

Università degli Studi di Napoli Federico II
Facoltà di Ingegneria



Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”
Dottorato di Ricerca in
Ingegneria dei Sistemi Idraulici di Trasporto e Territoriali
Indirizzo Infrastrutture Viarie e Sistemi di Trasporto
XXI Ciclo

Coordinatore Scientifico: Prof. Ing. Bruno Montella

Coordinatore di Indirizzo: Prof. Ing. Renato Lamberti

Tesi di Dottorato

***ANALISI DI SOLUZIONI PER LA SICUREZZA STRADALE
CON L'AUSILIO DI UN SIMULATORE DI GUIDA***

Tutor

Prof. Vincenzo Torrieri

Cotutor

Prof. Mariano Perneti

Dottorando:

Ing. Francesco Galante

INDICE

1	Introduzione.....	6
2	Fattori Umani e Sicurezza Stradale.....	9
2.1	<i>Introduzione.....</i>	9
2.2	<i>Sicurezza stradale: il criterio degli incidenti.....</i>	10
2.3	<i>Modelli di comportamento di guida: un'introduzione</i>	12
2.4	<i>L'influenza delle caratteristiche del conducente: modelli di abilità e differenze individuali</i>	13
2.5	<i>Il compito di guida: modelli gerarchici e di errore.....</i>	15
2.6	<i>Elaborazione delle informazioni e motivazione.....</i>	18
2.7	<i>Elaborazione delle informazioni e percezione</i>	19
2.7.1	Il modello cognitivo sviluppato da Rumar	19
2.7.2	Aspettative e modelli mentali.....	20
2.7.3	L'attenzione.....	23
2.7.4	Consapevolezza della situazione	24
2.8	<i>Modelli motivazionali.....</i>	25
2.8.1	Modelli di rischio	26
2.8.2	Adattamento comportamentale	27
2.8.3	Modello di carico di lavoro	30
3	Simulatori di Guida : Stato dell'Arte	33
3.1	<i>Breve Storia</i>	33
3.2	<i>Architettura dei simulatori di guida.....</i>	36
3.2.1	Sistema visivo	37
3.2.2	Sistema sonoro	39
3.2.3	Ritorno di forza.....	39
3.2.3.1	Sistema di moto	40
3.2.3.2	Ritorno di forza ai comandi	41
3.2.4	Modello dinamico.....	42
3.2.5	Modello di traffico.....	42

3.2.6	Scenario	43
3.3	<i>Alcune osservazioni su i simulatori di guida</i>	44
3.3.1	Malessere da simulatore	44
3.3.2	Validazione	45
3.4	<i>Alcuni simulatori di guida esistenti</i>	46
3.4.1	Simulatore Daimler-Chrysler	46
3.4.2	NADS	48
3.4.3	Il simulatore dinamico della Renault	49
3.4.4	VIRTTEX.....	50
3.5	<i>VERA</i>	52
3.5.1	Il sistema visuale	53
3.5.2	Cabina	53
3.5.3	Il sistema di moto	54
3.5.4	Il sistema dinamico	54
3.5.5	Applicazioni.....	55
4	Analisi al simulatore di soluzioni Per la sicurezza stradale	57
4.1	<i>Simulatori di guida e sicurezza stradale</i>	57
4.1.1	Studi sulla sicurezza di guida al simulatore	58
4.1.2	Studi sul Comportamento di guida	59
4.1.2.1	L'influenza della distrazione o di alterazioni	59
4.1.2.2	Performance di guida o misure comportamentali.	61
4.1.3	Il rischio nei giovani guidatori.....	62
4.1.4	Progettazione e Verifica di infrastrutture: Sistemi di segnaletica stradale62	
4.1.5	Sistemi di Trasporto Intelligenti: Adaptive Control Control	63
4.1.6	Valutazione di politiche di gestione.....	63
4.2	<i>Verifica della reazione dei guidatori ai messaggi in condizioni di emergenza mediante simulazione di guida</i>	65
4.2.1	Incendio nei tunnel: rischi per le persone	66
4.2.2	L'organizzazione della sicurezza e il ruolo degli utenti.....	67
4.2.3	L'esperimento	69

4.2.4	Il Metodo	69
4.2.4.1	I partecipanti	69
4.2.4.2	Gli scenari.....	70
4.2.5	Risultati	72
4.2.5.1	Risultati scenario No PMV.....	72
4.2.5.2	Risultati Scenario PMV	73
4.2.5.3	Risultati Scenario PMV+Frusta.....	73
4.2.6	Conclusioni.....	74
4.3	<i>Effetti di sistemi di delineazione delle curve sul comportamento di guida: un'analisi al simulatore di guida</i>	76
4.3.1	Creazione 3D dell'ambiente di guida	77
4.3.2	Descrizione del metodo di prova.....	79
4.3.2.1	Selezione e caratteristiche soggetti	79
4.3.2.2	Scenari	80
4.3.3	Analisi dati	82
4.3.3.1	Velocità	83
4.3.3.2	Posizione laterale	86
4.3.3.3	Effetti dei trattamenti sui profili di velocità	88
4.3.4	Conclusioni.....	89
4.4	<i>Analisi di dispositivi di traffic calming al simulatore di guida</i>	92
4.4.1	SITI DI STUDIO.....	96
4.4.2	Sito di progetto.....	97
4.4.3	ALTERNATIVE DI PROGETTO	99
4.4.4	Sperimentazione al simulatore di guida.....	106
4.4.4.1	Protocollo di prova.....	106
4.4.4.2	Validazione del simulatore di guida con misure di velocità.....	107
4.4.4.3	Risultati	107
4.4.5	Conclusioni.....	110
5	Un modello per la restituzione delle vibrazioni dovute alle irregolarità distribuite nei simulatori di guida	112
5.1	<i>Introduzione.....</i>	112
5.2	<i>Irregolarità stradali: esperienze in simulazione di guida</i>	113

5.3	<i>Il profilo stradale</i>	116
5.4	<i>Generazione artificiale di un profilo stradale</i>	117
5.5	<i>L'indice IRI</i>	122
5.6	<i>Modello di veicolo</i>	127
5.7	<i>Il modello di confort proposto</i>	129
5.8	<i>Validazione del sistema</i>	133
5.8.1	Validazione qualitativa	133
5.8.2	Validazione qualitativa	135
5.9	<i>Sperimentazione</i>	137
5.9.1	Soggetti	137
5.9.2	Sessione di addestramento	137
5.9.3	Percorso e scenario	138
5.9.4	Primi risultati.....	138
5.9.4.1	Velocità	139
5.9.4.2	Tempo di reazione e decelerazione	140
5.10	<i>Conclusioni</i>	141
6	Conclusioni	142
	BIBLIOGRAFIA	145

1 INTRODUZIONE

Ogni giorno in Italia si verificano in media 633 incidenti stradali, che provocano la morte di 14 persone e il ferimento di altre 893. Nel complesso, nell'anno 2007 sono stati rilevati 230.871 incidenti stradali, che hanno causato il decesso di 5.131 persone, mentre altre 325.850 hanno subito lesioni di diversa gravità. Rispetto al 2006, si riscontra una diminuzione del numero degli incidenti (-3,0%) e dei feriti (-2,1%) e un calo consistente del numero dei morti (-9,5%). Con riferimento all'obiettivo fissato dall'Unione Europea nel Libro Bianco del 13 settembre 2001, che prevede la riduzione della mortalità del 50% entro il 2010, l'Italia ha raggiunto quota -27,3%. Tale obiettivo appare di incerta realizzazione, ma è comunque la prima volta che si ottiene una riduzione così sostenuta in termini di mortalità (-9,5%) e ciò deve incoraggiare ad andare avanti guardando oltre il 2010.

La sicurezza stradale è, quindi, uno degli argomenti di maggiore interesse, non solo per gli addetti ai lavori. Essa rappresenta uno dei principali costi sociali sia in termini di vite umane sia in termini di costi effettivi per la sanità pubblica.

Si possono individuare tre fattori che, interagendo, sono alla base di ogni incidente: l'ambiente (infrastrutture, condizioni meteorologiche, ecc.), il veicolo (caratteristiche meccaniche, sicurezza attiva e passiva, manutenzione, ecc.) e il guidatore (educazione stradale, condizioni psichiche e fisiche, capacità di percezione del pericolo, ecc.). Tra questi, il fattore umano risulta di gran lunga la causa principale degli incidenti stradali. In particolare, gli studi effettuati hanno rilevato che una percentuale tra il 20% e il 40% degli incidenti mortali ha come causa principale o come fattore concomitante le condizioni psico-fisiche non ottimali del conducente che, nonostante la stanchezza e la sonnolenza, rimane alla guida del veicolo con una conseguente riduzione della sua soglia di attenzione e lucidità. Di conseguenza, l'analisi del fattore umano e della sua interazione con il veicolo può essere un elemento strategico per incrementare la sicurezza stradale.

I primi simulatori di autoveicoli nascono nei primi anni settanta e traggono le proprie origini dai primi simulatori di volo di inizio Novecento. Con l'avvento della computer technologies, Daimler-Benz lanciò in Germania un simulatore ad alta fedeltà agli inizi del 1980 che creò un grande interesse in tutto il settore automotive e diede una spinta decisiva allo sviluppo di questi dispositivi. Da quel momento, molti costruttori di

autoveicoli ed istituti di ricerca hanno sviluppato ed applicato i propri simulatori per studiare e risolvere in ambiente virtuale i loro più svariati problemi sfruttando anche il rapido sviluppo di nuovi e sempre più veloci processori e schede grafiche per PC che hanno permesso di ottenere un sempre più alto rapporto prestazioni/costi.

L'uso dei simulatori di guida per gli studi sulla sicurezza stradale sta crescendo anche grazie alla riduzione dei costi dei simulatori e lo sviluppo della tecnologia hardware/software. I simulatori di guida offrono un ambiente di guida simulato totalmente sicuro e caratterizzato da un elevato controllo sperimentale. La sicurezza negli studi al simulatore garantisce un'elevata flessibilità nel tipo di sperimentazioni che si possono condurre, in quanto evita potenziali danni ai soggetti partecipanti. Molte variabili estranee che possono influenzare il comportamento dei guidatori possono essere controllate utilizzando il simulatore: è possibile replicare precisamente l'area oggetto di sperimentazione mantenendo solamente le variabili relative al trattamento di interesse. In pratica, gli studi al simulatore consentono la manipolazione delle variabili indipendenti poiché permettono di mantenere costanti tutte le variabili estranee.

Inoltre, gli studi al simulatore sono generalmente più efficienti degli studi su strada. Primo, perché richiedono un minor numero di partecipanti come conseguenza dell'elevato controllo sperimentale. Secondo, trattamenti differenti implementati virtualmente sulla stessa area possono essere sottoposti ai soggetti in un'unica sessione di guida. Praticamente, è possibile effettuare esperimenti con misure ripetute con soggetti esposti allo stesso identico ambiente ed nelle stesse condizioni sperimentali. Quindi, un ridotto numero di partecipanti è sufficiente per ottenere lo stesso livello di potenza statistica che in esperimenti su strada richiederebbero un ben più grande campione.

Infine, i costi nell'implementare trattamenti in simulazione saranno sicuramente minori rispetto alla realtà ed l'utilizzo del simulatore per lo sviluppo di nuove tecnologie/dispositivi di tipo diverso può avvenire addirittura nella fase concettuale.

Quindi, il simulatore permette lo svolgimento dei test in condizioni ambientali controllate e ripetibili, eliminando delle condizioni di aleatorietà che potrebbero inficiare i risultati delle prove. Infine, essendo installato all'interno di un laboratorio, l'impiego di un simulatore permette di agevolare il rilevamento e la registrazione dei dati necessari per le analisi.

La simulazione di guida è uno strumento efficace anche nella progettazione e

valutazione di qualsiasi misura/dispositivo rivolto alla sicurezza stradale nel suo complesso. Effettuare verifiche in un ambiente virtuale, permettendo ai guidatori di testare al simulatore, aiuta a valutare ed ottimizzare il dispositivo in uno stadio embrionale, e di conseguenza riduce il costo, migliorando la qualità e l'utilizzabilità del progetto.

A partire dalle premesse su esposte il lavoro si articola come di seguito descritto.

Nel secondo capitolo, vengono presentati alcuni modelli, presenti in letteratura, sul comportamento di guida. Questi sono stati suddivisi in modelli basati sulle caratteristiche del guidatore (modelli di abilità e differenze individuali), modelli che focalizzano l'attenzione sul compito di guida (modello gerarchico e di errore), modelli basati sull'elaborazione delle informazioni (modello di Rumar e modelli mentali).

Nel terzo capitolo, dopo una breve introduzione sui simulatori di guida e sulle loro caratteristiche rilevanti, è stata effettuata una panoramica dei principali sistemi di simulazione esistenti. Infine, viene fornita una dettagliata descrizione del simulatore di guida Virtual Environment for Road sAfty (VERA), che è stato oggetto e strumento di ricerca da parte del candidato in questi tre anni di dottorato.

Nel quarto capitolo vengono descritti alcuni studi, realizzati con VERA, con implicazioni nel campo della sicurezza stradale: segnaletica d'emergenza in galleria, sistemi delineazione curve e sistemi luminosi sequenziali ed, infine, porte d'accesso e dispositivi di moderazione del traffico

Il capitolo quinto presenta lo sviluppo e l'implementazione, in VERA, di un modulo di comfort, in grado di restituire alla cabina del simulatore le vibrazioni dovute ad irregolarità stradali distribuite.

Il capitolo quinto presenta le conclusioni riassuntive relativamente all'attività svolta e ai suoi possibili sviluppi futuri.

La Bibliografia chiude il lavoro.

2 FATTORI UMANI E SICUREZZA STRADALE

2.1 Introduzione

In un studio pubblicato da Treat et al (1977) vennero classificati sulla base dei fattori che li hanno causati più di 2000 incidenti stradali avvenuti tra il 1971 ed il 1974. Lo studio rivelò che circa 50% degli incidenti è legato esclusivamente a fattori dovuti al guidatore e che in più del 90% dei casi il comportamento del guidatore è una concausa assieme a fattori legati all'ambiente o al veicolo.

Recenti statistiche, eseguite in Germania, basate esclusivamente su rapporti di polizia, evidenziano che il guidatore da solo o in combinazione con altri fattori è responsabile approssimativamente del 60% degli incidenti con danni alle persone.

Sebbene le statistiche suggeriscano che la strada non è quasi mai legata agli incidenti, l'analisi dei luoghi rivela che gli errori umani sono più frequenti in certe zone piuttosto che in altre. Ad esempio, l'eccesso di velocità, considerato come uno dei comportamenti umani più comuni che sono causa di incidenti, spesso sembra essere la causa diretta di un incidente, in realtà è lo specifico luogo che, evidentemente, provoca questo comportamento pericoloso. In altre parole questo comportamento ha luogo in specifiche situazioni e sotto specifiche condizioni, e può anche essere indotto. In conclusione si può dire che l'incidente stradale è causato da una combinazione di situazione e limite umano. Infatti circa il 26% di questi è causato dall'interazione tra il guidatore e l'ambiente stradali.

Nei paragrafi seguenti saranno riassunti le attuali conoscenze sul comportamento di guida come background applicabile alla sicurezza sulle strade extra-urbane. Il comportamento del guidatore, in questo contesto, è definito come una reazione più o meno evidente agli stimoli interni o esterni. Esso può essere stimato indirettamente utilizzando parametri del veicolo (velocità, accelerazione, posizione laterale) o direttamente analizzando la reazione del guidatore. Si è, inoltre, fatta una distinzione tra guidatore, veicolo e comportamento di guida. Per chiarire la distinzione tra questi termini utilizzeremo la figura seguente.

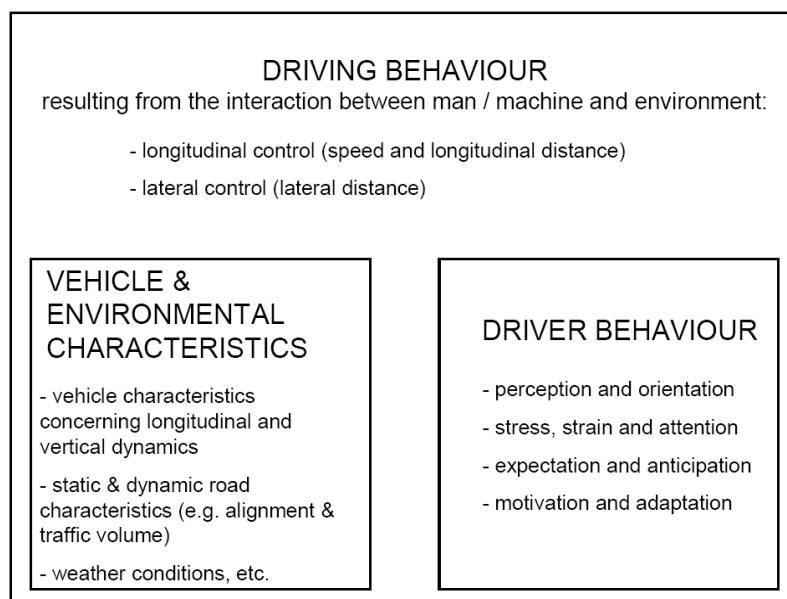


Figura 2-1 : Elementi del comportamento di guida

La Figura 2-1 descrive il comportamento di guida come risultato del comportamento umano da un lato e delle caratteristiche dell'ambiente e del veicolo dall'altro.

2.2 Sicurezza stradale: il criterio degli incidenti

La sicurezza stradale è spesso considerata inversamente proporzionale al numero di incidenti. Tuttavia, essa è qualcosa di più della mera assenza di incidenti oltre al fatto che questo criterio ha alcuni limiti intrinseci. Questo è tanto più vero, quando gli incidenti sono riferiti ai singoli guidatori o ai singoli luoghi per un breve periodo di tempo.

I suddetti limiti sono, di seguito, elencati: (Klebensberg, 1982; Krusysse, 1992):

- gli incidenti sono eventi rari da un punto di vista statistico;
- il loro verificarsi è dovuto tanto al caso quanto a fattori sistematici (che sono gli unici rilevanti);
- le cause degli incidenti sono spesso riportate in un maniera insufficiente;
- ad eccezione degli incidenti mortali, gli incidenti non sono riportati in maniera molto attendibile (inoltre nella definizione variano tra i differenti paesi).

Un modo per superare questi limiti è di considerare il guidatore ed il comportamento di guida ad un stadio precedente, presumendo che un comportamento sbagliato sia la

variabile antecedente degli incidenti.

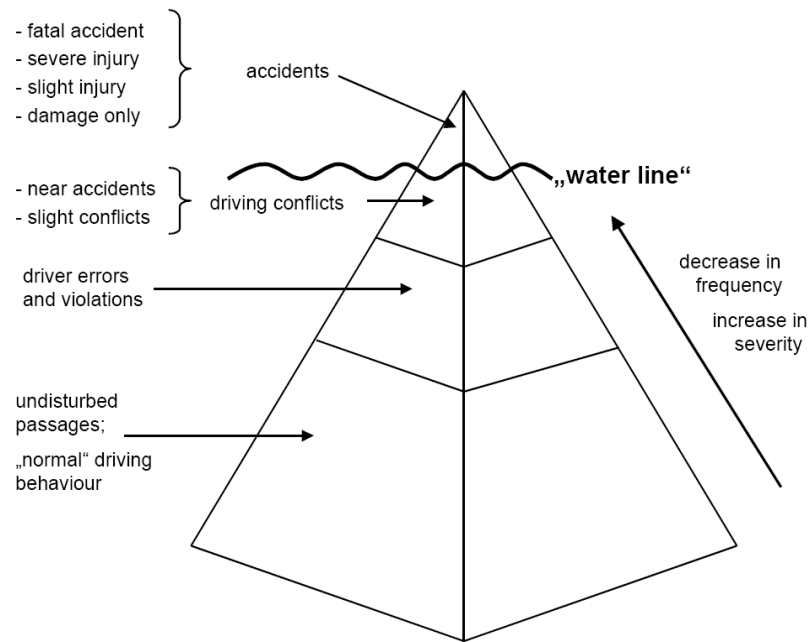


Figura 2-2: la piramide di sicurezza e il modello di iceberg

Questo approccio è spesso rappresentato come una piramide di sicurezza, dove si passa da comportamento di guida “normale” o imperturbato nella zona più in fondo, attraverso errori del guidatore e conflitti nella guida fino ad incidenti fatali in cima (Grayson & Hakkert, 1987; Maycock, 1997) (Figura 2-2). Il modello è chiamato modello di iceberg, in quanto sono riportati solo gli incidenti mentre i conflitti ed gli errori molto spesso vengono ignorati e, metaforicamente parlando, rimangono al di sotto del livello dell’acqua (Figura 2-2).

Klebersberg (1982) ha usato un approccio simile e ha descritto la guida come un continuo fra guida sicura ed incidenti. Analogamente al modello di iceberg, egli denomina gli errori di guida, i conflitti e i quasi-incidenti come stadi intermedi. Essendo la frequenza degli errori superiore a quella degli incidenti, essi sono molto più adatti all’analisi statistica. In pratica, a causa della loro numerosità, l’uso degli errori di guida o dei conflitti invece degli incidenti, permette una valutazione a breve termine della sicurezza stradale.

L’uso degli errori e dei conflitti come variabile per il rilievo degli incidenti si basa sulla così detta ipotesi di causa comune. Ciò vuole dire che gli errori ed gli incidenti hanno gli stessi meccanismi causali e che tutti gli incidenti sono, infatti, preceduti rispettivamente da errori e da conflitti.

Inoltre, gli errori o i conflitti possono essere definiti da una prospettiva esterna in contrasto ad un approccio individuale (Carbonell et Martín-del-Río, 2002). La differenza tra le due prospettive può essere illustrate usando l'esempio del sorpasso in un punto dove questo non è consentito. Quando il conducente è consapevole di compiere una azione non corretta, ma completa la manovra con successo, secondo l'approccio individuale egli non ha fatto un errore invece, secondo l'approccio esterno, lo ha certamente compiuto.

2.3 Modelli di comportamento di guida: un'introduzione

Le prime teorie sul comportamento di guida tentarono di spiegare e di predire il singolo incidente sulla base di quelle caratteristiche del guidatore che sono causa di ripetuti incidenti. Queste teorie non ebbero molto successo, principalmente a causa delle difficoltà associate ai dati di incidente. Comunque, da un punto di vista aggregato ci sono evidenti differenze tra i diversi gruppi di guidatori come vedremo in seguito.

I modelli che trattano con differenze individuali sono chiamati "tassonomici" (Michon, 1985) così non comportano relazioni dinamiche fra componenti. I modelli tassonomici si distinguono dai modelli funzionali, che prendono in considerazione le complesse interazioni in ogni guida. I modelli funzionali sono considerati avere il più grande potenziale nello spiegare il comportamento di guida (Michon, 1985). I modelli funzionali prominenti sono modelli che elaborano informazioni e modelli motivazionali.

Nell'ambito dei modelli che elaborano informazioni, sono stati distinti due trend differenti, vale a dire i modelli cognitivi come il modello sviluppato da Rumar (1985) e modelli dedotti dalla teoria della percezione diretta sviluppata da Gibson (1986).

L'assunzione principale di modelli motivazionali è che il guidatore gestisce in maniera autonoma la sua andatura e modifica il suo comportamento secondo i suoi propri scopi (Ranney, 1994). I primi modelli motivazionali erano basati completamente sul rischio. Comunque, un recente modello sviluppato di Fuller (2005) vede la quantità di lavoro come un importante meccanismo di regolazione.

Comunque, guidare è un compito complesso da diversi punti di vista. Per unire le assunzioni fatte dalle teorie summenzionate, è necessaria una struttura generale del compito di guida. Questa struttura è fornita da modelli gerarchici del comportamento di

guida. A causa della loro importanza, sia nell'incorporare risultati di teorie già esistenti sia nello sviluppo di nuove teorie, questi modelli saranno presentati anche prima dei modelli di elaborazione delle informazioni e dei modelli motivazionali. Lo sviluppo di teorie e tassonomie degli errori (di guida), è stato influenzato direttamente da questi modelli gerarchici. I modelli di errore hanno molto contribuito nella comprensione dei meccanismi che sono causa di incidente.

2.4 L'influenza delle caratteristiche del conducente: modelli di abilità e differenze individuali

Le prime teorie sul comportamento di guida tentarono di spiegare e predire il verificarsi in un singolo incidente attraverso una mancanza nelle abilità di guida. Questi modelli non ebbero successo per due ragioni: in primo luogo, fu trovato che le ragioni per il verificarsi di un incidente sono da ricercarsi piuttosto sul lato di motivazionale, secondo il criterio di incidente stesso presenta dei difetti come discusso sopra. Da un punto di vista statistico, gli incidenti sono eventi rari e perciò, è improbabile, che lo stesso guidatore abbia un incidente in due istanti di tempo successivi.

Inoltre, nel database degli incidenti, manca qualsiasi collegamento al coinvolgimento individuale del verificarsi dell'incidente, la ricerca deve contare sulla retrospettiva, che non è molto affidabile (Maycock, 1997). La predizioni del coinvolgimento in incidenti futuri sulla base di record di incidenti passati può condurre ad un numero alto di falsi positivi o falsi negativo (mancanti) su un livello individuale (Evans, 2004; Klebelsberg, 1982). Un altro limite è che i modelli di abilità non prendono in considerazione che guidare è un compito che il guidatore svolge potendo modificando la sua andatura autonomamente. Questo vuol dire che i guidatori possono affrontare le difficoltà della situazione correggendo la velocità e, quindi, sono consapevoli della loro mancanza dell'abilità (vedi e.g., Evans, 2004).

Ciononostante, il coinvolgimento in incidenti è in effetti differente per differenti gruppi di guidatori e può essere parzialmente predetto, ad esempio quando si usano dati di trasgressioni al codice. Per illustrare l'importanza relativa di fattori di differenziazione, verranno citati alcuni esempi presenti in letteratura.

Come indicato dalle statistiche di incidentalità, il principale esempio di un fattore

discriminante è l'età. Generalmente, il coinvolgimento nel rischio di incidente per gruppi di età diversa, per unità di tempo e distanza, tende ad essere a forma di U (Elvik & Vaa, 2004). Nonostante l'ovvia correlazione tra età e rischio di coinvolgimento in un incidente (danno) per unità di tempo o distanza percorsa, le ragioni sono differenti tra guidatori giovani ed anziani.

Per i giovani guidatori si potrebbe presumere che l'età e la mancanza di esperienza di guida si mescolino (Progetto europeo GAGDET). Comunque, quando guidatori giovani e anziani vengono messi a confronto si può dimostrare che la mancanza di esperienza di guida di per sé non può essere esplicativa (Maycock, 1997). Si presume che fattori motivazionali contribuiscano in misura maggiore all'elevato coinvolgimento in incidenti di questo gruppo di età, specialmente per giovani maschi (Boyce et Geller, 2002).

Il rischio più alto di coinvolgimento in incidente di guidatori anziani per distanza percorsa può essere spiegato invece principalmente da una generale riduzione nelle abilità percettive e motorie.

Se si analizzano in maniera più approfondita il numero totale di incidenti è possibile osservare che nonostante i limiti fisici dei guidatori anziani, il loro coinvolgimento in incidenti è più molto basso di quanto ci si sarebbe aspettati considerata la loro percentuale nella popolazione. Ciò si rileva solamente quando viene preso in considerazione il numero totale di chilometri percorsi. La ragione principale è che gli anziani usano delle strategie per compensare questi limiti nella guida: semplicemente guidano di meno, solamente durante le ore a scarso traffico e su strade note. Inoltre, si servono dell'esperienza passate per gestire le situazioni difficili.

Nonostante l'esperienza non sia il fattore causale nel coinvolgimento in incidenti fra i giovani guidatori, esistono diverse importanti differenze fra tra guidatori più o meno esperti. Se si considera la distanza in chilometri percorsa annualmente come variabile rappresentative dell'esperienza, è stato mostrato da Maycock (1997) che non c'è una relazione lineare, ma piuttosto una funzione potenza di 0.25 descritta da distanza in chilometri/anno. Questo risulta dal fatto che incidenti per distanza percorsa sono più bassi nei guidatori che coprono grandi distanze.

In genere, le differenze tra guidatori esperti e meno esperti diventano particolarmente significative in situazioni molto complesse.

Mentre l'età e l'esperienza sono variabili importanti se si considera il coinvolgimento in incidenti, in psicologia sono stati presi in considerazione anche altri fattori. In

generale, sono distinti fattori di differenziazione quali le caratteristiche e lo stato del guidatore. Mentre gli stati fanno riferimento a condizioni di breve termine come fatica, le caratteristiche sono inclinazioni personali di lunga-durata quali l'intelligenza o l'essere estroverso o, di contro, introverso. Per illustrare l'importanza delle caratteristiche, la struttura del Sensation Seeking verrà descritta più in dettaglio.

Il Sensation Seeking è definito come “la ricerca di varie, nuove, complesse ed intense sensazioni

ed esperienze e la volontà di assumere un rischio fisico, sociale, legale e finanziario per il desiderio di tale esperienza” (Zuckerman, 1994).

L'aspetto interessante per la sicurezza stradale di tale approccio è che, secondo Heino et al. (1996), i sensation seekers con punteggi elevati (SSS-V, Sensation Seeking Scale) non cercano necessariamente le situazioni ad alto rischio, ma stimano le situazioni come meno rischiose rispetto a soggetti che posti nella stessa situazione di guida hanno con punteggi più bassi.

Appare chiaro in questo paragrafo, che le differenze individuali sono, in effetti, importanti cause determinanti del comportamento di guida. D'altra parte, non sono evidentemente sufficienti per descrivere la complessa natura del compito di guida.

2.5 Il compito di guida: modelli gerarchici e di errore

Un modello molto divulgato sviluppato da Michon (1985) considera la guida come un'operazione per la soluzione di un problema gerarchico, che comprende tre livelli diversi. Questi livelli possono essere divisi in base ai requisiti dello specifico compito su ogni livello, l'intervallo di tempo necessario per eseguirli, ed il processo conoscitivo sviluppato. Il modello di compito gerarchico di Michon trova un suo equivalente nella distinzione tra prestazioni differenti o livelli di comportamento proposti da Rasmussen (1986). Rasmussen distinse, in generale, fra livelli basati sulla conoscenza, basati sulle regole e basati sulle abilità nello svolgere un compito. Entrambi i modelli possono essere combinati come proposto da Donges (1982) (Figura 2-3).

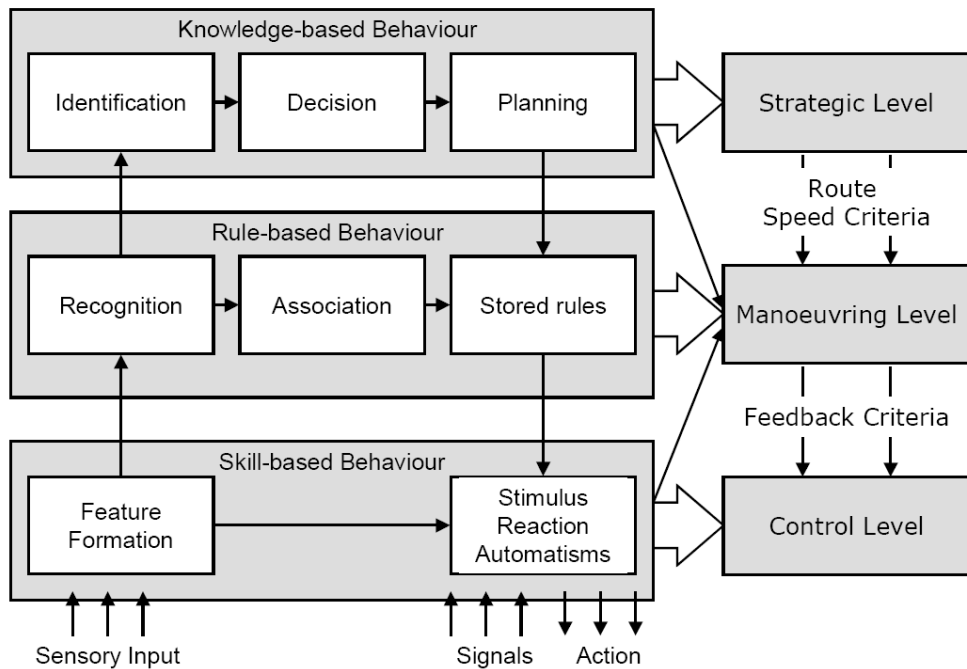


Figura 2-3 : Combinazione di livelli di performance (Rasmussen) e del modello gerarchico (Michon) secondo Donges.

La sezione sinistra in Figura 2-3 rappresenta i diversi livelli di compito proposti da Rasmussen, mentre la sezione a destra rappresenta il modello da Michon. Il livello strategico o di navigazione comprende tutti i processi riguardo a decisioni di viaggio: come e dove andare, quando andare, che strade prendere e che tipo di trasporto per usare. Decisioni su questo livello sono poco frequenti e di maggiore durata, se paragonate agli altri livelli. A causa della loro natura sono trattate in maniera più consapevole, ma diventano abitudini nel caso di costanti ripetizione. Le decisioni a livello di manovra sono prese in pochi secondi. Manovre tipiche sono il sorpasso, la svolta, o il gap acceptance. Compiti su questo livello sono eseguiti in modo da come soddisfare il set di requisiti sul livello strategico date le circostanze della situazione. Il comportamento sul livello di manovra è perciò influenzato da variabili motivazionali e situazionali. Altri termini usati per descrivere il livello di manovra sono livello tattico o livello di guida. Le decisioni sul livello di controllo sono prese piuttosto automaticamente all'interno di un intervallo di tempo molto piccolo come reazioni di risposta ad uno stimolo. Compiti tipici su questo livello sono tenere la corsia e cambiare la marcia. Questi sono entrambi eseguiti senza l'elaborazione di informazioni consapevoli da parte dei guidatori esperti. Per questo livello vengono utilizzati indifferentemente anche i termini operativo o livello di stabilizzazione.

I modelli gerarchici presentati, in primo luogo forniscono una netta divisione del

compito del guidatore in due differenti sotto-compiti ed inoltre sottolineano l'importanza del contesto comportamentale. Essi quindi sono un'utile struttura per ulteriori ricerche e forniscono le prime considerazioni in merito al progetto di una strada; inoltre, contribuiscono a spiegare il comportamento scorretto del guidatore e influenzano la classificazione degli errori.

Il sistema del modello di errore generico (GEMS) distingue tra processi che precedono l'individuazione di un problema (livello basato sulla capacità) ed i processi successivi all'individuazione di un problema (livello basato sulle regole e sulla conoscenza).

I guidatori, generalmente, si basano su sequenze di comportamento a livello basato sulle capacità piuttosto basarsi su processi di più alto livello. Questo è perché questi ultimi richiedono più risorse. Analogamente, comportamenti basati sulle regole saranno preferiti a comportamenti basati sulla conoscenza, infatti "... agli uomini, se gli viene data una scelta, preferiranno agire come ripercorritori di modelli specifici invece di provare a calcolare o ottimizzare" (Reason, 1990).

Reason (1990) dedusse la sua classificazione degli errori dal modello GEMS.

Per quanto riguarda il livello basato sulla capacità Reason distingue tra sviste ed errori. Mentre le sviste sono errori compiuti nell'esecuzione di un compito, gli "errori" sono errori a causa di problemi di memoria. Questi tipi di errori capitano quando non è necessaria nessuna soluzione consapevole dei problemi, come nel caso dei compiti di routine in ambienti noti. Tipici processi cognitivi coinvolti sono i cali di attenzione o memoria. Un'accumulazione di sviste o errori su una particolare sezione di strada potrebbe volere dire che l'attenzione del guidatore è distolta da informazioni non rilevanti ai lati della strada.

Errori a livello basato sulle regole o sulla conoscenza si hanno quando si applica una risoluzione cosciente dei problemi ed è intrapresa un'azione, o per problemi noti (livello basato sulle regole) o per problemi nuovi dove le strategie devono prima essere sviluppate (livello basato sulla conoscenza). Per quanto riguarda il livello basato sulle regole, la cattiva applicazione di una regola può essere distinta dall'applicazione di una cattiva regola. Errori sul livello basato sulla conoscenza possono assumere una grande varietà di forme.

Rispetto a Rasmussen, Reason aggiunge anche le violazioni nella sua tassonomia, anche se queste non sono classificate come errore. Per distinguere le violazioni dagli errori deve essere preso in considerazione anche il contesto sociale nel quale accadono

(Reason et al. 1990).

Sono stati fatti molti studi per dimostrare la rilevanza della tassonomia di Reason nell'ambito della sicurezza stradale, soprattutto introducendo il Questionario sul Comportamento del Guidatore (DQB, Aberg et Rimmö, 1998, Parker et al., 1995, Reason et al. 1990). Nonostante risultati promettenti, si deve notare che l'applicazione del DBQ è utile soprattutto per predire i errori di guida, le violazioni, o il coinvolgimento in incidente di un individuo sulla base del suo comportamento passato.

2.6 Elaborazione delle informazioni e motivazione

Come affermato in terzo paragrafo, i modelli funzionali suppongono interazioni complesse fra componenti differenti. Si possono distinguere due gruppi: modelli di elaborazione delle informazioni e modelli motivazionali. La percezione può essere vista come parte dell'elaborazione delle informazioni. L'elaborazione delle informazioni essenzialmente consiste di:

- selezione delle informazioni rilevanti
- elaborazione delle informazioni
- azione.

Nell'ambito dell'elaborazione delle informazioni e della percezione, si sono sviluppati molti processi, sistemi e contenuti che hanno caratteristiche diverse.

Saranno presentati due modelli sviluppati da Rumar e Gibson, rispettivamente, come rappresentativi del modello di elaborazione delle informazioni e di quello percettivo. Come il modello di Rumar enfatizzi i processi top-down, le aspettative e i modelli mentali sarà discusso in seguito. Questi hanno seguito dalla consapevolezza della situazione ed dall'attenzione. La teoria della percezione diretta, sviluppata da Gibson, evidenzia l'importanza delle caratteristiche dell'ambiente e l'influenza di alcune costanti ecologiche¹ come il tempo di collisione (TTC) e il tempo di attraversamento della linea di mezzera (TLC). Entrambi sono importanti nel comportamento di guida e saranno trattati a proposito della percezione della velocità e della distanza. In ogni caso, né la teoria di Gibson, né i processi sviluppati per la percezione della velocità e della distanza, possono essere compresi senza la conoscenza delle caratteristiche dell'occhio.

¹ Strutture che restano invariate nonostante talune trasformazioni causate dall'uomo e che pertanto potrebbero servire a precisare risorse ambientali persistenti (Reed, 1996)

2.7 Elaborazione delle informazioni e percezione

2.7.1 Il modello cognitivo sviluppato da Rumar

I modelli di elaborazione delle informazioni del compito del guidatore appartengono ai modelli funzionali e come questi implicano interazioni tra componenti differenti (Michon, 1985). L'elaborazione dell'informazione consiste di differenti fasi con all'inizio la percezione delle informazioni esterne o interne. Perciò questi modelli sono chiamati modelli percettivi.

Nel suo modello cognitivo del comportamento del guidatore, (Rumar, 1985) descrive i processi coinvolti nell'acquisizione e nell'elaborazione delle informazioni. La motivazione e la necessità di concentrarsi sulla percezione e sui processi cognitivi coinvolti è stato dedotta dalle ricerche di Treat et al. (1977). Un risultato di questo studio era che gli errori di riconoscimento (percezione e comprensione) e gli errori di decisione erano i fattori maggiormente rilevanti nell'individuazione delle cause di incidente.

La percezione essenzialmente è guidata da due processi: il processo top-down della percezione e il decision making. L'elaborazione top-down significa ipotesi di ricerca attiva controllata, guidata dall'attenzione, dall'esperienza, dalla motivazione e dalle aspettative (vedi capitolo seguente). I tre meccanismi di filtro nella percezione come descritto di Rumar saranno spiegati in seguito.

Durante la sua carriera di guida, il guidatore sperimenta diverse situazioni. Le esperienze passate costituiscono le aspettative quando si presenta una nuova situazione. Più la nuova situazione è simile a quella passata più forti saranno queste aspettative. Queste aspettative a loro volta aiutano il guidatore a rivolgere l'attenzione nei posti dove egli ritiene di trovare le informazioni rilevanti. A causa della sua natura, il processo top-down richiede più tempo di un processo bottom-up, ma permette al guidatore di cercare attivamente e di dedurre le informazioni mancanti. Questo vantaggio potrebbe diventare uno svantaggioso se la situazione in questione fosse male interpretata, es., sulla base di aspettative improprie. È ovvio che un'attenzione forviata, a causa di aspettative sbagliate, potrebbe causare cattive decisioni, che sfocerebbero in comportamenti inappropriati. Rumar riassunse questi processi come filtri cognitivi.

D'altra parte la percezione è un processo bottom-up, il che vuol dire, tra l'altro, che

anche gli stimoli ambientali influenzano la guida. Se l'attenzione sarà attratta da uno stimolo o meno dipende dalle caratteristiche fisiche di quest'ultimo. Essendo il punto focale dell'attenzione molto stretto, a causa delle caratteristiche dell'occhio, gli stimoli saranno prima percepiti dall'attenzione periferica. L'attenzione periferica è catturata più facilmente dagli oggetti mobili. Oggetti immobili con bassi contrasti luminosi saranno difficilmente catturati dalla vista umana. Questi difetti furono classificati da Rumar come filtri percettivi.

Infine, anche quando l'attenzione è concentrata su oggetti importanti, questi potrebbero non essere visti, essendo fisicamente coperti da altri oggetti. Questo è ciò che Rumar chiama filtro fisico.

Sia il processo top-down che quello bottom-up interagiscono e sono necessari e importanti per il guidatore. Ad esempio la scelta della velocità da parte di un guidatore quando entra in un tratto di strada ignoto si presume sia basata su un processo top-down, mentre i piccoli adattamenti che durante guida, la maggior parte delle volte, sono basati su processi bottom-up.

A causa della sua importanza per la sicurezza stradale, il ruolo delle aspettative è collegato a modelli mentali che saranno spiegati nel dettaglio nel prossimo paragrafo.

