teorica come ben descritto dal flesso in verde tra le sezioni MC2, MC1 e PC1, decisamente più marcato rispetto a quello corrispondente dello scenario A in cui la posizione risultava essere più composta rispetto alla traiettoria teorica.

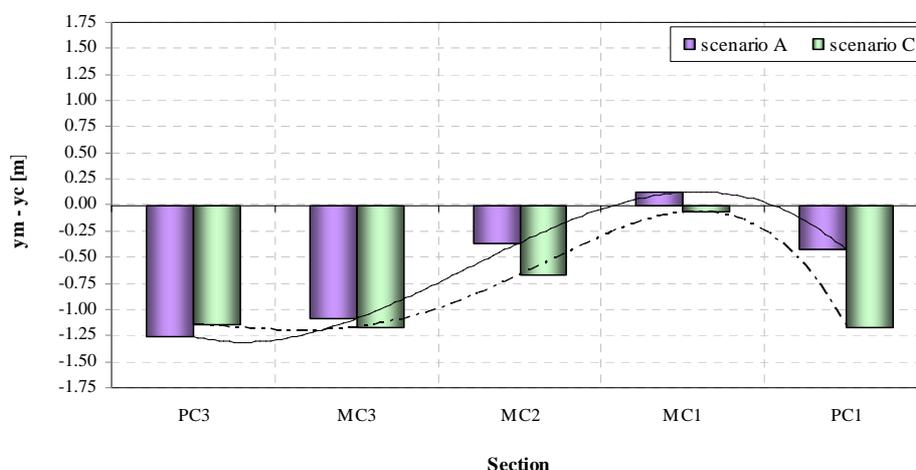


Fig. VIII.30 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e C nella direzione di marcia B.

Rispetto a quanto rilevato per lo scenario B – in cui non si erano evidenziati sostanziali variazioni rispetto alle traiettorie dello scenario di base A – nello scenario C si segnalano oltre alla variazione delle velocità di approccio alle curve circolari in ambo le direzioni anche delle sostanziali variazioni delle traiettorie di guida, a parità di altre condizioni dettate dal solo contributo della segnaletica orizzontale di tipo ottico, in grado – in definitiva – di influire in maniera e misura diversa sul comportamento di guida nelle due direzioni di marcia.

Scenari A e D

Nella direzione di marcia A si ripete sostanzialmente quanto già osservato in riferimento al caso precedente, con particolare interesse per l'impostazione della traiettoria di guida nella curva di uscita dello sviluppo curvilineo a doppia curvatura, in corrispondenza del quale si rileva un'anticipazione della manovra di 'taglio' della traiettoria teorica finalizzata alla percorrenza della curva 3 lungo la tangente al punto di massima curvatura (MC3), sebbene la differenza tra gli scostamenti calcolati in MC2 ed MC3 sia di minore entità rispetto a quanto misurato per lo scenario C.

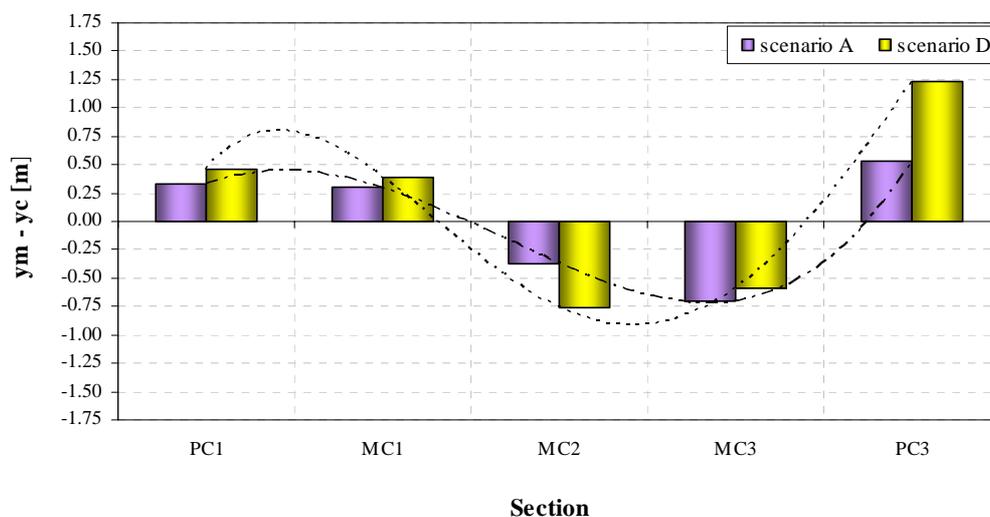


Fig. VIII.31 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e D nella direzione di marcia A.

Anche nella direzione opposta si segnala una netta somiglianza con quanto già illustrato per lo scenario di guida C, a testimonianza del prevalente contributo apportato dalla segnaletica orizzontale rispetto a quello offerto dalle modifiche alla segnaletica verticale. Il flesso tra le sezioni MC2, MC1 e PC1 – già descritto e motivato con la tendenza al 'taglio' lungo la tangente della traiettoria spontanea – si conserva in termini sia di posizione spaziale che di entità rispetto a quanto già segnalato per lo scenario C.

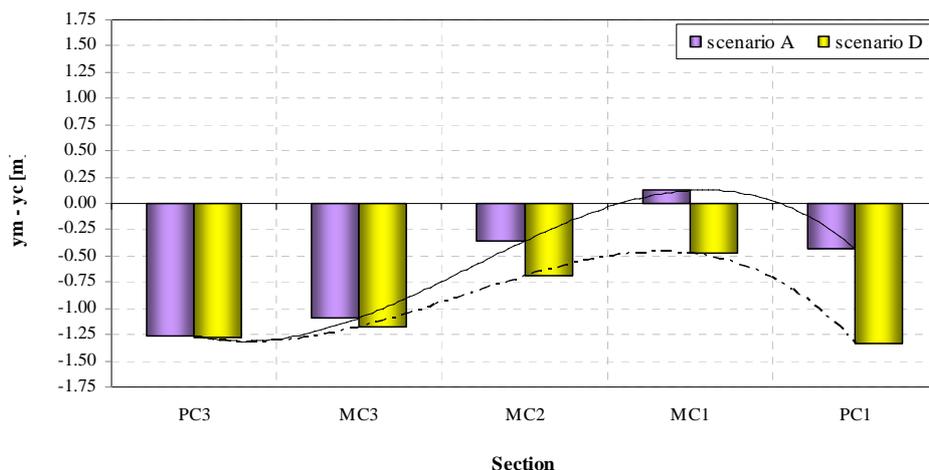


Fig. VIII.32 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A e D nella direzione di marcia B.

Scenari A ed E

Il confronto tra gli scostamenti laterali differenziali rispetto alle traiettorie teoriche di asse corsia negli scenari A ed E si rivela di notevole interesse per via del fatto che alle modifiche geometriche introdotte dovrebbe corrispondere non solo la capacità di conservare velocità di marcia più elevate rispetto allo scenario di base ma anche un miglior posizionamento in corsia.