2.7.2 Aspettative e modelli mentali

Nel paragrafo precedente si è discusso dell'importanza dei processi top-down nella percezione. I processi top-down sono rappresentati essenzialmente dalle "aspettative". Le aspettative derivano da rappresentazioni di alto livello della realtà nella memoria. Da cosa tali rappresentazioni sono attivate dipende da rappresentazioni di ordine più alte della realtà in memoria. Quale rappresentazione sia attiva dipende dalla somiglianza percepita tra la situazione attuale e le caratteristiche della situazione immagazzinate dalla memoria. Durante lo sviluppo della scienza psicologica, a queste rappresentazioni di alto livello sono stati dati i nomi di schema, script e modelli mentali. Questi concetti saranno prima presentati e poi si discuterà la loro importanza per la sicurezza stradale.

La struttura dello schema fu originalmente introdotta da Barlett nel 1932. "gli schemi sono strutture di conoscenza. In particolare, sono raccolte organizzate di informazioni che sono immagazzinate nella memoria a lungo termine, a cui si può accedere

rapidamente. Gli schemi ci guidano nella percezione del mondo con cui interagiamo; ci dicono ciò che è importante e ciò che merita la nostra attenzione; servono come base per la memoria di ricerca e ricostruirla” (Neuschatz et al., 2002). Gli schemi aiutano a dirigere le nostre attenzioni ed azioni esplorative attraverso le informazioni considerate importanti. Gli schemi sono modificati da informazioni semplificate, ad esempio dalle informazioni degli oggetti percepiti, risultanti da azioni esplorative

La struttura originale dello schema è stata estesa alla catena di eventi nel tempo e chiamata script da Schank et Abelson (1997) “gli schemi dell’evento, o scripts, sono definiti come sequenze organizzate a livello spaziale e temporale, che specificano le azioni, gli attori, e propongono il più fedelmente ciò che accade in ogni data istanza di un evento” (Hudson et Fivush, 1992). Con l'uso di script, le informazioni mancanti possono essere dedotte, finché la situazione è abbastanza proto-tipica per un valido script che sia stato sviluppato da situazioni simili precedenti. Associati agli script sono i concetti di abitudini e routine. Aarts et Dijksterhuis (2000) definiscono le abitudini come “le associazioni tra le mete (...)e le risposte comportamentali (...)” e, inoltre, come “automatiche risposte di comportamento”. Mentre le abitudini sono viste come costanti ripetizioni, il termine routine è usato in situazioni di decisione come la soluzione dominante e così non conta necessariamente su ripetizione. Ciononostante, le abitudini potrebbero essere la ragione per cui la routine viene attivata (Betsch, 2005).

Il termine modello mentale è divenuto popolare in modo crescente nell’interazione uomo-macchina, anche se originalmente era usato nelle scienze fisiche per descrivere lo svilupparsi dei processi di teorie. (Brewer, 2002). Il termine fu utilizzato successivamente nella psicologia dell’educazione e dello sviluppo (Derry, 1996) e soprattutto nel campo della comprensione ragionata (Johnson-Laird, 1983). Dipendendo dal loro campo di interesse, le definizioni enfatizzano aspetti diversi. Nel sommare l’uso comune di questi approcci, Brewer (2002) dà la seguente definizione: “un modello mentale è una forma di rappresentazione mentale nelle sfere meccanico-causali che permettono la spiegazione per queste sfere. (...) Le informazioni nel modello mentale hanno una relazione analogica col mondo esterno: la struttura della rappresentazione mentale corrisponde alla struttura del mondo. Questa relazione analogica permette ai modelli mentali di fare predizioni corrette su eventi nel mondo”. Comunque, “corrette” non equivale a “sempre corrette” come sarà mostrato in seguito. Riguardo il posto della memoria in cui i modelli mentali sono situati (o sviluppati), Brewer (2002) affermò che il termine è applicato sia alla conoscenza della memoria lungo termine, sia ai processi

temporanei, specifici della memoria a breve termine. Una definizione applicata nel human factor è data da Wilson et Rutherford (1989): "... un modello mentale è una rappresentazione formata da un utente di un sistema e/o di un compito, basato sia su precedenti esperienze sia su osservazioni correnti, che fornisce la maggior parte (se non tutto) ciò che è stato compreso del susseguente sistema e di conseguenza detta il livello di prestazione del compito”

Tutte queste le rappresentazioni interne (termini generici per gli schemi, script, le abitudini, routine e modelli mentali) aiutano ad aumentare l'efficienza e l'efficacia nel comportamento umano. Le ragioni sono molteplici: prima di tutto, esse sono semplificate rispetto alla realtà; secondo, il loro uso è automatico invece che consapevole e perciò ha bisogno di meno risorse nella memoria lavorativa; infine guidano l'attenzione verso stimoli importanti e perciò richiedono meno attenzione.

Nonostante il loro valore indubbio, le rappresentazioni interne sono la causa fondamentale di azioni o assunzioni difettose. Il loro ruolo nella produzione di un errore è largamente riconosciuto (Hacker, 2005; D. A. Norman, 1981; Reason, 1990). Infatti, sono responsabili di un'insieme di errori, soprattutto quelli basati sulle capacità (sviste e errori) e sul livello basato sulle regole (errori basati sulle regole) (vedi anche paragrafo 5). Come già affermato l'attivazione di una specifica rappresentazione interna dipende dalla sua somiglianza con l'ambiente percepito. Dato che gli stimoli nell'ambiente sono interpretati male sarà attivata una rappresentazione interna sbagliata. A causa del loro ulteriore ruolo nel determinare dove dirigere attenzione e che azioni compiere dopo, gli errori sono quasi inevitabili. Un'altra possibilità è che proprio la rappresentazione attivata sia difettosa, il che darà comunque luogo ad errori.

La misura delle rappresentazioni interne è necessariamente complessa e dispendiosa in termini di tempo, essendo coinvolti i processi mentali di alto livello, che non sono necessariamente consapevoli. Olson et Biolsi (1991) distinguono tra metodi diretti ed indiretti. I metodi diretti sono basati principalmente su risposta verbali del soggetto. Questi includono diverse tecniche di intervista, protocolli di pensieri ad alta voce e l'osservazione della performance del compito che è interrotto nei punti critici dalle domande dell'osservatore. I metodi indiretti sono basati principalmente sul risultato di giudizi di prossimità tra elementi considerati importanti. Il comportamento risultante può essere confrontato nelle diverse situazioni, che sono causa dell'attivazione dei diversi modelli mentali. I diversi comportamenti possono essere attribuiti a modelli mentali diversi.

L'applicazione di queste tecniche permette di confrontare modelli mentali di strade diverse e diversi utenti. Il comportamento associato a questi modelli potrebbe essere esteso, anche se non su un livello assoluto, ad altre categorie di strada.

Come le aspettative guidano il comportamento ed allo stesso tempo offrono la base per gli incidenti è stato evidenziato in un studio da Räsänen e Summala (2000). Essi evidenziarono come i guidatori rivolgono la loro attenzione alla sinistra (nei paesi con la guida destra) quando si immettono su una strada dove si aspettano traffico motorizzato. Questo comportamento ha come risultato che biciclette che si avvicinano dalla destra non sono viste, e ciò potrebbe dar luogo ad incidenti.

2.7.3 L'attenzione

Poiché le risorse sono limitate ed, inoltre, l'ambiente contiene innumerevoli stimoli, le risorse devono essere assegnate agli stimoli o alle informazioni ritenute importanti.

Questa allocazione di risorse è descritta dal costrutto dell'attenzione. Luck et Vecera (2002) così definiscono l'attenzione come “una restrizione dei processi cognitivi ad un sottoinsieme dell'informazioni disponibili per migliorare la velocità o l'accuratezza dei processi stessi”. Perciò l'attenzione potrebbe essere considerata il parametro intermedio tra schema ed esplorazione.

Donald Broadbent (1958) fu il primo a parlare della nozione di quantità limitata di attenzione che denominò “la teoria a collo di bottiglia dell'attenzione”. Broadbent assunse che l'informazione proveniente dall'ambiente venisse filtrata allo stadio iniziale prima ancora che questa venga processata passando da un solo, limitato canale. Gli stimoli sono filtrati in base alla valenza delle loro caratteristiche fisiche. Malgrado alcune prove a sostegno della teoria del canale singolo, Allport et Al.(1972) dimostrarono che in maniera simile ai modelli di risorsa multipla sembrano esserci canali multipli per la presa di informazioni o per l'attenzione.

L'attenzione può essere richiamata da un stimolo in maniera volontaria (top-down) o involontaria (down-top) a causa delle caratteristiche dello stimolo. L'importanza dei due processi si può assumere come direttamente dipendente dalle caratteristiche degli stimoli e dell'ambiente (Kastner & Ungerleider, 2000).

Una struttura che incorpora modelli mentali ed aspettative, da una parte, e

l'attenzione, dall'altra, è la consapevolezza della situazione. Questo costrutto sarà descritto nel paragrafo seguente.

2.7.4 Consapevolezza della situazione

Le rappresentazioni interne aiutano a comprendere la situazione corrente in un maniera efficiente. Esse inoltre guidano l'attenzione alla ricerca di informazioni considerate come rilevanti. Un concetto molto simile correlato alle rappresentazioni interne ed all'attenzione è la consapevolezza della situazione. Questa potrebbe essere definita semplicemente come “conoscenza di ciò che sta accadendo” (Endsley, 1995b). Tale definizione è fortemente operativa. Una definizione più elaborata è stata perciò proposta da Endsley (1988, 1995a) e recita come segue: “La consapevolezza della situazione è la percezione degli elementi nell'ambiente all'interno di un estensione di tempo e di spazio, la comprensione del loro significato, e la proiezione di loro status nel prossimo futuro”. I tre stadi di consapevolezza della situazione (la percezione, comprensione, proiezione nel futuro) si suppone che siano organizzati gerarchicamente, cioè, i livelli di ordine superiore non sono possibili senza i precedenti livelli inferiori. Come appare chiaro dalla definizione di Endsley, la consapevolezza della situazione coinvolge sia un componente statico che uno dinamico. Il componente statico rappresenta lo stato di conoscenza ed i modelli mentali ad un certo istante e è definito come “prodotto”. Il componente dinamico coinvolge le attività mentali in relazione alla costante aggiornamento delle componenti statici e della loro proiezione nel futuro. Questo componente dinamico è chiamato “processo”. Adams et Al. (1995) e Smith e Hancock (1995) indicano che la consapevolezza della situazione è sia un prodotto che un processo. La consapevolezza della situazione sembra essere “critica nell'effettiva presa di decisione e nella performance umana nei sistemi dinamici” (Endsley e Kiris, 1995). L'attenzione è la risorsa critica o collo di bottiglia in tutti gli stadi della consapevolezza della situazione. Nonostante relazioni tra consapevolezza della situazione e carico di lavoro, et Kiris (1995) dimostrarono che i due concetti sono indipendenti.

Riguardo al modo di misurare la consapevolezza della situazione, Gugerty (1997) distingue tra misure dirette ed indirette. Misure dirette consistono principalmente nel rispondere a domande relative ai tre livelli sopra menzionati di consapevolezza della situazione. Endsley et Kiris (1995) usarono domande diverse per stimare livello uno e

due della consapevolezza della situazione. Sebbene in questo studio le domande siano state fatte alla fine di ogni prova sperimentale, è possibile fare le domande durante lo svolgimento della prova. Tuttavia, la situazione dovrebbe essere interrotta e ciò è possibile solamente in un ambiente simulato. Questa tecnica è chiamata “Situation Awareness Global Assessment Technique” (SAGAT) ed è descritta in dettaglio da Endsley (1995). Misure indirette includono le performance in un compito predefinito. Ovviamente, lo scopo di questo compito deve essere reso esplicito per confrontare la consapevolezza della situazione fra diversi compiti o soggetti.

2.8 Modelli motivazionali

Mentre i modelli sopra menzionati sulla percezione mettono in evidenza le caratteristiche comuni del guidatore, i seguenti modelli motivazionali considerano le interazioni tra i meccanismi generali e le differenze individuali. Sebbene in molti casi i modelli motivazionali sono equivalenti ai modelli di rischio, i recenti approcci vedono l'omeostasi del carico di lavoro come il più importante background motivazionale (Fuller, 2005). Infatti, Rothengatter (1988) indicò per primo, che il rischio è solo un fattore da collegare alla scelta di un certo livello di velocità. Le altre variabili nel suo studio (determinate da analisi fattoriale dei vari articoli) erano “il piacere di guidare”, “il tempo di guida” e “i costi”.

Comunque, l'assunzione unificante dei modelli motivazionali è che la guida è un compito *self-paced*.. La decisione per un certo “passo” può essere vista come essere influenzata allo stesso tempo da fattori individuali, motivazionali e situazionali (Ranney, 1994). Un concetto, strettamente collegato ai modelli motivazionali, è l'adattamento comportamentale. Comunque, l'adattamento comportamentale è piuttosto un termine utilizzato per indicare, più che una teoria in se stessa, le conseguenze comportamentali assunte come il risultato di un meccanismo descritto in teorie motivazionali.

I capitoli seguenti tratteranno di diversi modelli di rischio e di adattamento comportamentale e introdurranno il modello di omeostasi del carico di lavoro proposto da Fuller (2005).

2.8.1 Modelli di rischio

Un concetto semplice ma importante è la distinzione fra rischio soggettivo ed oggettivo. Klebelsberg (1982) definisce rischio oggettivo come la probabilità misurabile di avere un incidente, mentre rischio soggettivo è quello valutato dal conducente attraverso la percezione dell'ambiente stradale. Secondo Klebelsberg, le situazioni sono tanto più pericolose quanto più il rischio soggettivo è minore rispetto al rischio oggettivo. Questo è perché chi guida corregge il suo comportamento in relazione al rischio soggettivo percepito, non a quello oggettivo.

Il concetto di rischio soggettivo come meccanismo rilevante per il comportamento di guida è stato ulteriore sviluppato da Wilde (1988). Originariamente indicata con il termine di teoria dell'omeostasi del rischio (RHT), venne in seguito chiamata teoria di rischio percepito. In breve, la teoria stabilisce che il tasso di incidenti per unità di tempo si mantiene costante nonostante miglioramenti oggettivi quando i guidatori correggono i loro comportamenti così che il loro livello di rischio percepito rimane più o meno costante.

In pratica, questo significa che qualsiasi miglioramento in termini di sicurezza (sia esso sulla strada o sui veicoli), a lungo andare, non darà luogo ad una riduzione dell'incidentalità quando questo sia riferito al tempo di viaggio. Non sorprende che la teoria sia stata controversamente dibattuta. Per controversie riguardo alla omeostasi del rischio si può far riferimento a McKenna (1988) o Evans (1986). Comunque, Janssen et Tenking (1988) osservano, che piuttosto che criticare la RHT, sarebbe bene evidenziarne il positivo impatto nella comprensione del comportamento di guida. Elvik & Vaa (2004) sommano i difetti della teoria ma, alla stessa tempo, sono d'accordo con gli altri ricercatori sul fatto che la teoria abbia identificato importanti meccanismi che dovrebbero essere presi in considerazione quando si spiegano meccanismi che causano gli incidenti.

Un altro modello che sostiene che il rischio sia un importante parametro nel comportamento di guida è stato proposto da Näätänen e Summala (1976). A differenza di Wilde, Näätänen e Summala sostengono che i guidatori si sforzano di minimizzare il rischio soggettivo così che questo è vicino a zero. Si crede che gli incidenti si verifichino a causa di una sottostima generale del rischio, che è ancora causato da difetti di percezione, e di una sovrastima delle proprie abilità.

Due cose importanti devono essere notate: innanzitutto, l'ammontare di rischio soggettivo si suppone sia ancora il risultato di un calcolo interno dell'utilità soggettiva attesa (SEU); secondo, l'ammontare del rischio accettato cambia in funzione di questo calcolo interno. Ciò non è dovuto della probabilità attesa di una situazione pericolosa ma ai cambiamenti nei costi attesi del comportamento corrente. Ogni qualvolta il rischio soggettivo eccede un livello accettato, il così detto monitor di rischio soggettivo viene attivato e il comportamento viene cambiato in un modo da ridurre il rischio soggettivo e portarlo sotto il livello accettato.

Il rischio ha effetto sul comportamento solamente quando i margini di sicurezza si portano al di sotto di un livello accettato.

Nonostante ogni aspetto di questa teoria sia intellegibile, Fuller (2005) indica che la sola distinzione tra rischio oggettivo e soggettivo non può spiegare il comportamento del guidatore. La ragione è che il rischio soggettivo è la conseguenza di un processo conoscitivo consapevole per valutare il rischio, che è completamente diverso dalla sensazione del rischio che lui definisce come risposta emotiva ad una minaccia. Poiché la stima del rischio soggettivo si suppone non cambi finché una certa soglia non è stata raggiunta e, quindi, non è possibile spiegare le differenze nel comportamento al di sotto del livello di soglia, la sensazione del rischio è considerata come continua e dovrebbe perciò spiegare il comportamento anche al di sotto del livello di soglia. Basandosi sulla critica dei modelli di rischio, Fuller (2005) sviluppò una teoria basata sulla domanda che verrà spiegata nel paragrafo in cui sono descritti i modelli di carico di lavoro.

2.8.2 Adattamento comportamentale

Tra i meccanismi per spiegare la RHT vi è il concetto dell'adattamento comportamentale. Nel 1990, l'OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) ha definito l'adattamento comportamentale come: "... quei comportamenti, che si possono verificare in seguito all'introduzione di cambiamenti nel sistema strada-veicolo-utente e che non sono stati destinati/intesi dagli iniziatori del cambiamento; gli adattamenti comportamentali si realizzano quando gli utenti della strada rispondono ai cambiamenti del sistema di trasporto stradale in modo tale che le loro necessità personali siano viste come un risultato, essi creano un continuo di effetti

che variano da un aumento positivo in sicurezza ad un calo in sicurezza“.

Diversi studi che in merito all’adattamento comportamentale si possono trovare nel rapporto dell’OECD (1990). Se la conseguenza netta è positiva o negativo dipende dall’ammontare dei fattori non intenzionali dovuti all’adattamento comportamentale come mostrato in Figura 2-4

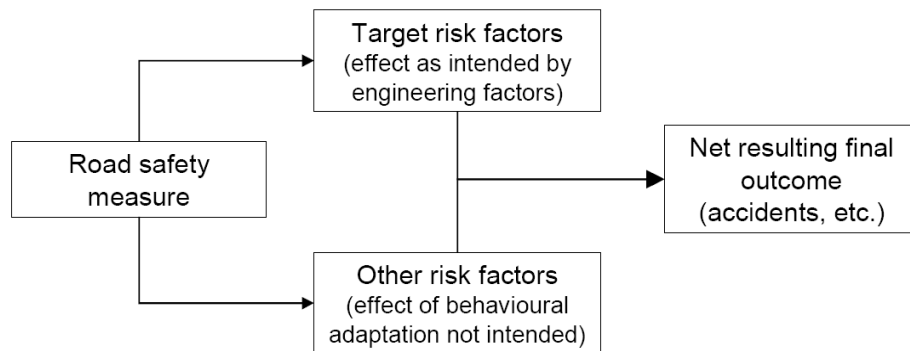


Figura 2-4 : Adattamento comportamentale:conseguenza finale risultate per la sicurezza.

Si potrebbe arguire come per l’RHT che l’adattamento comportamentale implica che le sole misure ingegneristiche non darebbero luogo ad una riduzione degli incidenti. Infatti, ci sono pubblicazioni che sostengono questa assunto. Ad esempio confrontando i dati relativi ad un periodo di 14 anni (1984-1987) di 50 stati americani, è stato trovato che la tendenza al ribasso in termini di mortalità è dovuta a fattori demografici, all’aumento della sicurezza passiva e al progresso in campo medico (Noland, 2003). Migliorie infrastrutturali talvolta hanno ottenuto anche effetti negativi come suggerito dall’adattamento comportamentale. L’infrastruttura include chilometri totali di corsie, numero medio di corsie, larghezza della corsia e percentuale di ogni classe di strada. Curvatura, larghezza della banchina, separazione delle corsie e presenza di pericoli a bordo strada non sono inclusi ma si presume implicitamente che strade più nuove sono costruite in un modo più sicuro. Noland (2003) conclude che “I risultati confutano fortemente l’ipotesi che migliorie infrastrutturali siano state efficaci nella riduzione della mortalità totale e dei danni.”.

Rothengatter (2002) afferma comunque, che l’adattamento comportamentale, in pratica, si verifica ma che gli effetti non sono così elevati da annullare gli impatti positivi delle misure di sicurezza. Al contrario, Dulisse (1997) indica che gli effetti dell’adattamento comportamentale sono qualche volta anche sottovalutati a causa di un difetto metodologico (ad esempio: inclusione di conducenti che allacciano la cintura di

sicurezza anche prima che fosse obbligatoria).

Le diverse ricerche riguardo l'ammontare dell'adattamento comportamentale possono essere spiegate da fattori multipli che influenzano il verificarsi dell'adattamento comportamentale. Questi fattori sono stati riassunti in un modello sviluppato da Weller & Schlag (2004) (Figura 2-5).

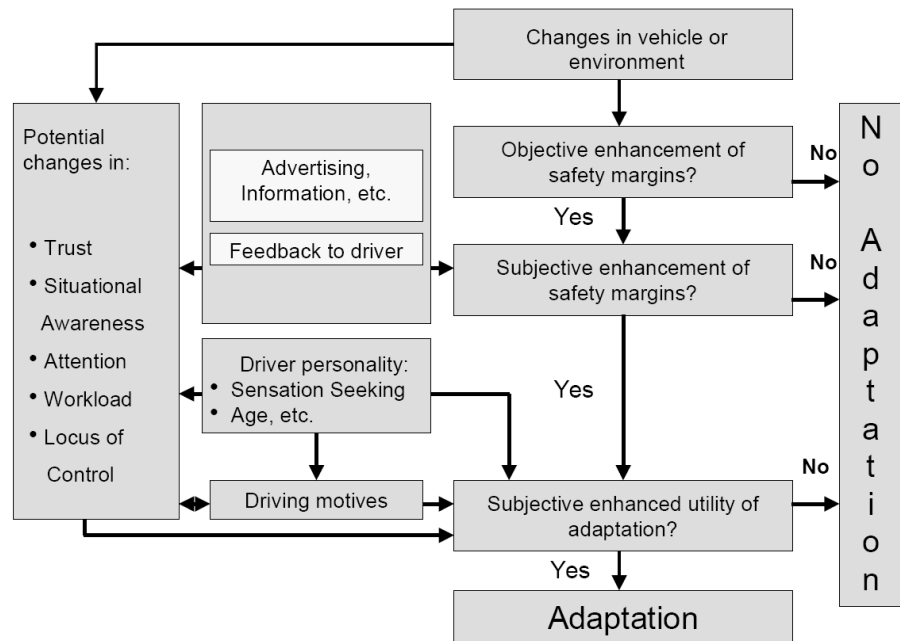


Figura 2-5 : Modello di elaborazione dell'adattamento comportamentale (Weller et Schlag, 2004).

Secondo questo modello, la misura implementata deve, in primo luogo, offrire la possibilità oggettiva di cambiare un comportamento in un modo pericoloso e, in secondo, luogo il conducente deve percepire questa possibilità. Il cambio è percepito se la misura è comunicata attraverso i mezzi di comunicazione o annunci pubblicitari, da una parte, e dal ritorno diretto al conducente dall'altra. Per dare luogo ad un adattamento, il cambiamento nel comportamento deve, inoltre, essere percepito come positivo per il guidatore (massimizzazione dell'utilità).

Questa funzione è diversa tra gruppi di guidatori diversi (e.g., gruppi di età) come è diversa all'interno dello stesso gruppo di guidatori (e.g., guidatore frettoloso o meno). Indipendente da questa catena di azione (miglioramento oggettivo, miglioramento soggettivo massimizzazione dell'utilità), c'è un secondo percorso che conduce all'adattamento, vale a dire cambio diretto di autentiche variabili psicologiche. Questi cambiamenti sono una diretta conseguenza dei cambiamenti nell'ambiente (o nel veicolo) ed i successivi cambiamenti nella natura del compito di guida. Quando il

compito di guida diviene più facile in seguito a variazioni nell'allineamento (rettilineo invece di curva), è probabile che il carico di lavoro decresca ed che, di conseguenza, la velocità aumenti. In effetti, il carico di lavoro sembra ricoprire la stessa importanza del rischio per quanto riguarda la spiegazione del comportamento di guida e verrà presentato nel paragrafo seguente.

2.8.3 Modello di carico di lavoro

Il carico di lavoro ha una lunga tradizione specialmente in lavori di psicologia (Hacker, 2005).

Il carico di lavoro potrebbe semplicemente essere definito come “il risultato di reazione a una domanda” (de Waard, 1996). Questa definizione permette di includere tutte le tipologie di carico di lavoro, senza alcuna restrizione nei processi coinvolti. Quando si parla di sicurezza stradale vanno distinti i seguenti aspetti del carico di lavoro:

- carico di lavoro mentale;
- carico di lavoro visuale;
- carico di lavoro fisico.

Riguardo alla guida, l'aspetto più importante è il carico di lavoro visuale.

ISO 10075-1 (1991) definisce lo *strain* mentale con lo stesso identico significato del carico di lavoro mentale, mentre la richiesta mentale stata chiamata *stress* mentale. Mentale, in questo caso, include tutti i processi cognitivi, informativi ed emotivi dell'esperienza e del comportamento umano e, di conseguenza, può essere applicato alle sopra-menzionate tipologie di carico di lavoro. ISO 10075-1 definisce lo stress mentale prima di definire lo sforzo mentale. *Stress* mentale/richiesta mentale è definita come: “L'insieme di tutte le influenze esterne valutabili esercitate su una persona e che lo influenzano mentalmente” (p.1). *Strain* mentale/carico di lavoro mentale è definito poi come: “L'effetto immediato (non a lungo termine) dello stress mentale vissuto dall'individuo che risente di precondizioni stabili o del momento, inclusi gli stili di risoluzione individuali”.

Le conseguenze del carico di lavoro possono essere positive o negative. Il principio generale è mostrato in Figura 2-6.

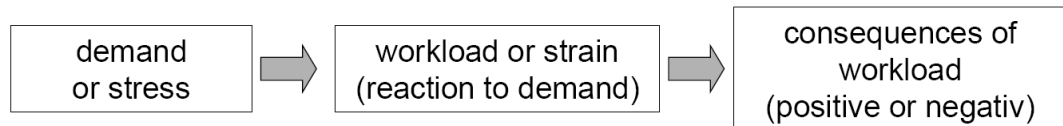


Fig. 2-6 : Relazione generale tra domanda, carico di lavoro e conseguenze.

Una ragione per definizioni concorrenti di carico di lavoro è che differenti stadi (cognitivi) e differenti meccanismi energetici sono coinvolti nell'esecuzione di un compito e tutti gli stadi e i meccanismi richiedono differenti risorse.

I differenti meccanismi energetici sono la stimolazione (*arousal*), l'attivazione e lo sforzo.

La stimolazione cambia in funzione delle caratteristiche dello stimolo. Durante un processo automatico, cambiamenti nella stimolazione portano a cambiamenti nell'attivazione senza che alcuno sforzo sia coinvolto.

L'attivazione è la preparazione fisiologica di una risposta.

Lo sforzo deve essere chiamato in causa durante un processo informativo consapevole. L'ammontare di sforzo che può essere richiesto è limitato a causa di limitate risorse. Anche se c'è un limite superiore nella quantità di risorse, chiamate capacità, è evidente che questa capacità varia a seconda delle caratteristiche del compito (Luck et Vecera, 2002; Young et Stanton, 2002). Sebbene agli inizi della ricerca sui processi mentali si presumeva che ci fosse solamente una risorsa (Kahneman, 1973), ora è riconosciuto che ci sono differenti risorse.

La più importante assunzione è che le differenti risorse sono indipendenti le une dalle altre. Minori risorse hanno in comune due compiti, minore interferenza ci sarà e maggiore sarà la capacità lasciata per il singolo compito.

Summala (1997) propone un modello gerarchico dell'adattamento comportamentale che è quasi un modello di carico di lavoro dove il tempo è la variabile centrale. È gerarchico poiché non si concentra soltanto su livelli più bassi del compito di guida ma include anche il livello di navigazione. Secondo il modello il fattore causale per le decisioni è il tempo disponibile su tutti i livelli del compito di guida. Nel livello di navigazione, i margini di tempo influenzano i mezzi di trasporto o le strade scelti per un viaggio. A livello tattico ed operativo i margini di tempo sono sinonimi di margini di sicurezza ed influenzano l'azione presa ed la velocità selezionata. Attraverso la variazione della velocità, i margini di tempo vengono cambiati, e di nuovo ciò porta ad un cambio nel carico di lavoro. A seconda della direzione del cambio di velocità il

risultato è sovra o sotto carico. Attraverso processi di feedback, i margini della sicurezza di breve periodo influenzano di nuovo le decisioni di viaggio e la velocità per raggiungere l'obiettivo. Poiché gli incidenti non sono menzionati esplicitamente nel modello, uno potrebbe presumere, che entrambi sovra e sottocarico avranno come risultato incidenti.

Crossen. et al. (2000; 2004) investigò alcune assunzioni del teoria. Poiché è stato trovato che lo sforzo (o carico di lavoro) dipende davvero dalla velocità, le performance del compito secondario non migliora in situazioni con minore domanda.

Una combinazione del RHT di Wilde (1994) e del modello gerarchico di Summala (1997) potrebbe essere vista nel modello di interfaccia compito-capacità (TCI) di Fuller (2005). Secondo Fuller, questo non è un rischio ma piuttosto omeostasi della difficoltà del compito che i conducenti cercano. Questa omeostasi è principalmente realizzata tramite l'adattamento nella velocità.

3 SIMULATORI DI GUIDA : STATO DELL'ARTE

3.1 Breve Storia

I simulatori di guida sono stati sviluppati, nel lontano 1910, allo scopo di verificare l'abilità e la competenza degli operatori di mezzi pubblici. Nei quattro decenni successivi, mockup di automobili sono state dotate di apparecchiature per testare le risposte dei guidatori a vari stimoli. In alcuni casi, venivano anche mostrate scene di guida riprodotte in maniera meccanica o immagini filmate.

In Figura 3-1 si riporta il layout della architettura di simulazione del laboratorio di ingegneria meccanica Istituto Nazionale di Ricerca in Giappone. Il sistema utilizzava una veicolo reale posizionato su attuatori servo-idraulici che garantivano i moti di rollio e beccheggio.

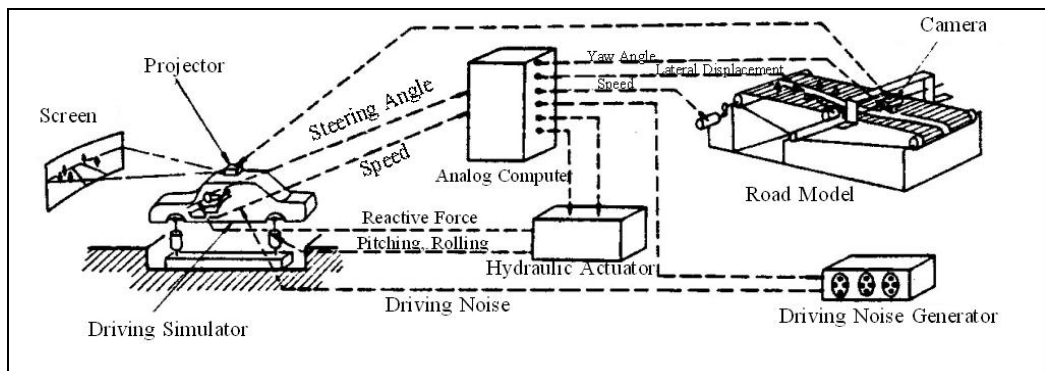


Fig. 3-1 : Configurazione simulatore Istituto Nazionale di Ricerca (Giappone).

L'ambiente visualizzato sullo schermo consisteva in immagini di un modello in scala di uno scenario di guida (Fig. 3-2). Il modello della strada (scala 1:100) era fissato su di

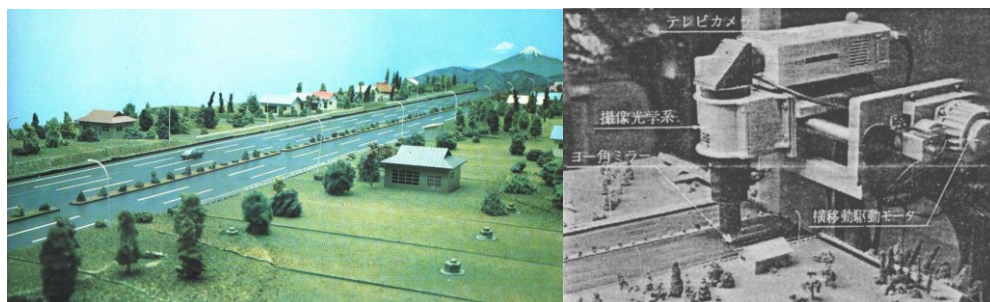


Fig. 3-2 : Modello stradale e telecamera simulatore Istituto Nazionale di Ricerca (Giappone).

una cinghia senza fine. La velocità, da 0 a 180 Km/h, variava in funzione della velocità del veicolo. La telecamera si muoveva da un lato all'altro seguendo la posizione laterale del veicolo e uno specchio alla fine della telecamera ruotava a seconda dell'angolo di imbardata del veicolo

Tuttavia, nonostante un crescente interesse, limiti tecnologici (potenza di calcolo e display video) frenavano fortemente sia la diffusione che lo sviluppo dei simulatori.

Il primo simulatore di guida basato sui sistemi attuali di realtà virtuale fu il sistema Sensorama sviluppato da Heiling nel 1962 (Fig. 3-3). Il sistema non era interattivo ma presentava oltre ad un sistema video 3D, un suono stereo, odori, vento, vibrazioni percepiti durante la guida in moto tra una strade di New York.



Fig. 3-3 : Sensorama

Alla fine degli anni 60, la tecnologia sviluppata dalla “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) per supportare i suoi programmi spaziali diede un nuovo e potente impulso al riaffermarsi delle tecniche di simulazione di guida. Diversi simulatori di guida divennero così operativi in tutto il mondo.

Nei primi anni 70, la General Motors e il Virginia Polytechnic Institute and State University realizzarono un lavoro pionieristico sulla simulazione di guida “human-in-loop”. Questo lavoro, che continuò per un ventennio, venne implementato usando il simulatore VPI-SU. Nella configurazione più avanzata, il VPI-SU presentava un modello di veicolo a 16 gradi di libertà con una piccola piattaforma mobile.

Nel 1983, la Federal Highway Administration inizia a servirsi dell’Highway Driving

Simulator (HYSIM) a McLean (Washington). Questo simulatore a base-fissa è stato utilizzato principalmente per studi sui fattori umani (strumenti di controllo del traffico, percezione dei rischi da parte del guidatore, sistemi intelligenti veicolo-infrastruttura, identificazione delle manovre pericolose). La Figura 3-4 mostra il laboratorio originale con un sistema di proiezione montato sulla cabina del veicolo.

Un simulatore di guida con un complesso sistema di movimento venne inaugurato a metà degli anni 80. Si trattava del simulatore di guida del VTI (Fig. 3-5), sviluppato dal Swedish National Road and Transport Research Institute a Linköping.

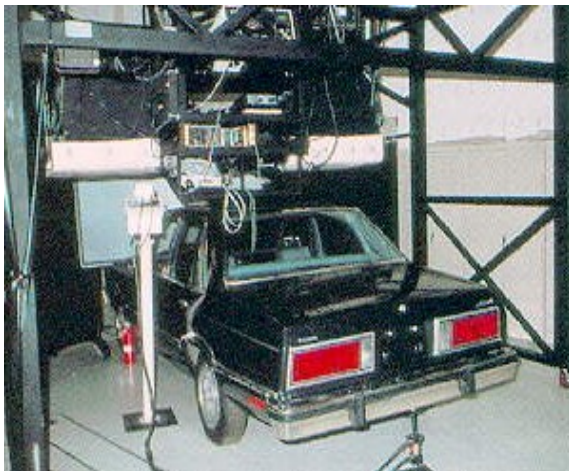


Fig. 3-4 : Il laboratorio originale HYSIM.



Fig 3-5 : Simulatore di guida del VTI.

Il simulatore era in grado di fornire un ampio movimento laterale e dei moti di rollio e di beccheggio, inoltre, una tavola vibrante simulava i moti ad alta frequenza.

Nel 1985, a Berlino, la Daimler-Benz (ora Daimler-Chrysler) rese operativo il suo simulatore a 6 gradi di libertà (Fig. 3-6). Una grande quantità di denaro venne spesa per



Fig 3-6 : Simulatore Daimler-Benz.

la sua realizzazione e, ciò, si dimostrò un ottimo investimento. Il simulatore si muoveva

con accuratezza ed agevolmente con un attrito molto basso. Nel 1994, il simulatore venne ricostruito allo scopo di realizzare lo stesso ampio movimento laterale del simulatore del VTI.

Tra la fine del 1980 e gli inizi del 1990, molte aziende automobilistiche iniziano a sviluppare propri simulatori di guida. Per esempio, il Ford Research Laboratory realizzò un simulatore di guida a base fissa, che era già pronto all'uso nel 1991. Renault e Chrysler svilupparono contemporaneamente simulatori statici. In Italia, il Centro Ricerche Fiat e la SEPA (Sistemi Elettronici Per l'Automazione) collaborano alla realizzazione di un simulatore statico dotato di un ampio campo di visione. Anche, tra le università e gli istituti di ricerca divenne comune dotarsi di simulatori di guida.

Nell'ultimo decennio, si sta assistendo alla nascita di una nuova generazione di simulatori di guida avanzati, accompagnata dal diffondersi di simulatori meno avanzati privi di sistemi di movimento. Due simulatori molto avanzati sono il NADS, sviluppato dal National Highway Traffic Safety Administration, ed il VIRTTEX al Ford Research Laboratory. Entrambi i simulatori presentano un largo dome mobile. Il NADS è caratterizzato da un enorme sistema di movimento per spostamenti laterali e longitudinali che consente le migliori performance attualmente possibili.

Tra questi sistemi ad elevate prestazioni può essere iscritto il simulatore di guida VERA, operante dal 2006 presso l'Istituto Motori del CNR di Napoli, in ragione della sua piattaforma mobile a 6 gradi di libertà e del suo ampio campo di visione.

3.2 Architettura dei simulatori di guida

I simulatori di guida possono essere suddivisi in sotto-sistemi differenti (Fig. 3-7): video, audio, ritorno di forza, modello del veicolo e scenario. Tutti questi sotto-sistemi operano insieme per creare l'illusione che il guidatore stia realmente controllando un veicolo reale.

E' fondamentale che tali sotto-sistemi siano sincronizzati (Allen et al., 1999) e che abbiano un ritardo (dall'azione del guidatore alla reazione del simulatore) minimo di 40-60 ms, altrimenti, si potrebbe perdere l'illusione e diventerebbe elevata la probabilità che il conducente avverta uno stato di malessere (mal di testa, confusione, stordimento).

Ovviamente, nel design di un simulatore è fondamentale la conoscenza del tipo di

applicazioni in cui lo stesso verrà impegnato.

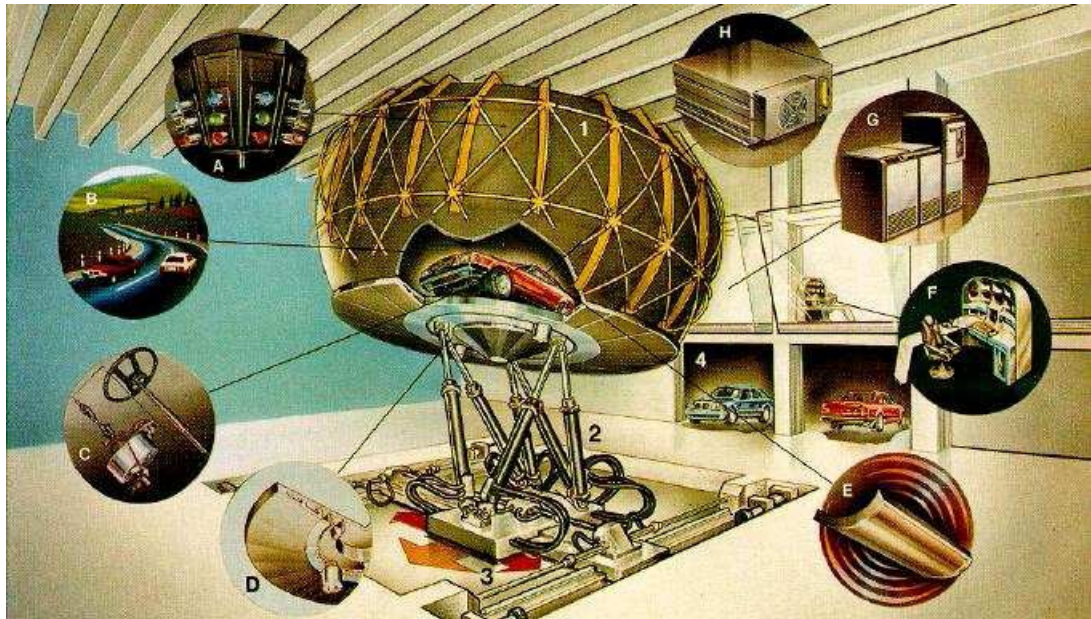


Fig. 3-7 : Struttura di un simulatore di guida avanzato (Deyo et al., 1988)

3.2.1 Sistema visivo

Il sistema visivo fornisce tutte le informazioni visive necessarie al guidatore. Condurre un veicolo è un compito essenzialmente visivo, per questo motivo, è fondamentale che le informazioni visive restituite siano le migliori possibili.

La produzione in tempo reale di immagini dotate di un buon realismo dipende da diversi fattori:

- Transport delay
- Frame rate
- Dimensione dello schermo
- Risoluzione
- Acuità visiva

I ritardi nella restituzione grafica sono spesso suddivisi in: transport delay e frame rate time. Il transport delay è il tempo intercorrente tra l'istante in cui il modello tridimensionale inizia ad essere calcolato a quello in cui l'immagine è pronta per essere visualizzata. Il ritardo totale in un simulatore di guida dovrebbe essere inferiore a circa 40-60 ms. Il frame rate time rappresenta il tempo tra la visualizzazione di due immagini

successive. Per un livello di interattività accettabile, il frame rate non dovrebbe scendere al di sotto dei 30 Hz; a 60 Hz si ottengono immagini estremamente fluide. Un ritardo grafico comporta un rischio elevato che il guidatore avverta uno stato di malessere.

La risoluzione necessaria dipende da diversi fattori, come la distanza dallo schermo. Diversi test hanno stabilito che un oggetto deve essere almeno 3 arcmin per essere intravisto da un occhio umano. Ciò significa 20 pixels per grado, quindi con uno schermo di 120° avremo 2400 pixels (su due canali/proiettori). Una risoluzione minore può essere adottata per gli schermi laterali e posteriori.

Il campo visivo diretto è di circa 60° x 30°. Alcuni esperti lo ritengono sufficiente, ma la gran parte della sensazione della velocità è situata agli estremi di tale campo di visione (Törnros et al. 1997); ciò significa che è necessario uno schermo di almeno 120° x 30°. Per creare uno schermo di tali dimensioni, sono necessari un numero elevato di proiettori.

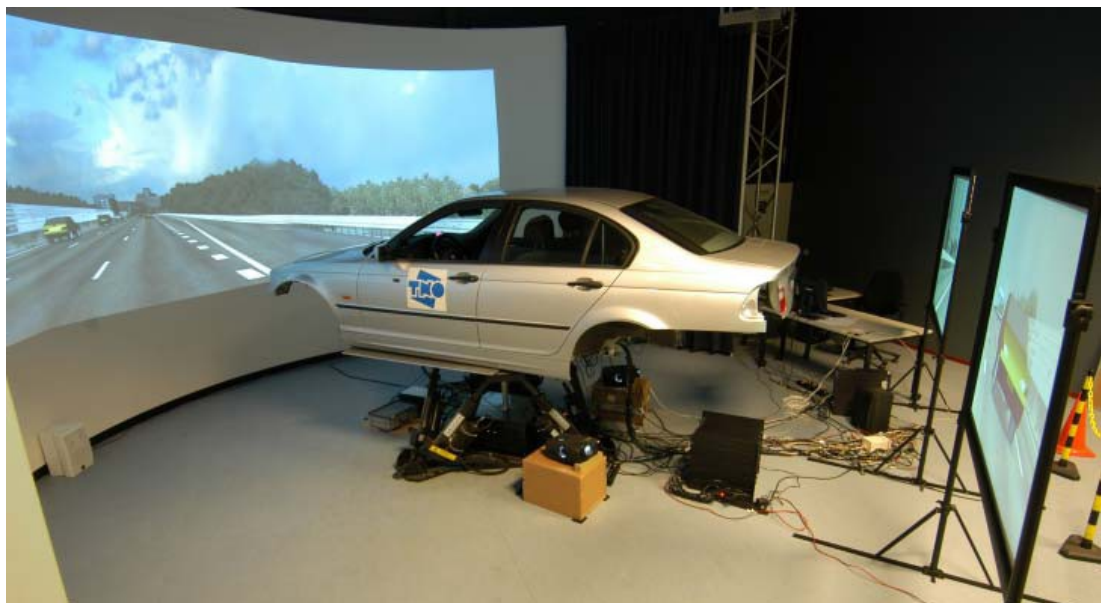


Fig. 3-8 : Sistema visuale con retrovisori (TNO).

E' importante che la scena grafica venga processata dal punto di vista del guidatore, altrimenti egli non vedrà ciò che si aspetta. I retrovisori (Fig. 3-8) non sono fondamentali ma possono diventare necessari in alcuni tipi di test (ad esempio: interazione con altri veicoli).

Esistono altre tecniche per la visualizzazione dell'immagini, ad esempio gli head-mounted display ed i sistemi di retroproiezione (i proiettori posizionati dietro gli schermi vi proiettano le immagini tramite specchi concavi). Nessuna di queste tecniche

viene utilizzata nei simulatori di alto livello. Gli head-mounted display visualizzano le immagini su due schermi molto prossimi agli occhi: tali schermi creano problemi in ragione della loro bassa risoluzione e dei grandi ritardi. La retro-proiezione presenta l'inconveniente che le immagini possono essere osservate solo da un'area ristretta.

3.2.2 Sistema sonoro

Al sistema sonoro vengono dedicati poche risorse e sforzi, perché esso non fornisce al guidatore molte informazioni dirette su ciò che sta accadendo. E', comunque, un elemento essenziale, senza il quale l'illusione non sarebbe così buona.

Durante la simulazione, il sistema sonoro riproduce i suoni che si possono udire all'interno di un veicolo. Il suono dominante in un veicolo è tra i 20-500 Hz, ma alcune tonalità e rumori provenienti dai pneumatici, dalla strada, ecc, si manifestano nell'area delle alte frequenze. Di conseguenza, il sistema sonoro deve coprire alcune migliaia di Hertz.

Per ottenere un'illusione realistica, è importante generare una spazializzazione 3D nel suono, così che sia possibile avvertire la direzione della sorgente sonora (Colinot et Belay., 2000). Ovviamente, la direzione dei suoni e l'informazione visiva devono essere in accordo o ci sarà un considerevole rischio di disorientare il guidatore. Molti suoni dipendono dalla velocità del veicolo (vento, irregolarità stradale) e dai giri del motore.

Il metodo più pratico di ricostruire il suono, percepito all'interno di un veicolo, consiste nel servirsi di una libreria di campioni sonori del motore, del vento, o delle irregolarità stradali, ecc; tali campioni vengono poi mixati in tempo reale in modo da ottenere una ottima illusione sonora.

3.2.3 Ritorno di forza

Il ritorno di forza al guidatore può essere diviso in due parti: le forze che si manifestano attraverso il cambio di moto del veicolo e le forze restituite dai comandi del veicolo come il volante, i pedali, etc.

3.2.3.1 Sistema di moto

Il compito del sistema di moto è di riprodurre tutte le forze a cui un guidatore viene esposto a seguito del movimento del veicolo.

I valori reali delle accelerazioni risultanti da tale moto dipendono non solo dal modello del veicolo, ma anche dal comportamento di guida e dalle condizioni stradali. Alcuni studi hanno messo in luce che le accelerazioni lineari (in x,y,z) sono dominanti tra 0-1 Hz con un piccolo picco secondario di circa 2-3 Hz per l'accelerazione verticale. Ciò si verifica a seguito della connessione diretta tra l'azione del guidatore ed i movimenti del veicolo mentre il picco delle accelerazioni verticali è dovuto alle sospensioni. Per le accelerazioni angolari, si è osservato che i moti di rollio e di beccheggio sono prevalentemente ad alta frequenza, mentre l'imbardata è a bassa frequenza. Tale risultato viene giustificato dal fatto che l'imbardata è generalmente il risultato dall'azione di chi guida, mentre il rollio ed il beccheggio sono dovuti più alle vibrazioni che ad una azione diretta (Reymond et Kemeny, 2000). Il moto angolare di rollio e beccheggio è limitato meccanicamente in un veicolo standard a circa $\pm 6^\circ$, a causa della corsa limitata delle sospensioni.

Costruire un sistema in grado di simulare ciò in maniera efficace richiede l'uso di due differenti sotto-sistemi: uno per le alte e l'altro per le basse frequenze. Per le alte frequenze, un piano vibrante è il modo più efficace per fornire a chi guida la sensazione della velocità del veicolo attraverso vibrazioni provenienti dalla strada, dal vento e così via (Reymond et Kemeny, 2000).

Il livello di simulazione delle basse frequenze dipende fortemente dai tipi di test a cui il simulatore verrà destinato. Per studi comportamentali in condizioni di guida normali (es.: misura del grado di distrazione dovuta ai telefoni cellulari), si può utilizzare solamente un piano vibrante. In realtà, alcuni esperti ritengono che un simulatore a base-fissa può essere considerato sufficiente per molti test in cui le manovre del veicolo non producono accelerazioni superiori ai 0,3g. Quando si vuole testare la reazione del guidatore, ad esempio in una situazione critica dove sono necessarie azioni estreme per evitare una collisione, la percezione fisica delle forze diventa il fulcro del test, quindi, risulta necessario un qualche tipo di sistema di moto a bassa frequenza.

Due differenti tecniche sono correntemente usate per simulare le accelerazioni a bassa frequenza. La prima utilizza un exapod (Fig. 3-9) dove le accelerazioni di breve

periodo vengono restituite tramite il movimento lineare e le accelerazioni di lungo termine inclinando il guidatore (Tilt Coordination Technique) e usando la forza gravità per ottenere la forza richiesta (ad esempio, in Figura 3-10, un inclinazione di 11° simula un'accelerazione di $0,2\text{ g}$). La seconda si serve di lunghi movimenti lineari e, con questa tecnica, le accelerazioni vengono direttamente simulate.



Fig. 3-9 : Esempio di Hexapod (DRL).

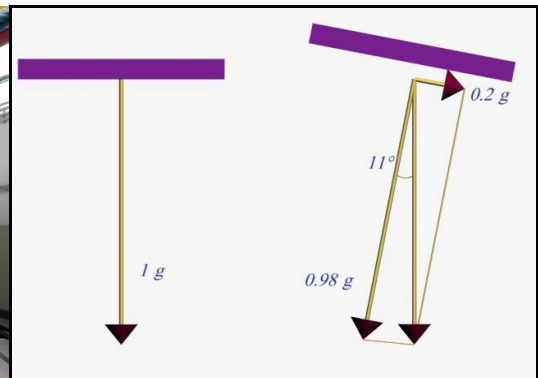


Fig. 3-10 : Tilt Coordination Technique.

Molti simulatori di guida usano un fattore di scala allo scopo di ridurre la domanda dei sistemi di moto. Studi hanno dimostrato che il più basso fattore di scala realistico è di $0,35$ (1g diventa $0,35\text{g}$). Diversi simulatori di alto-livello usano un fattore di scala pari a $0,5$ o più.

Il problema principale nell'uso della gravità per simulare le accelerazioni consiste nel fatto che l'essere umano ha delle soglie ($0,05\text{ m/s}^2$, $0,3^\circ/\text{s}$, $1^\circ/\text{s}^2$) e percepisce l'accelerazione al di sopra di tali valori (Reymond et Kemeny, 2000).

Considerando tali limiti, ci vorrebbe molto tempo per simulare grandi accelerazioni, anche se scalate, con il tilting; per questo motivo per garantire le corrette accelerazioni è necessario superare le soglie di percezione. Tale superamento è una delle possibili cause del malessere da simulatore.

3.2.3.2 Ritorno di forza ai comandi

Gran parte della sensazione di guida dipende dalle forze restituite ai comandi del veicolo, ad esempio il volante, i pedali ed la leva del cambio. Il ritorno di forza al volante dovrebbe essere presente in ogni simulatore, poiché minimizza la varianza nella

sterzata.

La tecnica usuale per creare il ritorno di forza al volante consiste nel connettere un servomotore alla colonna dello sterzo: questa soluzione è tanto flessibile quanto economica. Risulta, comunque, difficile ottenere un buon modello di sistema sterzante, poiché esso dipende da diversi fattori, quali le forze agli pneumatici e la reale dinamica del volante. Il sistema deve anche possedere una elevata frequenza di aggiornamento (> 100 Hz), altrimenti perderà in precisione.

Una soluzione pratica per riprodurre un ritorno di forza ai pedali è quella di servirsi dei sistemi meccanici esistenti: il sistema di frenatura di un veicolo reale può essere usato in un simulatore, in tal modo si ottiene un ritorno di forza reale.

3.2.4 Modello dinamico

Inizialmente, i simulatori di guida utilizzavano modelli di veicolo relativamente semplici e sviluppati allo scopo. Tali modelli consentivano la modellizzazione del comportamento di sterzo di un veicolo in tempo reale, data la limitata potenza di calcolo disponibile. Oggi, i modelli di veicolo rasentano la perfezione, e i simulatori possono praticamente utilizzare gli stessi modelli, gli stessi linguaggi di programmazione, e gli stessi programmi che gli ingegneri meccanici usano nella progettazione dei loro veicoli. Ciò permette di valutare le caratteristiche di handling e di comfort di guida del veicolo sin dagli inizi della fase di progettazione. Ci sono diversi costruttori di veicoli che si servono dei simulatori di guida a questo scopo (es. Daimler-Dasa, Renault, Ford). Comunque, sebbene il veicolo sia generalmente ben modellizzato, è dimostrato che valutare le caratteristiche di handling è una grande sfida anche con l'uso degli attuali simulatori di ultima generazione.

3.2.5 Modello di traffico

Purtroppo non si guida in totale isolamento. Il traffico è tutto intorno a noi, in gran quantità e rappresenta un elemento fondamentale per riprodurre situazioni complesse. Per essere accettabile, il traffico generato al computer deve riprodurre in maniera

accurata il comportamento di guida a livello strategico, tattico ed operativo (Michon, 1985). Ciò implica che ogni veicolo simulato dovrà avere il proprio modello di veicolo, i propri modelli di percezione e controllo e la propria logica di decisione.

Esistono differenti modelli di traffico che attualmente vengono utilizzati nel campo della simulazione di guida. Alcuni sono solo in grado di far muovere un veicolo lungo un percorso predefinito secondo predefinite caratteristiche cinematiche, senza essere in grado di gestire alcuna tipo di interazione. Altri sono caratterizzati da un grado elevato di interattività, sono in grado di gestire situazioni complesse in intersezioni o rotatorie a corsia multipla ed, inoltre, consentono di sviluppare nuove funzionalità (sistemi di aiuto alla guida, etc.) tramite script o API (Application Program Interface).

Ad un osservatore attento non possono, comunque, sfuggire i difetti di tali modelli: il comportamento fisico non è totalmente corretto, i veicoli non sterzano nel modo in cui un guidatore reale farebbe normalmente, le manovre hanno spesso inizio in posizioni inappropriate e il processo decisionale non può essere considerato esattamente “intelligente”. Inoltre, comportamenti particolarmente stravaganti si osservano spesso in situazioni che non possono essere gestite dalle leggi di traffico, come, ad esempio, quando quattro veicoli arrivano nel medesimo istante ad un’intersezione.

Va rilevato che un numero importante di applicazioni al simulatore di guida non richiede un modello di traffico “accurato” anzi, talvolta, l’uso di un tale modello può addirittura essere controproducente in quanto potrebbe limitare il controllo e la ripetibilità degli scenari di guida. Infatti, diversi test vengono realizzati a veicolo isolato o utilizzando un traffico di contorno che intaregisce, solo in maniera limitata, con il guidatore umano e svolge una mera funzione di popolare l’ambiente virtuale di guida.

Altre applicazioni, di crescente interesse, tuttavia, necessitano un modello di traffico “accurato”. Se l’interazione con gli altri veicoli è fondamentale nello studio, ad esempio: sistemi di aiuto alla guida, sistemi cooperativi, etc.

3.2.6 Scenario

Uno dei vantaggi più evidenti dei simulatori è la possibilità di far accadere le cose nell’istante in cui si vuole. Molti simulatori di guida presentano dei tool in grado di controllare il traffico in modo che una specifica situazione accada nell’istante

desiderato. Quindi, una lezione al simulatore può offrire moltissime istruttive situazioni di traffico, adattando il contenuto delle stesse alle necessità di apprendimento degli allievi.

L'addestramento virtuale è un aspetto importante nei simulatori di guida. Se gli studenti possono apprendere più o meno da soli, un singolo simulatore istruttore può gestire diversi simulatori allo stesso tempo. Tuttavia, programmare l'istruzione virtuale è una sfida. È possibile gestire semplici compiti come dare istruzioni sul percorso, spiegazioni standard su ciò che accade e feedback sugli errori. Compiti più complessi sono attualmente quasi impossibili per un computer: verificare il carico mentale di un allievo, trovare il processo che sta alla base del perché gli errori vengono fatti, o determinare se un allievo ha una corretta consapevolezza della situazione.

Tali aspetti possono essere persi in considerazione solo con un istruttore di guida umano.

3.3 Alcune osservazioni su i simulatori di guida

Il progetto di un simulatore è un compromesso tra prestazioni e costi. Quando un simulatore diventa operativo, è fondamentale avere un gruppo di persone che vi si dedichi. Progettare, condurre e valutare un esperimento significa che all'interno di tale gruppo devono essere rappresentati diversi ruoli, dal tecnico all'esperto di fattori umani. Senza un tale gruppo non è possibile realizzare test di buona qualità: anche il simulatore più avanzato è inutile senza del personale specializzato.

3.3.1 Malessere da simulatore

Il malessere da simulatore è un problema comune a tutti i simulatori di guida. Il problema ha origine da una varietà di cause interagenti, tra queste vi sono:

- Elevato ritardo tra le azioni del guidatore e le reazioni del simulatore. Ciò significa che il guidatore prosegue la sua azione per un tempo maggiore del solito, così che, quando il simulatore reagisce, il movimento è troppo ampio. Il ciclo chiuso, guidatore e simulatore, diventa instabile ed il guidatore deve compiere un grande

sforzo solamente per mantenere la strada;

- Il sistema di moto del simulatore produce movimenti nell'area del mal d'auto, frequenze intorno ai 0,2 Hz ed accelerazioni superiori a $0,2 \text{ m/s}^2$ (Kennedy, 1997);
- Le informazioni prodotte dal sistema visivo e dal sistema di moto non sono sincronizzate. Se la scena visuale ed il ritorno di forza non corrispondono, il guidatore si disorienta facilmente.

Il malessere da simulatore si verifica quando i soggetti testati sono affetti da nausea e rimangono in tale stato per un certo periodo anche dopo la fine del test. Non tutti sono affetti da malessere e il suo verificarsi dipende moltissimo da come il simulatore è stato progettato.

E' importante distinguere tra malessere da moto e da simulatore. Se il guidatore avverte malessere a causa del moto nella stessa situazione in una macchina reale, ciò prova che il simulatore emula l'ambiente reale. Il malessere da moto è, quindi, prova di un buon realismo; il malessere da simulatore è soprattutto un grosso problema da risolvere. Ovviamente, il malessere da simulatore intacca i risultati dei test.

3.3.2 Validazione

Definire la validità di un simulatore di guida è compito multi-disciplinare e complicato. Mudd (1968) ha definito la validità come il modo in cui il simulatore "riproduce un ambiente comportamentale". Rolfe et al. (1970) indicarono che "il valore di un simulatore dipende dalla sua capacità di provocare nell'operatore lo stesso tipo di risposta che questi avrebbe fornito in una reale situazione".

Blaauw (1982) definì una validità fisica ed una comportamentale: la prima confronta la capacità di un simulatore di riprodurre gli stimoli sensoriali presenti in un ambiente reale. La seconda confronta le azioni del guidatore in simulazione e nella realtà.

Reymond et Kemeny (2000), riprendendo in parte le nozioni di validità di Blaauw definirono:

- Validità fisica: confronto tra il movimento restituito dal simulatore e le dinamiche veicolari simulate.
- Validità percettiva: confronto tra la percezione del movimento al simulatore ed in una situazione reale.

- Validità comportamentale relativa: confronto tra gli effetti della variazione di alcuni parametri ambientali (strada, veicolo, condizioni di traffico) sul comportamento di guida.
- Validità comportamentale assoluta: confronto tra il comportamento di guida al simulatore e nella realtà.

Nello stabilire il grado di validità di un simulatore, è necessario, in ogni caso riferirsi al tipo di studi a cui lo stesso è stato destinato. Differenti parametri devono essere validi per differenti tipologie di esperimenti.

3.4 Alcuni simulatori di guida esistenti

Nel mondo esistono almeno un centinaio di simulatori di guida con diverse capacità.

I simulatori esistenti possono essere classificati in tre differenti categorie: alto, medio e basso livello. La categoria ad alto livello include tutti i simulatori che soddisfano tutte le richieste di un simulatore avanzato: si tratta di sistemi che garantiscono campi di visione prossimi ai 360° con un'ampia piattaforma mobile. Nella categoria di basso livello si possono inserire i simulatori costituiti da pc ordinari e dotati di un volante ed una pedaliera. I simulatori che si collocano tra queste due categorie vengono definiti di medio livello.

Di seguito, per dare un'idea di quanto di meglio offre il mercato della simulazione di guida verranno descritti alcuni tra i più performanti simulatori di medio/alto livello.

3.4.1 Simulatore Daimler-Chrysler

Il primo modello di simulatore di questa azienda è stato sviluppato nel lontano 1985 e rinnovato nel 1993/94 per aumentarne le prestazioni (Fig. 3-11). Durante l'ammodernamento, il modello dinamico del veicolo e il sistema visivo sono stati sostituiti e il sistema di moto è stato esteso lateralmente.

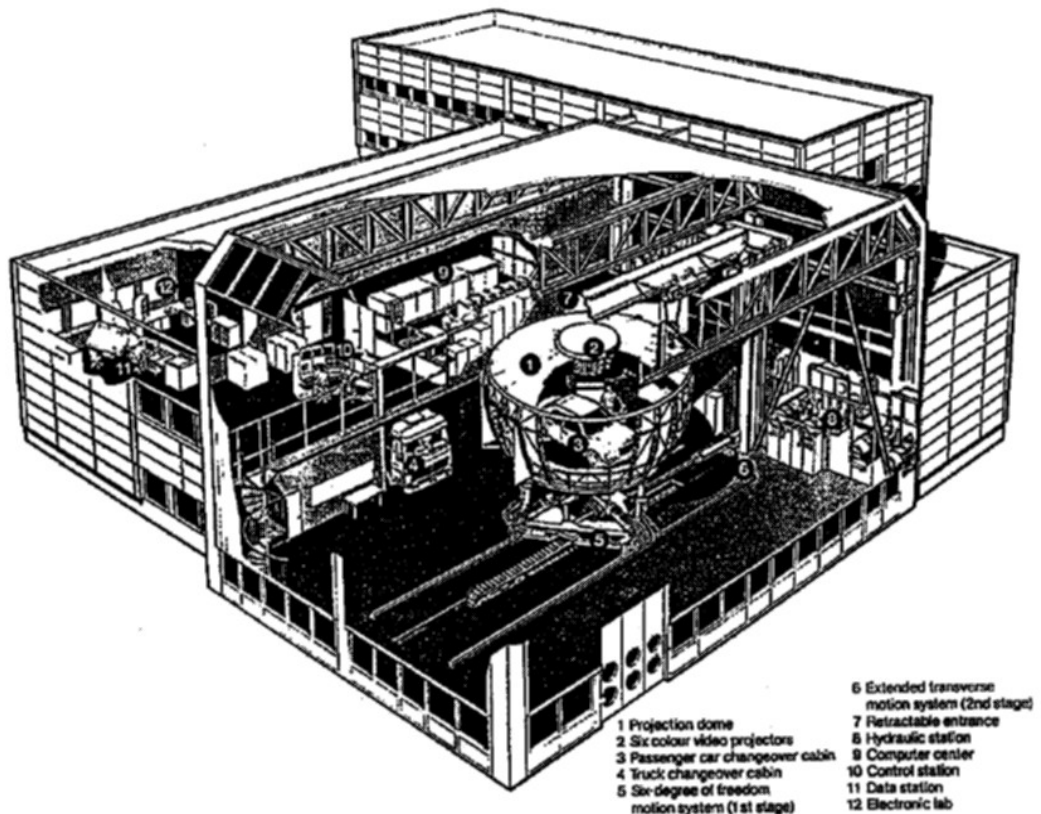


Fig. 3-11 : Layout laboratorio Daimler-Benz.

Il sistema di proiezione (frame rate 50Hz e transport delay pari a 70-85 ms) è costituito da 6 canali generanti immagini in tempo reale, di questi, cinque sono dedicati alla proiezione frontale (campo di visione: 180° in orizzontale e 35° in verticale). Il canale rimanente è utilizzato per la proiezione sullo schermo posteriore (48° in orizzontale e 35° in verticale), che può essere osservato dallo retrovisore laterale sinistro e da quello centrale. Ogni canale ha una risoluzione di 1024x926 pixels.

Il sistema di moto è costituito da una piattaforma mobile a 6 gradi di libertà e da un sistema di moto che garantisce un ampio movimento laterale. Il massimo movimento laterale fornito dalla piattaforma è di $\pm 1,5$ m (accelerazione massima 1,2 g con una frequenza di 3 Hz), a cui è possibile sommare un contributo extra di $\pm 2,3$ m garantito da un grande attuatore idraulico (accelerazione massima 0,7 g con una frequenza di 5 Hz) che muove lateralmente l'intero sistema (piattaforma, cabina, sistema video).

Il modello dinamico in tempo reale CaSimIR (Car Simulation In Real Time) è stato sviluppato presso il centro ricerche Daimler-Chrysler ed è costituito da due tipi di moduli:

- I moduli dato contengono informazioni sulle specifiche del veicolo (informazioni sulla massa, sulle sospensioni, e sulle caratteristiche del motore).

- I moduli struttura (albero motore, contatto ruota/strada, sospensioni e volante) rappresentanti la struttura del veicolo in dettaglio ed con grande generalizzazione.

Il modello può simulare differenti autovetture e camion. Il modello di autovettura ha dai 18 ai 37 gradi di libertà e può simulare tutte le possibili opzioni di guida.

Il modello è un modello fisico che sfrutta le leggi del moto di Newton ed in cui vengono immessi solo dati di veicoli reali.

3.4.2 NADS

Il National Advanced Driving Simulator (Fig. 3-12) è uno tra i simulatori di guida più avanzati e costosi (costo totale 50 milioni di dollari) esistenti al mondo. Il progetto, iniziato nel 1992 all'Università del Iowa dalla National Highway Traffic Safety Administration, è stato portato a termine nel Natale del 2001.

Ogni elemento di questo simulatore presenta caratteristiche ottimali: un piano XY di moto di circa 400 m² con in cima un exapod di grande dimensioni ed un piano vibrante con frequenze superiori a 20 Hz ed escursioni di $\pm 0,5$ cm.

Il dome montato sulla piattaforma dinamica presenta all'interno un sistema grafico (frame rate 60Hz e transport delay pari a 50 ms) da 15 canali in grado di coprire l'intero campo di visione (360°). Il sistema consente il cambio cabina con facilità, sono disponibili 4 diverse cabine, con un tempo medio per la sostituzione di otto ore.

Il progetto NADS ha sviluppato un nuovo processo per creare modelli dinamici per il simulatore, tramite Simulink e costruendo un modello per l'intero veicolo. Questo processo si serve di un tool di modellizzazione multy-body sviluppato al NADS, chiamato NADSdyna. NADSdyna permette di costruire diversi sottosistemi di veicoli (es.: sospensioni, motore e cambio). Una volta creato un modello di un sotto-sistema, è possibile validarlo in maniera individuale. L'equipe del NADS ha sviluppato una libreria di modelli di tutti i sotto-sistemi presenti in un veicolo standard e tali modelli possono essere utilizzati per ottenere nuovi veicoli.



Fig. 3-12 : Sistema di simulazione NADS.

3.4.3 Il simulatore dinamico della Renault

Il simulatori di guida vengono utilizzati alla Renault da circa dieci anni. Al momento, Renault possiede tre simulatori di guida (un quarto “Ultimate” è in fase di completamento, vedi Figura 3-13), situati al Technocentre presso la Research Direction a Guyancourt (Parigi). Due dei simulatori sono statici, il terzo è dinamico. Il simulatore dinamico è stato progettato dal gruppo di Vehicle Simulation e Perception presso il Renault Research Department nel 1999.

La cabina del simulatore è una versione modificata di una Renault Clio a scala reale. Il campo totale di visione è di 150°x40°, coperto da tre canali con 1024x768 pixels. Le immagini vengono proiettate su tre schermi piatti adiacenti. Per mantenere stabile il riferimento visuale relativo della cabina durante il moto della piattaforma, viene effettuata, dal modulo software di generazione delle immagini, una compensazione dinamica del punto di vista del guidatore. Le immagini dei retrovisori sono proiettate su uno schermo piatto posto dietro la cabina.

La cabina è montata su una piattaforma mobile a 6 gradi di libertà. Gli spostamenti massimi del simulatore sono ± 22 cm e $\pm 15^\circ$ in tutte le direzioni lineari ed angolari. L’accelerazione massima consentita è di 0,5 g e 0,4 m/s. per i moti angolari, i valori

massimi sono $300^\circ/s^2$ e $30^\circ/s$.

Il comportamento del veicolo simulato è fornito da MADA V3.0. Questo modello calcola 250 variabili interne in tempo reale. E' un modello multi-body, che gira a 100 Hz su computer standard.

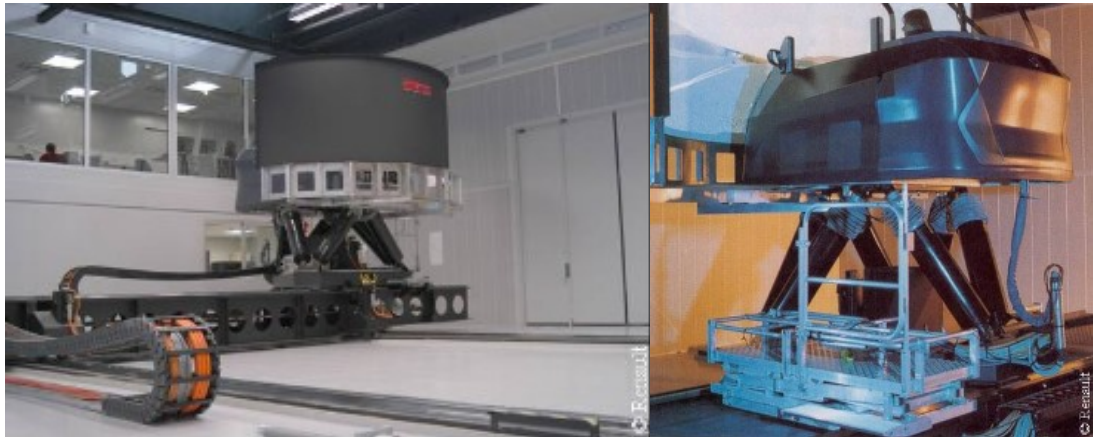


Fig. 3-13 : Immagini del nuovo simulatore della Renault “Ultimate”.

Per creare uno scenario di traffico realistico, Renault usa il proprio software di simulazione, SCANeR II. Si tratta di un sistema completo che consente il controllo del veicolo e dell'ambiente stradale durante la simulazione.

3.4.4 VIRTTEX

Il VIRTual Test Track EXperiment (Fig. 3-14) è situato al Ford Research Laboratory a Dearborn (USA). Il VIRTTEX è un nuovo modello di simulatore di alto livello costruito tra il 2000 ed il 2001.



Fig. 3-14 : Il Ford VIRTTEX.

Il sistema di moto è costituito da un exapod di grandi dimensioni ad elevate prestazioni ottimizzate per veicoli terrestri: il moto laterale e longitudinale è di $\pm 1,6$ m ed il tempo di risposta è di 15 ms.

Al di sopra della piattaforma vi è un grande dome; sul soffitto del quale sono installati cinque proiettori che garantiscono un ampio campo di visione sia frontale che posteriore. Potenti schede grafiche consentono una risoluzione frontale di 1600x1200 pixels per canale a 60 Hz. Il transport delay è leggermente alto (circa 80 ms).

Il modello del veicolo tiene conto del telaio/sospensioni, potenza del motore, del volante e dei pneumatici. Il modello dinamico del veicolo è a 6 gradi di libertà a cui si aggiunge un grado di libertà per ognuna delle sospensioni. Il modello dello sterzo ha più di 10 parametri che possono essere cambiati in tempo reale.

3.5 VERA

Il simulatore di guida Virtual Environment for Road sAfety (VERA) è stato assemblato, secondo precise richieste della società committente, dalla ditta francese Oktal nel 2005, a Napoli. L'idea era quella di costruire un simulatore di guida ad elevate prestazioni ma nel contempo snello ed utilizzabile per diverse tipologie di sperimentazioni. A tale scopo si è pensato di realizzare una architettura "leggera" costituita da una piattaforma mobile di ridotte dimensioni montante solamente una cabina di guida, i grandi schermi di proiezione non sono imbarcati ma fissati al suolo. Una particolarità di questo simulatore è costituita dal fatto che il sistema è stato pensato per ospitare anche una cabina di volo (cambio cabina in circa mezz'ora). Il simulatore (Fig. 3-15), situato presso una delle sale dell'Istituto Motori del CNR di Napoli, è operativo dal marzo 2006.



Fig. 3-15 : Il simulatore di guida VERA.

3.5.1 Il sistema visuale

La visione frontale della strada e dell'ambiente circostante è generata in tempo reale da workstation dotate di schede grafiche (Nvidia Fx Quadro) altamente performanti. Il campo totale di visione è di 160°x57°, garantito da tre canali visuali aventi una risoluzione di 1400x1050 pixels ognuno. Le immagini vengono proiettate su tre schermi (dimensioni 4x3 m ciascuno) piatti, fissati al terreno: gli schermi laterali sono ruotati di 30° rispetto a quello centrale.

I retrovisori sono stati sostituiti da tre schermi LCD da 6,5" gestiti da due pc Pentium standard. Il siffatto sistema garantisce un frame rate massimo di 75 Hz, una risoluzione dello schermo di circa 3,5 arcmin e una dimensione dei singoli pixels al centro dello schermo di 3 mm. Infine, la cabina è equipaggiata con una video camera direttamente collegata ad una tv 14" posta nella sala di supervisione.

3.5.2 Cabina

La cabina di guida è la metà anteriore di una reale Citroën C2, dotata di un cruscotto, vari indicatori (velocità, livello di carburante, indicatori di direzione, marcia inserita, etc.), due sedili regolabili e retrovisori laterali e centrale (Fig. 3-16). Il cambio può essere sia sequenziale che automatico. Volante e pedali sono provvisti di un sistema dinamico di ritorno di forza.

Il sistema sonoro consiste in 2 altoparlanti ed un subwoofer. Infine, un microfono connesso al sistema consente al supervisore di comunicare con il guidatore.



Fig. 3-16 – Retrovisori ed interni del simulatore di TEST Scarl.

3.5.3 Il sistema di moto

La cabina è montata su di una piattaforma mobile della CueSim, che include 6 attuatori lineari elettrici. L'exapod ha 6 gradi di libertà e può portare un carico di 1000 kg. Le caratteristiche della piattaforma sono riportate nella seguente tabella.

Modello (Maxcue 610-450-16-12)			
	Posizione	Velocità	Accelerazione
<i>Max. Carico [kg]</i>		1000	
<i>Altezza(min,max)</i>		1180, 1675	
<i>Peso [kg]</i>		625	
<i>Dimensioni [mm]</i>		1980 x 1750	
<i>Movimento X [mm, mm/s, mm/s²]</i>	-491/+432	718	±1.39
<i>Movimento Y [mm, mm/s, mm/s²]</i>	±425	712	±1.2
<i>Movimento Z [mm, mm/s, mm/s²]</i>	-247/+248	484	±0.59
<i>Rollio [°, %/s, %/s²]</i>	±25	50	575
<i>Beccheggio [°, %/s, %/s²]</i>	-24/+25	48	595
<i>Imbardata [°, %/s, %/s²]</i>	±43	82	1100

3.5.4 Il sistema dinamico

Il sistema dinamico del simulatore VERA ha una frequenza di aggiornamento di 100 Hz ed è costituito da diversi sottomodelli: drive-line, volante, pneumatici, confort, forze aerodinamiche, ruote non motrici, freno, chassis.

Il modello di chassis, descritto come un sistema multi-body, calcola la dinamica dello chassis, il veicolo, gli assali e i carichi. La modellizzazione multy-body è stata implementata tramite il software MesaVerde.

Il modello di drive-line gira a 1000 Hz e contiene i seguenti elementi: motore, cambio, trasmissione differenziale, ruote motrici, limitatore di velocità, frizione, modello di consumo, emissioni inquinanti.

Il modello di pneumatici usato è di tipo Pacejka, nella formulazione di Michelin. I valori usati sono stati forniti da tutti i maggiori produttori di pneumatici.

Il modello globale dei freni è composto da: un sotto-modello idraulico dei freni, in cui gli aspetti meccanici e termici sono tenuti in considerazione nel calcolo dell'efficienza del sistema frenante e un modello di ABS che può essere attivato o disattivato.

Il sotto-modello di confort non è fisico ma solo un effetto speciale e riproduce le accelerazioni verticali dovute all'irregolarità con una frequenza di quasi 30 Hz.

Le forze aerodinamiche sono riprodotte tramite un sotto-modello che tiene in conto il coefficiente di penetrazione frontale e laterale dell'aria.

3.5.5 Applicazioni

Il simulatore VERA è stato progettato per garantire un ampio campo di applicabilità. Inoltre, il software di simulazione in dotazione, SCANeR II, è particolarmente flessibile grazie alle sua dotazione di API (Application Programming Interfaces). Quest'ultime consentono sia di modificare moduli e funzionalità già esistenti sia di svilupparne di nuove, in tal modo, è possibile soddisfare pienamente le esigenze di sperimentatori e committenti.

Le API permettono di agire ad esempio sul:

- *modello visuale*: realizzazione degli effetti speciali visuali (fumo, fuoco, etc.), dell'interfacce grafiche per i sistemi di aiuto alla guida (mappe per sistemi GPS, informazioni ai guidatori, etc.)
- *modello dinamico*: modifica e creazione di nuovi sottomodelli del sistema dinamico esistente "Trydim" (modelli di pneumatici, confort-irregolarità stradale, chassis, drive line, volante, sistema frenante, forze aerodinamiche)
- *modello di acquisizione*: possibilità di intervenire nelle comunicazioni tra la cabina e gli altri moduli (sistemi di aiuto alla guida: ACC, Stop&Go, etc.)

Un lista non esaustiva delle applicazioni che si possono realizzare tramite l'utilizzo del simulatore in questione è la seguente:

- Studi sul comportamento di guida in condizioni ambientali avverse (notte, pioggia, neve, nebbia, fumo) e non

- Studi su design infrastrutturali, sulla sicurezza e sulla segnaletica stradale
- Studi sugli effetti dei sistemi di aiuto alla guidaSviluppo sistemi di guida per portatori di handicapTest sul comportamento di guida sotto l'effetto di alcol, droghe e medicinali
- Training.

4 ANALISI AL SIMULATORE DI SOLUZIONI PER LA SICUREZZA STRADALE

4.1 Simulatori di guida e sicurezza stradale

I simulatori di guida sono una applicazione tecnologica recente se confrontati ai simulatori di volo usati nell'industria aerospaziale da almeno 50 anni. Il crescere delle performance dei computer accompagnato da una drastica riduzione nei costi, ha consentito all'industria automobilistica di sviluppare interessanti simulatori di veicoli terrestri a basso costo e di non essere più dipendente da veicoli reali per le fasi di test e di sviluppo.

L'industria automobilistica ha così dato inizio ad un uso consapevole, vantaggioso dei simulatori ma, di seguito, questi sono stati impiegati in maniera soddisfacente in svariati campi. I simulatori di guida presentano, infatti, un vasto campo applicativo, che varia dallo studio del comportamento di guida a quello della tecnologia dei dispositivi a bordo dei veicoli. Poiché i simulatori forniscono un ambiente sperimentale che è sia sicuro che replicabile, sono ideali per gli studi sulla sicurezza stradale e l'addestramento alla guida.

I simulatori possono misurare, in sicurezza, le reazioni dei guidatori a situazioni non sicure e che, addirittura, ne mettono a repentaglio la vita (Technical Specifications for the Simulator from the Driver Simulator Laboratory Center for Intelligent Systems Research, 2006). Dutta et Al. (2004) usarono un simulatore di guida di medio livello per valutare ed ottimizzare i fattori che influenzano la comprensione di diversi messaggi forniti tramite pannelli a messaggio variabile. Liu et Wen (2004) investigarono gli effetti di due differenti modelli di display (head-up display - HUD e head-down display - HDD) sulle performance di guida e sul livello di workload psicologico di operatori di veicoli commerciali a Taiwan. Simulatori di guida di basso livello sono stati usati per analizzare la consapevolezza della situazione ed il workload durante la guida mentre venivano usati l'adaptive cruise control e i telefoni cellulari. Come ovvio l'utilizzo del simulatore, al posto degli studi su strada, elimina in tali studi il pericolo di incidenti dovuti ad uno errato funzionamento del sistema o alla distrazione indotta dal telefono cellulare (Wang et al., 2006). Inoltre, l'addestramento al simulatore di giovani guidatori, annulla i pericoli di manovre errate e consente ai guidatori di sperimentare diverse

situazioni pericolose progettate ad hoc.

I simulatori possono essere usati anche per condurre studi sperimentali accuratamente controllati, in cui le variabili sperimentali vengono isolate da fattori che possono influenzare le performance del guidatore (Technical Specifications for the Simulator from the Driver Simulator Laboratory Center for Intelligent Systems Research, 2006).

Per esempio, i simulatori sono uno strumento utile per valutare il design della segnaletica stradale. Infatti, misurando le performance dei soggetti, si può quantitativamente dire quale design della segnaletica presenta il grado di soddisfazione più elevata, il miglior riconoscimento e reazione tra i soggetti testati (Upchurch et al., 2002; Dutta et al., 2002).

L'uso dei simulatori di guida per gli studi sulla sicurezza stradale sta crescendo in seguito alla riduzione dei costi dei simulatori e lo sviluppo della tecnologia hardware/software. Il progresso nei software rende possibile ai ricercatori di progettare specifiche situazioni sperimentali in ambiente virtuale. Oggigiorno, in tutto il mondo, università, istituti di ricerca e organizzazioni autorizzate si servono dei simulatori per applicazioni nel campo della sicurezza di guida; possiamo citare come esempio: NHTSA, VTI, University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), University of Iowa, Monash University Accident Research Center (MUARC, Australia), Institute for Transportation Studies in University of Leeds (UK), etc.

4.1.1 Studi sulla sicurezza di guida al simulatore

I simulatori sono stati utilizzati per analisi sulla sicurezza di guida in diversi studi. Di seguito si elencano i principali ambiti di applicazione dei simulatori di guida, con l'unico scopo di effettuare una prima classificazione e non volendo escludere eventuali possibili sviluppi, anche in considerazione del rapido sviluppo dei simulatori stessi e delle necessità per la sicurezza stradale:

- Studi sul comportamento di guida
 - Influenza della distrazione o di alterazioni (uso del cellulare, fatica, etc)
 - Performance di guida o misure comportamentali (gap acceptance, cambio corsia, sorpasso, eccesso di velocità, etc.)