Il grafico VIII.33 denota, tuttavia, ancora una volta la tendenza ad accentrarsi verso l'asse stradale nel tratto compreso tra le sezioni MC1 ed MC2, verosimilmente per poter conservare una combinazione di velocità elevata e traiettoria di guida più favorevole oltre che per impostare una traiettoria a curvatura più ampia nell'approccio alla curva in uscita (curva 3).

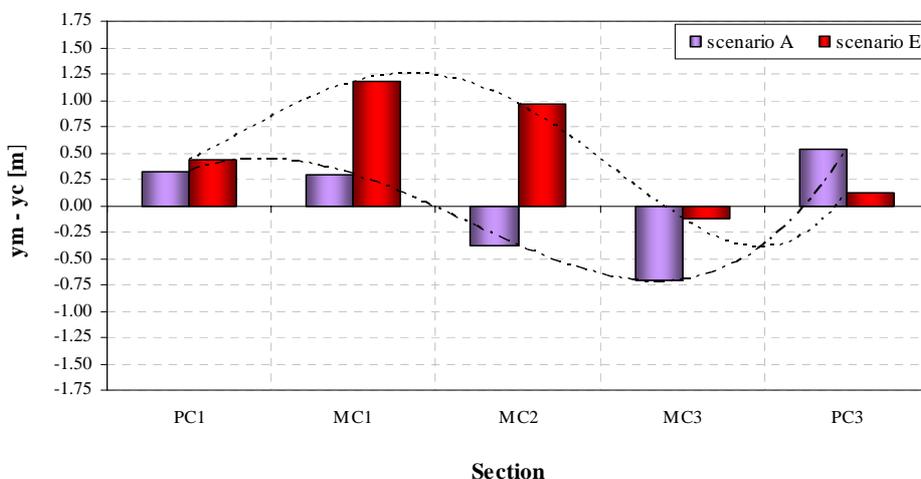


Fig. VIII.33 – Scostamento laterale rispetto all'asse corsia negli ambienti di guida notturni A ed E nella direzione di marcia A.

Nella direzione opposta si conferma la tendenza al ‘taglio’ della traiettoria, particolarmente marcata nelle sezioni PC3 e MC3. Nell’impostazione della controcurva l’utente invece mantiene una posizione più corretta e centrata in corsia sia rispetto al caso precedente che rispetto allo scenario A. Va, tuttavia, ricordato che nello scenario di guida notturno E nella direzione di marcia B le velocità operative rilevate per la percorrenza delle due curve circolari si mantengono su valori significativamente alti (mediamente 66 km/h), addirittura in eccesso rispetto ai corrispondenti valori diurni (circa 60 km/h). La lettura incrociata delle velocità e delle traiettorie di guida si rivela di conseguenza determinante per la comprensione del reale approccio comportamentale dell’utente nelle condizioni di guida imposte.

Confrontando dunque direttamente i risultati degli scenari A ed E si può osservare che nel primo caso le caratteristiche geometriche del tracciato (aventi raggi di curvatura compresi tra gli 80 ed i 90 m) ammettevano la conservazione di velocità operative elevate soltanto in virtù della maggiore propensione al ‘taglio’ delle traiettorie; nel secondo caso, al contrario, le caratteristiche geometriche dello scenario modificato meglio approssimano le curvature spontanee attuate dall’utente in relazione alla velocità operativa selezionata per la percorrenza in sicurezza dell’elemento curvilineo, specialmente nel caso della controcurva (curva 1). Si segnala, peraltro, la persistenza da parte dell’utente della tendenza a voler ricercare traiettorie ancor più confortevoli di quelle teoriche dettate dalla geometria dell’asse stradale, in grado di assicurare velocità sempre più elevate e quanto più prossime a quelle ambientali praticate lungo i lunghi rettili di approccio nelle due direzioni.

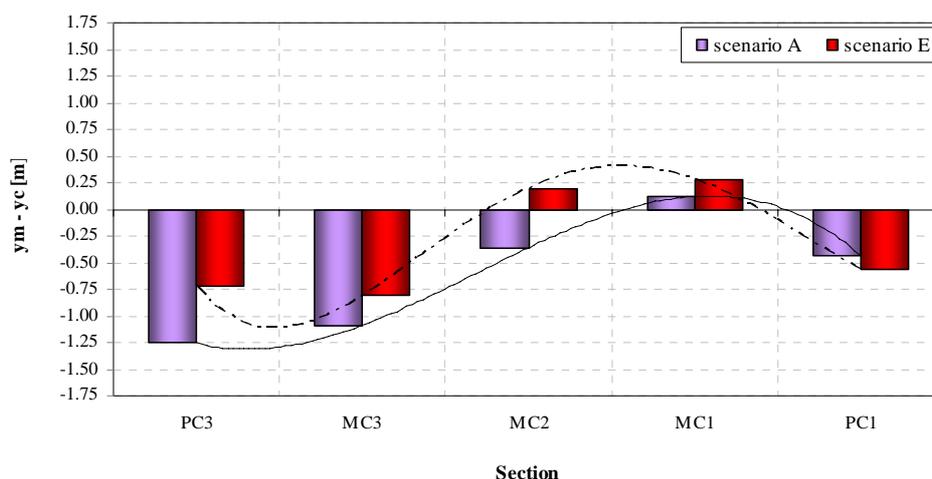


Fig. VIII.34 – Scostamento laterale rispetto all’asse corsia negli ambienti di guida notturni A ed E nella direzione di marcia B.

8.3 Indagine statistica mediante questionari a risposta multipla.

8.3.1 Descrizione metodologica.

Parallelamente alle attività di prova con il simulatore virtuale, è stata condotta un'indagine statistica, realizzata mediante un questionario anonimo a risposta multipla, riguardo le abitudini di guida delle persone e il loro grado di informazione sul fenomeno dell'incidentalità. Il questionario è stato strutturato in maniera tale da fornire risposte di tipo cosciente ed incosciente sulla propensione al rischio da parte degli intervistati durante la guida, in relazione alle proprie abitudini ed al grado di cultura sul tema della sicurezza stradale.

Se la domanda n. 1, ad esempio, tende ad identificare la tipologia e l'ambiente di intrattenimento serale durante il fine settimana – in qualche modo precursore della psicologia di guida degli utenti soprattutto all'atto del rientro a casa – le domande n. 2 e n. 5 consentono di verificare statisticamente la risposta comportamentale degli intervistati in relazione ai due conclamati fattori di rischio durante la guida: la stanchezza ed il tasso alcolico. Le domande n. 3 e n. 4, invece, corrispondono alla volontà di descrivere dal punto di vista soggettivo la condotta di guida adottata dagli intervistati durante le ore notturne in relazione ai criteri di scelta individuati, allo scopo di stabilire l'esistenza – quantomeno dal punto di vista soggettivo e spontaneamente dichiarato – di connessioni tra la velocità adottata durante la marcia, percezione della stessa, tipologia di strada, presenza/assenza di controlli e rispetto del Codice della Strada.