- Caratteristiche dei giovani guidatori (prendere rischi, bere)
- Addestramento
 - Addestramento neo-patentati
 - Addestramento per evitare gli incidenti
- Progettazione e verifica di infrastrutture di trasporto
 - Sistemi di segnaletica stradale
 - Segnaletica orizzontale, dossi ed altre infrastrutture stradali
 - Piano stradale, tunnel, ponti
- Medicina ed applicazione di terapie
 - Droghe ed alcohol
 - Supporto ai test clinici
 - Incidenti biomeccanici
- Ergonomia e studi cognitivi
 - Ostacoli visivi e sonori nella guida
 - Haptic Feedback al simulatore
 - Malessere da movimento
 - Guidatori anziani
- Studi su Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS)
 - Adaptive Cruise Control, Stop&GO, etc
 - Sistemi cooperativi
 - Sistemi anticollisione
 - Altre sistemi innovative in-veicolo
- Valutazione di politiche di gestione
 - Progettazione e verifica di nuove politiche
 - Ambiente di traffico urbano ed extraurbano

Di seguito verranno descritti alcuni esempi

4.1.2 Studi sul Comportamento di guida

4.1.2.1 L'influenza della distrazione o di alterazioni

Poiché è rischioso guidare in uno stato alterato su di una vera strada, molti ricercatori

si sono indirizzati nel uso della simulazione di guida virtuale come strumento fondamentale. Wittmanna et Al. (2006) usarono il metodo della simulazione di guida per valutare gli effetti della posizione di display visuali sulle performance di guida. Per determinare la sicurezza relativa alla posizione dei display a bordo veicolo durante la guida, alcuni soggetti portarono a termine un compito di lane-keeping in un simulatore di guida e, contemporaneamente, reagivano ad una luce premendo il pedale del freno. Un compito secondario era stato progettato su di un display in una delle sette diverse posizioni definite all'interno della cabina di guida. Dati comportamentali, movimenti dell'occhio e stime soggettiva mostrarono che la manipolazione dell'informazioni visualizzate durante la guida disturbava le performance dei guidatori in maniera esponenziale in funzione della distanza tra la linea di visione del compito primario e la posizione del display a bordo.

L'eccentricità verticale aveva un effetto dannoso maggiore rispetto alla distanza orizzontale. Sotto una certa condizione con un elevato carico del compito secondario, il tempo di reazione per spingere il pedale del freno in seguito allo stimolo esterno è quasi doppio con un'eccentricità diagonale di 351 in confronto ad un valore più basso di eccentricità. Le misure soggettive del carico di lavoro soggettivo integrarono i dati comportamentali confermando chiari effetti dannosi per eccentricità di almeno 351.

Sung et al. (2005) hanno studiato al simulatore gli effetti della concentrazione di ossigeno sulla fatica del guidatore.

Esistono, inoltre, molti studi che analizzano, tramite simulazione di guida, l'influenza dell'uso dei telefono cellulare alla guida (Haigney et al., 2000; Liu, 2003). Questi studi puntano a capire in che misura la distrazione è dovuta all'uso del telefono cellulare. I sistemi di simulazione possono raccogliere dati dettagliati sulle performance di guida (e.g. controllo dei pedali, del volante, marcia inserita, etc.) e condurre successivamente uno studio quantitativo.

La similitudine tra gli studi sopra riportati è che, durante la guida, questi test comportano maggiori rischi dovuti ad un aumento del carico di lavoro mentale o ad alterazioni psico-fisiche. Bisogna prendere atto che questi tipi di esperimenti non possono essere condotti facilmente in una reale condizione di guida a causa dei rischi che possono comportare. Quindi, in queste condizioni, la guida al simulatore diviene un approccio utile per questo genere di misure di performance quando c'è un effetto rischio.

4.1.2.2 Performance di guida o misure comportamentali.

Un'altro genere di studi si serve dei simulatori per effettuare misure di performance di guida. In una condizione reale di guida risulta difficile seguire le manovre del guidatore mentre un simulatore permette una opportuna raccolta dati di ogni manovra. Per esempio, Salvucci et Liu (2002) esplorarono l'evoluzione temporale di un cambio corsia, incluso il controllo del guidatore e il comportamento del movimento dell'occhio, usando un simulatore di guida a base fissa di medio livello e 11 soggetti. Nell'esperimento, ai guidatori venne richiesto di guidare in ambiente autostradale simulato a più corsie. Quindi, i dati del guidatore furono ripartiti in unità standardizzate di tempo per facilitare l'analisi del comportamento prima, durante, e dopo il cambio di corsia. I risultati mostrarono che i guidatori:

- a) realizzano l'atteso schema di sterzata ad onda sinusoidale ad eccezione per un più lungo e piatto secondo picco in cui raddrizzano il veicolo;
- b) rallentano leggermente prima di un cambio di corsia con sorpasso, accelerano rapidamente dopo il cambio di corsia, e mantengono una velocità più elevata fino a che non iniziano a ritornare nella corsia di marcia normale;
- c) avevano il loro indicatore di direzione acceso, all'inizio del corsia-cambio, solo per il 50% delle volte, mentre arrivano ad un 90% solo 1.5-2 s dopo l'inizio della manovra;
- d) spostano il loro centro visivo primario dalla corsia di inizio manovra a quella di destinazione immediatamente dopo l'inizio del cambio corsia.

Questi risultati evidenziano l'efficacia dell'uso dei simulatori per la raccolta dei dati nelle manovre di guida. Tuttavia, d'altra parte, il risultato (a) indica anche che il comportamento del volante nella guida in un ambiente simulato può presentare delle differenze rispetto alla guida di un veicolo reale.

Questo implica che la fedeltà o la validità di simulatore di guida dovrebbe essere un problema da investigare per avvalersi dei dati misurati. Se la validità è bassa, di conseguenza, i dati misurati sono senza significato.

4.1.3 Il rischio nei giovani guidatori

Guidare al simulatore è un metodo ideale per condurre esperimenti che sono rischiosi su una vera strada. Leung et Starmer (2005) condussero un singolo-cieco studio randomizzato con guidatori giovani e anziani per stimare come l'età, combinata con un dose modesta di alcol, influenzasse le performance in una guida simulata. I compiti di guida includevano l'individuazione della presenza di un veicolo all'orizzonte il più rapidamente possibile, la stima il posizione sulla strada in cui un veicolo in avvicinamento sarebbe stato sorpassato dal veicolo del soggetto testato (time to collision) e il sorpasso di un un altro veicolo in presenza di un plotone compatto di veicoli proveniente in senso opposto.

4.1.4 Progettazione e Verifica di infrastrutture: Sistemi di segnaletica stradale

La simulazione di guida è uno strumento efficace anche nella progettazione e valutazione della segnaletica stradale. Effettuando verifiche in un ambiente virtuale e permettendo ai guidatori di tare al simulatore, aiuta a valutare ed ottimizzare il segnale in uno stadio avanzato, di conseguenza riduce il costo e migliora la qualità e l'utilizzabilità del progetto.

In un studio condotto da Upchurch et al. (2002), il design e la disposizione del segnale di uscita dal Boston Central Artery-Tunnel (Interstate 93) attraverso il centro Boston sono stati simulati e valutati. Prima dello studio, la ricostruzione della Central Artery è stata necessaria per migliorare le operazioni di traffico tramite la riduzione del numero di uscite ed ingressi sulla Interstate 93 dalle 27 uscite ed ingressi su più di 3 miglia a 14. Inoltre, la riduzione dei segnali di uscita potrebbe causare nei guidatori, specialmente in quelli poco pratici della zona, difficoltà nell'ottenere informazioni sulla direzione da seguire per la loro uscita. Questo può generare nel guidatore frustrazione ed una riduzione nella sicurezza dovuta ad un repentino cambiamento di corsia ed ad altre manovre.

Un studio al simulatore di guida è stato, quindi, progettato allo scopo di affrontare questi problemi con un migliore design e disposizione della segnaletica. Un tunnel

virtuale generato al computer è stato realizzato rispettando la geometria del tunnel esistente (inclusa curvatura orizzontale e verticale ed altezza della volta) e la disposizione della segnaletica. I soggetti testati guidarono attraverso il tunnel simulato per valutare le alternative della segnaletica sviluppate.

4.1.5 Sistemi di Trasporto Intelligenti: Adaptive Control Control

In contrasto con lo sviluppo rapido delle nuove tecnologie nell'industria automobilistica, l'adattamento del guidatore sembra essere molto lento. Da adesso, l'uso dei simulatori per misurare e valutare i nuovi dispositivi è una scelta prudente per i produttori che evitano gli inconvenienti di una prototipazione reale.

Hoedemaeker et Brookhuis (1998) hanno condotto un studio indirizzato ad valutare il comportamento del guidatore in presenza delle nuove tecnologie esistenti al tempo, in particolare Adaptive Cruise Control Systems (ACCs). In questo studio, vantaggi ed limiti degli ACCs sono stati valutati con l'ausilio di un simulatore di guida. I quattro gruppi di partecipanti testati differiscono negli stili di guida riportati rispetto alla velocità (guida veloce) e alla concentrazione (l'abilità di ignorare le distrazioni), e hanno guidato in modi da essere conformi con queste opinioni. I risultati mostrano l'adattamento comportamentale con un ACC in termini di maggiore velocità, minore valore minimo di distanza interveicolare e maggiore forza in frenata. Lo stile di guida del gruppo non influenzò molto questi adattamenti comportamentali. La maggior parte dei guidatori valutarono il sistema di ACC molto positivamente, ma gli indesiderabili adattamenti comportamentali osservati inducevano alla cautela riguardo la sicurezza potenziale di tali sistemi.

4.1.6 Valutazione di politiche di gestione

I simulatori sono stati usati anche per misure di gestione del traffico. Nel studio condotto da Uzzell e Muckle (2005), il cambiamento nel comportamento di guida è stato osservato in simulazione di guida. Esaminando diverse soluzioni ingegneristiche per il programma "Quiet Lanes", sono stati valutati differenti comportamenti di guida

l'efficacia di tali soluzioni.

La crescita del traffico motorizzato sulle corsie extraurbane nel Regno Unito ha aumentato i pericoli e dissuade le persone dal passeggiare, andare in bicicletta o a cavallo sulle strade di campagna. Un'iniziativa statale "Quiet Lanes" è stata indirizzata contro questo sviluppo non sostenibile, per rendere le strade di campagna sicure ed attraenti per gli utenti non-motorizzati. Sebbene dispositivi di traffic calming siano stati impiegati in aree urbane, il loro trasferimento in aree rurali più sensibili a livello ambientale è stata problematica, soprattutto per motivi estetici in quanto tali sistemi forniscono un aspetto urbano. Soluzioni innovative sono necessarie per ridurre la velocità del traffico ma sarebbe stato prudente valutare sperimentalmente la probabile efficacia e accettabilità di alcune nuove misure prima di realizzarle.

Il lavoro di Uzzell e Muckle (2005) tratta dell'uso di ambienti simulati realizzati tramite il fotografie a colori ritoccate per predire i cambiamenti nel comportamento di guida associato con il cambiamento degli ambienti stradali. Si è trovato che i soggetti testati erano in grado di distinguere tra le diverse soluzioni simulate ed il comportamento di guida da loro suggerito rifletteva, in maniera accurata, quello associato altrove con l'uso della strada in condizioni simili.

4.2 Verifica della reazione dei guidatori ai messaggi in condizioni di emergenza mediante simulazione di guida

Gli incidenti stradali che si verificano a cielo aperto sono notevolmente più numerosi rispetto a quelli che si verificano nelle gallerie, tuttavia, questi ultimi hanno effetti ben più gravi. In particolare le conseguenze possono essere estremamente distruttive e pericolose nel caso di incendio, perché gli spazi chiusi ostacolano la dispersione del calore e del fumo. Inoltre, le limitazioni di accesso per i vigili del fuoco e per le operazioni di salvataggio, la difficoltà nel garantire un'uscita d'emergenza sicura agli utenti della galleria aumentano la severità dell'incidente. Gli incendi nei tunnel, non solo, mettono in pericolo la vita degli utenti (221 morti negli incendi dei trafori del Monte Bianco, del Tauern, del Kaprun e del Gottardo in meno di due anni) ma, possono anche danneggiare la struttura del traforo con conseguenze pregiudizievoli sul capitale rappresentato dal tunnel.

Appare, quindi, essenziale cercare di impedire tali incidenti o, comunque, fornire agli utenti del tunnel misure adeguate per mettersi in salvo o per essere salvati dai vigili del fuoco. Tali misure di sicurezza nelle gallerie stradali possono essere di due tipi: riduzione della probabilità di incidente (design della galleria, regolazione del traffico, dispositivi installati nella galleria e manutenzione) e riduzione delle conseguenze dell'incendio (installando dispositivi di sicurezza e costruendo gallerie resistenti agli incendi). Queste misure non sono sufficienti a garantire la sopravvivenza degli utenti se la reazione avviene in ritardo (i primi minuti di un incendio sono cruciali in termini di auto-salvataggio e limitazione danni) o adotta comportamenti pericolosi come attendere all'interno o a fianco del proprio veicolo, risalire le vie di fuga e ritornare all'interno della galleria, ecc.

Questi comportamenti dei conducenti sono dovuti alla difficoltà di percezione e di riconoscimento dei segnali di allarme, all'incomprensione dei rischi, alla mancata conoscenza del corretto comportamento da adottare ed allo stress. La riduzione del numero di incidenti e della loro severità può essere ottenuta fornendo agli utenti avvertimenti (segnalazioni) rapidamente comprensibili e chiare istruzioni su come reagire alle differenti condizioni d'emergenza.

Uno modo pratico per fornire segnalazioni in tempo reale a tutti gli utenti della galleria è quello di servirsi di pannelli a messaggio variabile che possono informare i

conducenti sia tramite messaggi alfanumerici che mediante l'uso di pittogrammi. Ovviamente vanno investigati tempi, modi e forme di tali messaggi per assicurarsi che la risposta dell'utente sia quella voluta del designer. L'analisi del comportamento dei guidatori nei confronti di tali messaggi in una situazione d'emergenza come quella sopra descritta, non è perpetrabile con studi su strada per ovvie ragioni di sicurezza. È necessario utilizzare, dunque, per tali studi, ambienti di prova controllati e sicuri. La simulazione di guida è per questo motivo un contesto ideale per analisi di questo tipo. Nel documento si riportano i risultati di un esperimento sul comportamento dei guidatori nei confronti di un messaggio di "pericolo incendio in galleria" visualizzati tramite pannello a messaggio variabile in ambiente simulato.

4.2.1 Incendio nei tunnel: rischi per le persone

Per la maggior parte degli utenti della strada, il tunnel è un ambiente sconosciuto. All'interno di un edificio in fuoco, gli occupanti hanno il riflesso istintivo di cercare di evacuare e se conoscono il luogo in cui si trovano (domicilio, luogo di lavoro) l'evacuazione può avvenire senza conseguenze particolarmente gravi anche nelle condizioni peggiori.

L'evacuazione di un tunnel è invece molto meno "naturale" per varie ragioni. In primo luogo, gli utenti spesso sottostimano il pericolo che rappresenta il fumo emesso da un incendio situato a diverse centinaia di metri di distanza, di cui non si percepisce il calore emanato e che talvolta risulta anche difficile da notare. Inoltre, i differenti dispositivi di sicurezza all'interno del tunnel, in particolare le uscite d'emergenza, sono generalmente poco diffuse e quindi le modalità del loro utilizzo poco note alla maggior parte degli utenti della strada. È, quindi, poco probabile che un utente non esperto riesca a raggiungere un'uscita d'emergenza se, in più, la visibilità è scarsa a causa della presenza di fumo. La mancanza di visibilità è, dunque, il primo pericolo che minaccia l'utente nel caso di un incendio in tunnel.

L'utente bloccato nel fumo si trova ad essere esposto ai gas tossici che si sprigionano dall'incendio. La causa principale della presenza di questi gas dipende dal materiale plastico di cui i veicoli leggeri sono sempre più dotati. Inoltre i veicoli pesanti, a seconda della natura del loro carico, possono liberarne delle quantità ancora più

considerevoli. I trasporti di materiale pericoloso infine costituiscono dei casi estremi. L'incendio con dispersione di certe materie può avere quindi delle conseguenze catastrofiche.

La temperatura non è generalmente considerata un pericolo diretto di grande rilevanza. In effetti, è raro che la temperatura ad altezza uomo superi i limiti di sopportabilità prima di un tempo relativamente lungo, se non nelle immediate vicinanze dell'incendio o nel caso di un incendio particolarmente violento. Al contrario la temperatura in corrispondenza del soffitto può raggiungere anche diverse centinaia di gradi, comportando due forme di pericolo indiretto. Da una parte, infatti, si crea l'irraggiamento emesso da questi gas caldi, dall'altra il pericolo è costituito dalla caduta di oggetti dal soffitto: l'alta temperatura distrugge gli attacchi alle pareti di guaine porta-cavi, apparecchiatura d'illuminamento, etc.

4.2.2 L'organizzazione della sicurezza e il ruolo degli utenti

In un incendio all'interno di un tunnel, le operazioni di sicurezza (Fig. 4-1) vengono divise in due fasi distinte, la cui durata sono fortemente variabili da una galleria all'altra, a seguito della sua importanza e localizzazione:

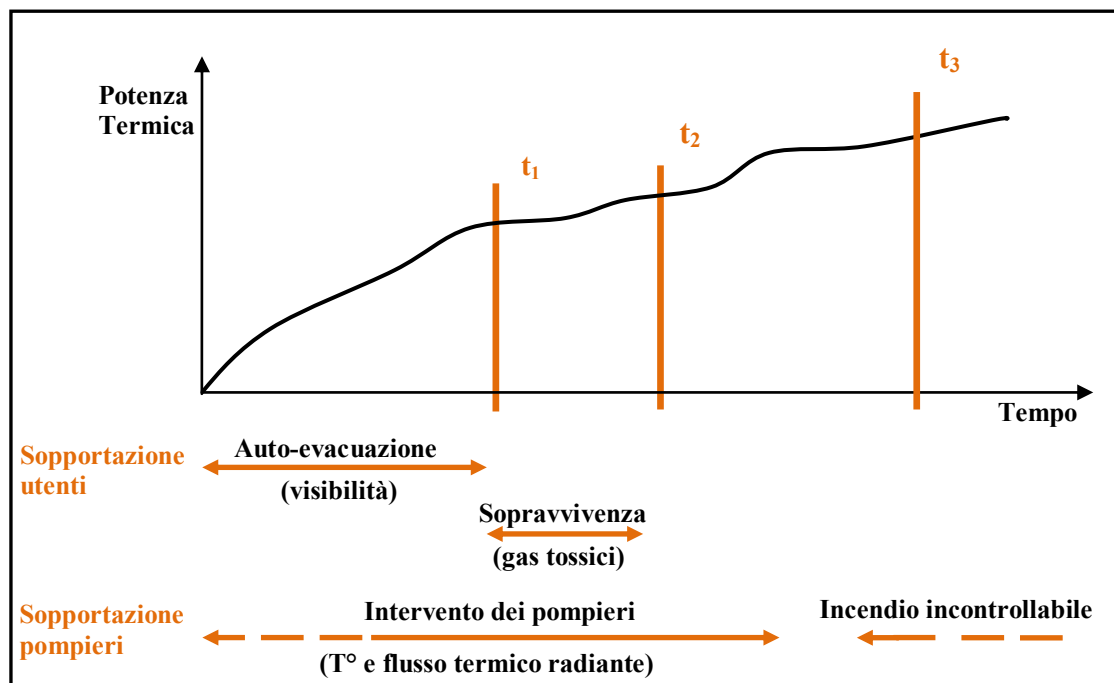


Fig 4-1 : Tempi di sopportazione

1. *la fase di auto-evacuazione*: durante i primi minuti dell'incendio, è fondamentale

che gli utenti siano in grado di evacuare il tunnel con le proprie forze, prima dell'intervento dei soccorsi.

2. *la fase di intervento dei soccorsi*, che può essere divisa in due tempi:

- l'evacuazione delle persone rimaste intrappolate nella galleria;
- la protezione dei beni, i veicoli e l'infrastruttura, mediante la lotta contro l'incendio. Si può verificare che l'incendio divenga incontrollabile (ad esempio, nella catastrofe del Tunnel del Monte Bianco, il fuoco ha imperversato per oltre 50 ore).

La sicurezza degli utenti di un tunnel nel caso di incendio si basa su di un sistema complesso di elementi tecnici e di organizzazione. Tra i dispositivi tecnici si possono citare numerosi equipaggiamenti: estintori, telefoni d'emergenza, detector automatici d'incendio, illuminazione di sicurezza, estrazione dei fumi.

La presenza di tutti questi dispositivi diventa inutile se la reazione degli utenti alla situazione d'incendio non è rapida, corretta e precisa.

In quasi tutti gli incendi in galleria, è stato osservato che, al di là dei ritardi dei soccorsi o nel lanciare l'allarme o dell'inadeguatezza dei sistemi di sicurezza, il numero delle vittime è fortemente dipeso da reazioni degli utenti poco ortodosse o, addirittura, irresponsabili:

- mancato arresto del veicolo nonostante il fumo.
- mancato allontanamento repentino dal veicolo con conseguente morte per asfissia.
- ricerca di rifugio nelle nicchie per i telefoni d'emergenza non dotate di aereazione o di porte resistenti al fuoco.
- indugiare all'interno della galleria nonostante il chiaro pericolo.
- manovre non consentite (retromarcia o inversione) con il proprio veicolo.

Queste reazioni possono essere giustificate dalla rarità dell'evento, dalla mancanza di informazione sul tipo di comportamento da adottare, dalla mancata comprensione della reale gravità della situazione, dalla condizione di panico o di stress che si crea.

È evidente che per evitare questi comportamenti che portano inesorabilmente alla morte dell'utente, non è sufficiente indicare solo tempestivamente la presenza di un incendio, ma è necessario informare gli utenti sul tipo di comportamento che ci si attende da loro.

4.2.3 L'esperimento

Stante tutte le premesse effettuate, lo scopo di questo esperimento è l'analisi della reazione dei conducenti nei confronti di un messaggio di "pericolo incendio in galleria" visualizzato tramite un pannello a messaggio variabile (PMV).

4.2.4 Il Metodo

4.2.4.1 I partecipanti

Il questionario per la selezione dei soggetti ed il questionario biografico sono stati somministrati sia direttamente che tramite e-mail come screening iniziale per l'accettabilità dei soggetti. Gli individui che soffrono di mal d'auto, frequenti emicranie, che sono malati di cuore, in stato interessante o che soffrono di una qualsiasi condizione medica o farmaceutica che li possa predisporre alla nausea, a disturbi visivi, alla sonnolenza sono stati considerati non idonei allo studio. Scopo della procedura di screening è stato quello di minimizzare la possibilità che i soggetti sperimentino il malessere da simulatore durante la guida. Inoltre, soltanto agli intervistati maggiorenni, in possesso di una patente valida e che guidano su strade extraurbane è stata consentita la partecipazione ai test.

Sono stati selezionati 33 soggetti. Tutti i soggetti lavorano all'Università degli Studi di Napoli Federico II e sono in possesso di una regolare licenza di guida. Il campione è composto di 19 uomini e 15 donne. Un soggetto donna si è sentito leggermente male (lieve nausea) durante la fase di addestramento, si è ritenuto quindi di non farle continuare la sperimentazione. L'età media dei partecipanti è di 32,5anni (Sq_m 5,4 anni).

I partecipanti hanno tra 6 e 18 anni di guida (in media 10,3 anni, Sq_m 4,1 anni), percorrono tra 2000 ed 30000 Km all'anno (media 14400 Km, Sq_m 9232 Km); la metà dei partecipanti guida prevalentemente in città e su strade extraurbane, la restante parte ha familiarità con tutti i tipi di strada. Il 60% dei soggetti possiede una vettura medio/piccola con cilindrata tra 1000 -1300 cc. Nessuno tra i partecipanti ha avuto incidenti rilevanti negli ultimi dieci anni; soltanto tre sono stati multati per infrazioni (eccesso di velocità) al codice stradale.

La totalità dei partecipanti possiedono un grado di istruzione elevato: sono tutti laureati.

4.2.4.2 Gli scenari

Sono previsti tre scenari di guida più un quarto scenario di addestramento. Quest'ultimo ha lo scopo di far familiarizzare i soggetti con i comandi (in particolare volante, pedali e cambio) del simulatore di guida e con le accelerazioni fornite dalla piattaforma dinamica che riproduce parzialmente le vere accelerazioni a cui è sottoposto il veicolo.

Per tale fase è stato realizzato uno scenario ad hoc (Fig. 4-2) che riproduce un tratto della SS 658 (Melfi-Potenza). La strada extraurbana, una corsia per senso di marcia, si sviluppa sia in viadotto che in rilevato per una lunghezza di circa 12 Km. La sezione della corsia è di 3,5 metri con una banchina pari ad un metro.



Fig 4-2 : Scenario di addestramento – SS658.

Lo scenario d'addestramento è stato così concepito:

- 1) Un primo tratto di 5 km senza veicoli autonomi (tutti gli altri veicoli presenti nella simulazione ad eccezione del veicolo pilotato, detto "interattivo"). In questo tronco di strada, l'utente si impratichisce dei comandi della cabina del simulatore: per il primo minuto della simulazione viene richiesto al guidatore di mantenere una bassa velocità (30-40 km/h) per adeguarsi alla sensibilità dello sterzo. Gradualmente, il soggetto acquista padronanza dei comandi e riesce a mantenere il veicolo al centro corsia anche a velocità più elevate di quella inizialmente consigliata.

- 2) Nel secondo tratto di circa 4 km sono presenti veicoli autonomi in tutte e due i sensi di circolazione. L'utente addestrato può ora affrontare situazioni più complesse e sperimentare le accelerazioni fornite dalla piattaforma. Durante il percorso è installato un pannello a messaggio variabile di incidente allo scopo di far familiarizzare i partecipanti a tale segnaletica. Come indicato dal pannello a 1km è modellizzato un incidente.
- 3) L'ultimo tratto di 3km è caratterizzato da un plotone di 7 veicoli autonomi che precedono chi guida il simulatore simulando una situazione di Stop&Go. Scopo di questa fase è addestrare il soggetto nella frenata d'emergenza e non: tramite tale tecnica si impara come dosare la pressione sul pedale del freno a seconda del tipo di frenata richiesta dalla situazione di guida.

Ovviamente il livello di competenza raggiunto con tale addestramento da ogni soggetto è verificato sia quantitativamente che qualitativamente.

I tre scenari di guida (Fig. 4-3) sono costituiti tutti da una strada extraurbana che si sviluppa per i primi 8,5km a cielo aperto e di seguito procede per i successivi 2,3 km in galleria. Una descrizione esaustiva della procedura usata per la creazione degli scenari di test e delle caratteristiche geometriche della strada è riportata nell'Allegato A.



Fig. 4-3 – Pannello a messaggio variabile e frusta in galleria.

Il primo scenario è lo scenario base senza pannello né frusta e verrà utilizzato come scenario di riferimento per gli altri due. Il secondo scenario presenta in galleria un pannello a messaggio variabile in corrispondenza del km 9,5. Il messaggio riportato dal pannello è “STOP INCENDIO RIFUGIO A 100 M”. Ovviamente a 100 metri dal pannello è presente un rifugio.

Nel terzo scenario, oltre al pannello già descritto è presente, nella sezione della galleria corrispondente al rifugio, una frusta costituita da frecce luminose che, muovendosi lungo la volta della galleria, indicano la porta del rifugio.

Per tutti e tre gli scenari, inoltre, è stato modellizzato un effetto speciale di fumo (Fig. 4-4). Il fumo è visibile al chilometro 9,65, cioè 50 metri dopo aver superato il rifugio.

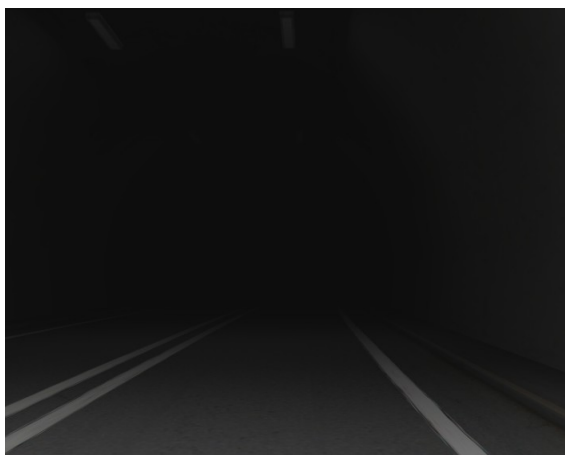


Fig. 4-4 – Effetto fumo in galleria.

Data la particolarità della situazione d'emergenza, ogni partecipante guida su uno solo dei tre scenari. In definitiva, 9 soggetti hanno completato il primo scenario, 12 il secondo e 10 il terzo; uno si è sentito male durante la guida di addestramento.

Dopo i test ad ogni partecipante è stato somministrato un questionario per raccogliere le sue sensazioni sulla guida ed sulla situazione di emergenza testata.

4.2.5 Risultati

Di seguito si riportano i risultati ottenuti da una prima elaborazione parziale dei dati rilevati durante i test e dei questionari compilati.

4.2.5.1 Risultati scenario No PMV

Tutti i soggetti hanno dichiarato di aver guidato nel modo più naturale possibile. Il grado di realismo medio dello scenario d'emergenza è di 7,5/10. Uno dei soggetti non

ha compreso la situazione di pericolo neanche di fronte al fumo e si è arrestato solo quando il fumo è diventato molto denso e la visibilità si è annullata. Dei rimanenti soggetti, circa il 60% si è arrestato lentamente entrando a fine frenata nel fumo, gli altri hanno frenato in maniera decisa (in media $-2,35 \text{ m/s}^2$) alla vista del fumo. La maggior parte di coloro che hanno frenato lentamente ha dichiarato di non aver percepito di essere in una condizione di grave pericolo (in media il livello di percezione del pericolo si è attestato su 2,5/10).

I dati relativi alla posizione laterale del veicolo alla vista del fumo non appaiono rilevanti. Particolarmente interessanti sono la reazione degli utenti successiva all'arresto del veicolo: solo tre utenti si dirigono all'uscite d'emergenza, gli altri si ripartiscono in maniera equa tra l'inversione/retromarcia ed il rimanere vicino/dentro il veicolo nell'attesa dei soccorsi.

4.2.5.2 Risultati Scenario PMV

Due soggetti non hanno letto il messaggio contenuto nel pannello, di questi uno ha dichiarato di non aver visto il pannello. Entrambi si sono fermati solo una volta all'interno del fumo molto denso e hanno ammesso di non aver compreso la situazione di pericolo. Tra i soggetti rimanenti solo il 40% si sono arrestati al rifugio come richiesto dal pannello (tutti hanno compreso il messaggio), ad una distanza di circa ± 40 metri.

Il rimanente 60% ha ridotto la velocità alla lettura del messaggio in media di 26km/h ma si è arrestato, nonostante avesse compreso il messaggio, solo alla vista del fumo, senza curarsi della presenza del rifugio.

Le reazioni degli utenti successive all'arresto del veicolo in questo scenario appaiono più valide rispetto allo scenario senza PMV, infatti, il 70% dei soggetti ha dichiarato che si sarebbe recata al rifugio all'arresto del veicolo. L'opzione rimanere vicino/dentro il veicolo nell'attesa dei soccorsi è comunque considerata dal rimanente 30%.

4.2.5.3 Risultati Scenario PMV+Frusta

Tutti i soggetti hanno letto e compreso il messaggio visualizzato dal pannello. Il 60%

degli utenti si è arrestato in corrispondenza del rifugio. L'intorno, rispetto alla posizione del rifugio, in cui si sono fermati gli utenti si è ridotto a circa ± 16 metri.

Gli altri soggetti (40%) si sono arrestati solo alla vista del fumo in maniera brusca; comunque hanno ridotto la loro velocità alla lettura del pannello in media di 33km/h. Per quanto riguarda la reazione successiva all'arresto del veicolo si è osservato una percentuale pari al 80% di soggetti che dichiarano che si sarebbero diretti verso il rifugio.

4.2.6 Conclusioni

L'incendio in galleria è un evento raro ma può avere esiti disastrosi in termini di vite umane. I dispositivi di sicurezza possono ridurre le conseguenze di un tale incidente ma diventano inutili di fronte a comportamenti non corretti e, talvolta, rischiosi degli utenti. È necessario informare gli utenti in tempo reale sul corretto comportamento da adottare in tali situazioni. In questo studio, condotto con l'ausilio di un simulatore di guida, si analizzano gli effetti sul comportamento di guida di messaggi del tipo "pericolo incendio in galleria" visualizzati su pannelli a messaggio variabile in una situazione simulata di incendio.

Sono state analizzati tre scenari: uno senza pannello, il secondo con pannello e l'ultimo con pannello più una frusta che individuava il rifugio.

I risultati evidenziano il buon realismo della simulazione di guida, infatti nello scenario senza pannello si sono osservati comportamenti simili a quelli riscontrati nella realtà.

Nonostante la ridotta *compliance* (40%) all'informazione fornita dal pannello, si osserva che, in presenza dello stesso, il soggetto si pone, qualunque sia la sua reazione, in uno stato di attenzione e, quindi, si riduce l'effetto sorpresa prodotto dal fumo dell'incendio; si riducono, inoltre, le velocità di approccio all'incendio/fumo garantendo spazi di frenatura minori.

Nel caso di pannello più frusta si verifica un discreto aumento della compliance, probabilmente la presenza della frusta avvalora indirettamente il messaggio contenuto nel pannello, e si nota una maggiore precisione nell'arresto del veicolo in prossimità del rifugio.

Infine, particolarmente interessante appare l'evoluzione delle reazioni degli utenti successive all'arresto nel passaggio tra gli scenari senza e con pannello: la percentuale di utenti che si metterebbe in salvo andando al rifugio aumenta in maniera importante.

4.3 Effetti di sistemi di delimitazione delle curve sul comportamento di guida: un'analisi al simulatore di guida

Le curve planimetriche sono un elemento critico per la sicurezza stradale. Diversi studi hanno evidenziato un'elevata correlazione tra percentuale di incidenti e la curvatura orizzontale, tanto che quest'ultima viene considerata come un fattore molto più rilevante della larghezza della strada, della visibilità verticale o della distanza di visibilità.

Incidenti frontali, scontri con oggetti fissi, fuoriuscite e ribaltamenti si verificano in maniera sproporzionata nelle sezioni curvilinee della strada ed è stata stimata che la percentuale di incidenti in curva è tra 2 e 4,5 volte più elevata che in rettilineo.

Tre meccanismi generali possono indurre i guidatori all'errore in curva:

- Scarsa attenzione
- Errata percezione della velocità d'approccio e del raggio della curva
- Errato posizionamento sulla corsia

Ognuno di questi tre aspetti gioca un ruolo fondamentale negli incidenti in curva e nessuno di essi è interamente indipendente dagli altri.

Esistono differenti trattamenti per gestire la velocità in curva, dalla segnaletica verticale semplice di pericolo curva, fino a trattamenti sulla superficie stradale (es.: rallentatori di velocità di effetto ottico, acustico o vibratorio).

Tali sistemi hanno, in generale, lo scopo di attirare l'attenzione del conducente, di avvisarlo della presenza della curva e di spingerlo a ridurre la velocità nell'approccio della stessa.

Sistemi più complessi, come i sistemi luminosi di delimitazione della curva, hanno in più il vantaggio di accompagnare il guidatore durante la percorrenza della curva e di indicarne la severità (in termini di raggio di curvatura). Inoltre, poiché tali sistemi enfatizzano le caratteristiche percettive della curva, possono funzionare anche in maniera implicita, senza la cosciente attenzione del guidatore.

L'analisi del comportamento dei guidatori nei confronti di tali sistemi in curva, non è facilmente perpetrabile con studi su strada per ovvie ragioni di sicurezza. È consigliato utilizzare, dunque, per tali studi, ambienti di prova controllati e sicuri. La simulazione di guida è per questo motivo un contesto ideale per analisi di questo tipo.

Di seguito, si riportano la metodologia e gli strumenti utilizzati ed i risultati ottenuti

in un esperimento sul comportamento dei guidatori in presenza di delimitatori modulari di curva, con e senza sistemi luminosi sequenziali, in un ambiente simulato di guida.

4.3.1 Creazione 3D dell'ambiente di guida

L'ambiente da realizzare è stato definito a partire da informazioni di diverso tipo: foto, immagini sintetiche, disegni cartacei, informazioni sotto forma tabellare. Tali informazioni sono state combinate al fine di definire con precisione la dimensione, la posizione e l'aspetto di ogni elemento nello spazio 3D. La scena da realizzare consiste di tre macromodelli principali, che verranno integrati tra di loro: l'infrastruttura stradale, i delimitatori modulari di curva (con e senza sistema luminoso sequenziale) ed il terreno.

L'intero ambiente di guida, realizzato il 3D, si estende per circa 13 Km in lunghezza, 6 Km in larghezza ed 200 m in altezza.

L'infrastruttura stradale è costituita da una strada extraurbana a doppio senso (una corsia per senso di marcia) di tipo C1 con le seguenti caratteristiche:

- Due corsie di marcia da 3,75 m;
- Banchina da 1,5 m;
- Pendenza longitudinale massima pari al 7%;
- Raggio di curvatura orizzontale minimo pari a 118 m.
- Intervallo velocità di progetto 60-100

In particolare, la strada modellizzata è in piano e si estende per circa 20 Km a cielo aperto parte in trincea e parte in rilevato.

Il tracciato è costituito da diverse serie di clotoide-curva-clotoide separate da tratti in rettilineo di 1200 metri. Le curve presentano raggi variabili di 178, 300, 600 ed 800 metri: i parametri e le lunghezze delle clotoidi sono quelli minimi previsti dalla normativa per i diversi raggi.

È previsto un dispositivo di ritenuta, posto a bordo strada, lungo tutto il tracciato. Le piazzole di sosta non sono state modellizzate.

Per il terreno, il modello è stato generato in maniera casuale in modo da creare un

paesaggio realistico e non monotono.

Particolare cura è stata profusa nella modellizzazione dei delimitatori modulari di curva, essendo l'elemento principale della sperimentazione. Per le caratteristiche dei delimitatori si è fatto riferimento all'articolo 42 del codice stradale:

“Sono costituiti da un pannello quadrato delle dimensioni di 60x60 cm sulla viabilità ordinaria e 90x90 cm sulle autostrade e strade extraurbane principali, con un disegno a punta di freccia bianca su fondo nero. Lo spaziamento longitudinale fra gli elementi è di massima quello previsto dalla tabella seguente”(in grassetto lo spaziamento relativo ad una curva di raggio 178 metri)

Raggio della curva [m]	Spaziamento longitudinale [m]
da 30 a 50	8
da 50 a 100	12
da 100 a 200	20
da 200 a 400	30
oltre 400 (se necessario)	da 30 a 50

Per garantire la visibilità dei delimitatori ad una distanza superiore ai 350 metri è stata utilizzata la tecnica del L.O.D. (Level Of Detail), che prevede diverse rappresentazioni di uno stesso oggetto, ognuna delle quali visibili in un range definito di distanza dall'osservatore.

L'effetto luce è stato modellizzato tramite l'utilizzo di una texture (immagine mappata su di una superficie) di tipo “halo” che tramite l'applicazione della trasparenza è in grado di fornire un effetto volumetrico alla rappresentazione finale.

Infine, l'intermittenza delle luci poste sul delimitatore è stata riprodotta con una rappresentazione di tipo “switch”. Tramite tale tecnica è possibile alternare due stati di una stessa rappresentazione, nel nostro caso, gli stati in questione sono “luce spenta” e

“luce accesa” (Fig. 4-). La gestione del sistema di “switch” viene effettuata dinamicamente ed in tempo reale tramite scenario: in particolare, da scenario è possibile modificare la sequenza e la frequenza del sistema luminoso.

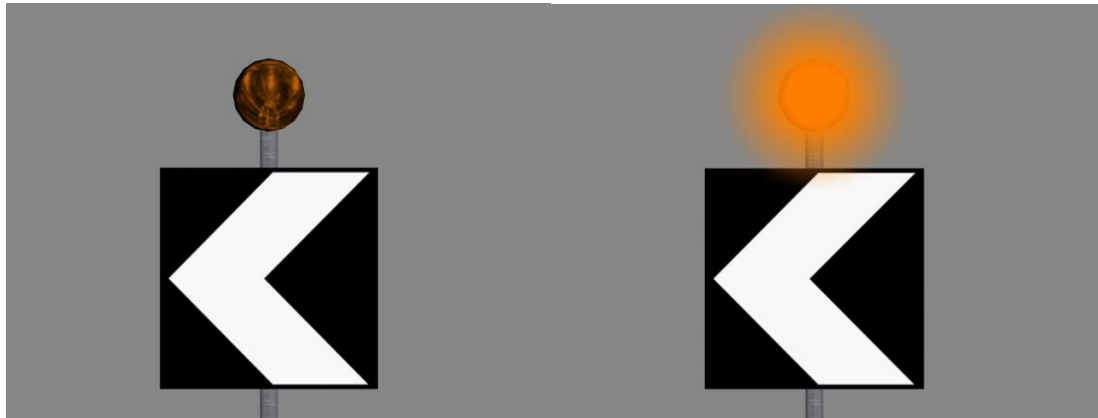


Fig. 4-5 : Delimitatori modulari di curva con sistema luminoso(spento e acceso).

4.3.2 Descrizione del metodo di prova

Il simulatore di guida VERA è stato utilizzato per investigare gli effetti della segnaletica complementare (delimitatori modulari di curva con e senza sistema luminoso sequenziale) sulla velocità e sulla posizione laterale adottate in curva dai conducenti. L’analisi è stata realizzata su curve di raggio (178 metri), in modo tale da garantire, data la velocità di progetto della strada scelta (tipo C1), una variazione di velocità (ΔV) tra la curva e il precedente tratto rettilineo pari a 30 Km/h.

4.3.2.1 Selezione e caratteristiche soggetti

Un questionario per la selezione dei soggetti ed un questionario biografico sono stati somministrati sia direttamente che tramite e-mail come screening iniziale per l’acceptabilità dei soggetti. Gli individui che soffrono di mal d’auto, frequenti emicranie, che sono malati di cuore, in stato interessante o che soffrono di una qualsiasi condizione medica o farmaceutica che li possa predisporre alla nausea, a disturbi visivi, alla sonnolenza sono stati considerati non idonei allo studio. Scopo della procedura di screening è stato quello di minimizzare la possibilità che i soggetti sperimentino il

malessere da simulatore durante la guida. Inoltre, soltanto agli intervistati maggiorenni, in possesso di una patente valida e che guidano su strade extraurbane è stata consentita la partecipazione ai test.

Sono stati selezionati 21 soggetti. Tutti i soggetti lavorano o studiano all'Università degli Studi di Napoli Federico II ed sono in possesso di una regolare licenza di guida. Il campione è composto di 15 uomini e 6 donne.

L'età media dei partecipanti è di 28,6 anni (Sqm 6.8 anni). I partecipanti hanno tra 5 e 37 anni di guida (in media 10 anni, Sqm 7,2 anni), percorrono tra 2000 ed 25000 Km all'anno (media 10142 Km, Sqm 6673 Km); la metà dei partecipanti guida prevalentemente in città e su strade extraurbane, la restante parte ha familiarità con tutti i tipi di strada. Il 65% dei soggetti possiede una vettura medio/piccola con cilindrata tra 1000 -1300 c.c.. Soltanto uno dei partecipanti ha avuto un incidente negli ultimi tre anni; sei sono stati multati per infrazioni (eccesso di velocità, sorpasso, mancato rispetto del segnale di stop) al codice stradale.

La totalità dei partecipanti possiede un grado di istruzione elevato: sono tutti laureati.

4.3.2.2 Scenari

È previsto uno scenario di guida più un secondo scenario di addestramento. Il training dei partecipanti all'esperimento ha lo scopo di farli familiarizzare con i comandi (in particolare volante, pedali e cambio) del simulatore di guida e con le accelerazioni fornite dalla piattaforma dinamica che emula parzialmente le vere accelerazioni a cui è sottoposto il veicolo. Per tale fase è stato realizzato uno scenario ad hoc.

Tale scenario consiste in una strada extraurbana a doppio senso (una corsia per senso di marcia) di tipo C1 (corsie da 3,75m con banchine da 1,5m).

In particolare, la strada modellizzata è in piano e si estende per circa 15 Km a cielo aperto parte in trincea e parte in rilevato.

Il tracciato è costituito da diverse serie di clotoide-curva-clotoide separate da tratti in rettilineo di 1200 metri. Le curve presentano raggi variabili di 300, 400 ed 600 metri: i parametri e le lunghezze delle clotoidi sono quelli previsti dalla normativa per i diversi raggi.

È previsto un dispositivo di ritenuta, posto a bordo strada, lungo tutto il tracciato.

Lo scenario di guida è così concepito:

1. Un primo tratto “base” di 5 km senza altri veicoli autonomi (tutti gli altri veicoli presenti nella simulazione ad eccezione del veicolo pilotato, detto “interattivo”). In questo tronco di strada, l’utente si addestra all’uso dei comandi della cabina del simulatore : per il primo minuto di simulazione viene richiesto al guidatore di mantenere una bassa velocità (30-40 km/h) per un più facile controllo del veicolo. Gradualmente, il soggetto acquista padronanza dei comandi e riesce a mantenere il veicolo al centro corsia anche a velocità più elevate di quella inizialmente consigliata.
2. Nel secondo tratto di circa 10 km sono presenti veicoli autonomi in tutte e due i sensi di circolazione. L’utente addestrato può ora affrontare situazioni più complesse e sperimentare le accelerazioni fornite dalla piattaforma.

Ovviamente il livello di competenza raggiunto da ogni soggetto con tale addestramento verrà verificato sia direttamente dallo sperimentatore che indirettamente dall’analisi delle risposte al questionario post-pretest.

Lo scenario di guida (Fig. 4-6) è costituito da una strada extraurbana secondaria. Ad ognuno dei soggetti selezionati viene richiesto di guidare rispettando i limiti imposti dal codice e quelli suggeriti dalla geometria della strada.



Fig. 4-6 : Curva test con delimitatori modulari e “frusta luminosa”.

Durante il percorso, i soggetti incontrano tre curve di raggio pari a 178 metri: la prima senza alcuna segnalazione, la seconda con i delimitatori modulari di curva ed l’ultima con i delimitatori modulari di curva con sistema luminoso sequenziale (“frusta luminosa”).

Sono stati previsti dei veicoli autonomi in senso opposto a quello del veicolo interattivo.

I dati raccolti durante la simulazione sono di tipo qualitativo (video, questionari prima e dopo la guida) e quantitativo (velocità, accelerazione, posizione sulla corsia, azioni sul pedale e sul volante, etc.).

4.3.3 Analisi dati

I dati sono stati raccolti ad una frequenza di 20 Hz e sono stati convertiti in valori (velocità e posizione laterale) medi per ogni metro del tracciato. Le misure utilizzate per l’analisi dei dati riguardano le tre aree relative alle curve di raggio 178 metri caratterizzate da un diverso trattamento (nessun trattamento, delimitatori modulari di curva, delimitatori modulari di curva con sistema luminoso sequenziale). In particolare, sono stati analizzati i dati raccolti 1000 metri prima dell’inizio della curva e

300 metri dopo la fine della curva. Nello schema, fuori scala, in Fig. 4-7 sono indicati i punti di maggior interesse nell'area di analisi.

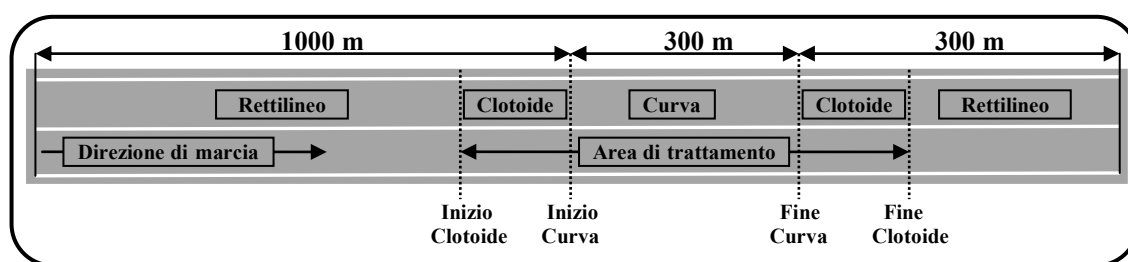


Fig. 4-7 – Schema area d'analisi.

4.3.3.1 Velocità

Nella tabella 4-1 sono riportati velocità medie per i diversi trattamenti in punti rilevanti della curva.

Tab 4-1 : Velocità medie (V.m.), deviazione standard (D.s.) ed intervallo di confidenza al 95% per i diversi trattamenti.

	0 - Nessun trattamento			1- Delimitatori modulari di curva			2 - Delimitatori + sistema sequenziale luminoso			Variazione [%]		
	V. m.	D. s.	Intervallo confid.	V. m.	D. s.	Intervallo confid.	V. m.	D. s.	Intervallo confid.	0-1	0-2	1-2
Inizio Clotoide	83.3	11.2	77.2 ÷ 89.5	76.3	15.8	67.6 ÷ 85.0	71.2	13.6	63.7 ÷ 78.7	-8.4	-14.6	-6.7
Inizio Curva	78.0	11.0	72.0 ÷ 84.1	71.6	14.6	63.6 ÷ 79.6	67.5	13.0	60.3 ÷ 74.6	-8.3	-13.5	-5.7
Minima Curva	67.3	10.3	61.7 ÷ 73.0	59.3	9.8	53.9 ÷ 64.6	58.7	8.4	54.1 ÷ 63.3	-12.0	-12.8	-0.9
Metà Curva	75.3	10.8	69.3 ÷ 81.3	70.4	9.9	64.9 ÷ 75.8	69.5	9.6	64.2 ÷ 74.8	-6.6	-7.7	-1.2
Media Curva	75.2	9.4	70.0 ÷ 80.4	68.7	10.0	63.2 ÷ 74.2	69.3	7.8	65.0 ÷ 73.6	-8.6	-7.9	0.8
Fine Curva	81.7	14.0	74.0 ÷ 89.4	73.2	15.3	64.8 ÷ 81.6	74.0	11.9	67.4 ÷ 80.5	-10.4	-9.5	1.1
Fine Clotoide	83.5	14.2	75.7 ÷ 91.3	74.9	15.5	66.4 ÷ 83.4	76.4	11.2	70.3 ÷ 82.6	-10.3	-8.5	2.0

In particolare, la variazione di velocità, nel caso di semplici delimitatori modulari di curva, è pari a 5.4 Km/h (8.3%): tale differenza di velocità è statisticamente significativa, $F(1,30) = 4.38$, $p < 0.05$. Una riduzione quasi doppia (10.5 Km/h), sempre rispetto alla situazione di controllo, si osserva in presenza di delimitatori accoppiati con un sistema sequenziale luminoso. L'analisi di varianza dimostra un significativo effetto ($F(1,30) = 6.96$, $p < 0.02$) di tale trattamento sulla velocità d'ingresso in curva. Una

similare variazione delle velocità medie tra trattamenti e controllo si ha in corrispondenza del punto d’inizio della clotoide che precede l’ingresso in curva.

I due trattamenti inducono, inoltre, una velocità media minima raggiunta in curva praticamente uguale pari a circa 59 Km/h, con una diminuzione rispetto alla curva senza trattamento approssimativamente di 8 Km/h.

Anche in termini di velocità media mantenuta in curva, ottenuta come media dei valori medi di velocità osservati in curva, nelle curve “trattate” si sono registrati valori simili (69 Km/h), inferiori di circa 6 Km/h nei confronti della situazione di controllo.

Per un rapido confronto tra i diversi trattamenti, sono state riportate in Fig. 4-8 le velocità medie, proposte in tabella 4-1, con i rispettivi intervalli di confidenza (95%).

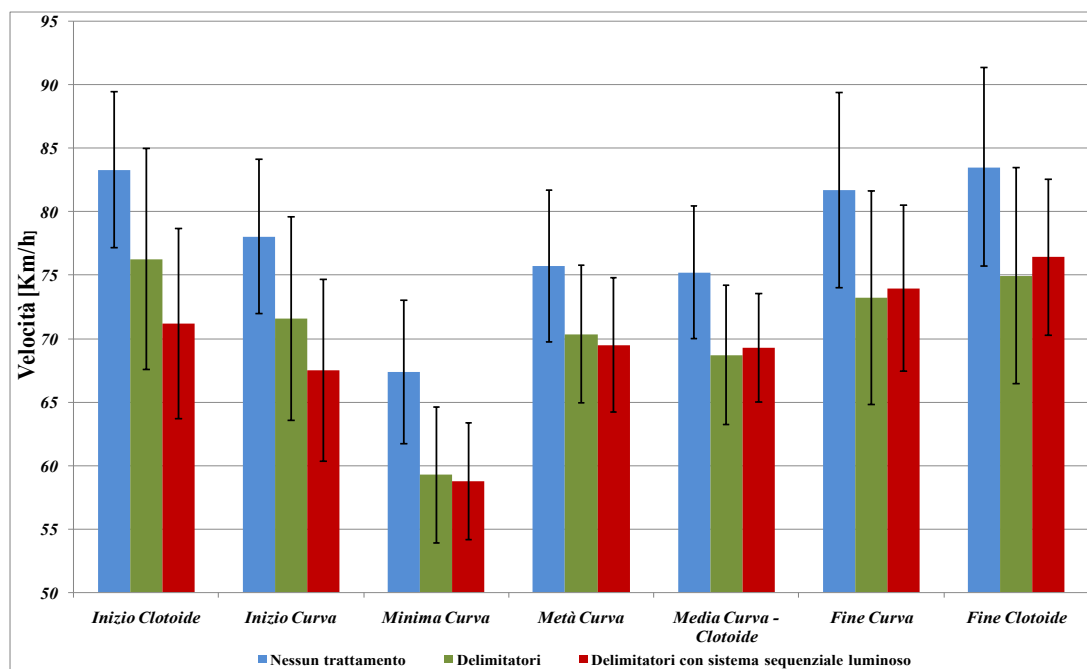


Fig. 4-8 : Confronto delle velocità medie (intervalli di confidenza al 95%) per i diversi trattamenti.

Dall’analisi dei profili di velocità media (Fig. 4-9), l’influenza di entrambi i trattamenti è evidente a partire da circa 100 metri prima dell’ingresso in curva e permane ben oltre la fine della curva.

Si nota, sempre in Fig. 4-9, che nelle curve con trattamento la velocità minima viene raggiunta ad una distanza da inizio curva minore che nel caso di riferimento: ciò è indice dell’effetto benefico delle segnalazioni. Più precisamente, nella curva di controllo, la velocità minima si ha in media a circa 92 metri dall’ingresso in curva, nel caso di delimitatori a 66 metri ed, infine, nell’ultimo trattamento si ha un dimezzamento rispetto al valore di controllo (45 metri).

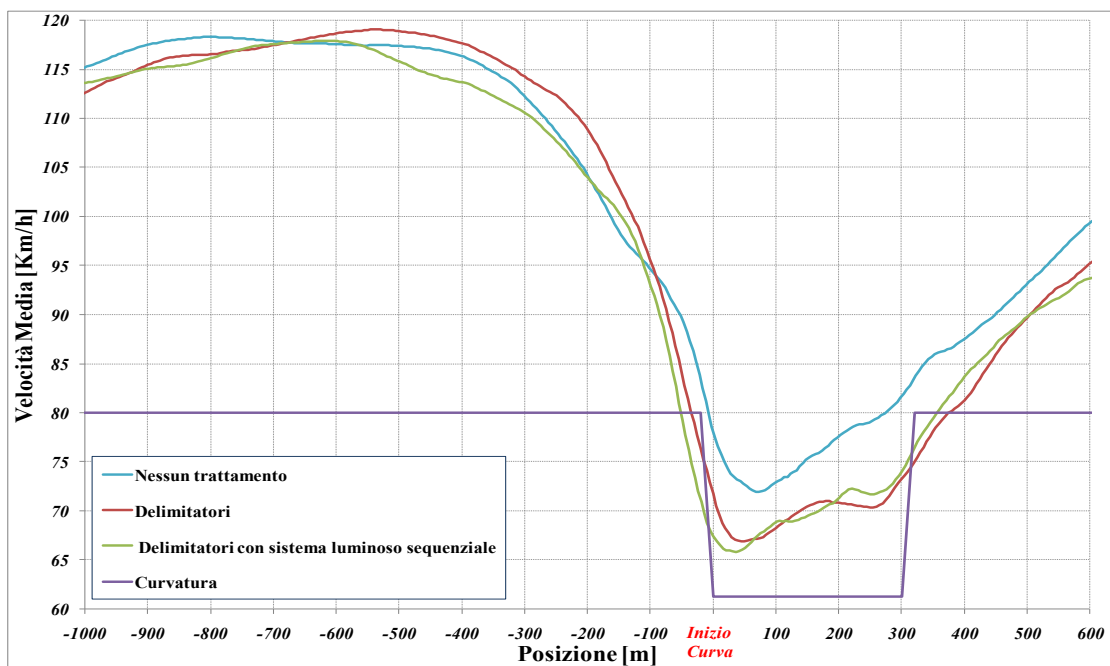


Fig. 4-9 : Profili di velocità media per i diversi trattamenti.

Le misure indagate sembra influenzino positivamente anche il comportamento tenuto dai guidatori all'interno della curva. Infatti, nella curva senza segnalamento, l'utente tende in media ad accelerare per riportarsi alla velocità desiderata subito dopo il raggiungimento della velocità minima a seguito dell'ingresso in curva. In presenza dei trattamenti, invece, la velocità mantenuta in curva è quasi costante e l'utente accelera solo in corrispondenza dell'uscita dalla curva. Tale differenza di comportamento è sicuramente da imputare ai segnalamenti che indicano ai guidatori sia la lunghezza che la severità della curva percorsa.

In ultimo, sono stati investigati la distanza (tempo) media di reazione alla curva/segналamento, intesa come la distanza intercorrente tra la posizione in cui il soggetto inizia a decelerare (azione sull'acceleratore o sul freno) a seguito della presenza della curva/segналamento e quella corrispondente all'inizio curva, e la variazione media di velocità (ΔV) corrispondente alla distanza di reazione sopra definita.

Nella curva di controllo, la distanza media di reazione al cambio di curvatura è pari a 346 metri (12.8 secondi), la variazione di velocità nella fase di decelerazione è di 41.5 Km/h. Nel caso dei soli delimitatori, tale distanza, intesa come distanza di reazione al segnale, si incrementa di 45 metri rispetto alla situazione precedente e la variazione di velocità corrispondente è pari a 54.3 Km/h. Infine, per i delimitatori con sistema

luminoso sequenziale, l'utente reagisce 444 metri (16.1 secondi) prima dell'inizio della curva, la differenza media di velocità tra l'istante di reazione e quello di ingresso in curva è pari a 58.9 Km/h. La distribuzione per intervalli di velocità delle ΔV (Fig. 4-10), conforta i dati medi sopra riportati ed mostra l'effettivo impatto dei due trattamenti in termini di percentuale di utenti e corrispondente variazione di velocità tra rettilineo e curva.

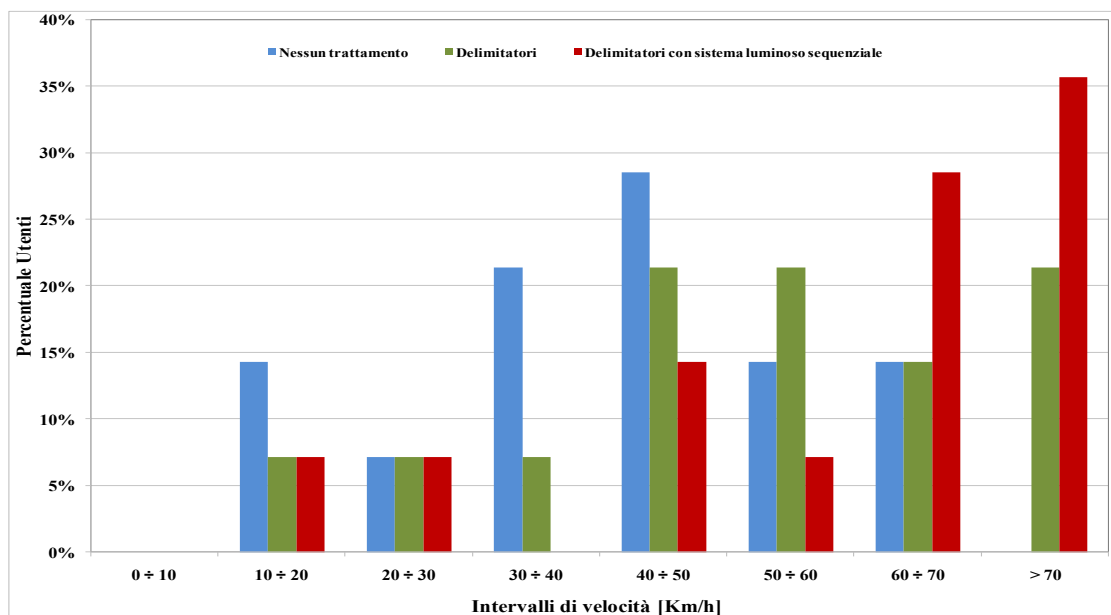


Fig. 4-10 : Distribuzione della variazione di velocità rettilineo-curva per i diversi trattamenti.

Questi risultati ribadiscono l'effettiva efficacia di entrambe le misure oggetto di sperimentazione, indicando una maggiore incidenza, in termini di sicurezza, dei delimitatori con sistema luminoso sequenziale.

4.3.3.2 Posizione laterale

Le posizioni laterali medie, riportate in tabella 2 ed in Fig. 4-11, sono state registrate rispetto al centro corsia (larghezza della corsia = 3.75 metri): valori positivi della posizione laterale indicano che il veicolo si trova a destra rispetto al centro corsia e viceversa.

Ad inizio curva, in presenza di delimitatori, si nota in media una maggiore tendenza a spostarsi verso il centro strada rispetto agli altri due casi trattati. La posizione laterale

media all'interno della curva non sembra essere in alcun modo influenzata dai trattamenti (tabella 4-2).

Tab 4-2 : Posizione laterale medie (P.L.m.) rispetto al centro corsia, deviazione standard (D.s.) ed intervallo di confidenza al 95% per i diversi trattamenti.

	0 - Nessun trattamento			1- Delimitatori modulari di curva			2 - Delimitatori + sistema sequenziale luminoso		
	P.L.m.	D. s.	Intervallo confid.	P.L.m.	D. s.	Intervallo confid.	P.L.m.	D. s.	Intervallo confid.
Inizio Clotoide	-0.05	0.40	-0.27 ÷ 0.16	0.09	0.32	-0.08 ÷ 0.27	-0.07	0.33	-0.25 ÷ 0.11
Inizio Curva	0.46	0.35	0.26 ÷ 0.65	0.66	0.36	0.45 ÷ 0.86	0.39	0.42	0.16 ÷ 0.62
Media Curva	0.59	0.40	0.37 ÷ 0.82	0.61	0.37	0.41 ÷ 0.82	0.58	0.35	0.38 ÷ 0.78
Fine Curva	0.87	0.54	0.58 ÷ 1.17	0.69	0.40	0.47 ÷ 0.92	0.76	0.63	0.41 ÷ 1.11
Fine Clotoide	0.44	0.39	0.22 ÷ 0.65	0.50	0.42	0.26 ÷ 0.72	0.45	0.58	0.26 ÷ 0.65

La deviazione standard della posizione laterale è un indice del controllo laterale del veicolo: minore è la deviazione, migliore è il controllo laterale del veicolo. All'interno della curva, si osserva che i trattamenti portano ad una deviazione standard significativamente minore, quindi, ad un miglior controllo.

Dall'analisi della posizione del volante (varia tra -1 ÷ +1, positiva a sinistra), si è osservato che la deviazione standard (maggiore è la deviazione della posizione del volante, maggiore è lo sforzo impiegato nello sterzare), in caso di segnalamento, diminuisce in maniera significativa: si riduce, rispetto alla situazione di controllo, del 43% per i soli delimitatori e del 47% per quelli combinati con un sistema luminoso sequenziale.

Infine, i profili della posizione laterale media, in Fig. 4-11, sebbene, non forniscano alcuna ulteriore indicazione sugli effetti dei trattamenti all'interno della curva, evidenziano un aumento della distanza a cui viene percepita la curva se indicata dalla segnaletica. Infatti, i guidatori, nell'approcciare una curva, tendono a portarsi a destra rispetto al centro corsia in modo da affrontare al meglio o, eventualmente, tagliare la curva. Nel caso di segnalamento, tale manovra viene effettuata decine di metri prima rispetto alla curva non segnalata, quindi, la presenza della curva e la sua possibile severità viene avvertita in anticipo. In particolare, i delimitatori con un sistema luminoso sequenziale hanno un effetto significativo ($F(1,30)=4.85$, $p<0.05$) sulla posizione laterale a partire da circa 380 metri prima dell'ingresso in curva.

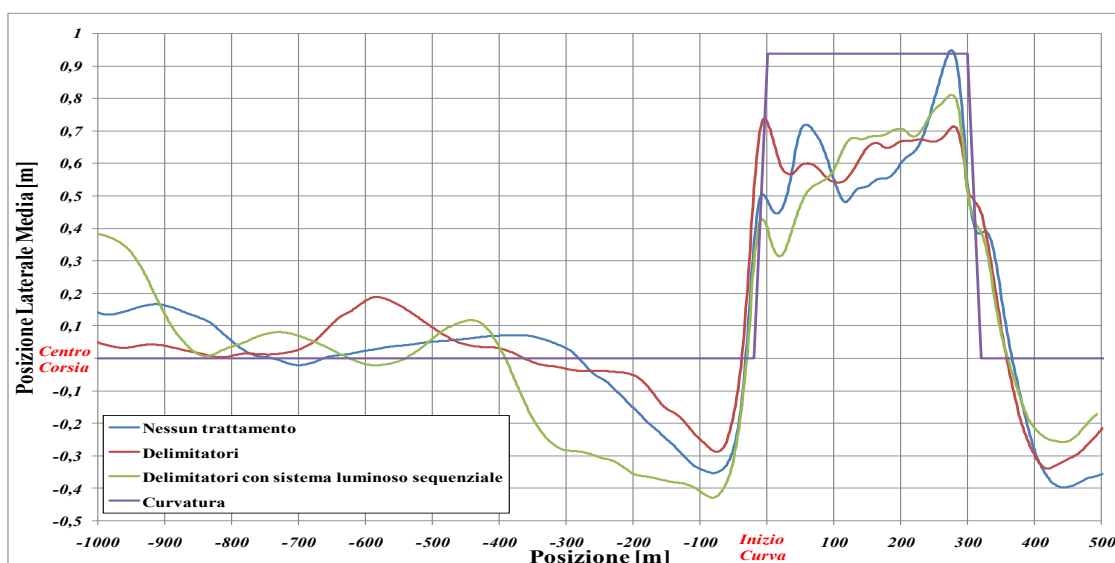


Fig. 4-11 : Confronto tra la posizione laterale media nei diversi trattamenti.

4.3.3.3 Effetti dei trattamenti sui profili di velocità

La velocità è stata misurata 600 m prima dell'inizio della curva e fino a 200 m dopo la fine della curva. Per ogni trattamento e per ogni soggetto sono stati ottenuti profili di velocità separati. In tal modo, è stato possibile testare in che posizione prima o dopo l'inizio della curva i due trattamenti (delimitatori modulari di curva, delimitatori modulari di curva con sistema luminoso sequenziale) separatamente hanno avuto effetto sulle distribuzioni delle velocità.

Dall'analisi della varianza in ogni sezione (distanza tra le sezioni 5 m) è possibile ricavare le stime della percentuale di varianza spiegata relativa all'effetto principale per ogni trattamento. Tali indici dell'importanza relativa dell'influenza dei trattamenti sulla velocità adottata sono stati riportati in Fig. 4-12 rispetto alla posizione.

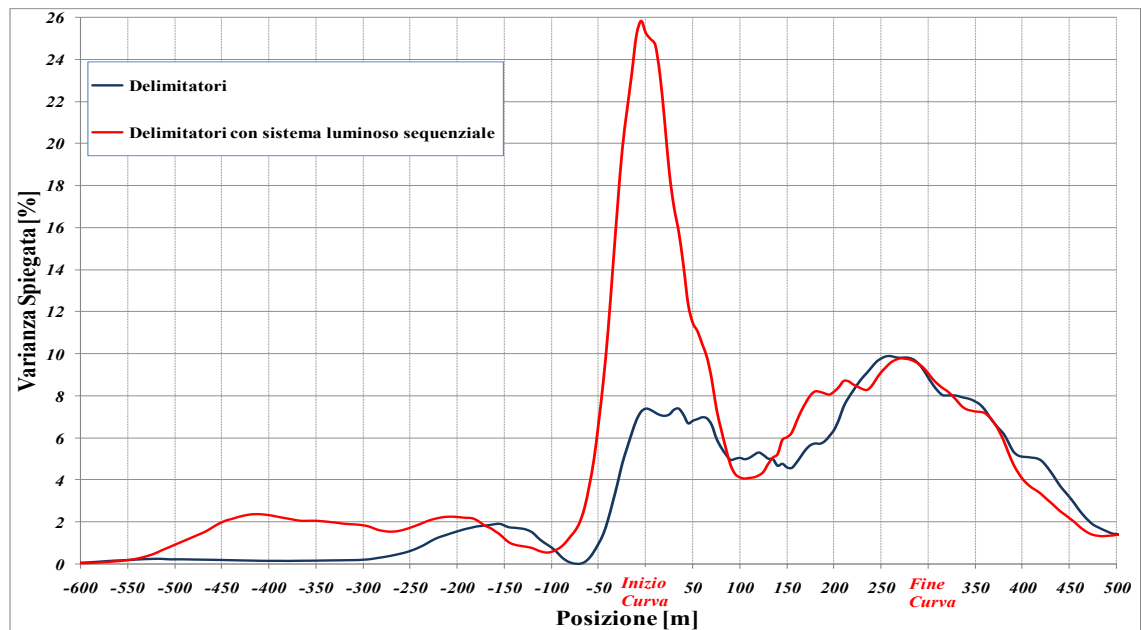


Fig. 4-12 : Varianza Spiegata dell'effetto principale come funzione di localizzazione.

L'influenza dei delimitatori modulari di curva diventa statisticamente significativa a circa 250 m prima dell'ingresso in curva, pur mantenendosi modesta (2%) fino a circa 40 m. Cresce quindi fino all'inizio della curva e mantiene valori quasi costanti (in media 6.96%) all'interno della stessa con un picco (10%) in corrispondenza della fine della curva. A circa 200 m dalla fine del trattamento ogni influenza può essere considerata svanita.

I delimitatori modulari di curva con sistema luminoso sequenziale hanno un'influenza significativa circa 500 m prima dell'ingresso della curva. Il picco (25.8%) viene raggiunto in corrispondenza dell'inizio curva. È evidente la maggior influenza in percentuale di tale trattamento rispetto ai semplici delimitatori modulari di curva a partire da 100 m prima di inizio curva fino a circa 100 m dopo. Da circa metà curva in poi, i due trattamenti analizzati influiscono in eguale misura sulla velocità.

4.3.4 Conclusioni

La percentuale di incidenti associati alle curva planimetriche è elevata in tutto il mondo; maggiore è la severità della curva o la differenza tra la velocità dell'ambiente circostante e quella in curva, più elevata sarà la probabilità di incidente. Sebbene, da un parte, ciò potrebbe apparire come un risultato non sorprendente, ciò che sorprende è

che, dopo tutti gli incidenti ed i veicoli kilometro percorsi durante gli anni, non sia stata individuata una soluzione efficace al problema.

Gli errori dei guidatori associati alle curve planimetriche sembrano essere il risultato di tre problemi correlati: scarsa attenzione, errata percezione della velocità d'approccio e del raggio della curva, errato posizionamento sulla corsia.

La segnaletica verticale semplice di pericolo curva non è in grado di fornire un'adeguata misura di sicurezza: spesso non è notata per mancanza di attenzione, familiarità con la strada o stanchezza, non fornisce alcuna indicazione sulla velocità mantenuta ed, ovviamente, non è di alcun aiuto nel percorrere la curva.

La percezione della velocità e della curvatura sembra agire contemporaneamente sia a livello conscio (esplicito) che inconscio (implicito). Per questa ragione, i trattamenti di delimitazione, che evidenziano la severità della curva e sviluppano nei guidatori momentaneamente il senso della loro velocità apparente, sembra siano promettenti nell'indurre i guidatori ad entrare in curva ad una velocità più bassa. Inoltre, tali trattamenti potrebbero anche aiutare nella risoluzione del terzo problema, scegliere e mantenere una appropriata posizione laterale nel percorrere la curva.

Per verificare l'efficacia dei trattamenti di delimitazione, è stata condotta una sperimentazione con l'ausilio del simulatore dinamico di guida VERA. La sperimentazione è stata condotta con 21 soggetti in un ambiente simulato di guida riprodotto una strada extraurbana di tipo C1. I trattamenti sono stati applicati su curve di 178 metri di raggio ($\Delta V_{\text{cur-rett}} = 30 \text{ Km/h}$) e lunghezza pari a 300 metri.

Sono stati analizzati gli effetti sul comportamento di guida di due tipi di trattamenti, i classici delimitatori modulari di curva e i delimitatori combinati con un sistema luminoso sequenziale, confrontandoli con una situazione di controllo (nessun trattamento).

L'analisi dei dati sperimentali, mostra un effetto sostanziale e statisticamente significativo dei segnalamenti sulla velocità in curva sia in termini di velocità minime che di velocità di ingresso.

Sono evidenti i benefici apportati dai trattamenti, in termini di sicurezza: riduzione velocità d'ingresso in curva, aumento della distanza di percezione e reazione del pericolo curva, velocità costante in curva, velocità minima più prossima all'inizio della curva, aumento della variazione della velocità tra rettilineo e curva.

Sebbene entrambi i due sistemi influiscano positivamente sul comportamento di guida, i delimitatori con sistema luminoso sequenziale presentano un'incidenza

maggiore, doppia per alcuni aspetti (velocità d'ingresso, distanza di reazione), sul comportamento di guida.

Contrariamente alle aspettative, i trattamenti non influenzano la posizione laterale mantenuta in curva, sebbene, in loro presenza e maggiormente nel caso dei sistemi con luci, si osserva una miglior controllo laterale del veicolo ed un minore sforzo al volante.

In conclusione, si può affermare che i dati sperimentali ottenuti hanno dimostrato l'efficacia dei trattamenti, almeno nelle condizioni scelte per la sperimentazione, sia nella gestione della velocità in curva che come guida nel percorrere la stessa.

4.4 Analisi di dispositivi di traffic calming al simulatore di guida

Esaminando in modo aggregato i microdati ISTAT relativi al quinquennio 2000-2004, per l'intero territorio nazionale, si osserva che nei tratti interni delle provinciali e delle statali si verificano il 10,9% degli incidenti ed il 14,3% dei morti totali, con un indice di mortalità (incidenti mortali/incidenti totali) triplo rispetto a quelle delle strade comunali urbane. La rilevanza del fenomeno è ancora più evidente se si considera che sia gli incidenti che i morti sono superiori a quelli che si verificano in autostrada. Per quanto attiene al rapporto con le utenze deboli, si osserva che l'investimento dei pedoni nelle provinciali causa il 15,3% dei morti (58 morti/anno), con un indice di mortalità pari all'11,7%, e nelle statali il 18,4% dei morti (97 morti/anno), con un indice di mortalità pari al 10,3%: ovunque quindi nei settori urbanizzati di strade extraurbane oltre un decimo degli investimenti di pedoni sono mortali. Per quanto riguarda le tipologie di sinistro, sono sovra rappresentati, rispetto alla media delle strade urbane, gli incidenti a veicolo isolato, in curva, su strada bagnata, con il coinvolgimento di veicoli pesanti ed in periodo notturno.

La maggior parte dei fattori di rischio nei tronchi di studio sono legati a velocità operative incongruenti con il tipo di utenza e con le caratteristiche della geometria d'asse, della segnaletica orizzontale e verticale e della sovrastruttura stradale: pertanto una efficace transizione tra l'ambito extraurbano e quello urbano, che faccia percepire al conducente la velocità più appropriata, potrebbe mitigarvi significativamente i fattori di rischio. La segnaletica dei limiti di velocità si dimostra insufficiente allo scopo, specialmente se questi non sono congruenti con la percezione dell'ambiente da parte dell'utente, mentre risulta assai più appropriata una logica connessione tra la configurazione della strada e la velocità consentita. Una soluzione efficace consiste nella realizzazione di porte di accesso, che utilizzino la combinazione di più dispositivi di moderazione del traffico, come isole spartitraffico, restringimenti della carreggiata con allargamento dei margini, cambio di materiali e/o di colore della pavimentazione, segnaletica orizzontale, segnaletica verticale, piantumazione, illuminazione ed altri arredi urbani (Ministero LL.PP., 2000).

L'European Transport Safety Council (ETSC, 1995) individua due principi di riferimento per le misure nella transizione tra l'ambito extraurbano e quello urbano: il primo è che all'interno dell'area urbanizzata sono assolutamente ineludibili misure di

moderazione della velocità, il secondo è che la massima efficacia si consegue con l'effetto cumulativo di più provvedimenti (combinazioni di restringimenti di corsia e collocazione ai margini di alberi ed altri elementi verticali, ecc), introdotti con progressività lungo la zona di transizione e culminanti nell'effettiva sezione d'ingresso all'area urbana.

Le porte d'accesso sono state specificamente definite nelle norme di progettazione di alcuni paesi europei, come l'Olanda (CROW, 1998), la Danimarca (Road Directorate, 1999), il Regno Unito (Highways Agency, 2004) e l'Irlanda (NRA, 2005), mentre in altri sono il risultato della realizzazione congiunta di dispositivi differenti previsti dall'impianto normativo (Busi e Zavanella, 2003).

La normativa olandese, ad esempio, prevede la possibilità di realizzare un'isola spartitraffico rialzata e la piantumazione di alberature lungo il margine mentre nella normativa danese sono differenziate le porte d'accesso nelle strade di scorrimento e nelle strade locali. Nelle strade di scorrimento sono ammesse alberature lungo i margini, rifacimento della pavimentazione, posa in opera di impianti di illuminazione e lievi restringimenti di carreggiata, mentre nelle strade locali sono ammessi anche dossi ed altri interventi strutturali.

L'effetto delle porte di accesso dipende dal contesto e dalla tipologia dell'intervento. In generale è maggiore se all'interno dell'area sono attuate altre misure di moderazione del traffico. Nel Regno Unito si è riscontrato che la riduzione di velocità è pari a 10 km/h se la porta di accesso non è seguita da ulteriori provvedimenti nel centro abitato e sale a 15 km/h se si adottano anche altri sistemi di moderazione (VISIP, 1994). Sempre nel Regno Unito, il Department of the Environment, Transport and the Regions (DETR, 2005) ha riscontrato riduzioni dell'ottantesimo percentile delle velocità sino a 25 km/h nel caso di porte di accesso accoppiate ad ulteriori misure di moderazione del traffico all'interno dell'abitato. Taylor e Wheeler (1998), nella valutazione di efficacia di 9 progetti, hanno riscontrato una riduzione di velocità compresa tra 5 e 24 km/h in corrispondenza della porta di accesso ed una ulteriore tra 5 e 22 km/h all'interno del centro abitato. In un successivo studio esteso a 56 casi, nei progetti che prevedevano solo porte di accesso (DFT, 2000; Taylor e Wheeler, 2000) è stata riscontrata una riduzione di incidentalità generale all'interno dei centri abitati del 10% e degli incidenti mortali e con feriti gravi del 43% (i maggiori benefici sono stati conseguiti per i pedoni ed i ciclisti); nondimeno nei casi in cui le porte di accesso erano integrate con provvedimenti supplementari all'interno dei centri abitati (deviazioni, restringimenti,

mini rotatorie e dossi) si sono conseguite riduzioni di incidentalità ben maggiori: 37% per gli incidenti con feriti lievi e 70% per gli incidenti con morti e con feriti gravi.

Il Department for Transport (DFT, 2005) suggerisce due condizioni in cui le porte di accesso possono risultare particolarmente efficaci: a) elevate velocità di approccio a piccoli agglomerati urbani; b) centri abitati in cui il punto di inizio dell'abitato non è chiaramente riconoscibile.

Negli Stati Uniti, è stata condotta la valutazione di due porte di accesso e cinque misure isolate di moderazione del traffico (Hallmark et al., 2007). I risultati del progetto mostrano una riduzione fino a 10 km/h delle velocità operative ed una significativa riduzione del numero di veicoli che non rispettano i limiti di velocità.

In passato, diverse misure di moderazione della velocità sono state sviluppate e testate, con diversi risultati. Nella maggior parte dei casi, i cambiamenti nell'infrastruttura locale hanno migliorato la sicurezza stradale e la qualità della vita nelle aree in cui sono stati implementati. Tuttavia, talvolta, le misure non hanno avuto alcun effetto. Si è reso evidente che il grado di successo dipende fortemente dalla particolare area. Infatti effettuando interventi simili in aree differenti si sono ottenuti spesso risultati contraddittori.

Sapere che certe misure per la sicurezza stradale danno un risultato insoddisfacente in particolari situazioni può essere di grande aiuto alle autorità di gestione dell'infrastruttura stradale. Inoltre, certi interventi tendono ad essere costosi. A ciò spesso si aggiunge il fatto che modificare questi interventi o ripristinare la situazione iniziale può essere ancora più costoso. Diventa essenziale predire sulla base di esperienze precedenti in quale situazione particolare un data misura di sicurezza stradale può essere applicata con effetto positivo.

Alcuni problemi si sono osservati in relazione alle sperimentazioni sul campo:

- a) Spesso è difficile trovare un numero sufficiente di aree che sono adatte allo stesso tipo di intervento;
- b) Le aree selezionate spesso non soddisfano le richieste sperimentali;
- c) Le autorità di gestione dell'infrastruttura stradale hanno problemi nell'impegnarsi in misure non convenzionali di efficacia non provata;
- d) Spesso, ci si scontra con fattori che complicano la valutazione di ciò che è stato implementato, ad esempio: l'apertura di nuove strade nell'area o la chiusura per manutenzione, questo disturba ovviamente il confronto prima-dopo l'intervento.

In che misura situazioni differenti possono essere confrontate nelle sperimentazioni su campo è stato a lungo oggetto di discussione. Il numero di variazioni che si possono verificare ultimamente sviscerano l'affidabilità statistica di tali studi.

Questi fattori sottolineano l'importanza nell'individuazione di un'alternativa appropriata alle sperimentazioni su strada, come ad esempio l'uso delle tecniche di simulazione di guida.

Nel 1990, il Ministero dei Trasporti e dei Lavori Pubblici olandese, chiese di valutare l'adeguatezza dei simulatori di guida per valutare gli effetti di sistemi infrastrutturali sul comportamento di guida dei guidatori. Lo studio (Riemersma et al., 1990) fu condotto dal Dutch Road Safety Departement, dal TNO Institute for Perception e dalla Daimler-Benz AG, utilizzando il simulatore dinamico della Daimler-Benz. Vennero simulati gli impatti di una serie di misure (porta d'accesso, cambio colore pavimentazione e spartitraffico) atte a ridurre la velocità in entrata al villaggio di Weiteveen in Olanda. I risultati ottenuti, su un campione di 24 soggetti, sono stati confrontati con i cambiamenti nel comportamento di guida osservati dopo l'installazione delle misure nel sito reale. Il confronto ha dimostrato che è possibile l'uso di simulatori di medio/alto livello per analizzare l'efficacia di dispositivi di moderazione del traffico, applicati sia separatamente che in maniera combinata, in alternativa di sperimentazioni su strada.

Dispositivi di traffic calmin sono stati valutati anche con il simulatore del TRL (Lockwood, 1997). L'ingresso di tre villaggi reali è stato riprodotto al simulatore. Tutti i villaggi presentano dei dispositivi di moderazione del traffico, sotto forma di segnaletica verticale ed orizzontale, chicane e dossi. All'esperimento hanno partecipato 16 soggetti, guidando nei villaggi simulati con e senza i trattamenti. Le velocità ottenute in simulazione sono state confrontate con rilievi realizzati prima e dopo l'introduzione dei trattamenti nei villaggi reali. Si è osservato che i dati di velocità simulate e reali erano ampiamente confrontabili.

Sempre allo scopo di valutarne l'efficacia nella riduzione della velocità, diversi trattamenti di traffic calming sono stati valutati, in una strada extraurbana a carreggiata singola, con l'ausilio del simulatore anche dell'università di Leeds (Jamson et al., 1999). I dispositivi, all'incirca una ventina, consistevano in alberi a lato strada, differenti sistemi di segnaletica orizzontale con effetto di restringimento della corsia (es: illusione di Wundt), segnali di limite di velocità, chicane, rallentatori di velocità ad effetto sonoro, lampioni, etc.. I trattamenti sono stati analizzati sia in maniera individuale che combinata in due sessioni di guida successive. I risultati hanno evidenziato che i

trattamenti che funzionano bene a livello individuale, perdono di efficacia in combinazione con altri trattamenti. Questo è dovuto al fatto che i guidatori perdono di sensibilità in seguito all'esposizione ai dispositivi e che l'uso dei trattamenti in combinazione riduce gli effetti dello stesso trattamento proposto da solo.