Le ultime domande – dalla n. 6 alla n. 8 – sono state formulate allo scopo di verificare l'effettivo grado di informazione e di percezione sociale della sicurezza stradale da parte degli intervistati, consentendo – tra le altre cose – di incrociare le indicazioni dei primi quesiti (relativi al proprio comportamento) con quelli riferiti alla generalità dei casi.

Il profilo risultante dai questionari – specie laddove incrociato con i test di guida – si è prestato favorevolmente ad una descrizione quanto mai completa della condotta di guida da parti degli utenti, sia dal punto di vista soggettivo (mediante il questionario) che oggettivo (mediante lo studio cinematografico negli ambienti di guida).

Tab. VIII.5 – Scheda-tipo del questionario sperimentale.

1	Qual è l'ambiente ideale per le serate del tuo fine settimana?
	Pub/birreria
	Discoteca
	Casa
	Ristorante/pizzeria
	Piazza

2	Stai guidando di notte e sei cosciente di essere stanco dopo una lunga giornata, cosa fai?
	<p>Moderi la velocità</p> <p>Cerchi di arrivare alla tua destinazione il prima possibile</p> <p>Non importa: ormai la macchina va da sola</p> <p>Fai guidare qualcun altro / ti fermi per un caffè</p> <p>Alzo la musica e mi metto a cantare per tenermi sveglio</p>
3	Stai guidando di notte e trovi strada libera davanti a te, cosa fai?
	<p>Vai più veloce, tanto non c'è polizia</p> <p>Vai più veloce, tanto non c'è traffico</p> <p>Guidi in maniera più rilassata: la strada è tutta per te</p> <p>Moderi la velocità: in fondo di notte la visibilità è scarsa</p> <p>Non cambia nulla rispetto a quando c'è traffico</p>
4	Qual è il tuo rapporto con la velocità di guida?
	<p>Non guardo mai il contachilometri</p> <p>Controllo la mia velocità solo quando vedo la polizia</p> <p>Ogni tanto controllo la mia velocità ed i limiti della strada che sto percorrendo</p> <p>Adeguo la mia velocità in funzione dei limiti</p> <p>Adeguo la mia velocità in funzione del tipo di strada</p>
5	Quando devi guidare, qual è il tuo rapporto con l'alcol?
	<p>Non bevo</p> <p>Smetto di bere molto tempo prima di mettermi al volante</p> <p>Bevo e poi cerco di mangiare per assorbire l'alcol</p> <p>Bevo senza problemi tanto reggo bene</p> <p>Bevo e studio i trucchetti per aggirare gli eventuali controlli di polizia con l'etilometro</p>
6	Secondo te, la guida di notte è:
	<p>più sicura che di giorno, perché la gente ha meno fretta ed è più rispettosa del Codice della Strada</p> <p>più sicura che di giorno, perché c'è meno traffico</p> <p>come di giorno</p> <p>meno sicura, perché la visibilità è scarsa</p> <p>meno sicura, perché chi guida è in generale più stanco che di giorno</p>
7	Secondo te, il maggior numero di incidenti stradali avviene:
	<p>di notte</p> <p>di giorno</p> <p>nel weekend</p> <p>quando la strada è bagnata o ghiacciata</p> <p>sulle strade dove si corre di più (autostrade)</p>
8	Secondo te, la causa principale degli incidenti stradali é:
	<p>la velocità</p> <p>la visibilità</p> <p>la stanchezza del guidatore</p> <p>lo stato di sicurezza/manutenzione delle strade</p> <p>l'assunzione di alcol o sostanze alienanti da parte del guidatore</p>

8.3.2 Risultati.

Il campione intervistato è risultato composto da 126 persone, comprendenti anche 83 degli utenti virtuali, aventi età media di 27,0 anni, con deviazione standard di 10,5 anni, di ambo i sessi: 89 maschi (70,63%) e 37 femmine (29,37%).

Si riportano qui di seguito i risultati ottenuti in forma tabulare, meglio rappresentativa della dispersione delle risposte ottenute.

Tab. VIII.5 – Risultati statisticamente significativi dei questionari sperimentali.

1	Qual è l'ambiente ideale per le serate del tuo fine settimana?	Preferenza [%]
	Pub/birreria	51.6
	Discoteca	7.1
	Casa	7.1
	Ristorante/pizzeria	23.0
	Piazza	11.1
2	Stai guidando di notte e sei cosciente di essere stanco dopo una lunga giornata, cosa fai?	
	Moderi la velocità	43.7
	Cerchi di arrivare alla tua destinazione il prima possibile	8.7
	Non importa: ormai la macchina va da sola	0.0
	Fai guidare qualcun altro / ti fermi per un caffè	22.2
	Alzo la musica e mi metto a cantare per tenermi sveglio	25.4
3	Stai guidando di notte e trovi strada libera davanti a te, cosa fai?	
	Vai più veloce, tanto non c'è polizia	7.1
	Vai più veloce, tanto non c'è traffico	23.8
	Guidi in maniera più rilassata: la strada è tutta per te	38.9
	Moderi la velocità: in fondo di notte la visibilità è scarsa	7.1
	Non cambia nulla rispetto a quando c'è traffico	23.0
4	Qual è il tuo rapporto con la velocità di guida?	
	Non guardo mai il contachilometri	2.4
	Controllo la mia velocità solo quando vedo la polizia	3.2
	Ogni tanto controllo la mia velocità ed i limiti della strada che sto percorrendo	45.2
	Adeguo la mia velocità in funzione dei limiti	12.7
	Adeguo la mia velocità in funzione del tipo di strada	36.5
5	Quando devi guidare, qual è il tuo rapporto con l'alcol?	
	Non bevo	44.4
	Smetto di bere molto tempo prima di mettermi al volante	38.9
	Bevo e poi cerco di mangiare per assorbire l'alcol	7.1
	Bevo senza problemi tanto reggo bene	7.1
	Bevo e studio i trucchetti per aggirare gli eventuali controlli di polizia con l'etilometro	2.4

6 Secondo te, la guida di notte è:	
più sicura che di giorno, perché la gente ha meno fretta ed è più rispettosa del Codice della Strada	0.0
più sicura che di giorno, perché c'è meno traffico	11.9
come di giorno	20.6
meno sicura, perché la visibilità è scarsa	34.1
meno sicura, perché chi guida è in generale più stanco che di giorno	33.3
7 Secondo te, il maggior numero di incidenti stradali avviene:	
di notte	11.1
di giorno	15.9
nel weekend	58.7
quando la strada è bagnata o ghiacciata	12.7
sulle strade dove si corre di più (autostrade)	1.6
8 Secondo te, la causa principale degli incidenti stradali è:	
la velocità	57.9
la visibilità	1.6
la stanchezza del guidatore	6.3
lo stato di sicurezza/manutenzione delle strade	0.0
l'assunzione di alcol o sostanze alienanti da parte del guidatore	34.1

A commento dei risultati riferiti alla domanda n.1 si rileva che circa la metà del campione intervistato afferma di recarsi solitamente in pub nel weekend, dove la probabilità di bere alcolici sicuramente molto elevata. Un significativo 23 % circa si reca solitamente in ristorante/pizzeria, questa tendenza è stata riscontrata nei meno giovani. La rimanente parte del campione si divide più o meno ugualmente tra discoteca, piazza, casa.