Di seguito, verrà riportato un'analisi, realizzata al simulatore di guida VERA, sugli effetti sul comportamento di guida di due trattamenti atti a ridurre la velocità all'ingresso di un ambiente urbano. I trattamenti consistono in porte d'accesso e dispositivi di moderazione del traffico. La guida simulata è stata condotta su di uno scenario virtuale riprodotto un reale ambiente urbano nella provincia di Salerno.

4.4.1 SITI DI STUDIO

Le strade oggetto di studio, situate nella provincia di Salerno, sono state: SP125 Polla – Petina, in ingresso al comune di Polla; SS103 Montesano – Moliterno, in ingresso al comune di Tardiano; SS426 San Pietro – Sant'Arzenio, in ingresso ed in uscita dal comune di Sant'Arzenio; SP39 San Pietro al Tanagro – Teggiano, in ingresso ed in uscita da un piccolo agglomerato urbano del comune di Teggiano. La campagna di rilievo delle velocità è stata effettuata in collaborazione con il Centro di Monitoraggio della Sicurezza Stradale della Provincia di Salerno. I rilievi sono stati realizzati mediante apparecchiature contatraffico KV Laser, il cui funzionamento è basato sull'emissione e la ricezione di una coppia di raggi laser a bassa potenza diretti perpendicolarmente all'asse stradale, che hanno consentito la registrazione dei seguenti parametri: istante di passaggio del veicolo, velocità, lunghezza e direzione di marcia. In ogni sito, sono state individuate 5 sezioni di rilievo e la registrazione è stata effettuata per 12 ore di un giorno ferialo.

Le elaborazioni sono state sviluppate escludendo dalle distribuzioni di velocità le informazioni relative ai veicoli con distanziamento temporale inferiore a 5 secondi, oltre che quelle relative ai veicoli con lunghezza inferiore a 3 metri e superiore a 9 metri.

Tabella 4-3 : Velocità di ingresso nel centro abitato

Centro abitato	Strada	Sezione	V ₅₀ [km/h]	V ₈₅ [km/h]	V ₉₅ [km/h]
Polla	SP125	2	42,57	58,00	64,00
Tardiano	SS103	29	47,56	63,00	74,00
Sant'Arzenio Nord	SS426	75	27,09	32,00	34,00
Sant'Arzenio Sud	SS426	10	58,15	72,00	84,00
Teggiano Nord	SP39	12	70,22	91,00	102,00
Teggiano Sud	SP39	15	61,33	78,00	86,00

Gli ottantacinquesimi percentili delle velocità di ingresso nel centro abitato (V_{85}) risultano compresi tra 32 e 91 km/h (Tab. 4-3). Le velocità di ingresso più basse sono state registrate nei siti in cui vi è un maggior condizionamento della geometria del tracciato. Gli ingressi ai centri abitati di Polla, Tardiano e Sant'Arzenio Nord sono preceduti da curve di piccolo raggio. L'ingresso sud al centro abitato di Sant'Arzenio è preceduto da un'intersezione ad Y. Le maggiori velocità operative sono state registrate nel comune di Teggiano, che è stato selezionato come sito di progetto.

4.4.2 Sito di progetto

L'ingresso da nord al comune di Teggiano, che ha una popolazione di circa 8.500 abitanti, avviene lungo la SP39 su un rettilineo quasi pianeggiante lungo circa 5,5 km in una strada a carreggiata unica e doppio senso di marcia, con due corsie larghe circa 3,0 m e banchine di larghezza inferiore a 0,30 m. Anche nel tratto esterno al centro abitato è presente un limite di velocità pari a 50 km/h. Tra il km 3 ed il km 4 della SP39 sono presenti abitazioni ed attività commerciali, in assenza di infrastrutture pedonali, isolate rispetto al principale agglomerato urbano del comune. Le velocità di ingresso a questo piccolo agglomerato urbano sono pari a 91 km/h per i veicoli provenienti da nord e 78 km/h per i veicoli provenienti da sud. Il tronco compreso tra il km 3 il km 4 (cfr. Figura 1) è stato quindi selezionato come sito di progetto con l'obiettivo di rendere le velocità operative congruenti con l'ambiente urbanizzato per i veicoli che viaggiano in entrambi i versi di marcia.

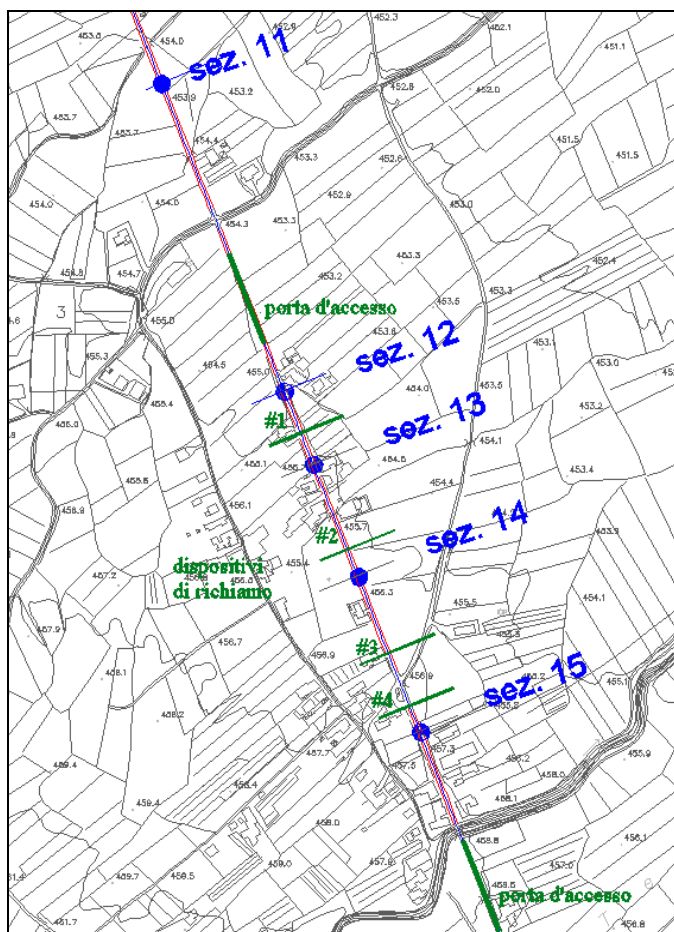


Figura 4-13 : Localizzazione delle sezioni di misura e degli interventi di progetto

Nel sito di progetto sono stati effettuati rilievi di velocità in 5 sezioni di misura (Fig. 4-13): 6 ore nelle sezioni 11 (850 veicoli), 13 (1.109 veicoli), 14 (762 veicoli) e 15 (872 veicoli) e 12 ore nella sezione 12 (2.031 veicoli). La sezione 12 rappresenta l'ingresso all'abitato per i veicoli diretti verso sud, mentre la sezione 15 rappresenta l'ingresso per i veicoli diretti verso nord. Nella sezione 11 si sono registrate le velocità più elevate (Fig. 4-14 e Fig. 4-15) in entrambe le direzioni in quanto la sezione è esterna all'agglomerato urbano.

In direzione sud le velocità sono costanti in quasi tutto l'abitato, con una lieve riduzione di velocità nella sezione 15 che dipende dall'avvicinamento ad un dosso con visibilità limitata. In direzione sud le velocità di ingresso all'abitato sono superiori rispetto alla direzione nord. I veicoli diretti verso sud percorrono un rettilineo di 3 km interamente in ambito extraurbano prima di entrare nel centro abitato senza alcun preavviso. I veicoli diretti verso nord sono in uscita da un centro abitato e percorrono un rettilineo in una zona priva di urbanizzazione per una lunghezza di circa 1 km. Prima dell'ingresso nell'abitato è inoltre presente un dosso.

Sempre in direzione nord, si registra un aumento delle velocità nelle sezioni di uscita dall'abitato in quanto i veicoli sono diretti verso una zona extraurbana. In direzione sud, invece, i veicoli che escono dall'agglomerato incontrano un breve tratto privo di abitazione prima di entrare nell'agglomerato urbano principale del comune di Teggiano.

In tutte le sezioni di rilievo la velocità media è sempre di gran lunga superiore al limite di velocità, pari a 50 km/h.

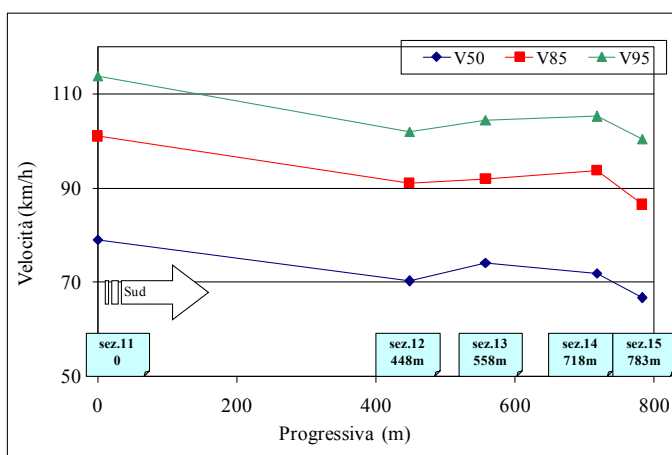


Figura 4-14 – Sito di progetto: diagramma delle velocità in direzione sud

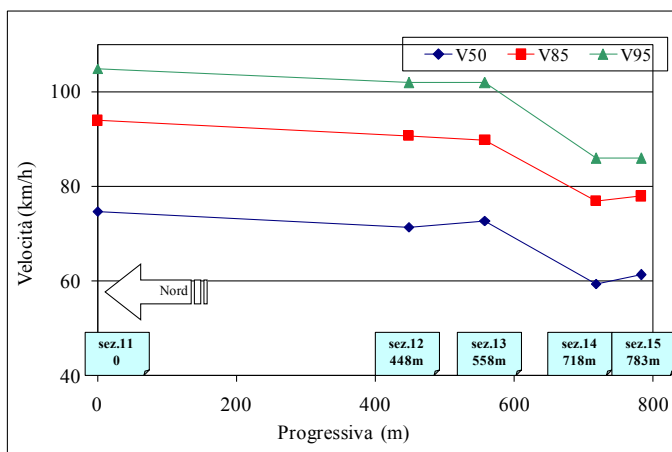


Figura 4-15 – Sito di progetto: diagramma delle velocità in direzione nord

4.4.3 ALTERNATIVE DI PROGETTO

Il progetto consiste nella realizzazione di due porte di accesso e di quattro dispositivi integrativi di moderazione del traffico (Fig. 4-13). Le porte di accesso (Fig. 4-16 e Fig. 4-17) hanno la funzione di rallentare solo i veicoli in ingresso nel centro abitato mentre i dispositivi integrativi di moderazione del traffico (Fig. 4-18), distanti circa 150 m l'uno dall'altro, sono funzionali ad entrambe le direzioni di marcia.

Per le porte di accesso si sono previste due alternative di progetto, la prima consiste

in interventi di segnaletica, piantumazione ed arredo mentre la seconda, più costosa, prevede anche un allargamento della piattaforma ed una deviazione dei veicoli in ingresso nell'abitato.

Nella soluzione 1 (Fig. 4-16), la porta di accesso è composta dai seguenti elementi:

- a) rallentatori di velocità ad effetto sonoro;
- b) rallentatori di velocità ad effetto ottico;
- c) bande periferiche trasversali;
- d) siepe convergente verso la carreggiata;
- e) fascia trasversale colorata in conglomerato stampato;
- f) portale metallico rivestito in erba contenente il segnale inizio centro abitato.

Due serie di rallentatori di velocità ad effetto sonoro sono stati installati, rispettivamente 140 ed a 70 metri prima dei rallentatori di velocità ad effetto ottico, allo scopo di allertare i guidatori dell'avvicinarsi di un'area urbana. Ogni serie è composta da 10 striscie rumorose rialzate con una lunghezza (perpendicolare all'asse stradale) di 2.76 metri, una larghezza (parallela all'asse stradale) di 0.15 metri e un'interasse di 0.50 metri.

I rallentatori di velocità ad effetto ottico, conformi alle indicazioni dell'art.179 del Regolamento, sono realizzati mediante l'applicazione di 5 strisce trasversali, di dimensione longitudinale pari a 2 m, con larghezza crescente nel senso di marcia e distanziamento decrescente (Tab. 4-4). Obiettivo dei rallentatori è preavvisare i conducenti dell'ingresso nella porta e attirare l'attenzione verso il successivo dispositivo di moderazione del traffico.

Tabella 4-4 : Parametri di progetto dei rallentatori ad effetto ottico

N striscia	L [cm]	Distanziamento[cm]	Interasse [cm]
1	20	-	-
2	30	100	125
3	40	80	115
4	50	60	105
5	60	40	95

Subito dopo i rallentatori sono inserite 19 coppie di bande periferiche trasversali. Le

bande periferiche hanno lo scopo di dare l'impressione di un restringimento della carreggiata ed hanno consentito una significativa riduzione di velocità in differenti applicazioni effettuate negli Stati Uniti (Arnold e Lantz, 2007; Hallmark et al., 2007; Katz e Rakha, 2008; McGee e Hanscom, 2006). Ciascuna banda è costituita da un rettangolo lungo 44 cm (perpendicolarmente alla direzione di marcia) e lungo 30 cm (nella direzione di marcia), con la base contigua alle strisce longitudinali. Le bande sono installate in coppia, ossia l'una di fronte all'altra (Fig. 4-16 e Fig. 4-17), in modo da amplificarne l'effetto, con un di stanziamento tale che il conducente oltrepassi 4 strisce al secondo, nell'ipotesi di velocità di ingresso nella serie pari a 90 km/h e moto uniformemente decelerato con decelerazione pari a $1,2 \text{ m/s}^2$. In tali ipotesi, la lunghezza complessiva del dispositivo è pari a 100,4 m e la velocità di uscita è pari a 70,6 km/h.

Al fine di ridurre la larghezza ottica della piattaforma e di focalizzare l'attenzione di guidatori sulla porta di accesso nel tratto compreso tra l'inizio delle bande ottiche e la fine della porta di accesso, per una lunghezza pari a 108,4 m, in entrambi i lati della piattaforma è installata una siepe, alta 1,50 m e larga 0,50 m, convergente verso la carreggiata. Nel tratto iniziale la distanza dell'asse della siepe dalla carreggiata è pari a 4,00 m, che si restringono a 1,00 nel tratto finale. Negli ultimi 8,00 m la siepe è parallela alla carreggiata, per accentuare l'effetto porta, ed il raccordo con la parte obliqua è realizzato con un raggio pari a 10,00 m.

Nella zona a cavallo del portale, per una lunghezza pari a 5,00 m, è prevista una fascia di colore rosso in conglomerato stampato, ossia conglomerato bituminoso impresso a caldo con rete metallica, colorato di rosso con resine acriliche e componenti (cariche di quarzo e cementi modificati) e rifinito con antisdrucchiolo. In tal modo si ottiene un richiamo dell'attenzione dei conducenti per l'effetto combinato della diversa colorazione della pavimentazione e di una lieve vibrazione al passaggio sulla fascia di conglomerato che ha profilo ed aspetto simili a quelli dei masselli. L'inizio della pavimentazione in conglomerato stampato è localizzato 3,00 m dopo il centro dell'ultima banda periferica trasversale.

La porta di accesso termina con un portale metallico rivestito in erba contenente il segnale inizio centro abitato. Il portale è localizzato al centro della fascia in conglomerato stampato. La larghezza del portale è pari a 12,00 m (misurata tra gli assi

dei sostegni laterali) e l'altezza è pari a 6,50 m. L'altezza utile per il passaggio dei veicoli al di sotto del portale è pari a 5,00 m. La struttura del portale, metallica, è rivestita in edera in modo tale da aumentare l'impatto visivo, l'effetto schermante e l'impressione di ingresso in un centro abitato, ad eccezione della zona centrale del portale stesso in cui sono installati, in corrispondenza dell'asse delle due corsie, i segnali inizio centro abitato. I montanti hanno forma quadrata con lato pari a 0,50 m, la fascia verticale trasversale ha altezza pari a 1,50 m, ciascun segnale di inizio centro abitato ha dimensione $2,00 \times 0,90$ m, con altezza delle lettere pari a 0,25 m. Nella porta di accesso in direzione nord, poiché i veicoli provengono da una zona interna del centro abitato, anche se con assenza di urbanizzazione, non sono installati i segnali di inizio centro abitato e la fascia superiore del portale è interamente ricoperta di edera.



Figura 4-16 : Porta di accesso in direzione sud: alternativa 1

Nella soluzione 2 (cfr. Figura 4-17) è stata inserita una deviazione per i veicoli in ingresso al centro abitato mediante isola centrale materializzata con cordolo sormontale e strisce gialle rifrangenti e nere. La deviazione prevede un disassamento della corsia di marcia in ingresso pari a 2,50 m. La lunghezza del tratto di deviazione verso destra è pari a 30,00 m. Il tratto è a sua volta composto da tre tronchi di lunghezza pari a 10,00 m: il primo tronco è circolare con raggio pari a 80,00 m, il secondo tronco è rettilineo, il terzo tronco è anch'esso circolare con raggio pari a 80,00. La deviazione verso sinistra

per il rientro nella sede stradale originaria è simmetrica rispetto alla precedente. L'isola divisionale è separata dalla due corsie di marcia da due banchine larghe 0,50 m. Il raggio iniziale dell'isola, preceduto da zebraure integrate con inserti stradali catarifrangenti, è pari a 0,50 m. Nella parte iniziale dell'isola, in entrambi i lati, è installato delineatore speciale di ostacolo accoppiato con il segnale passaggio consentito a destra. I cordoli, con strisce gialle rifrangenti e nere, hanno larghezza pari a 0,30 m ed altezza pari a 0,12 m. Il primo tratto è verticale con altezza pari a 0,05 m. Il secondo, raccordato con un raggio pari a 0,02 m, è sub-orizzontale con base pari a 0,20 m ad altezza pari a 0,07 m. Il terzo, raccordato con un raggio pari a 0,10 m, è orizzontale con lunghezza pari a 0,10 m (Fig. 4-18). La parte centrale dell'isola è riempita con erba.

A causa della deviazione, nella soluzione 2 non si è proposta la realizzazione di un differente tipo di pavimentazione in corrispondenza della porta per evitare variazioni di aderenza e regolarità in un tratto caratterizzato da elevata curvatura.

Rispetto alla soluzione 1, le bande periferiche trasversali hanno caratteristiche differenti. Le bande sono installate in modo tale che il conducente oltrepassi 5 strisce al secondo. La velocità di ingresso nella serie è assunta pari a 70 km/h (minore rispetto alla soluzione 1 per effetto del condizionamento indotto dalla deviazione). La decelerazione è ipotizzata pari a $2,5 \text{ m/s}^2$. In tali ipotesi, la lunghezza complessiva del dispositivo è pari a 44,6 m e la velocità di uscita è pari a 44,8 km/h.



Figura 4-17 : Porta di accesso in direzione sud: alternativa 2

Nel tratto compreso tra le porte di accesso sono previsti 4 dispositivi integrativi di moderazione del traffico (Fig. 4-13). Ciascun dispositivo, di lunghezza pari a 30,00 m, è costituito da due serie (una per ciascun approccio) di 15 triangoli isosceli, con base ed interasse costanti, pari rispettivamente a 0,30 e 1,00 m, aventi l'altezza crescente (2 cm per metro): 0,44 m il primo, 0,74 m il quindicesimo (Fig. 4-19). I triangoli, soprannominati “denti di drago”, danno l'impressione di restringimento della carreggiata. Il restringimento ottico è rinforzato da due siepi convergenti verso la piattaforma. Le siepi, di altezza pari a 1,50 m e larghezza pari a 0,50 m, distano 3,00 m dalla carreggiata nella sezione iniziale e 1,00 m nella parte centrale del dispositivo. Il raccordo tra i due lati delle siepi è realizzato con raggio pari a 25,00 m.

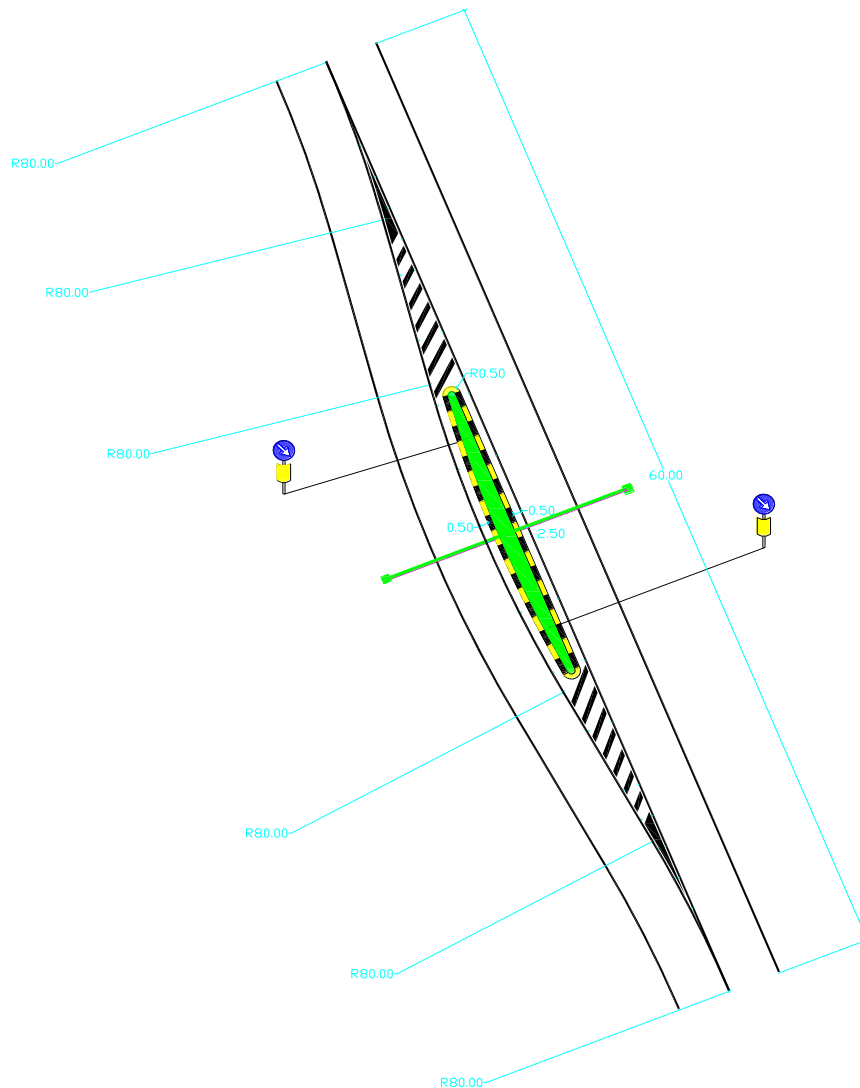


Figura 4-18 : Porta in direzione sud: alternativa 2, particolare della deviazione

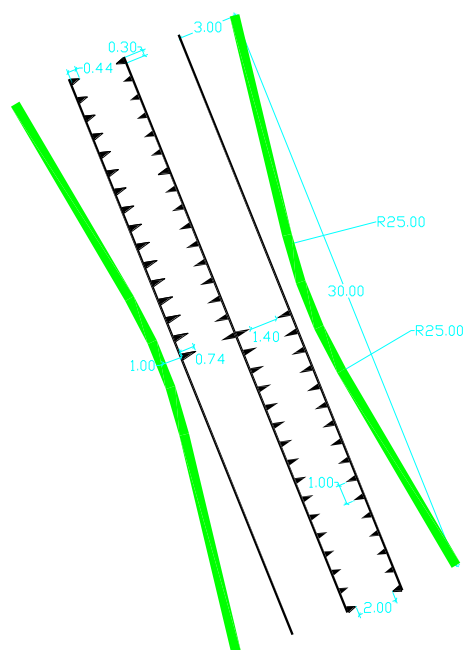


Figura 4-19 : Dispositivi integrativi di moderazione del traffico

La segnaletica (orizzontale e verticale) sarà realizzata con materiali ad elevatissime prestazioni in quanto l'efficacia dell'intervento è strettamente legata alla corretta percezione da parte dei guidatori dell'ambiente stradale e della segnaletica.

La segnaletica orizzontale sarà realizzata mediante laminato elasto-plastico autoadesivo rifrangente, con polimeri e pigmenti di alta qualità, contenente una dispersione di microgranuli ad alto potere antisdrucchiolo e microsferi in ceramica con indice di rifrazione superiore ad 1,9.

In corrispondenza delle isole divisionali previste nella soluzione 2, la segnaletica orizzontale sarà integrata con inserti stradali catarifrangenti, dispositivi di guida orizzontale che riflettono la luce incidente mediante catadiottri. Saranno installati inserti permanenti del tipo 1.

Per la segnaletica verticale saranno utilizzate pellicole ad elevatissima risposta luminosa realizzate con la tecnologia dei microprismi. Le pellicole microprismatiche sono costituite da elementi ottici prismatici sigillati in una resina sintetica trasparente. I requisiti fotometrici di questo tipo di pellicola sono notevolmente superiori ai valori richiesti per le pellicole di classe 2 dal D.M. 31 marzo 1995 n.1584 "Approvazione del disciplinare tecnico sulle modalità di determinazione dei livelli di qualità delle pellicole retroriflettenti impiegate per la costruzione dei segnali stradali". Nelle pellicole tradizionali il coefficiente areico di intensità luminosa, che misura la quantità di luce rinviata dal segnale, diminuisce in modo sensibile con l'aumentare dell'angolo di

osservazione, ossia con l'avvicinarsi del veicolo al segnale. Questo fenomeno è molto meno marcato per le pellicole microprismatiche.

4.4.4 Sperimentazione al simulatore di guida

4.4.4.1 Protocollo di prova

Per l'esperimento sono stati selezionati 30 soggetti (18 uomini e 12 donne), dai 23 ai 54 anni, con patente di guida valida. Prima di accedere alla sala di simulazione, ogni soggetto ha letto e firmato un modulo di consenso informato, quindi, è stato istruito sulle procedure d'emergenza e sull'uso dei comandi in cabina.

La fase di addestramento alla guida al simulatore in ambiente virtuale è stata condotta su di una strada extraurbana a doppio senso (una corsia per senso di marcia). Durante la guida, di circa 10 minuti, il soggetto con scarso traffico diretto in senso opposto a quello del soggetto testato.

Dopo una breve pausa, ogni partecipante ha guidato per tre volte attraverso la piccola comunità urbana in direzione sud e tre volte in direzione nord. La guida attraverso l'area urbana è preceduta da due chilometri che riproducono il reale ambiente in avvicinamento alla comunità urbana e da quattro chilometri di ambiente extraurbano modellizzato allo scopo di separare la guida attraverso le sezioni di studio. Al passaggio sui rallentatori di velocità ad effetto sonoro e sulla fascia di colore rosso in conglomerato stampato vengono riprodotti in cabina i rumori corrispondenti. Tali suoni sono stati registrati su strada per classi di velocità.

Sono stati testati 3 scenari:

- Alt0: stato di fatto;
- Alt1: alternativa progettuale 1;
- Alt2: alternativa progettuale 2.

Su ogni scenario hanno guidato 10 soggetti. Tre soggetti hanno interrotto il test a causa di malessere (mal di test e/o nausea); rimangono, quindi, 27 guidatori (9 per ogni scenario).

4.4.4.2 Validazione del simulatore di guida con misure di velocità

Allo scopo di validare le velocità registrate al simulatore, si è proceduto al confronto tra dati reali e simulati. Il confronto è stato realizzato tra i dati di velocità raccolti nelle sezioni 11, 12, 13, 14 e 15 in direzione sud ed in direzione nord.

Poiché i test di Kolmogorov-Smirnov e di Chi Quadro (χ^2) hanno dimostrato che non tutte i dati di velocità si adattano ad una distribuzione Gaussiana con un livello di significatività del 5%. In questo studio, sono stati impiegati test non parametrici.

Il Kolmogorov-Smirnov a due code è stato utilizzato per determinare se i due campioni indipendenti erano stati estratti da popolazioni con la stessa distribuzione (l'ipotesi nulla). I risultati del test (Tab. 4-5) mostrano che l'ipotesi nulla può essere rigettata con un livello del 5% solo per la sezione 11, in direzione sud. Quindi, eccetto questa sezione, non ci sono differenze significative tra i campioni di velocità reali e simulate.

La differenza massima nella velocità media è pari a 7.19 km/h. Si osserva che la deviazione standard della velocità dei guidatori è maggiore nei dati raccolti in simulazione.

Tabella 4-5 : Confronto tra dati di velocità reali e simulati.

Sezione	Direzione	Velocità Media (km/h)			Deviazione Standard (km/h)			Kolgomorov-Smirnov <i>p-value</i>
		Reale	Simulata	Differenza	Reale	Simulata	Differenza	
11	Sud	81.26	74.07	7.19	17.06	21.19	-4.13	0.036
12	Sud	73.98	71.54	2.44	16.25	19.55	-3.30	0.398
13	Sud	76.87	71.42	5.45	15.76	19.93	-4.17	<u>0.087</u>
14	Sud	76.29	69.11	7.18	18.07	17.55	0.52	0.162
15	Sud	71.63	68.64	2.99	16.01	17.40	-1.39	0.333
11	Nord	77.39	80.85	-3.47	16.84	24.30	-7.46	0.113
12	Nord	73.49	79.61	-6.13	17.04	26.26	-9.22	0.181
13	Nord	75.04	78.01	-2.97	15.96	26.31	-10.35	0.175
14	Nord	64.19	71.34	-7.14	13.16	18.91	-5.75	<u>0.092</u>
15	Nord	65.81	71.39	-5.58	12.99	20.11	-7.11	0.118

Nota: il **grassetto** indica valori statisticamente rilevanti con un livello di significatività del 5%, il sottolineato valori statisticamente rilevanti con un livello di significatività del 10%

4.4.4.3 Risultati

Le analisi statistiche sono state effettuate con test non parametrici, poiché i dati di velocità non si distribuiscono seguendo una Gaussiana. Tramite i test di Mann-Whitney e di Kolmogorov-Smirnov è stata valutata la significatività statistica della differenza

delle velocità nei tre scenari simulati. Il primo permette di verificare l'equivalenza della posizione di due popolazioni campione. Il secondo è stato adoperato per determinare se due campioni sono indipendenti e derivano dalla stessa popolazione ossia provengono da distribuzioni identiche.

Considerando che sono stati confrontati tre trattamenti, il numero di combinazioni possibili è pari $(3 \cdot (3 - 1)) / 2$. Il livello di significatività usato per il confronto a coppie è stato corretto tramite la formula:

$$\alpha' = \alpha \cdot \frac{2}{(3 \cdot (3 - 1))}$$

I tre scenari (Alt0 - scenario esistente, Alt1 - trattamento alternativa, Alt2 - trattamento alternativa) sono stati confrontati, in entrambe le direzioni, mediante analisi dei profili delle velocità medie (Fig. 4-20 e Fig. 4-21) e dei dati di velocità and the speed (Tab. 4-6 e Tab. 4-7) nelle seguenti sezioni: controllo (control - 500 metri prima della porta d'accesso), porta d'accesso (gateway - posta al centro della chicane) e centro della comunità urbana (village midpoint).

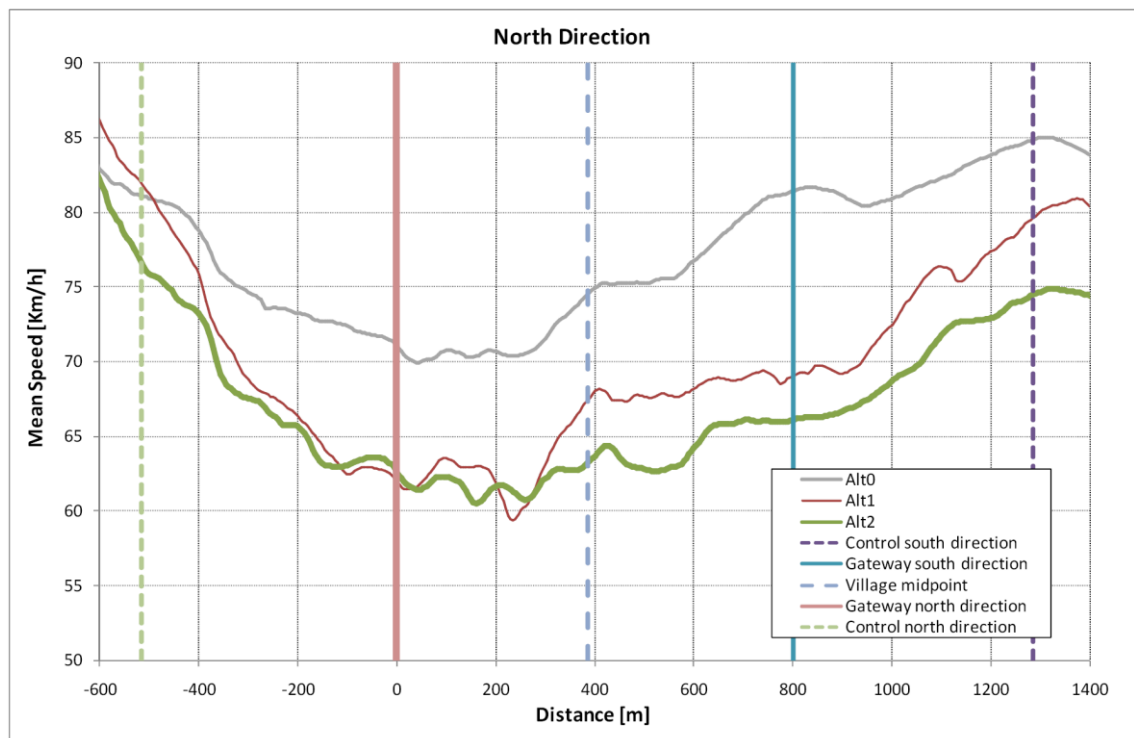


FIGURE 4 20: Profili di velocità medie al simulatore di guida (direzione Nord).

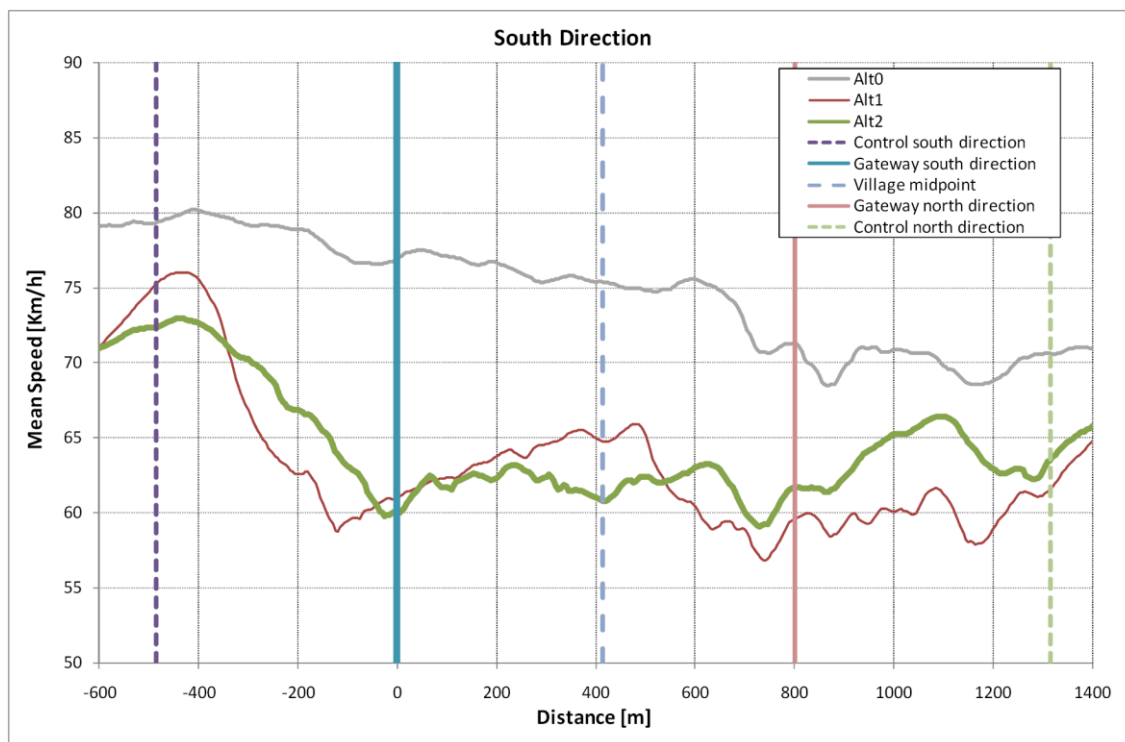


FIGURE 4 21: Profili di velocità medie al simulatore di guida (direzione Sud).

Nella sezione di controllo, come atteso, la distribuzione delle velocità nei tre scenari non mostra differenze statistiche significative.

Entrambi i trattamenti, in corrispondenza delle porte d'accesso, dimostrano di essere molto efficaci nella riduzione della velocità. In particolare, si osserva, in direzione sud, una riduzione nelle velocità medie pari a 16 km/h (20.8%) per l'alternativa 1 e pari a 17 km/h (22.0%) per l'alternativa 2.

Le deviazioni standard presentano una leggera riduzione nelle alternative con trattamento. In direzione nord, si nota una riduzione (11 km/h) della velocità media più contenuta rispetto alla direzione sud. Le differenze tra le alternative progettuali 1 e 2 non sono statisticamente significative.

Tabella 4-6 : Medie e deviazioni standard per sezioni e tipo di trattamento

Sezione	Direzione	Velocità Media (km/h)			Deviazione Standard (km/h)		
		Alt0	Alt1	Alt2	Alt0	Alt1	Alt2
Controllo	Sud	79.40	75.25	72.37	26.39	20.43	20.83
Controllo	Nord	82.12	80.92	75.59	27.33	36.41	32.76
Porta d'accesso	Sud	76.99	61.01	60.06	23.02	21.16	20.10
Porta d'accesso	Nord	72.04	61.00	61.63	20.46	17.70	20.12
Centro villaggio	Sud	75.36	64.79	60.83	22.35	19.60	13.73
Centro villaggio	Nord	75.47	66.35	62.19	24.50	15.46	14.19

Il test Mann-Withney mostra un livello di significatività per entrambi i trattamenti inferiore al 5% nella direzione sud ed minore del 10% in quella nord. Il Kolmogorov-Smirnov evidenzia un livello di significatività inferiore al 10%, ad eccezione dell'alternativa 1 in direzione nord.

Nel centro dell'area urbana, sia le medie che le deviazioni standard della distribuzione della velocità mostrano una riduzione. In direzione sud, la riduzione della velocità media è stata uguale a 10 km/h (14%) per l'alternativa 1 e pari a 9 km/h (12.1%) per la 2. In direzione nord, le riduzioni per l'alternativa 1 e 2 sono rispettivamente pari a 9 km/h (12.1%) e a 13 km/h (17.6%).

I risultati sono statisticamente significativi solo per il trattamento 2.

Tabella 4-7 : Significatività statistica dei trattamenti

Sezione	Direzione	Velocità Media (km/h)			Deviazione Standard (km/h)		
		<i>Alt0 vs Alt1</i>	<i>Alt0 vs Alt2</i>	<i>Alt1 vs Alt2</i>	<i>Alt0 vs Alt1</i>	<i>Alt0 vs Alt2</i>	<i>Alt1 vs Alt2</i>
Controllo	Sud	0.731	0.481	0.492	0.754	0.526	0.526
Controllo	Nord	0.683	0.313	0.567	0.526	0.329	0.936
Porta d'accesso	Sud	0.006	0.005	0.932	<u>0.022</u>	<u>0.022</u>	0.997
Porta d'accesso	Nord	<u>0.028</u>	<u>0.020</u>	0.864	0.100	<u>0.022</u>	0.754
Centro villaggio	Sud	0.081	0.010	0.668	0.329	0.048	0.526
Centro villaggio	Nord	0.208	<u>0.031</u>	0.429	0.526	0.100	0.189

Nota: il **grassetto** indica valori statisticamente rilevanti con un livello di significatività del 5% ($\alpha=1,67\%$), il sottolineato valori statisticamente rilevanti con un livello di significatività del 10% ($\alpha=3,33\%$)

4.4.5 Conclusioni

Il lavoro analizza il comportamento dei guidatori, in termini di velocità, nel passaggio dall'ambito extraurbano a quello urbano, sia senza portale d'accesso e dispositivi di traffic calming che con due differenti configurazioni di porte d'accesso e traffic calming posizionati in corrispondenza della zona urbana.

Dopo una campagna di rilievi su strada, il sito sperimentale è stato scelto, all'interno di un campione di 6 tronchi stradali extraurbane, considerando la velocità operativa più elevata.

Per il sito sono stati progettati due porte d'accesso e quattro dispositivi di traffic calming: i primi allo scopo di ridurre la velocità all'ingresso della zona di trattamento, i secondi per rafforzare e protrarre gli effetti delle porte. Per le porte di accesso si sono previste due alternative di progetto: la prima a basso costo e di rapida realizzazione e la

seconda più costosa prevede un allargamento della piattaforma ed una deviazione dei veicoli in ingresso nell'abitato.

Il sito sperimentale ed i trattamenti sono stati riprodotti fedelmente in 3D. Il comportamento di guida nelle diverse alternative progettuali è stato valutato tramite un simulatore dinamico di guida. I risultati ottenuti dimostrano che entrambi i trattamenti sono molto efficaci nella riduzione della velocità. Infatti, le velocità medie si riducono, nella zona di trattamento, tra 17 km/h e 10 km/h in direzione sud e tra 13 km/h e 9 km/h in direzione nord. I test di Mann-Withney e di Kolmogorov-Smirnov mostrano un livelli di significatività accettabile per entrambi i trattamenti. Complessivamente, l'alternativa progettuale 2 mostra i migliori risultati ed è suggerita per essere realizzata.

5 UN MODELLO PER LA RESTITUZIONE DELLE VIBRAZIONI DOVUTE ALLE IRREGOLARITÀ DISTRIBUITE NEI SIMULATORI DI GUIDA

5.1 Introduzione

La guida di un veicolo è un compito particolarmente complesso, coinvolge sia processi psicomotori nel controllo del veicolo che processi cognitivi nel trattamento delle informazioni percepite durante la guida. Queste informazioni vengono comunicate, direttamente o in maniera indiretta, dal traffico e dall'infrastruttura stradale.