Se si sta guidando di notte e si è coscienti di essere stanchi, il 44% circa tende a moderare la velocità, il 50% circa invece adotta accorgimenti per mantenersi sveglio, ripartiti equamente tra il bere un caffè e alzare la musica. Il rimanente 9% cerca di arrivare il prima possibile a casa.

Il comportamento degli utenti stradali con strada libera si caratterizza diversamente secondo le seguenti percentuali di preferenza: il 40% circa guida in modo più rilassato, un 23% va più veloce in virtù della mancanza di traffico, un 23% non trova differenze rispetto a quando c'è traffico, un 7% modera la velocità per la scarsa visibilità ed infine il rimanente 7% va più veloce per la mancanza di controlli della Polizia.

Per quanto concerne il rapporto delle persone con la velocità di guida si rileva che il 45% controlla velocità e limiti ogni tanto, solo il 12 % circa adegua la velocità in funzione dei limiti ed un buon 36% circa adegua la velocità in funzione del tipo di strada. Percentuali molto basse dell'ordine del 2-3% non controllano mai la velocità oppure la controllano quando vedono la Polizia.

In relazione al rapporto tra guida e consumo di alcolici, un significativo 45% dichiara di non bere affatto, il 39% smette di bere molto prima di mettersi alla guida, mentre percentuali campionarie del 7% si fidano della loro capacità di tolleranza oppure cercano di mangiare per assorbire l'alcol.

Il grado di conoscenza del fenomeno dell'incidentalità del campione intervistato è descritto dalla domande n. 6, n.7 e n. 8. Alla domanda sul livello di sicurezza della guida di notte il 67% circa indica che è meno sicura che di giorno a causa di visibilità scarsa e stanchezza dei conducenti ugualmente ripartiti; il 20% non trova differenze rispetto al giorno, mentre l'11% sostiene che è più sicura in virtù del minore volume di traffico.

In relazione alla collocazione temporale dei maggiori tassi di incidentalità nel corso della settimana emerge che il 58% dei soggetti intervistati afferma che il maggior numero di incidenti si verifica nel weekend; il 15% circa risponde 'di giorno', l'11% crede 'di notte' e il 12% quando la strada è bagnata o ghiacciata; infine l'1,6 % risponde nelle strade dove si corre di più (autostrade). Le stastiche evidenziano, al contrario, che le autostrade sono la categoria di strade più sicura; inoltre è dimostrato che il maggior numero di incidenti avviene di giorno, generalmente dalle ore 18 alle ore 20. Considerando le statistiche relative alla distribuzione durante i giorni della settimana, è noto che il numero è praticamente costante durante i giorni feriali, si ha un leggero aumento in corrispondenza del weekend.

Infine, in relazione alla principali cause di incidentalità, il campione si ripartisce nelle seguenti percentuali: il 58% circa crede sia la velocità, il 34% l'assunzione di alcol o sostanze alienanti, il 6% la stanchezza del guidatore. Infine il 2% circa la visibilità.

Capitolo 9

CONCLUSIONI

Il progetto di ricerca è stato strutturato in funzione dell'obiettivo prioritario dello studio della percezione del rischio durante la guida da parte degli utenti stradali, valutata in diverse condizioni di esercizio, anche in presenza di modifiche dello spazio stradale (sia di tipo geometrico che di tipo informativo).

In tale direzione, i risultati sperimentali delle attività condotte – sia in ambiente reale che in realtà virtuale - consentono di formulare le seguenti osservazioni:

1. gli elementi di rischio rilevati in sede di analisi di sicurezza non vengono ritenuti tali dall'utente o comunque ne viene sottostimata l'importanza;
2. il comportamento di guida viene condizionato non tanto da rischi di carattere generale (illuminazione notturna, presenza o meno di ostacoli, scarsa o limitata visibilità) quanto piuttosto dalla presenza di discontinuità od elementi inattesi che impongono un brusco adattamento della velocità di marcia e della posizione in carreggiata. Il fenomeno risalta in misura più evidente nella direzione di marcia B negli scenari di guida notturni, allorquando in prossimità della sezione PC3 viene attuata una repentina correzione nella condotta di guida, con effetti differiti anche all'interno della curva circolare stessa (accelerazione residua);
3. la condotta di guida dell'utente rispecchia la tendenza alla conservazione della massima velocità possibile in relazione alle caratteristiche geometriche e funzionali del tronco stradale (velocità ambientale) fino all'imminenza di elementi di discontinuità tali da imporre l'adattamento. A valle di tali discontinuità, la condotta di guida tende a riportarsi il più velocemente possibile alle condizioni di monte;
4. la guida notturna negli scenari di guida testati (reale e virtuali) si caratterizza per il fatto di essere maggiormente rischiosa non solo – e non tanto – per la presenza di ulteriori elementi di rischio rispetto alle ore diurne (illuminazione stradale) quanto piuttosto per l'approccio comportamentale evidenziato dall'utente in corrispondenza delle criticità osservate. Si determina, in buona sostanza, una divaricazione tra la sicurezza intrinseca del tronco stradale – inferiore a quella diurna per quanto detto – ed il comportamento di guida dell'utente - più rischioso nottetempo che in condizioni di illuminazione diurna.

In particolare, rilievi condotti *nell'ambiente reale* hanno consentito di segnalare alcuni spunti meritevoli di evidenza: il comportamento dell'utente in condizioni libere prescinde in tutte le

condizioni dalle limitazioni di velocità poste in opera (50 km/h) evidenziando la stretta connessione tra velocità praticata e caratteristiche della strada in senso lato (tanto di giorno quanto di notte). Le velocità operative in rettilineo si mantengono, infatti, sempre su valori superiori ai 70 km/h tanto di giorno quanto di notte. A fronte di una condotta simile in rettilineo, si rileva un diverso approccio alle curve circolari, cui resta associata una riduzione delle velocità operative di percorrenza di circa il 10-15% rispetto ai corrispondenti valori diurni. Al fattore 'notte' resta, inevitabilmente, associata una discrepanza nel comportamento di guida rilevato, sia in termini di percezione dei rischi che di stile di guida in senso stretto. Una volta considerato come elemento di rischio il tasso di decelerazione residuale in curva, si rileva come negli scenari notturni la condotta di guida dell'utente si configuri come sfavorevole alla sicurezza, specialmente nella direzione di marcia B, in corrispondenza dell'intersezione stradale di nuova collocazione e dell'errore di carattere percettivo imposto dalla dislocazione degli impianti di illuminazione pubblica lungovia, a testimonianza di una maggiore difficoltà nella negoziazione delle velocità operative in curva e/o di una maggiore sottostima delle caratteristiche di pericolosità dettate dalla geometria del tracciato.

In entrambe le direzioni, peraltro, la fase di decelerazione nelle condizioni di guida notturna viene completata solo in corrispondenza della sezione centrale delle curve circolari (MC1 e MC3 ordinatamente): nella direzione di marcia A, ben il 66% del differenziale di velocità tra tangente e centro curva viene esaurito all'interno della curva 1 (tra PC1 e MC1), mediante l'applicazione di un tasso di decelerazione pari a 0.2 m/s^2 . Nella direzione opposta, si segnala l'errore di carattere percettivo in corrispondenza della sezione MC3 tale da produrre la brusca decelerazione ben evidenziata dalla seguente Fig. IX.1 e misurata in un tasso di decelerazione pari a 2.66 m/s^2 , peraltro preceduti da una significativa riduzione di velocità anche lungo la tangente ($\Delta = 18.8 \text{ km/h}$), realizzata mediante un tasso di decelerazione di 1.5 m/s^2 e tuttavia non sufficiente ad assicurare l'iscrizione del veicolo in curva in tutta sicurezza.

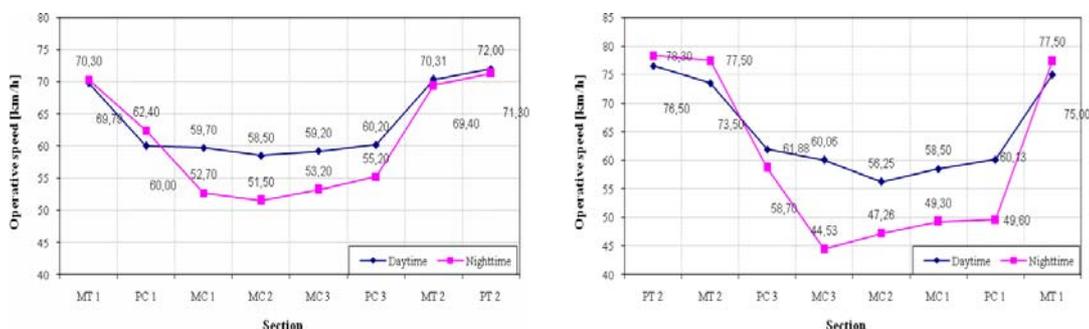


Fig. IX.1 – Profili delle velocità operative diurni e notturni nelle due direzioni di marcia nell'ambiente di guida reale.

I rilievi condotti *nell'ambiente virtuale* hanno evidenziato invece i seguenti spunti e cioè che a parità di altre condizioni, le condizioni di illuminazione comportano un diverso approccio alla guida da parte dei soggetti testati, confermando la 'forbice' comportamentale già rilevata nell'ambiente di guida reale.

In questa direzione si ritiene soddisfatto anche l'obiettivo collaterale della definizione, costruzione e validazione di un modello virtuale in ambiente immersivo per la valutazione del comportamento di guida dell'utente stradale in condizioni operative differenziate.

La calibrazione del modello virtuale (scenario A) è stata condotta sui soli dati diurni dell'ambiente reale ed in particolare con i dati sperimentali delle sezioni centrali delle curve (MC1, MC2 ed MC3). Lo scenario virtuale notturno A risulta di conseguenza un'incognita del problema alla pari degli scenari modificati successivamente testati. La validità del modello virtuale si misura, in altri termini, nella verifica incrociata dei risultati dello scenario virtuale notturno A con i dati sperimentali reali notturno dell'ambiente fisico in entrambe le direzioni di marcia.

Si osserva che, a fronte di un R^2 di calibrazione sui dati diurni pari a 0.946 e 0.972 rispettivamente nelle due direzioni di marcia A e B, il modello virtuale ha riportato risultati sperimentali notturni del tutto confrontabili con quelli reali in ambo le direzioni, attestati da un R^2 pari a 0.929 e 0.957 ordinatamente per le direzioni A e B. La validità del modello virtuale implementato si intende, pertanto, verificata sperimentalmente.

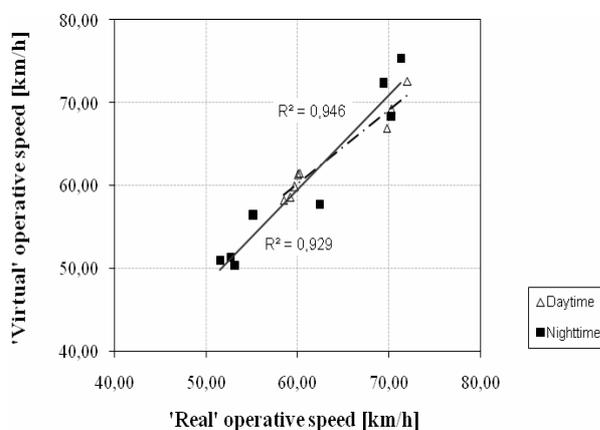


Fig. IX.2 – Quadro di raffronto delle velocità operative diurne e notturne nell'ambiente reale e nello scenario di guida virtuale A nella direzione di marcia A.

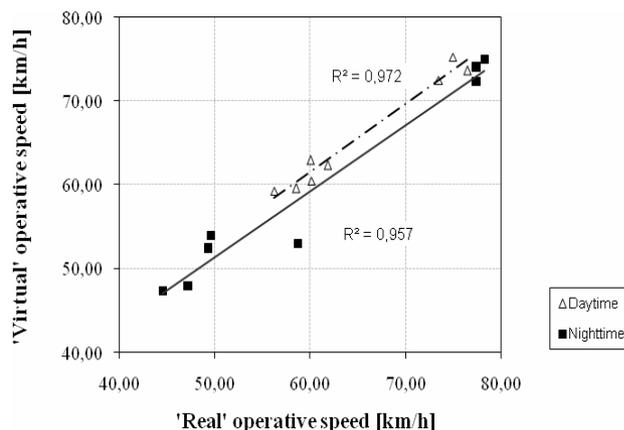


Fig. IX.3 – Quadro di raffronto delle velocità operative diurne e notturne nell'ambiente reale e nello scenario di guida virtuale A nella direzione di marcia B.

In riferimento alle modifiche funzionali introdotte nello scenario base di guida si può concludere che, a parità di altre condizioni, gli interventi proposti sulla segnaletica orizzontale e/o verticale producono effetti diversi in relazione alle caratteristiche e alla tipologia di messaggio forniti ed in particolare:

- ❑ in condizioni di illuminazione diurna, le modifiche alla segnaletica evidenziano scarsa o minima efficacia sia in termini di velocità che di impostazione delle curve;
- ❑ in condizioni di illuminazione notturna, la segnaletica orizzontale migliora l'impostazione delle curve nelle due direzioni sia in termini di velocità che di traiettoria;
- ❑ la segnaletica verticale introduce una reazione di tipo istantaneo cui corrisponde una decelerazione più efficace prima dell'ingresso della curva. L'effetto percettivo è per propria natura transitorio e limitato sia nello spazio che nel tempo.
- ❑ la combinazione delle modifiche alla segnaletica conferma quanto segnalato in termini di miglioramento della percezione a distanza delle caratteristiche delle curve.