Tra le informazioni acquisite, assumono un ruolo fondamentale nel fornire la sensazione di movimento/velocità quelle relative alla regolarità stradale, poiché influenzano il grado di comfort nella guida del veicolo. Il comfort di guida è correlato alle vibrazioni all'interno del veicolo che, a loro volta, dipendono dal livello di regolarità della strada, dalla velocità scelta dal guidatore e dalle caratteristiche di inerzia e meccaniche del veicolo. In realtà, diversi autori (Karan et al. 1978, Paterson et al. 1985, Watanada et al. 1987, Bennet et al. 2001, Chandra 2004) hanno sottolineato che, in certe condizioni di irregolarità stradale, i guidatori possono essere indotti a variare la propria velocità allo scopo di raggiungere un livello accettabile di vibrazioni all'interno del veicolo in accordo con i loro soggettivi limiti di esposizione e con le caratteristiche meccaniche del veicolo.

Nei simulatori di guida, poiché queste vibrazioni all'interno della cabina non vengono fornite, si ha la sensazione di guidare sulla "seta" e ciò induce un effetto non trascurabile nelle sensazioni percepite dal guidatore, rendendole talvolta poco realistiche. Tale discrepanza con il mondo reale può influenzare negativamente la percezione della velocità; portando chi guida un simulatore di guida a selezionare velocità elevate.

Per tale motivo, è stata sviluppata ed implementata una procedura per riprodurre nel simulatore di guida VERA le vibrazioni della cassa del veicolo indotte dalle irregolarità distribuite della pavimentazione stradale.

In questo capitolo, si riportano le tecniche e le tecnologie utilizzate in simulazione di guida per la riproduzione delle vibrazioni, la metodologia utilizzata per la generazione artificiale di un profilo stradale, una descrizione dell'indice IRI ed dei modelli

meccanici per lo studio della dinamica del veicolo. In seguito, verrà descritto lo sviluppo e l'implementazione di un modello per la simulazione delle vibrazioni ed i risultati di due procedure di calibrazione. Alla fine del capitolo, sono presentati i risultati di una sperimentazione realizzata allo scopo di studiare gli effetti sul comportamento di guida delle vibrazioni indotte dall'irregolarità stradale.

5.2 Irregolarità stradali: esperienze in simulazione di guida

Quando si guida in un ambiente reale, è possibile ottenere diverse informazioni tramite differenti modalità sensoriali ed integrando tali informazioni siamo in grado di percepire lo stato del veicolo. Nella guida a velocità costante, gli stimoli sensoriali vibratori, in aggiunta a quelli visuali, vengono utilizzati per la percezione della velocità. I soggetti che guidano un simulatore di guida, talvolta, percepiscono velocità del veicolo inferiore a quella calcolata. La mancanza di una precisa percezione rappresenta pertanto un limite dei simulatori di guida. Dunque, è importante generare una sensazione naturale di vibrazione per aumentare la percezione della velocità nei simulatori.

Esistono diversi modi per generare e restituire le vibrazioni in un simulatore di guida. La restituzione delle vibrazioni in simulazione di guida può avvenire tramite:

- Sedile vibrante
- Tavola vibrante
- Piattaforma dinamica (vedi cap. 5)

Ovviamente, nel caso di simulatori statici, privi di sedile o tavola vibrante, non vi è alcuna possibilità di fornire stimoli sensoriali vibratori ma è possibile solo simulare le vibrazioni tramite stimoli sonori. Tali suoni vengono modulati in funzione della condizione della pavimentazione stradale e della velocità. Sebbene, tali stimoli riproducano solamente una componente sensoriale dell'effetto delle vibrazioni sul guidatore, tale metodo è pur sempre un buon compromesso rispetto all'assenza totale di informazioni relative alle vibrazioni. Va ricordato che tale stimoli sonori vanno accoppiati anche ai sistemi di simulazione in grado di riprodurre le accelerazioni dovute all'irregolarità stradale per garantire la coerenza sensoriale.

I sedili vibranti sono costituiti, generalmente, da un solo attuatore in grado di controllare la posizione verticale del guidatore (Ultimate Renault – Francia, INRETS -

Francia) con escursioni di qualche decina di millimetri ed accelerazione che generalmente non superano i 10 m/s^2 . Tale sistema è poco costoso ma presenta dei limiti nella restituzione delle vibrazioni.

Diversi simulatori (NADS - USA, VTI Driving Simulator III - Svezia, AIST - Giappone) vengono integrati con una tavola vibrante; il sistema è posizionato tra la cabina di guida e l'eventuale piattaforma dinamica. La tavola è destinata a riprodurre i moti ad media-alta frequenza ($> 3 \text{ Hz}$) dovuti alle vibrazioni originate dalle sospensioni, dal motore, dalla turbolenza dell'aria, dalla risonanza della cassa del veicolo, etc.. La tavola consente da uno (z) a quattro (x, z, rollio e beccheggio) gradi di libertà con escursioni di una decina di centimetri.

A conoscenza dell'autore, alla cabina di un simulatore di guida è possibile fornire vibrazioni:

- Random
- Ottenute da misure su strada

Le vibrazioni random sono le più semplice da mettere in opera poiché le accelerazioni in cabina vengono ottenute come semplice somma di armoniche sinusoidali diverse: almeno tre per evitare che vengano memorizzate dai guidatori (Green, 2005).

Il secondo metodo per generare le vibrazioni in un simulatore di guida è quello di riprodurre la forma d'onda delle vibrazioni in cassa misurate in un veicolo mentre guida su di una strada reale. Comunque questo metodo può solamente generare vibrazioni sotto specifiche condizioni di registrazione (es.: velocità e condizioni stradali). Sono degne di nota recenti esperienze sviluppate in questa direzione con il Kitami Institute of Technology Dynamic Driving Simulator (KITDDS) riportate in Kawamura et al. (2004, 2007, 2008). In questi lavori, allo scopo di analizzare la relazione tra le irregolarità stradali e il comfort di guida, diversi soggetti hanno effettuato una guida con il KITDDS durante la quale tramite piattaforma dinamica veniva riprodotta in cabina una vibrazione artificiale. Tale vibrazione era calcolata tramite un modello di veicolo che utilizzava quale input il profilo stradale misurato per differenti livelli di irregolarità. Comunque, durante le sessioni di guida, i soggetti testati non erano liberi di interagire con il simulatore di guida e, quindi, non erano in grado di modificare la propria velocità allo scopo di raggiungere all'interno della cabina di guida un livello accettabile di vibrazioni.

Espié et al. (2001) hanno riprodotto le vibrazioni per il sedile vibrante del simulatore SIM², schematizzando i profili reali misurati su strada come una successione di micro protuberanze quasi semi sferiche con differente altezza. Queste micro protuberanze sono caratterizzate da un raggio medio, da una distribuzione normale (σ , μ) delle altezze e da una densità. Ogni superficie stradale è individuata da una coppia (σ , μ), i cui valori cambiano ogni volta che il veicolo si sposta su di un tipo differente di pavimentazione. Le protuberanze su di un tratto di lunghezza L saranno definite da altezze h_i generate secondo una legge normale, da larghezze λ_i proporzionali (costante di proporzionalità usata 5/2) all'altzze, da un interspazi l_i tra le protuberanze proporzionali alla larghezze ed infine da una forma sinusoidale secondo la seguente funzione:

$$\begin{cases} f_i(x) = h_i \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} x\right) & \text{se } x \in [0, \lambda_i] \\ f_i(x) = 0 & \text{se } x \in [\lambda_i, \lambda_i + l_i] \end{cases}$$

Tra due posizioni x_i e x_{i+1} , procedendo ad una velocità V , si ha una vibrazione uniforme con una traslazione casuale:

$$y = \frac{A}{2} \left[\sin\left(2\pi f t + \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right]$$

$$\text{con } A = h_i \sin\left|\frac{2\pi}{\lambda} x\right|, \quad f = \frac{V}{A}$$

Il segnale così calcolato viene, infine, inviato al controller del sedile vibrante.

Akamatsu et al. (2002) hanno proposto un metodo in grado di generare, in condizioni arbitrarie, vibrazioni derivanti da misure su strada, che si basa su di un modello autoregressivo con un numero ridotto di parametri. Un modello autoregressivo è un modello stocastico per la serie temporale di una variabile. In questi modelli, la variabile (posizione verticale) al tempo t è espressa come una somma pesata delle variabili del passato (i valori precedenti) e di un rumore random. Poiché il modello è un combinazione lineare dei valori precedenti della variabile, una volta specificati i coefficienti, è necessario soltanto un semplice calcolo per generare le vibrazioni nel

simulatore di guida. I parametri e gli input random sono stimati da vibrazioni misurate in differenti condizioni di velocità. Quando viene simulata la vibrazione, i parametri e la variabile di input cambiano continuamente in accordo con la velocità del veicolo.

Il modello più comunemente usato per la generazione delle vibrazioni di un veicolo è un modello meccanico con masse, molle e smorzatori basato sulla struttura del veicolo con una cabina, ruote/pneumatici e sospensioni (Artz et al., 2004). Gli input del modello sono le caratteristiche della frequenza spaziale della superficie stradale. Su quest'ultimo metodo si basa il modello proposto ed implementato dall'autore nel simulatore di guida VERA; per tale motivo del modello si parlerà in maniera esauriente nel corso del seguente capitolo.

5.3 Il profilo stradale

L'irregolarità della pavimentazione stradale può essere singolare o distribuita. Gli esempi tipici delle irregolarità singolari della superficie della pavimentazione sono fossi e buche. In un ambiente urbano possiamo trovare anche i tombini e dispositivi di traffic calming. Un'irregolarità distribuita è sempre presente in ogni pavimentazione stradale poiché è virtualmente impossibile ottenere una superficie piana perfetta. Tuttavia, l'irregolarità distribuita subisce con il tempo un incremento a causa dei sovraccarichi dinamici trasmessi dal traffico pesante e dalla degradazione progressiva dei materiali della pavimentazione.

Da un punto di vista matematico, il profilo longitudinale della strada può essere considerato come un segnale e quindi può essere descritto da una somma di funzioni armoniche nel dominio dello spazio. Il profilo longitudinale di una strada può essere, quindi, rappresentato nel dominio dello spazio o nel dominio spaziale di frequenza. Secondo le norme ISO, una classificazione dell'irregolarità della strada è basata sul valore predominante di lunghezza di onda del profilo stradale, λ . Nella seguente tabella, è riportata la classificazione delle caratteristiche della superficie stradale basate sull'intervallo di lunghezza di onda (distanza tra due massimi consecutivi in una funzione sinusoidale) e sulla relativa ampiezza, h .

Tabella 5-1 : Classificazione delle caratteristiche della superficie stradale.

Texture	Microtexture	Macrottexture	Megattexture	Uneveness
λ [mm]	< 0.5	$0.5 \div 50$	$50 \div 500$	> 500
H [mm]	$0.001 \div 0.5$	$0.01 \div 20$	$0.1 \div 50$	-

Il comfort di guida è fortemente influenzato dalle caratteristiche superficiali che rientrano nel campo della megatessitura e dell'irregolarità.

Secondo un approccio di modellazione matematica, il profilo della strada può essere principalmente descritto in due modi: deterministico e stocastico. Nel primo modo, la funzione discreta che descrive esattamente il profilo stradale è conosciuta mentre nel secondo il profilo è trattato come un processo casuale e quindi viene usata la densità spettrale di potenza (PSD) dell'altezza verticale della superficie stradale.

5.4 Generazione artificiale di un profilo stradale

Dai primi anni Settanta, diversi autori (ISO 1995, Cebon 1999) hanno evidenziato che il profilo longitudinale della pavimentazione stradale può essere visto come un processo stocastico stazionario ed ergodico. Di conseguenza, è possibile descrivere il profilo per mezzo di una funzione spettrale di densità di potenza (PSD) dello spostamento verticale del profilo che è ottenuto come la trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione del processo stocastico che descrive il profilo.

Partendo da un profilo continuo noto, per un valore definito di frequenza spaziale, n , concentrata all'interno di una fascia di frequenza Δn , il valore della funzione spettrale di densità di potenza per la frequenza assegnata, n , è definita per mezzo della seguente espressione (Bendate et al. 1986, Diana et al. 1997):

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (5-1)$$

dove Ψ_x^2 è il valore quadratico medio della componente del segnale per la frequenza spaziale n , all'interno di una fascia di frequenza Δn .

Il profilo stradale non è, tuttavia, misurato in maniera continua ma discreta, per cui risulta descritto da una sequenza di quote uniformemente distanti. Detta L la lunghezza totale del profilo stradale, e B il passo di campionamento, la frequenza spaziale massima teorica risulta essere, dal momento che la massima frequenza spaziale effettiva, in accordo con il teorema di Nyquist, è $n_{eff} = n_{max} / 2$; i valori discretizzati delle frequenze n_i sono uniformemente distanti di un intervallo pari a $\Delta n = 1/L$. Perciò, il generico valore della frequenza spaziale, n_i , può essere rivisto come il prodotto delle quantità $i \cdot \Delta n$ e la (5-1) può essere riscritta in forma discreta come:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Psi_x^2(i \cdot \Delta n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (5-2)$$

con l'indice i variabile da 0 a $N = n_{max} / \Delta n$

Nell'ipotesi che il profilo longitudinale stradale sia descritto per mezzo di una semplice funzione armonica, ad esempio attraverso la seguente espressione:

$$y(x) = A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi) = A_i \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi) \quad (5-3)$$

Dove A_i è l'ampiezza, n_i è la frequenza spaziale e φ è l'angolo di fase, allora sarà possibile dimostrare che il valore quadratico medio del segnale armonico è:

$$\Psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2} \quad (5-4)$$

Dalla (5-4) è possibile facilmente dedurre che la relazione tra il contenuto spettrale, ottenuto attraverso la trasformata di Fourier, e il PSD del profilo stradale discretizzato può essere definito attraverso la seguente espressione:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n} \quad (5-5)$$

Diversi autori (Cebon 1999, Diana et al. 2004) hanno mostrato che, una volta nota la funzione PSD degli spostamenti verticali, è possibile generare un profilo stradale

artificiale attraverso la relazione tra il contenuto spettrale e la funzione PSD del profilo stesso.

In effetti, dallo sviluppo dell'espressione (5-5) e assumendo un angolo di fase casuale, φ_i , seguente una distribuzione probabilistica uniforme nel campo $0 \div 2\pi$, il profilo artificiale può essere descritto attraverso la seguente espressione:

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi_i) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} \sqrt{2 \cdot \Delta n \cdot G_d(i \cdot \Delta n)} \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \quad (5-6)$$

Richiamando la classificazione ISO dell'irregolarità stradale, la funzione PSD degli spostamenti verticali può essere rappresentata per mezzo della seguente equazione:

$$G_d(n) = G(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad (5-7)$$

dove n_0 è 0.1 cicli/m e $G(n_0)$ è riportato nella seguente tabella:

Tabella 5-1 : Valori di $G(n_0)$ per la classificazione ISO sulla regolarità stradale.

Classificazione strada	$G(n_0) 10^{-6} [m^3]$
<i>Limite superiore A – limite inferiore B</i>	32
<i>Limite superiore B – limite inferiore C</i>	128
<i>Limite superiore C – limite inferiore D</i>	512
<i>Limite superiore D – limite inferiore E</i>	2048
<i>Limite superiore E – limite inferiore F</i>	8192
<i>Limite superiore F – limite inferiore G</i>	32768
<i>Limite superiore G – limite inferiore H</i>	131072

Sostituendo la (5-7) nella (5-6), è possibile generare un profilo stradale artificiale secondo la classificazione ISO, attraverso la seguente equazione:

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi_i) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} \sqrt{2 \cdot \Delta n \cdot G_d(i \cdot \Delta n)} \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \quad (5-8)$$

dove k è in funzione della classificazione ISO ed è riportato nella tabella seguente.

Tabella 5-3 – Valori di k per la classificazione ISO sulla regolarità stradale.

Classificazione strada	k
<i>Limite superiore A – limite inferiore B</i>	3
<i>Limite superiore B – limite inferiore C</i>	4
<i>Limite superiore C – limite inferiore D</i>	5
<i>Limite superiore D – limite inferiore E</i>	6
<i>Limite superiore E – limite inferiore F</i>	7
<i>Limite superiore F – limite inferiore G</i>	8
<i>Limite superiore G – limite inferiore H</i>	9

Nella Figura 5-1 viene riportato un profilo artificiale generato a partire dalla funzione PSD degli spostamenti verticali per la classificazione stradale A-B. Il passo di campionamento è stato assunto pari a 0.25 m, mentre la lunghezza totale del profilo stradale è di 100 m; inoltre l'intervallo minimo di frequenza, Δn , è 0.001 cicli/m, mentre la massima frequenza spaziale teorica, n_{max} è 2 cicli/m, quindi il segnale è composto da 400 funzioni armoniche. Nella figura seguente (D'Apuzzo, 2004) viene anche riportato un esempio di profilo artificiale generato prendendo in considerazione le prime 200 funzioni armoniche fino alla massima frequenza spaziale effettiva, n_{eff} . La differenza media in altezza tra i due profili è inferiore al 10%, mentre la differenza tra i corrispondenti valori dell'IRI (valutato con una velocità di viaggio pari a 80 Km/h (Sayers, 1961)) è inferiore al 2%.

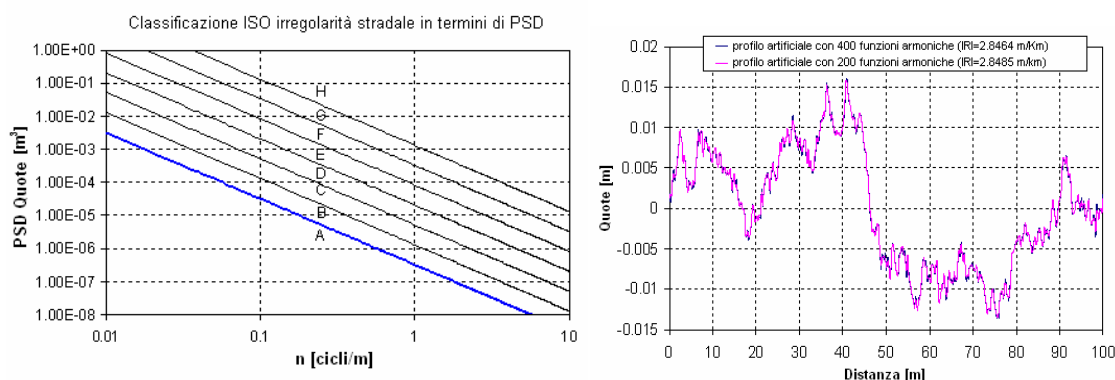


Figura 5-1 : Classificazione ISO sulla regolarità stradale (sinistra); profilo stradale artificiale generato a partire dal PSD per la classe stradale ISO con limite superiore A (destra)

La Figura 5-1 mostra che, in una scala bilogarithmica, la relazione fra lo spettro di densità di potenza PSD e la frequenza spaziale n è di tipo lineare, e, attraverso l'eq. (5-8), ogni retta fra quelle riportate in figura genera un profilo longitudinale caratterizzato

da un determinato valore dell'irregolarità. Per trovare una correlazione fra il valore del PSD e l'indice di irregolarità IRI (di cui si parlerà nel prossimo paragrafo), si sono presi in considerazione diversi valori dell'indice IRI ottenibili dalle rette riportate in figura, escludendo quelle corrispondenti ai livelli di classificazione stradale D-H, in quanto generano valori dell'IRI troppo elevati che sicuramente non si riscontrano nelle pavimentazioni stradali. È stato quindi possibile, attraverso un'analisi di regressione dei risultati ottenuti, trovare una correlazione (Figura 5-2) tra il valore dell'indice IRI e il valore della funzione spettro densità di potenza in corrispondenza della frequenza spaziale n_0 ($\log[G(n_0)]$ nell'eq. (5-7)). Pertanto a partire da un valore fissato dell'indice IRI è possibile ricavare la retta, caratterizzata da una intercetta in corrispondenza della frequenza spaziale n_0 pari a $\log[G(n_0)]$, alla quale corrisponderà un profilo longitudinale avente una irregolarità pari a quella iniziale.

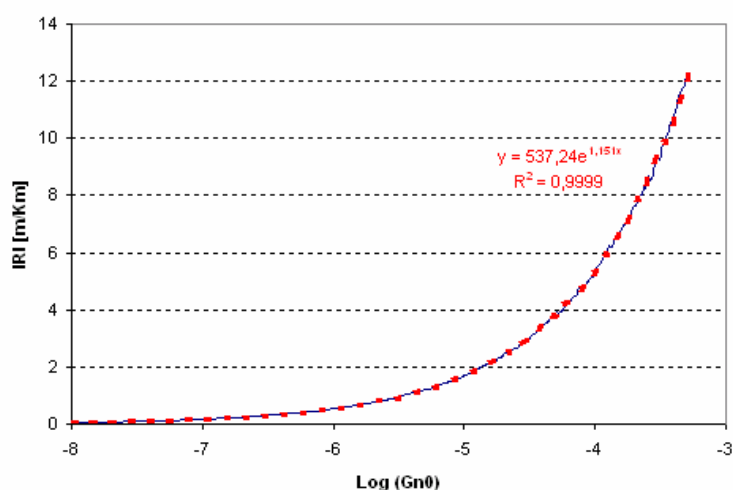


Figura 5-2 : Correlazione l'irregolarità longitudinale e lo spettro di densità di potenza

Nella seguente figura (Fig. 5-3), è visibile un esempio di generazione artificiale di profili stradali a partire dalle curve di ISO PSD e sono riportate le condizioni della pavimentazione in funzione del valore dell'IRI. In particolare, sono stati generati quattro profili di una strada lunga 100 metri (cioè i profili 1, 2, 3 e 4) con aumento del livello di rugosità della strada. I valori di IRI sono 1.45 m/km per il profilo 1, corrispondente ad una superficie stradale recentemente asfaltata, 2.87 m/km per il profilo 2, corrispondente ad una superficie stradale di media età, 5.64 m/km per il profilo 3, corrispondenti ad una non buona superficie stradale ed a 11.47 m/km che corrispondono ad una superficie stradale con gravi difetti.

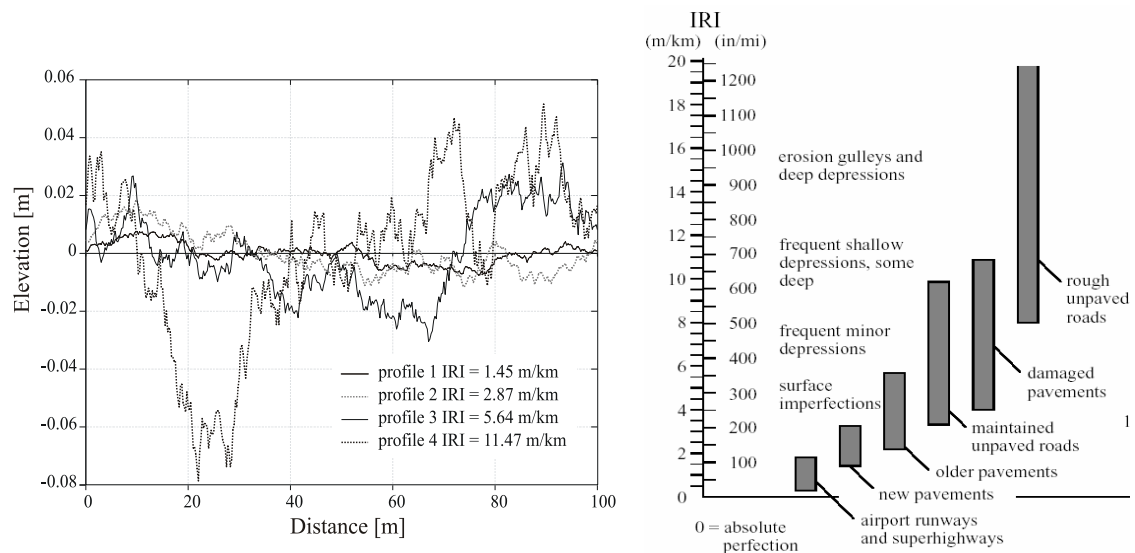


Fig. 5-3 : Profili stradali artificiali generati tramite curve ISO (destra), valori di IRI e condizioni pavimentazione stradale.

5.5 L'indice IRI

Nel campo delle pavimentazioni stradali, l'irregolarità può essere definita come l'insieme delle distorsioni del piano viabile che rendono la marcia dei veicoli poco confortevole. Le irregolarità del piano viabile imprimono al veicolo delle accelerazioni, orizzontali e verticali, che influenzano il comfort e la sicurezza della circolazione; le accelerazioni verticali sono quelle che influenzano principalmente il *comfort* di marcia e sono prevalentemente dovute all'irregolarità longitudinale del profilo.

Il modello di comfort sviluppato ed implementato nel simulatore di guida V.E.R.A. riproduce le vibrazioni della cabina, restituendole tramite piattaforma dinamica, indotte dall'irregolarità longitudinale descritta attraverso l'indice IRI (*International Roughness Index*), sviluppato dalla Banca Mondiale, che è un indice sintetico in grado di fornire un giudizio globale sullo stato della pavimentazione.

Conoscendo il profilo iniziale è possibile calcolare il valore dell'indice IRI attraverso la procedura mostrata nel seguito (Sayers, 1961). Si procede alla schematizzazione dell'interazione veicolo-pavimentazione attraverso un sistema lineare a due gradi di libertà (*Quarter car*), riportato nella figura seguente.

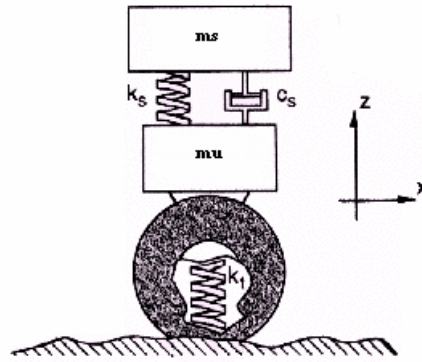


Figura 5-4 : Modello Quarter Car

dove c_s e k_s sono le costanti del dispositivo di accoppiamento cassa-asse del veicolo viscoso ed elastico, k_f è la costante del dispositivo elastico di accoppiamento pneumatico-pavimentazione, e m_s e m_u sono la massa sospesa (massa del veicolo gravante sulla ruota) e non sospesa (massa dell'asse gravante sulla ruota).

Sayers (1961) suggerisce, ai fini del calcolo dell'indice IRI, di assumere i seguenti valori delle costanti del modello:

$$c = \frac{c_s}{m_s} = 6; \quad k_1 = \frac{k_f}{m_s} = 653; \quad k_2 = \frac{k_s}{m_s} = 63.3; \quad \mu = \frac{m_u}{m_s} = 0.15$$

Il sistema di quattro equazioni differenziali del primo ordine che regolano il moto del Quarter Car possono essere riscritte nella seguente notazione matriciale:

$$\dot{x} = Ax + Bh_p \tag{5-9}$$

in cui x , A , e B sono definite da:

$$x = \begin{bmatrix} z_s \\ \dot{z}_s \\ z_u \\ \dot{z}_u \end{bmatrix}^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & -c & k_2 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{k_2}{\mu} & \frac{c}{\mu} & -\frac{k_1 - k_2}{\mu} & -\frac{c}{\mu} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_1}{\mu} \end{bmatrix}^T$$

h_p = quote del profilo

z_s e z_u = altezza della massa sospesa e non sospesa

\dot{z}_s e \dot{z}_u = derivata rispetto al tempo dell'altezza della massa sospesa e non sospesa.

Detta L la lunghezza del profilo e V la velocità di percorrenza, che ai fini del calcolo dell'IRI viene posta pari a 80 Km/h (Sayers (1961)), è possibile definire l'indice IRI attraverso la seguente espressione:

$$IRI = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{\frac{L}{V}} |z_s - z_u| dt \quad (5-10)$$

Per risolvere il sistema di equazioni differenziali (5-9), non risolvibile in forma chiusa, è necessario utilizzare algoritmi di risoluzione per iterazioni successive: l'integrazione di Eulero e l'algoritmo degli stati di transizione.

Il metodo di Eulero consiste nel risolvere il sistema di equazioni differenziali attraverso un'integrazione numerica; la più semplice integrazione di Eulero consiste nella considerare la seguente approssimazione:

$$x_i = x_{i-1} + dt \dot{x}_{i-1} \quad (5-11)$$

dove dt è un intervallo temporale piccolo proporzionale allo step di campionamento Δ attraverso la seguente relazione:

$$dt = \frac{\Delta}{V}$$

Sayers (1961) osserva che il metodo approssimato di Eulero richiede tempi di elaborazione piuttosto elevati, ed inoltre tale metodo consente di ottenere una stima attendibile dell'indice IRI solamente se il passo di campionamento risulta essere sufficientemente piccolo (<100 mm). Questo valore risulta indubbiamente più piccolo di quello utilizzato nelle normali procedure di campionamento dei profili longitudinali stradali che varia invece tra 200 e 300 mm.

L'algoritmo degli stati di transizione consente di risolvere questi problemi. Partendo dall'ipotesi che la pendenza media del profilo sia costante tra la sezione i-1 ed i, allora è possibile ottenere la seguente soluzione in forma chiusa:

$$x_i = e^{\frac{A\Delta}{V}} \cdot x_{i-1} + A^{-1} \cdot (e^{\frac{A\Delta}{V}} - I) \cdot Bu \quad (5-12)$$

dove I è matrice identità (4x4) e u è la pendenza media del profilo considerata costante tra la sezione i-1 ed i. Il termine $e^{A\Delta/V}$ è una matrice 4x4 detta di transizione che definisce la risposta libera come una combinazione lineare delle quattro variabili in x al punto i-1, mentre il termine $A^{-1} (e^{A\Delta/V} - I)B$ è un vettore di 4 elementi detto di risposta parziale che definisce la risposta forzata come una funzione lineare della pendenza u. La matrice di transizione è possibile calcolarla in funzione degli sviluppi in serie di Taylor, così come riportato nella espressione seguente:

$$e^{\frac{A\Delta}{V}} = I + \sum_{i=1}^N \frac{A^i (\Delta/V)^i}{i!} \quad (5-13)$$

L'equazione (5-12) è esatta se si considera la pendenza del profilo costante tra la sezione i-1 ed i, e diverse ricerche condotte sui diversi metodi di interpolazione mostrano come questa approssimazione risulti effettivamente verificata.

L'equazione (5-12) è soluzione del seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\dot{x} = Ax + Bs_p \quad (5-14)$$

dove s_p è la pendenza del profilo filtrato, e il vettore x è ora espresso in termini di pendenze e non più di altezze; in particolare il vettore x avrà le seguenti componenti:

$$x = \left[s_s, \dot{s}_s, s_u, \dot{s}_u \right]^T \quad (5-15)$$

dove gli indici s_s e s_u rappresentano rispettivamente la pendenza della massa sospesa e non sospesa.

Benché le variabili presenti nell'equazione (5-14) siano differenti da quelle iniziali presentate nell'equazione (5-10), queste sono comunque adatte per il calcolo l'IRI, in quanto l'equazione (5-10) può essere trasformata nella seguente espressione:

$$IRI = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |s_{s,i} - s_{u,i}| \quad (5-16)$$

in cui la pendenza del profilo viene calcolata attraverso l'operatore media mobile, ovvero:

$$s_{ps,i} = \frac{h_{p,i+k} - h_{p,i}}{k\Delta} \quad (5-17)$$

dove $k = \max[1, \text{int}(L/\Delta)]$.

Per generalizzare, l'equazione (5-16) può essere riscritta in termini matriciali attraverso la seguente espressione:

$$IRI = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |Cx| \quad (5-18)$$

in cui la matrice C è così definita:

$$C = [1 \quad 0 \quad -1 \quad 0]$$

Sayers (1961) osserva che questo metodo, a differenza del precedente, consente di ottenere una maggiore stabilità nella soluzione finale, in quanto attraverso questo è possibile avere una stima attendibile dell'indice IRI fino a un passo di campionamento inferiore o uguale a 300 mm. Tale stabilità fa preferire l'utilizzo dell'algoritmo degli stati di transizione rispetto a quello di Eulero. A tal riguardo la Figura 5-5 mostra le differenze che è possibile ottenere in termini dell'indice IRI utilizzando i due algoritmi di calcolo (Sayers, 1961); in particolare è possibile notare come a passi di campionamento che oscillano intorno ai 250 mm il metodo di Eulero sottostima il valore dell'IRI calcolato rispetto a quello vero (misurato) di circa il 30%.

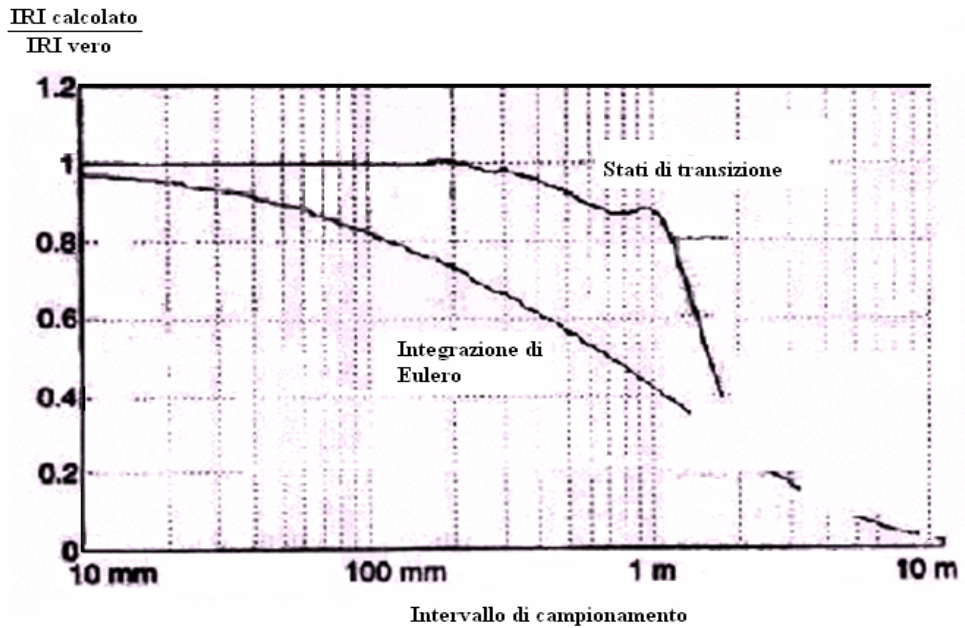


Figura 5-5 : Differenza fra l'algoritmo di Eulero e quello degli stati di transizione (Sayers, 1961)

5.6 Modello di veicolo

Per quanto riguarda il modello del veicolo, attualmente, in ingegneria meccanica, sono adottati i modelli di massa concentrata per studiare la dinamica del veicolo. In particolare, il veicolo è considerato come sistema fatto di masse puntuali o di corpi rigidi collegati fra loro tramite molle ed smorzatori. In base al grado di approssimazione richiesto "per catturare" il comportamento del veicolo, questi modelli possono essere molto semplici (sistemi ad un grado di libertà), ma possono diventare abbastanza complessi (fino a parecchi gradi di libertà).

Nell'ingegneria stradale, il più usato tra i modelli di corpo rigido è il "Quarter Car Model" (Fig. 5-6). Si tratta di un sistema a due gradi di libertà in cui la massa sospesa rappresenta un quarto del telaio del veicolo ed è collegata alla massa non sospesa attraverso il sistema della sospensione che è modellato solitamente da una molla e da uno smorzatore in parallelo. La massa non sospesa, rappresentante metà asse, è collegata al profilo della pavimentazione stradale tramite un'altra molla accoppiata con uno smorzatore per considerare la rigidità verticale del pneumatico ed il coefficiente di smorzamento.

Questo modello, accoppiato con una rappresentazione deterministica o stocastica del profilo della strada, può essere usato per valutare il PSD o lo spettro di frequenza delle

accelerazione verticale. Tuttavia, per considerare il moto di beccheggio del veicolo è necessario utilizzare un modello a quattro gradi di libertà (chiamato Half Car Model) dove sono presi in considerazione sia gli assi anteriore che quelli posteriori.

Un Half Car Model (Fig. 5-6) differisce da un Quarter Car Model poichè il telaio del veicolo è rappresentato tramite una struttura rigida con una massa specifica ed un'inerzia di rotazione che sono computate considerando il veicolo mezzo. Il corpo rigido del veicolo è collegato agli assi anteriore ed posteriori attraverso i sistemi di sospensione che sono modellati dalle molle lineari e dai smorzatori in parallelo. Come per il Quarter Car Model, gli assi sono rappresentati dalle masse puntuali, computate su metà veicolo e sono collegati al profilo stradale con sistemi molla-smorzatore che tengono in conto la rigidità verticale e lo smorzamento.

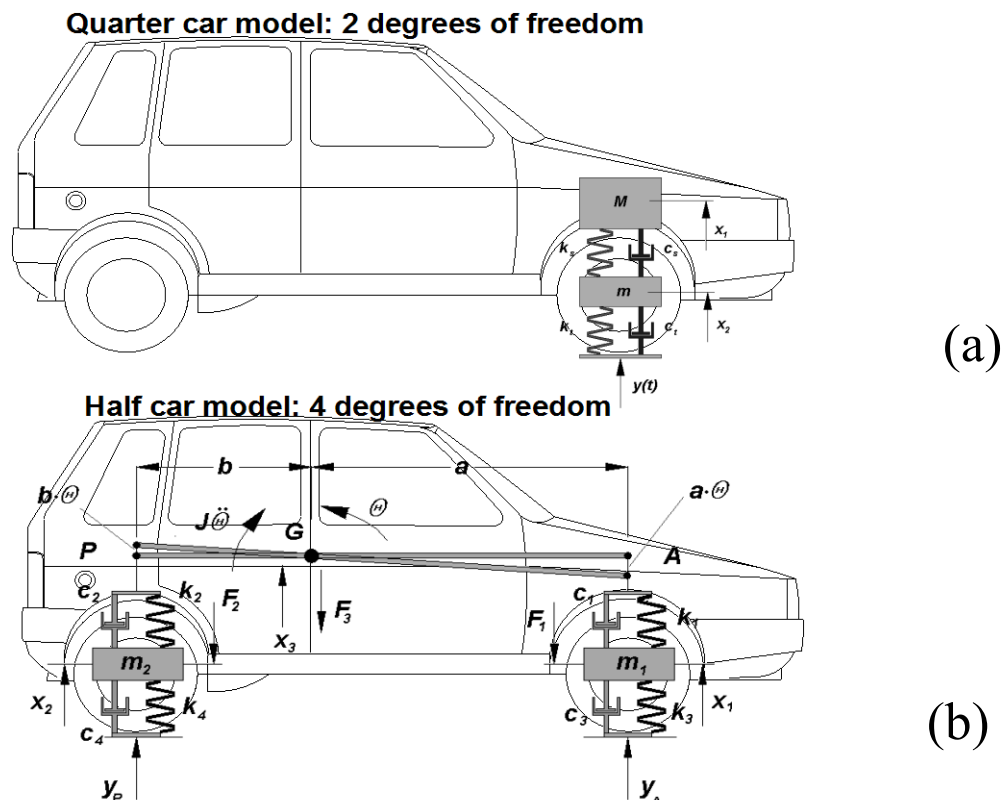


Fig. 5-6 : Quarter Car model (a) e Half Car Model (b)

Dal punto di vista computazionale, per uno specifico veicolo, il moto di un veicolo su di una superficie irregolare può essere facilmente descritto tramite un insieme classico delle equazioni differenziali lineari di secondo grado:

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = F \quad (5-19)$$

dove, $[M]$ è la matrice delle masse contenente le proprietà d'inerzia del veicolo, $[C]$ è la matrice degli smorzamenti contenete le proprietà di smorzamento degli smorzatori, $[K]$ è la matrice delle rigidzze contenente le proprietà di rigidzza delle molle, X è il vettore degli spostamenti relative ad ogni grado della libertà che caratterizza il modello e la F è il vettore delle forze esterne che agiscono sul veicolo (in questo caso l'eccitazione verticale del profilo).

Usando la notazione complessa per descrivere lo spostamento di ogni grado di libertà, x_i e calcolando le derivate del primo e del secondo ordine per derivare la velocità e le accelerazioni, si può ottenere:

$$x_i(t) = X_i \cdot e^{i\omega t}, \quad \dot{x}_i(t) = i\omega \cdot X_i \cdot e^{i\omega t}, \quad \ddot{x}_i(t) = -\omega^2 \cdot X_i \cdot e^{i\omega t} \quad (5-20)$$

dove ω è la frequenza circolare. Sostituendo la (5-20) in (5-19), l'insieme delle equazioni differenziali lineari è trasformato in una serie algebrica di equazione:

$$[-\omega^2[M] + i\omega[C] + [K]]X = F \quad (5-21)$$

che può essere risolta allo scopo di derivare le funzioni complesse di trasferimento (o funzione di risposta in frequenza, FRF) tra l'eccitazione verticale di profilo della strada e la reazione dinamica del veicolo, espresse in termini di spostamento verticale, la velocità o l'accelerazione.

5.7 Il modello di confort proposto

Nel modello proposto, le irregolarità distribuite vengono descritte tramite la funzione $W_d=W(s)$, dove W_d è la posizione verticale relativa rispetto alla superficie della pavimentazione considerata perfettamente piatta, che può essere ottenuta con una campagna di misure del profilo stradale o generate in maniera artificiosa una volta stabilito il livello di irregolarità. Ad ogni passo di tempo viene individuate la posizione del centro del veicolo proiettata sulla superficie stradale e, quindi, viene definite la

posizione di ogni ruota in funzione di s (ascissa curvilinea) ed, infine, viene computati i loro W_d .

Il veicolo è rappresentato da un modello multi-body (Full Car Model) a 7 gradi di libertà, 3 (posizione verticale, beccheggio e rollio) per la cassa e 1 per ogni ruota.

Le irregolarità stradali sono considerate come un input per il modello dinamico ed ad ogni passo di tempo vengono calcolate le accelerazioni verticali, di beccheggio e di rollio del centro del veicolo. Tali valori vengono poi trasferiti alla piattaforma mobile opportunamente elaborate.

Il modello proposto è stato implementato in linguaggio C++, utilizzando le API del modello dinamico “Trydim” (Fig. 5-7) del software di simulazione di guida SCANeR II. In pratica, si è realizzato un modulo (vibration.dll) del modello dinamico che computa le accelerazioni della cassa dovute ai diversi profili stradali caricati ad inizio simulazione e le invia in input agli algoritmi della piattaforma dinamica.