Le modifiche alla geometria dell'asse (in conformità a quanto statuito dal DM 5 novembre 2001) comportano, invece, un notevole miglioramento della condotta di guida tanto di giorno quanto di notte.

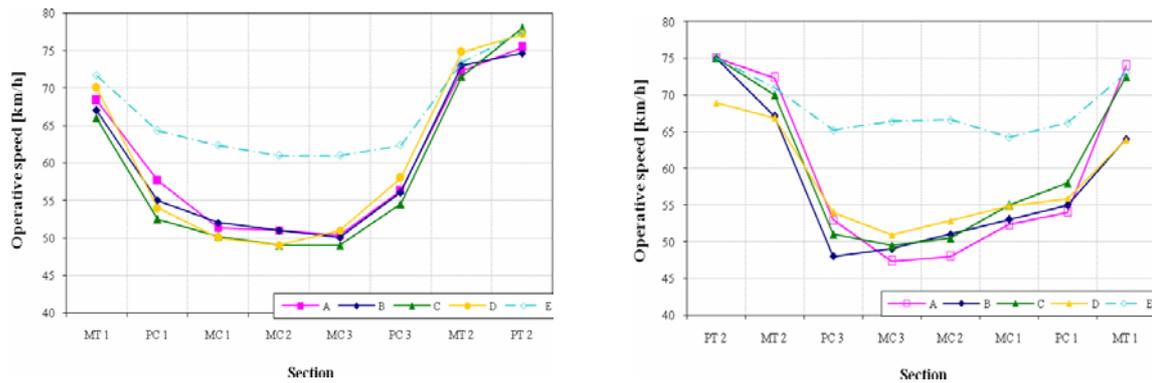


Fig. IX.2 – Profili di velocità notturni a confronto negli ambienti di guida virtuali A-B-C-D-E nelle direzioni di marcia A e B.

Peraltro, in tutti gli scenari - sia diurni che notturni - si segnala la tendenza al ‘taglio’ delle curve (secondo modalità e con caratteristiche differenziate a seconda degli ambienti di guida), finalizzata al mantenimento di velocità più elevate di quelle dettate dalla traiettoria ideale di marcia.

Considerato - per quanto detto - come fattore di rischio principale l’accelerazione residua in curva per il contesto stradale oggetto di studio, si osserva come le azioni migliorative realizzate mediante segnaletica risultino essere discretamente efficaci sia in termini di riduzione della velocità di ingresso in curva che di negoziazione della velocità finale di percorrenza dell’elemento curvilineo a monte dell’ingresso nello stesso.

Quale conclusione di carattere generale si ritiene necessario un affinamento tanto delle metodologie sperimentali quanto degli spunti risultanti dalle prove comportamentali già condotte, con lo scopo prioritario di stabilire se ed in che misura l’utente effettivamente percepisca i rischi della strada ed ancora se egli percepisca un elemento di condizionamento nella diversità nelle condizioni di guida (giorno, notte, ecc.). Sulla base dello studio condotto – e limitatamente ad esso – risulta chiaro che il fattore ‘notte’ non é percepito intrinsecamente come fatto di rischio tale da indurre uno stile di guida più cauto. Al contrario, sia per ragioni di tipo funzionale (traffico ridotto) che per ragioni di tipo personale (motivazioni, stato psico-fisico), la condotta di guida notturna nel tronco stradale analizzato si caratterizza per il fatto di essere sostanzialmente indifferente alle condizioni operative se non addirittura maggiormente spregiudicata. L’elemento curvilineo composto dalle due controcurve a raggio ridotto ($R < 100$ m) viene percepito nottetempo come una discontinuità inattesa che induce un brusco adattamento comportamentale, all’interno dello sviluppo curvilineo stesso, evidenziando una condotta favorevolmente predisposta al rischio di incidentalità in condizioni critiche. Di giorno, al contrario, la controcurva viene meglio percepita in virtù di una più vasta gamma di informazioni di tipo ambientale e contestuale, tali

da consentire l'attraversamento della stessa a velocità più elevate, pur se in combinazione di un 'taglio' più marcato delle traiettorie.

I rischi associati all'allargamento/restringimento della carreggiata, alla visibilità limitata oltre la curva e alla presenza dell'intersezione in corrispondenza della curva a raggio di curvatura minimo non trovano riscontro alcuno nel comportamento operativamente rilevato, neppure nell'ambiente di prova reale.

In prospettiva futura, si ritiene che, oltre agli aspetti cinematici descrittivi del comportamento di guida oggettivamente mantenuto su strada, vadano approfonditi anche gli aspetti di tipo ergonomico, percettivo e soprattutto motivazionale, che costituiscono la base su cui gli interventi finalizzati alla sicurezza – sia di tipo funzionale che strutturale - vanno ad inserirsi. La valutazione dell'efficacia di tali interventi andrebbe, peraltro, prolungata nel tempo e non solo limitata alla determinazione dei benefici istantanei, allo scopo di verificare la sussistenza o meno della cosiddetta 'assuefazione da stimolo'.

Nell'ottica di rivalutare la centralità del fattore umano alla guida, gli spunti di ricerca e di affinamento del lavoro fin qui svolto si possono rapidamente individuare nella valutazione dell'efficacia della segnaletica stradale (orizzontale e verticale) di tipo percettivo piuttosto che di tipo attenzionale in contesti di studio e secondo modalità diversificate, nell'estensione delle verifiche di sicurezza dei tracciati stradali alle condizioni operative più sfavorevoli alla sicurezza (condizioni climatico-ambientali diversificate) e nella disamina del rapporto tra visione-visibilità-attenzione-percezione da parte dell'utente durante la guida in relazione allo stato funzionale delle strade che questi si trova a percorrere.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio indistintamente la mia famiglia (mamma, papà, Flavia) e l'amore della mia vita (Anna) per avermi sempre dato la forza di credere in ciò che stavo facendo ed amarlo almeno quanto amo voi. Grazie di essere come siete!

Un sentito e doveroso ringraziamento va riconosciuto al Prof. Aurelio Marchionna ed all'ing. Paolo Perco che hanno sempre assicurato disponibilità e cortesia nei miei confronti sia nel corso delle revisioni periodiche che nella fase finale di redazione del lavoro di tesi.

Un particolare ringraziamento va riconosciuto al Prof. Marco Pasetto per il suo ruolo di guida scientifica presso il Dipartimento di Costruzioni e Trasporti dell'Università di Padova ma anche per il perdurante supporto umano che mai è venuto meno nel corso dei tre anni di dottorato.

Un ulteriore sentito e sincero ringraziamento spetta al Prof. Luciano Gamberini ed a tutto lo staff tecnico dell'HTLab del Dipartimento di Psicologia Generale dell'Università di Padova (in particolare Bruno Seraglia, Massimiliano Martinelli e Diego Varotto) per la fattiva e stimolante collaborazione.

Una menzione di merito a conclusione di questo lungo e sudato lavoro spetta anche a tutti i ragazzi (tesisti, tirocinanti, volontari, ecc.) che direttamente od indirettamente mi hanno assistito ed aiutato nell'espletamento delle prove su strada ed in laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Awadallah F., *Theoretical analysis for horizontal curves based on actual discomfort speed*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 131, Issue 11, 2005.
- [2] Bella F., *Effects of driver perception of combined curves on speed and lateral placement*, Proceedings of the 85th Annual Meeting Transportation Research Board, January 22-26, 2006, Washington D.C.
- [3] Blanco M., *Relationship between driver characteristics, nighttime driving risk perception, and visual performance under adverse and clear weather conditions and different vision enhancement systems*, Diss. submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University (2002).
- [4] Bonneson J.A., *Side friction and speed as controls for horizontal curve design*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 125, Issue 6, 1999.
- [5] Bonneson J.A., *A kinematic approach to horizontal curve transition design*, Proceedings of the 79th Annual Meeting Transportation Research Board, Transportation Research Board, November 7, 1999, Washington D.C.
- [6] Bosurgi G., D'Andrea A., Pellegrino O., *Influenza della componente uomo nella verifica di una curva planimetrica*, Proceedings of the X National SIIV Congress, Catania, Italy, 2000.
- [7] Brenac T., *Safety at curves and road geometry standards in some European countries*, Transportation Research Record no. 1523, Transportation Research Board, 1996.
- [8] Cantisani G., Loprencipe G., *Analisi della vulnerabilità indotta dai difetti geometrici delle sezioni stradali in curva*, Proceedings of the XII National SIIV Congress, Parma, Italy, 2002.
- [9] Caroti L., Losa M., Ristori C., *Adeguamento delle curve a raggio variabile alle condizioni operative dei veicoli*, Proceedings of the XI National SIIV Congress, Verona, Italy, 2001.
- [10] Charlton S.G., *Perceptual and attentional effects on drivers speed selection at curves*. Accident Analysis and Prevention, 36, 877-884. 2004.
- [11] Charlton S.G., *The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments*. Accident Analysis and Prevention, 39(5), 873-885. 2007.
- [12] Charlton S.G., *Conspicuity, memorability, comprehension, and priming in road hazard warning signs*, Accident Analysis and Prevention, Vol. 38, pp. 496-506, 2006.
- [13] Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R., *Operating speed prediction model for two-lane rural roads*, Proceedings of the 3rd International SIIV Congress, Florence, Italy, 2004.

-
- [14] Crisman B., Marchionna A., Perco P., Roberti R., *Considerazioni critiche sull'inserimento delle curve di raccordo nei tracciati stradali*, Proceedings of the XII National SIIV Congress, Parma, Italy, 2001.
- [15] Crisman B., Fugaro L., Marchionna A., Roberti R., *Modello di previsione delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale*, Proceedings of the XIII National SIIV Congress, Padova, Italy, 2003.
- [16] Dietsch M., Ebersbach D., Lippold Ch., Mallschutzke K., Gatti G., *Road geometry, driving behaviour and road safety*, Sixth Framework Programme, Ripcord-Iserest Project, Final Report, 2005.
- [17] Easa S., Ganguly C., *Modeling driver visual demand on complex horizontal alignments*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 131, Issue 8, 2005.
- [18] Fildes B.N., Leening A.C., Corrigan J.McM., *Speed perception: drivers' judgements of safety and speed on rural straight and curved roads and for different following distances*, Report no. CR60, Department of Transport, Federal Office of Road Safety, Victoria 3174, Australia, 1989.
- [19] Fildes B.N. & Lee S.J., *The speed review: road environment, behaviour, speed limits, enforcement and crashes*, Report no. CR127 (FORS), Federal Office of Road Safety, Canberra, Australia, 1993.
- [20] Fildes B.N., Jarvis J., *Perceptual countermeasures: literature review*, Federal Office of Road Safety, Research Report CR4/94.
- [21] Fink K.L., Krammes R.A., *Tangent length and sight distance effects on accident rates at horizontal curves on rural two-lane roads*, Transportation Research Record no. 1500, Transportation Research Board, 1995.
- [22] Fitzpatrick K., Shamburger B., Fambro D., *Design speed, operating speed, and posted speed survey*, Transportation Research Record no. 1523, Transportation Research Board, 1996.
- [23] Fitzpatrick K., Collins J.M., *Speed-profile model for two-lane rural highways*, Transportation Research Record no. 1737, Transportation Research Board, 2000.
- [24] Fulop I.A., Bogardi I., Gulyas A., Csicsely-Tarpay M., *Use of friction and texture in pavement performance modeling*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 126, Issue 3, 2000.
- [25] Gaudry M., Vernier K., *Effects of road layout and pavement condition on speed and safety*, November 1998.
- [26] Gatti G., Cavuoti E., *L'influenza della configurazione delle curve sul comportamento degli utenti e sullo stato di rischio*, Proceedings of the XI National SIIV Congress, Verona, Italy, 2001.
- [27] Golob T.F., Recker W.W., *Relationship among urban freeway accidents, traffic flow, weather, and lighting conditions*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 129, Issue 4, 2003.
- [28] Gothié M., Parry T., Roe P., *The relative influence of the parameters affecting road surface friction*, Atti 2nd International Colloquium on Vehicle Tyre/Road Interaction.

-
- [29] Green M., *Contrast detection and direction discrimination of drifting gratings*, *Vision Research*, no. 23, pp. 281-289.
- [30] Griffin L.I., Reinhardt R.N., *A review of two innovative pavement marking patterns that have been developed to reduce traffic speeds and crashes*, AAA Foundation for Traffic Safety, Texas Transportation Institute, 1995.
- [31] Hasan M., Sayed T., Hassan Y., *Influence of vertical alignment on horizontal curve perceptivity: effect of spirals and position of vertical curve*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, no. 32, 2005.
- [32] Hashem R. Al-Masaeid, Kumares C. Sinha, *Analysis of accident reduction potentials of pavement markings*, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. no. 120, Issue 5, 1994.
- [33] Hassan Y., Easa S., *Effect of vertical alignment on driver perception of horizontal curves*, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. no. 129, Issue 4, 2003.
- [34] Hauer E., *Safety of horizontal curves*, fonte: internet.
- [35] Haworth N., Mulvihill C., *A comparison of hazard perception and responding in car drivers and motorcyclists*, Monash University Accident Research Centre, Victoria 3800, Australia, 2006.
- [36] Hsiang Yi Lee, Chi Yuang Yu, *Visibility effectiveness of hemisphere and corner cube retroreflective pavement markers on curved roads*, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. no. 129, Issue 1, 2003.
- [37] Johnston, I.R., *Modifying driver behaviour on rural road curves: a review of recent research*. Proc. of the 11th Australian Road Research Board (ARRB) Conference, Vol. 11(4), 115-124, 1982.
- [38] Kanellaidis G., Zervas A., Karagioules V., *Drivers' risk perception of road design elements*, *Transportation Human Factors*, 2(1), pp. 39-48, 2000.
- [39] Lamm R., Choueiri E.M., Hayward J.C., Paluri A., *Design on two-lane rural roads*, Transportation Research Record no. 1195, Transportation Research Board, Washington D.C.
- [40] Lamm R., Choueiri E.M., Mailaender T., *Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways*, Transportation Research Record no. 1280, Transportation Research Board, 1990.
- [41] Marchionna A., Crisman B., Roberti R., Perco P., *Verifica della congruenza di un tracciato stradale con il modello MOST e confronto con altre procedure adottate*, Proceedings of the XI National SIIV Congress, Verona, Italy, 2001.
- [42] McDonald, L.B. & Ellis, N.C., *Driver workload for various turn radii and speeds*, *Transp. Res. Rec.*, 530, 8-30, 1975.
- [43] McKenna F.P., *Drivers' perception of risk*, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 23, No. 1, pp. 45-62, 1991.
-

-
- [44] Messer, C.J. – Mounce, J.M. – Brackett, R.Q., *Highway geometric design consistency related to driver expectancy*. Publication No. FHWA-RD-81-035. Federal Highway Administration, Washington. DC, 1981.
- [45] Morral J.F., Robinson J.B.L., *Design speed choices for Canadian two-lane rural highways*, Proceedings of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada St. John's, Newfoundland and Labrador, 2003.
- [46] Nikiel S., *Realism vs. Reality: Creating Virtual Reconstructions of Architectural Artifacts*, In Proceedings of the "10th Annual International Workshop on Presence", October 25-27 2007, Barcelona, Spain.
- [47] Olson, P. L., *Vision and Perception*. In B. Peacock, and W. Karwowski (Eds.), *Automotive Ergonomics*. 299-320, London: Taylor & Francis, 1993.
- [48] Olson, P. L., & Sivak, M., *Comparison of headlamp visibility distance and stopping distance*. *Perceptual and Motor Skills*, 57, 1177-1178, 1983.
- [49] Pasetto M, Galiazzo A., *Visibilità e percezione visiva del tracciato stradale in galleria*, Proceedings of the XI National SIIV Congress, Verona, Italy, 2001.
- [50] Pasetto M., Manganaro A.. *The human factor in the check policies for drop-on road marking materials optical performances*. In: Proceedings of the "7th International Conference on Managing Pavement Assets", Electronic paper from the CD Official Proceedings (Paper ID 34-100), Calgary, 2008.
- [51] Pasetto M., Manganaro A.. *Risk perception and road safety: experimental study of the road user environmental conditioning through the "action-reaction" mechanism*. In: Proceedings of the "Transport Research Arena Europe 2008", Electronic paper from the CD Official Proceedings (Paper ID 233, No. 6.4.11), Ljubljana, 2008.
- [52] Pasetto M., Gamberini L., Manganaro A. *Potentialities of immersive virtual reality models in the drivers' behaviour analysis and in the evaluation of road safety measures*. In: Proceedings of the "11th Annual International Workshop on Presence", 2008, Padova (Italy).
- [53] Patel K., Bailenson J., Jung S.H., Diankov R., Bajcsy R., *The effects of fully immersed virtual reality on the learning of physical tasks*, In Proceedings of the "8th Annual International Workshop on Presence", August 24-26, Cleveland, Ohio, USA.
- [54] Perco P., *Desiderable length of spiral curves for two-lane rural roads*, Proceedings of the 85th Annual Meeting Transportation Research Board, January 22-26, 2006, Washington D.C.
- [55] Roberti R., *La sicurezza di un tracciato stradale: velocità di progetto, aderenza trasversale e sopraelevazione*, SIIV National Meeting, Parma, 2002.
- [56] Shinoda H., Hayhoe M.M., Shrivastava A., *What controls attention in natural environments?*, *Vision Research*, Vol. 41, pp. 3535-3545, 2001.

-
- [57] Slangen- de Kort Y.A.W., Ijsselsteijn W.A., Kooijman J., and Schuurmans Y.. *Virtual environments as research tools for environmental psychology: a study of the comparability of real and virtual environments*, In: Proceedings of the "4th Annual International Workshop on Presence", Electronic paper available on web, Philadelphia, 2001
- [58] Stamataidis N., Vest A., *Means to reduce operating speeds on curves*, fonte: internet.
- [59] Taiganidis I., Kanellaidis G., *Approximate perspective design of roads*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 125, Issue 4, 1999.
- [60] Wang J., *Operating speed models for low speed urban environments based on in-vehicle GPS data*, Dissertation presented to the Academic Faculty, Georgia Institute of Technology, 2006.
- [61] Weisse, J.; Klempau, F.; Landau, K.; Breuer, B., *Characterization of driver behaviour and strain in critical situations*, Atti 2nd International Colloquium on Vehicle Tyre/Road Interaction.
- [62] Wonho Suh, Young-Jin Park P., Chang Ho Park, Kyung Soo Chon, *Relationship between speed, lateral placemet, and drivers' eye movement at twoe rural highways*, Journal of Transportation Engineering, Vol. no. 132, Issue 8, 2006.
- [63] Wooldridge M.D., Fitzpatrick K., Koppa R., Bauer K., *Effects of horizontal curvature on driver visual demand*, Transportation Research Record no. 1737, Transportation Research Board, 2000.
- [64] *Evaluation of design consistency methods for two-lane rural highways, executive summary*, Publication no. FWHA-RD-99-173, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2000.
- [65] *Condizionamento dell'utente: sezione, segnaletica, ambiente*, IASPIS Final Research Report, 1998.
- [66] *Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways*, NCHRP Report no. 502, Transportation Research Board, 2003.
- [67] *Recommendations for AASHTO superelevation design*, Prepared by Design Quality Assurance Bureau, NYSDOT, September, 2003.
- [68] *Evaluation of the design consistency methods for two-lane rural highways, executive summary*, Federal Highway Administratio, Report no. FHWA-RD-99-173, 2000.
- [69] *Speed prediction for two-lane rural highways*, Federal Highway Administratio, Report no. FHWA-RD-99-171, 1999.
- [70] *Design speed, operating speed, and posted speed practices*, NCHR Report no. 504, Transportation Research Board, 2003.
- [71] *Effect of warning signs on curve operating speeds*, Research Report KTC-05-20/SPR-259-03-1F, College of Engineering, Kentucky Transportation Center, 2005.