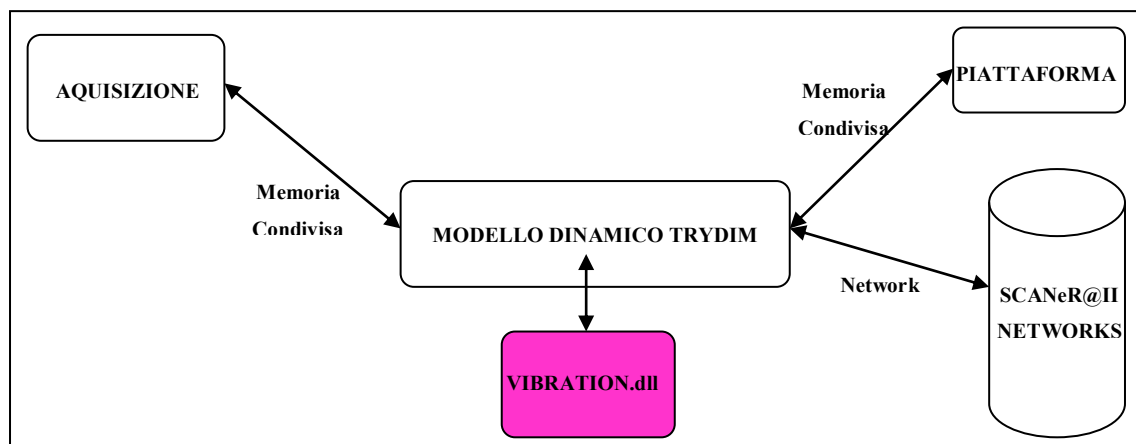


Fig. 5-7 : Architettura globale del modello dinamico Trydim.

Il modulo sperimentale può essere suddiviso in tre sotto-moduli:

1. *Generazione delle irregolarità*: Viene fornito ad ogni ruota un profilo stradale tramite la sua Trasformata di Fourier nel dominio delle frequenze spaziali.
2. *Full Car Model*: Il veicolo è considerato come un sistema costituito da quattro punti massa capaci di muoversi solamente nella direzione verticale, che rappresentano le ruote, ed un corpo rigido in grado di muoversi verticalmente e di ruotare intorno agli assi di rollio e beccheggio, rappresentante la cassa del veicolo. Il corpo rigido è connesso alle ruote tramite un sistema di sospensioni modellizzate da molle lineari e ammortizzatori in parallelo. Le ruote anteriori ed

il corpo rigido sono anche connessi tramite una barra di torsione modellizzata da una molla ed un ammortizzatore in parallelo, in maniera simile si è proceduto per le ruote posteriori. Le ruote sono connesse al profilo stradale tramite un sistema di molle-ammortizzatori che tiene in conto la rigidità e dello smorzamento verticale dei pneumatici. Lo schema del modello è riportato in Figura 5-8.

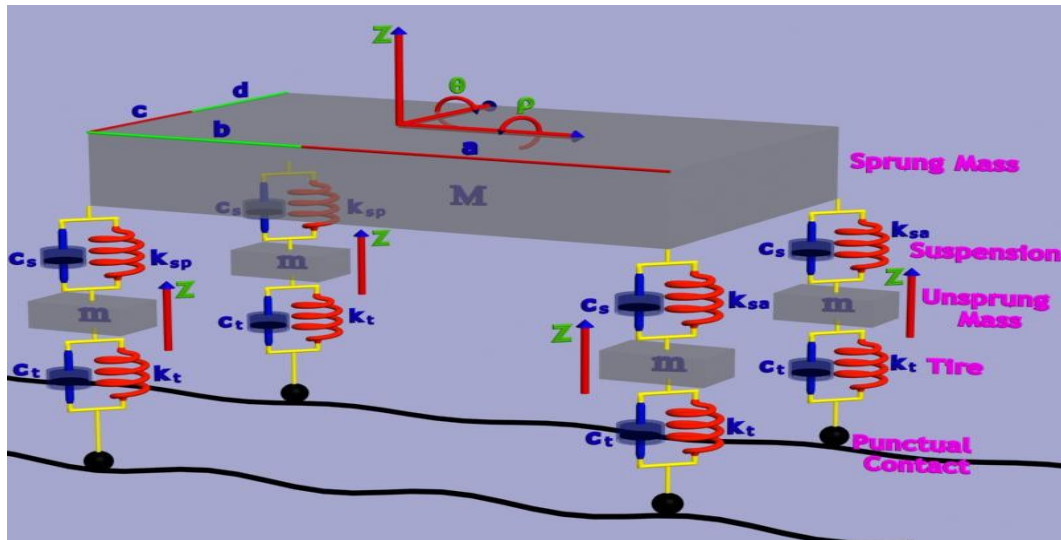


Fig. 5-8 : Full Car Model.

3. *Trasferimento delle accelerazioni*: Le accelerazioni dovute al profilo stradale calcolate dal modello dinamico sopra-descritto vengono addizionate alle accelerazioni del modello dinamico del simulatore di guida e, quindi, inviate come input al modello di piattaforma.

In pratica ad ogni passo di tempo, viene aggiornata la velocità del veicolo (quindi, s) e il profilo stradale su cui si trova ogni ruota. In particolare, poiché la superficie stradale viene schematizzata tramite l'uso di patch accostati l'uno all'altro, si è pensato di associare ad ogni patch un diverso profilo stradale.

Nota s ed il profilo, è possibile calcolare per ogni ruota la posizione verticale relativa. Tramite il modello dinamico multi-body a 7 gradi di libertà è possibile, infine, computare le accelerazioni verticali, di rollio e di beccheggio della cassa. Tali accelerazioni, in ultimo, vengono inviate, addizionate alle accelerazioni del modello dinamico del simulatore di guida, quali dati di input all'algoritmo di "Motion Cueing" della piattaforma.

Tale algoritmo (Fig. 5-9), che trasforma le accelerazioni fornite dal modello dinamico in posizioni degli attuatori della piattaforma, è composto da:

- 1 filtro passa-alto (F_1) per rimuovere i contenuti a bassa frequenza delle accelerazioni lineari e 1 filtro passa-alto (F_1) per rimuovere le componenti a bassa frequenza delle accelerazioni angolari. Il segnale di accelerazione risultante dal primo filtro F_1 viene poi integrato due volte per ottenere il comando di posizione in traslazione, mentre l'uscita del secondo filtro F_1 è anch'essa integrata due volte per ottenere le rotazioni ad alta frequenza;
- 1 filtro passa-basso (F_2) per estrarre le componenti a bassa frequenza delle accelerazioni lineari nel piano orizzontale. Il segnale ricavato è utilizzato per calcolare l'inclinazione necessaria per generare la componente dell'accelerazione lineare originata dall'accelerazione di gravità ("tilt coordination"). La tilt coordination viene poi sommata alle rotazioni ad alta frequenza calcolate al punto precedente per ottenere il comando delle rotazioni della piattaforma;
- 2 filtri passa-alto (F_3) per riportare la piattaforma nella sua configurazione neutra (tecnica di "motion washout", per evitare che gli attuatori vadano in saturazione).

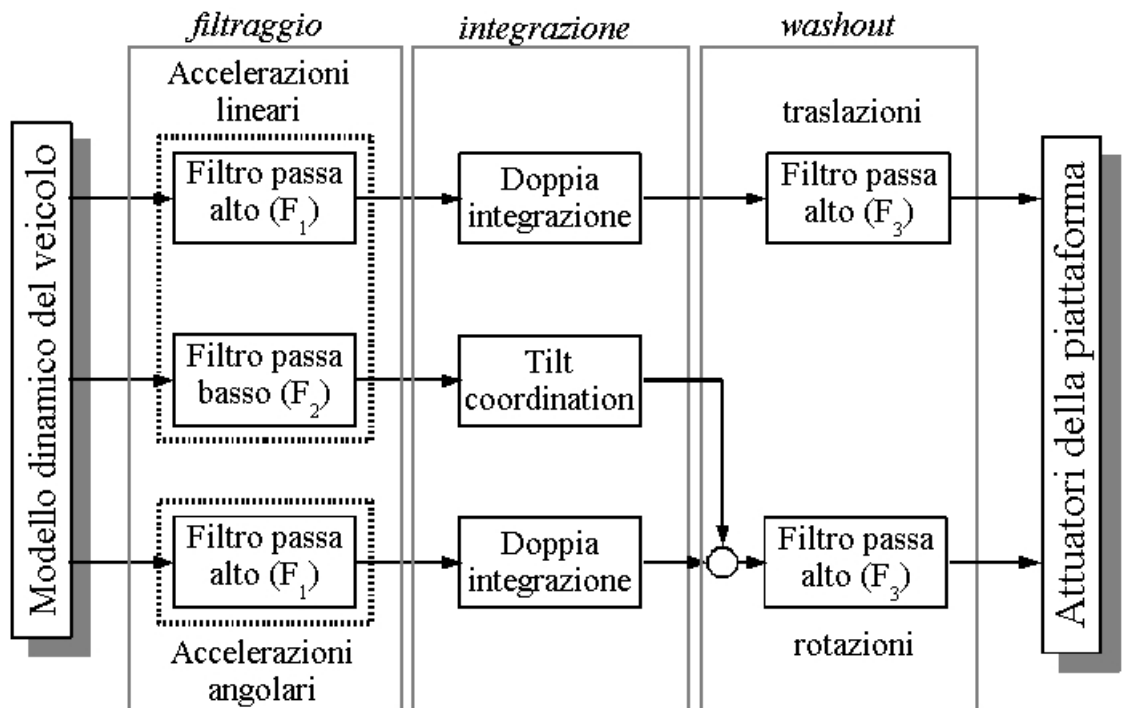


Fig. 5-9 : Struttura del filtro di "motion cueing".

5.8 Validazione del sistema

Il modello implementato è stato validato in due modi. Nel primo, le accelerazioni verticali della piattaforma mobile sono state confrontate con le accelerazioni verticali calcolate dal modello di comfort. Il secondo tipo di verifica è di tipo qualitativa ed è il risultato di una sessione di guida di soggetti esperti in simulazione di guida.

5.8.1 Validazione qualitativa

Per la prima validazione, dopo i primi infruttuosi tentativi di test con soggetti umani, è stato necessario implementare una procedura per riprodurre al simulatore una guida automatica. La motivazione che hanno indotto a sviluppare una tale funzionalità, è costituita dall'impossibilità di mantenere una velocità costante in presenza di vibrazioni simulate indotte da irregolarità stradali con IRI 4 e 6.

La procedura, sviluppata sempre tramite le API del software di simulazione di guida SCANeR@II e scritta in linguaggio C++, è in grado, in assenza di guidatore all'interno della cabina del simulatore, di accendere il veicolo, portarlo ad una prestabilita velocità ed a mantenerlo a tale velocità per un intervallo di tempo predefinito. La procedura funziona con modelli dinamici a cambio automatico ed è stata concepita per mantenere in corsia il veicolo durante la marcia.

La prima validazione è stata effettuata mediante tale sistema di guida automatica su tre tracciati rettilinei di circa 10 Km con tre diversi valori di IRI: 2, 4 e 6. Al veicolo a guida automatica è stato imposto di raggiungere sei diversi valori di velocità da 20Km/h a 120 Km/h, con un incremento ad ogni aumento di velocità di 20 Km/h, e di mantenerli per almeno 25 secondi. Durante ogni sessione di guida, è stata registrata sia la accelerazione verticale della piattaforma sia quella in uscita dal modello sviluppato. L'accelerazione della piattaforma è stata registrata tramite una piattaforma inerziale, posta in corrispondenza del centro di gravità del veicolo reale e solidale alla cabina di guida.

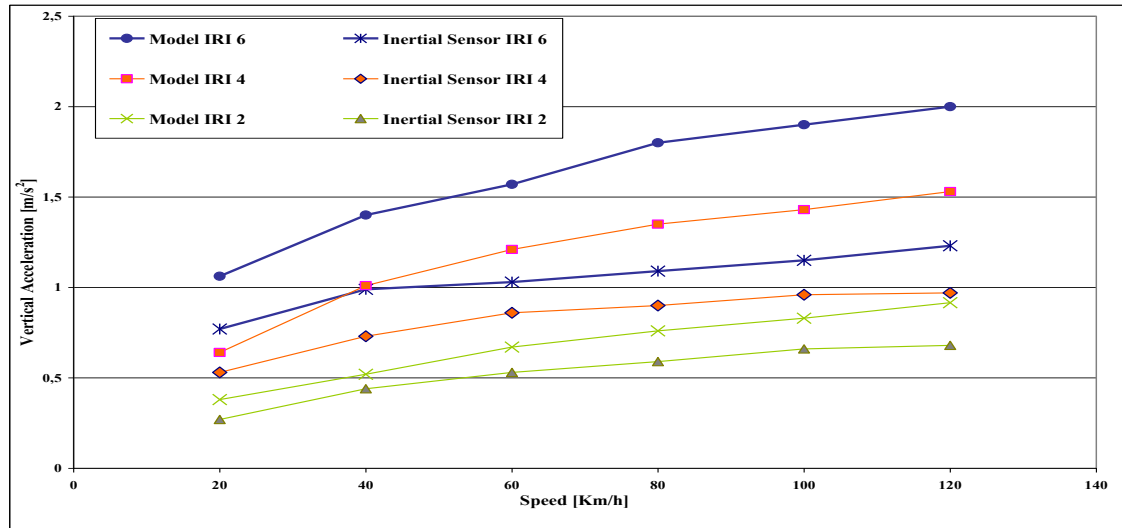


Fig. 5-10 : Confronto tra l'accelerazione verticale resa e da modello per diversi IRI.

In Figura 5-10, si può osservare il confronto, per diversi valori di velocità, tra lo scarto quadratico medio (RMS) dell'accelerazione verticale della piattaforma e quello dell'accelerazione verticale calcolata da modello.

Il confronto degli spettri delle accelerazioni per un IRI pari a 4 è visibile in Figura 5-11.

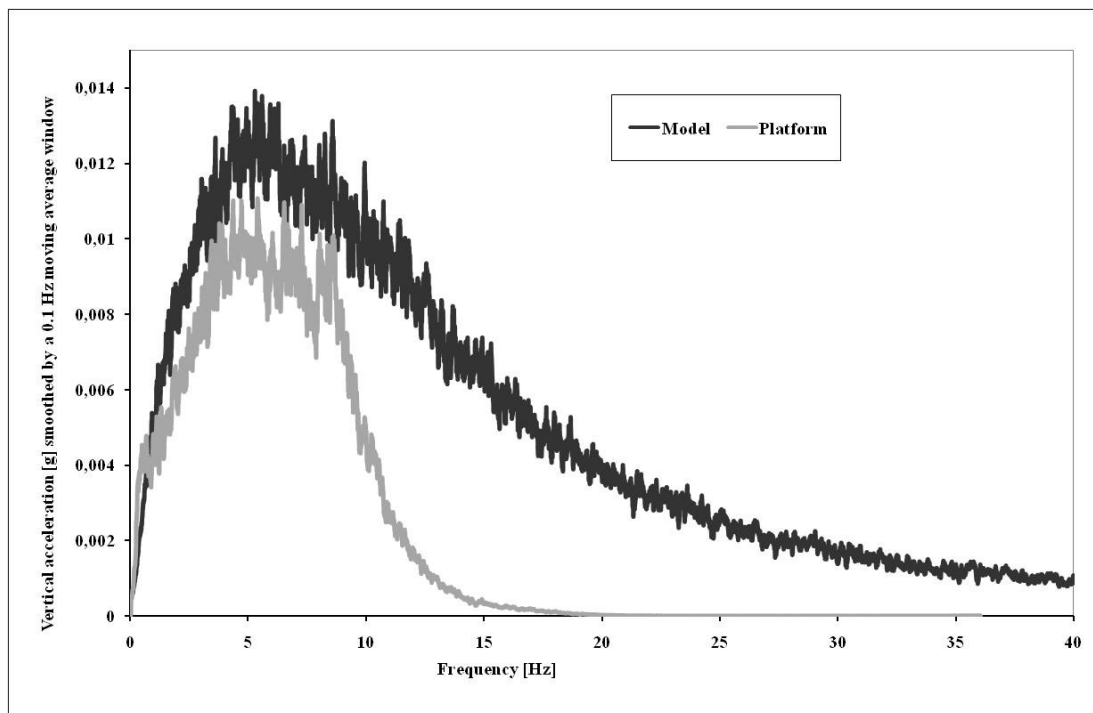


Fig. 5-11 : Confronto degli spettri delle accelerazioni per un IRI 4.

È possibile osservare che i due spettri sono molto simili in un intervallo compreso tra 0 -9 Hz e che lo spettro relativo alla piattaforma si porta a zero rapidamente. Nonostante

tali limiti, le sensazioni che il conducente percepisce non sono molto diverse da quelle reali e ciò perché la maggior parte delle accelerazioni percepite vengono fornite attraverso il sedile. Infatti, considerando le proprietà meccaniche di un sedile convenzionale e la massa di un soggetto, tutte le accelerazioni con una frequenza maggiore di 10 Hz hanno un basso impatto, ossia vengono smorzate.

In Figura 5-12, a supporto di quanto detto, si riportano i valori di trasmissibilità STH (Seat To Head), ottenuti da un modello sviluppato da Liang et Chiang (2008), per un sedile con schienale inclinato di 21° in funzione della frequenza delle vibrazioni verticali. I valori sono confrontati con dati reali e con un secondo modello sviluppato da Cho et Yoon (2001).

Tuttavia, va precisato che le vibrazioni vengono trasferite anche dal volante e dal pavimento della cabina (rispettivamente tramite le mani ed i piedi).

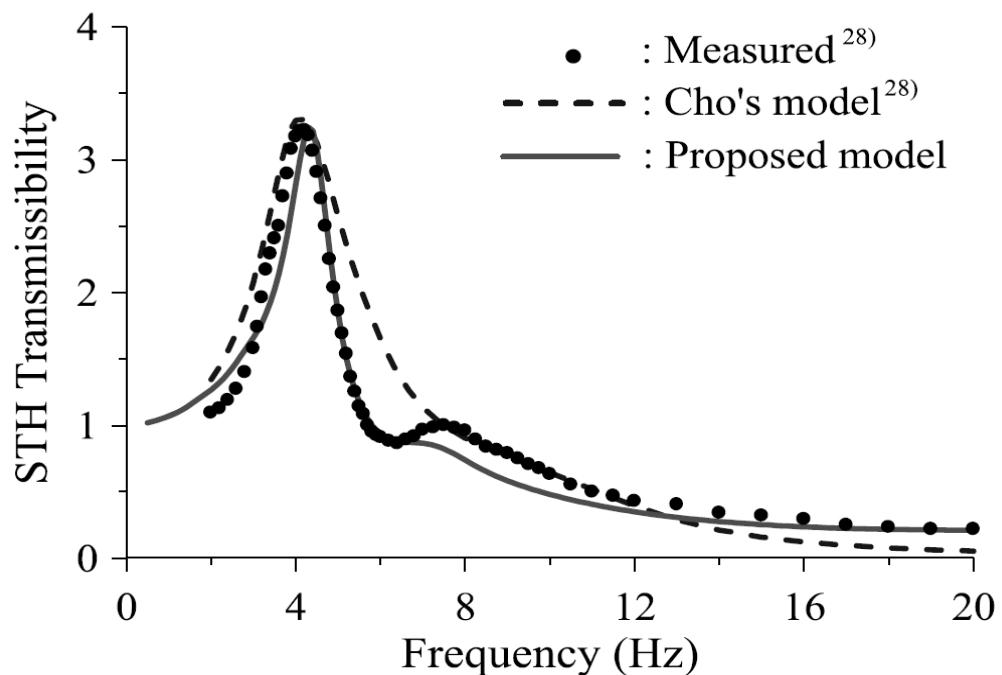


Figura 5-12 : Trasmissibilità STH per un sedile con schienale inclinato di 21° (Liang et Chiang, 2008)

5.8.2 Validazione qualitativa

Durante il 12th SCANer©II User Group Meeting, che si è tenuto a Napoli, è stato chiesto ai partecipanti di testare il nuovo sistema implementato al simulatore di guida VERA. È stato condotto sul sistema migliorato un test con sei esperti europei: AUDI

(Germania), CTAG (SPAGNA), TRL (Inghilterra), SINTEF (Norvegia), Renault e MPSA-Peugeot (Francia). I soggetti, tutti con diversi anni di esperienza nel campo della simulazione, lavorano in laboratori dotati di simulatori di guida dinamici ed hanno testato diversi sistemi di simulazione.

Il circuito test è costituito da una strada extraurbana a doppio senso, una corsia per senso di marcia, di tipo C1 e si estende per circa di 10 Km. Il tracciato è diviso in sezioni caratterizzati da irregolarità stradali corrispondenti a due diversi valori di IRI (1,5 e 6): le sezione ad IRI 1,5 da a 3 km sono separate da una ad IRI 6 di 300 metri. Ad irregolarità differenti corrispondono texture (immagini) riproducenti la pavimentazione stradale diverse. Tutti gli esperti testati hanno portato a termine la guida di test e nessuno di loro ha avuto alcun sintomo di malessere da simulatore.

A fine guida, ai soggetti è stato somministrato un questionario diviso in tre sezioni: la prima biografica (dati personali ed anagrafici, competenze lavorative, tipo di laboratorio/simulatore, etc.), una sul simulatore VERA in generale (giudizi sul sistema in generale e sui singoli sottosistemi: comandi in cabina, sistema di visualizzazione e sistema di moto; realismo scenario tridimensionale) e l'ultima sul sistema di comfort implementato (vedi Tab. 5-4). Nella seguente tabella sono riportati i risultati dell'ultima sezione del questionario.

Tab. 5-4 : Risultati del questionario sull'irregolarità.

Realism of irregularities	<i>Fair/Very good*</i>
Physical comfort of irregularities	<i>Very good*</i>
Improving of speed perception	<i>Yes**</i>
Driving with irregularities	<i>Quite easy***</i>
Realism of passing between different surface profiles	<i>Very good*</i>
Irregularities effects meet your expectation	<i>Sufficiently/Yes**</i>

*Very poor, weak, fair, very good, excellent.

**No, a little, sufficiently, yes.

***Very difficulties, with some difficulties, quite easy, very easy.

I risultati totali ottenuti mostrano che l'architettura sviluppata è in grado di riprodurre in cabina efficacemente le accelerazioni indotte da irregolarità stradali. Giudizi estremamente positivi, inoltre, sono stati, dati al realismo delle irregolarità riprodotte ed al comfort di guida derivante.

5.9 Sperimentazione

Scopo della sperimentazione è stato quello di valutare e confrontare gli effetti delle vibrazioni dovute a differenti profili stradali (IRI 2, IRI 4, IRI 6) sul comportamento di guida.

5.9.1 Soggetti

I soggetti sono stati selezionati tra gli studenti e lo staff dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Dieci soggetti (tre donne e sette uomini), tra i 24 e i 46 anni, hanno partecipato allo studio.

Tutti i partecipanti avevano un patente di guida valida da almeno cinque anni e hanno dichiarato di fare un uso giornaliero dell'auto. Quattro dei dieci partecipanti hanno avuto esperienza di guida fuori strada.

Prima di effettuare l'esperimento i soggetti hanno firmato un modulo di consenso informato e sono stati informati sugli scopi dell'esperimento.

5.9.2 Sessione di addestramento

Ogni partecipante ha effettuato una sessione di addestramento (da 8 a 10 minuti) prima del test. Lo scopo è quello di abituarsi all'ambiente di simulazione per ridurre stress ed altri effetti del simulatore durante il test vero e proprio, inoltre, durante tale sessione i soggetti verranno addestrati al controllo del veicolo simulato (volante, pedali e cambio). Tale test permette di escludere i partecipanti che soffrono di malessere da simulatore. L'addestramento è stato condotto nelle stesse condizioni della sperimentazione: presenza di copilota, tracciato simile a quello sperimentale. La guida d'addestramento è stata condotta senza attivare il modulo di confort, ossia nessuna vibrazione dovuta all'irregolarità stradale è stata resa.

5.9.3 Percorso e scenario

Ogni partecipante ha guidato lo stesso circuito stradale extraurbano. Il percorso è di circa 20 Km senza limiti di velocità imposti. L'intera strada è stata divisa in sezioni di uguale lunghezza; ad ogni sezione è stata assegnata in maniera random un differente profilo stradale corrispondente a:

1. IRI 0: superficie totalmente piatta (nessuna irregolarità)
2. IRI 2: pavimentazione stradale di nuova costruzione
3. IRI 4: pavimentazione usurata con imperfezioni superficiali
4. IRI 6: strada non pavimentata con frequenti depressioni

Per garantire un continuo controllo della velocità e del volante, sono state inserite curve con raggi variabili da 400 a 600 metri. Le curve successive sono state separate da rettilinei di 1200 metri. La strada presenta una corsia da 3,75 metri per ogni direzione con banchina da mezzo metro e nessun segnale stradale. Ad destra ed a sinistra della carreggiata stradale sono stati posizionati ad ogni 50 metri paletti di margine. L'ambiente virtuale circostante riproduce il layout di una strada extraurbana. Nessun veicolo è previsto durante la sperimentazione. I partecipanti sono stati istruiti per guidare il più naturalmente possibile e per considerare il veicolo guidato come fosse proprio. Nessun limite di velocità è stato indicato.

5.9.4 Primi risultati

Per valutare gli effetti delle vibrazioni dovute all'irregolarità stradali sul comportamento dei soggetti che guidano il simulatore, sono stati registrati i seguenti dati: posizione chilometrica del veicolo, velocità longitudinale, posizione dell'acceleratore e del freno. L'analisi dei dati si incentra sulla scelta della velocità, sul tempo di reazione e sulla decelerazione dovuti ai cambi di irregolarità.

Nessuno dei soggetti ha perso il controllo del veicolo durante il test.

5.9.4.1 Velocità

In Fig. 5-13 è possibile osservare il profilo tipico di velocità che delinea gli effetti dei diversi valori dell'irregolarità stradali. La velocità è più elevata nelle sezioni dove le irregolarità non vengono rese dalla piattaforma. I soggetti riducono bruscamente la propria velocità nelle sezioni con IRI 4 ed IRI 6. Il cambio di velocità non è significativo per valori di IRI più bassi. Una dipendenza tra i valori di IRI (in entrata ed in uscita) e la relativa scelta della velocità è evidente.

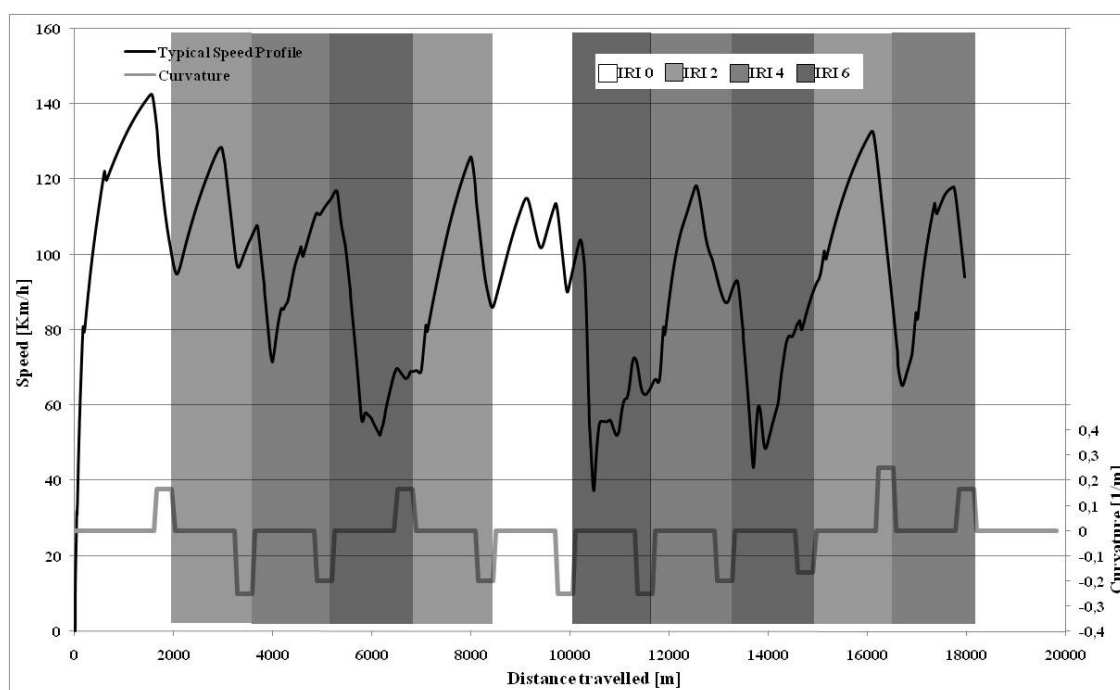


Fig. 5-13 : Profilo tipico di velocità.

Inoltre, la relazione tra irregolarità stradale e velocità è stata analizzata utilizzando l'Analisi di Varianza (ANOVA) per misure ripetute per livelli di IRI seguita da un test di sfericità (Mauchley) che ha dato risultati positivi.

L'ANOVA è ci da un'informazione sugli effetti di un particolare fattore (i livelli di IRI) su una particolare variabile (la velocità scelta). La tecnica isola la varianza sperimentale spiegata per i fattori ed assicura, con un certo livello di confidenza, che la variabile sia sensibile nei confronti del fattore. La sfericità è un assunto matematico sulla struttura della matrice di covarianza nell'ANOVA per misure ripetute: se la varianza della differenza delle osservazioni è simile o, più raramente, uguale; l'ipotesi di sfericità è verificata.

Il livello di significatività statistica scelto è di 0.05. I risultati ottenuti ($F=3.454E3$, $p<0.0001$) indicano un sicuro effetto dei livelli di IRI. Anche i test post hoc per confronti a coppie hanno evidenziato una differenza significativa delle velocità in funzione del livello di IRI.

In Fig. 5-13 viene riportata la relazione tra la velocità media adottata dai soggetti testati in rettilineo e il relativo valore di IRI. Questo diagramma conferma l'influenza della valore dell'irregolarità nella velocità scelta dal guidatore. La velocità si riduce leggermente spostandosi da IRI 0 ad IRI 2; variazioni significative (in media 25 Km/h) si verificano nel passaggio da IRI 0 ad IRI 4 e una elevata riduzione (in media 52 Km/h) sulla velocità si osserva per pavimentazioni con IRI 6.

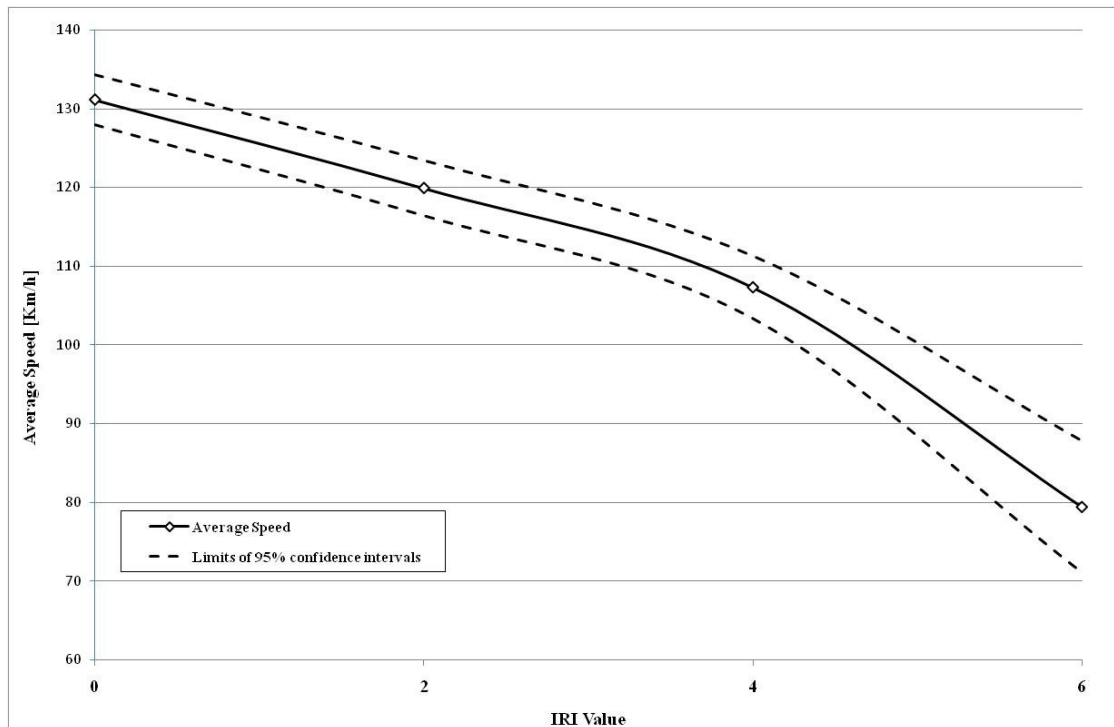


Fig. 5-13 : Correlazione tra velocità medi adottata e valori di IRI

5.9.4.2 Tempo di reazione e decelerazione

Il tempo di reazione (RT) considerato è il tempo tra l'inizio di un nuovo valore di IRI e il momento in cui il guidatore inizia a ridurre la velocità. Da IRI 0 A IRI 2, non ci sono reazioni. Da IRI 2 a IRI 4, il RT medio è di 1.1 sec con una decelerazione media di 3.2 m/s^2 . Da IRI 4 a IRI 6, il RT medio è simile al passaggio precedente con una decelerazione di 4.5 m/s^2 . Particolarmente interessante è il passaggio tra IRI 0 a IRI 6: il

RT medio e la decelerazione sono rispettivamente 0.9 sec e 5.4 m/s^2 .

5.10 Conclusioni

Nel presente capitolo è descritto un modulo sperimentale che consente l'implementazione delle vibrazioni dovute all'irregolarità distribuite nel simulatore dinamico di guida della società TEST Scarl. Il nucleo del modulo è costituito da un modello "Full Car" non lineare a sette gradi di libertà.

Dal confronto delle vibrazioni restituite dalla piattaforma e dei dati di input alla piattaforma, si è dimostrato che il sistema implementato è in grado di fornire vibrazioni uguali a quelle reali in un range di 0-9 Hz. Il risultato ottenuto può considerarsi accettabile dal punto di vista del realismo cinetico se si considera che i sedili dei veicoli smorza le frequenze superiori a 10 Hz.

Un gruppo di esperti ha testato il sistema ed ha espresso un'opinione positiva sia rispetto all'incremento della percezione della velocità sia in relazione al realismo dell'irregolarità.

Infine, il risultati della prima sperimentazione con pochi partecipanti mostrano una reale influenza del valore dell'irregolarità sul comportamento dei soggetti alla guida del simulatore, specialmente sulla scelta della velocità.

Ulteriori test dovranno essere condotti per confermare ed estendere i risultati ottenuti.

Una possibile evoluzione del sistema per future sperimentazione potrebbe consistere nel sincronizzare le vibrazioni sulla piattaforma con un sistema in grado di riprodurre le vibrazioni sul volante. Inoltre, si potrebbe integrare un nuovo modulo che tenga conto degli effetti dell'aerodinamica.

6 CONCLUSIONI

I simulatori di guida sono degli strumenti ormai diffusamente utilizzati dalle case automobilistiche e dai centri universitari, perché permettono di condurre i test in sicurezza, a costo relativamente basso e in condizioni controllate e ripetibili. Per questo motivo si rivelano particolarmente adatti anche per gli studi sulle condizioni psico-fisiche del conducente. Il livello di fedeltà nella ricostruzione della realtà raggiunto dai simulatori di guida ha consentito un loro impiego sempre maggiore sia nell'ambito della ricerca sia pura che applicata al campo produttivo fino a trasformarli in uno strumento fondamentale per la comprensione delle interazioni conducente-veicolo-strada. Il simulatore viene, infatti, preferito alle normali prove su strada perché presenta molti vantaggi tra cui: controllo dell'ambiente di prove e delle condizioni a contorno, efficienza, minor costo e maggiore facilità di gestione dei dati in opportuni database; in particolare il controllo degli esperimenti è sicuramente il maggiore dei vantaggi dei simulatori perché possono essere monitorate diverse variabili che non sarebbe facile controllare ed acquisire su strada. Un altro importante vantaggio dei simulatori è rappresentato dalla ripetitività degli esperimenti: la strada infatti viene riprodotta più o meno fedelmente, ma comunque è sempre la stessa per tutte le prove con i diversi tester; con una prova reale, su strada, una condizione di questo tipo non si potrebbe ottenere perché le caratteristiche della strada e le condizioni dell'ambiente in cui si svolgono le prove tendono a variare in modo casuale. Questa possibilità di riprodurre la stessa situazione un numero comunque elevato di volte, permette di valutare situazioni che nella realtà si verificano raramente consentendo quindi una consistente raccolta di dati altrimenti impossibile. Il simulatore consente, inoltre, per quanto precedentemente detto, di usare un minor numero di tester, con riduzione dei costi e dei tempi.

A conferma di quanto detto, in questo lavoro sono stati curati i diversi aspetti metodologici e applicativi della simulazione di guida. L'interesse è stato rivolto alla sicurezza stradale e, quindi, all'uso del simulatore di guida nello studio del comportamento di guida sia in situazioni ad alto rischio per il guidatore che nella fase di progettazione e/o di utilizzo di dispositivi rivolti a migliorare la sicurezza stradale.

Un primo problema affrontato riguarda la reazione dei guidatori a messaggi forniti tramite un pannello a messaggio variabile (PMV), in condizione di emergenza. La

sperimentazione è stata effettuata utilizzando tre diversi scenari in galleria: uno senza PMV, il secondo con PMV e l'ultimo con PMV più una frusta che indicava il rifugio d'emergenza. Tali scenari sono stati creati dal dottorando e la condizione di emergenza è rappresentata da un incendio in galleria. I risultati ottenuti hanno evidenziato un buon realismo della simulazione di guida, infatti nello scenario senza pannello si sono osservati comportamenti simili a quelli riscontrati nella realtà ed una maggiore compliance dei guidatori nei confronti dell'ultimo sistema di segnalazione simulato. E' palese che tale studio poteva essere effettuato esclusivamente in un ambiente di guida simulato, per ovvio motivi di sicurezza.

La seconda tematica, sempre in merito al comportamento dei guidatori, riguarda il comportamento degli utenti in presenza di sistemi di delimitazione delle curve e di sistemi luminosi sequenziali ("fruste luminose"). Anche in questo caso tutti i soggetti hanno affrontato una situazione sperimentale perfettamente identica (condizioni ambientali e stradali, traffico, caratteristiche meccaniche del veicolo, etc.) ciò è possibile solo utilizzando il simulatore di guida. Relativamente ai trattamenti studiati, si è osservato una maggiore efficacia del sistema combinato in termini di riduzione della velocità di inserimento in curva. Nessuno dei dispositivi, individualmente o in modalità combinata, sembra influenzare in maniera significativa la posizione laterale che i guidatori mantengono in curva.

Per quanto riguarda l'utilizzo del simulatore nella progettazione e/o l'utilizzo di dispositivi su strada è stato effettuato uno studio sul comportamento dei guidatori, in termini di velocità, nel passaggio dall'ambito extraurbano a quello urbano. In questa sede è stato possibile valutare dispositivi di moderazione del traffico combinati a porte d'accesso non ancora esistenti. E' quindi evidente che il simulatore può essere utilizzato non solo per effettuare una semplice scelta tra diverse alternative progettuali, ma direttamente nella fase di progettazione delle alternative stesse. I risultati, ottenuti dai confronti tra dati reali e simulati di velocità, indicano che il sistema di simulazione (VERA) è in grado di valutare gli effetti di sistemi infrastrutturali sul comportamento di guida dei guidatori ed è una alternativa valida, sicura ed economica agli studi su strada.

Infine, un ultimo studio, riguarda lo sviluppo di un modello per la restituzione delle vibrazioni dovute alle irregolarità distribuite della pavimentazione stradale. In tale fase è stato affrontato e risolto l'inconveniente presente nei simulatori di guida, dove le

vibrazioni non sono fornite, e si ha quindi la sensazione di guidare sulla “seta” con l’effetto non trascurabile sulle sensazioni percepite dal guidatore, rendendole talvolta poco realistiche. Dopo un’analisi esaustiva del problema è stato implementato un “Full Car model” non lineare a sette gradi di libertà. Il modello implementato è in grado di fornire al guidatore vibrazioni uguali a quelle reali in un range di 0-9 Hz (range di sensibilità dell’organismo umano), ed ha superato una prima verifica di tipo “sensazionale” con un panel di esperti europei in simulazione di guida. Inoltre, i risultati di una sperimentazione condotta su 10 soggetti con diversi valori di IRI ha evidenziato una reale influenza del valore dell’irregolarità sul comportamento dei soggetti alla guida del simulatore, specialmente sulla scelta della velocità. Il modello è, quindi, fondamentale per incrementare la percezione della velocità e quindi il realismo del comportamento di guida al simulatore.

BIBLIOGRAFIA

- Aarts, H., Dijksterhuis, A. *Habits as knowledge structures: Automaticity in goal-directed behavior*. Journal of Personality and Social Psychology, 78(1), 2000.
- Akamatsu, M., Daimon, T., Onuky, M. Simulating vehicle cabin floor vibration using AR Model. In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2002, Paris, France, 2002
- Allen, R.W., Rosenthal, T., Aponso, B., Harmsen, A., Markham, S. *Low cost PC-based techniques for simulation implementation*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 1999, Paris, France, 1999.
- Artz, B., Kao, B. G., Cathey, L., Blommer, M., and Greenberg, J. *VIRTTEX vehicle model for ride applications*. In Proceedings of the Driving Simulation Conference Europe, Paris, France, 2004.
- Aberg, L., Rimmö, P.-A. *Dimensions of aberrant driver behaviour*. Ergonomics, 41(1), 1998
- Bendat, J. S., Piersol, A. G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures* New York, J. Wiley & Sons, 1986.
- Bennett, C., Greenwood, I. *Modelling road user and environmental effects in HDM-4*. Volume 7, HDM-4, ISOHDM, Highway Development and Management , World Bank, 2001.
- Blaauw, G.J. *Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study*. Human Factors 24, 1982.
- Boyce, T. E., Geller, E. S. *An instrumented vehicle assessment of problem behaviour and driving style: Do younger males really take more risks?* Accident Analysis and Prevention, 34(1), 2002.

- Busi, R., Zavanella, L. *Tecniche per la sicurezza in ambito urbano*. Vol. III. Le normative europee per la moderazione del traffico, Egaf edizioni, 2003.
- Carbonell, E. J., Martín-del-Río, B. *Some insights on how to work with human error in traffic behaviour*. In R. Fuller & J. A. Santos (Eds.), *Human Factors for Highway Engineers*. Amsterdam: Pergamon, 2002
- Cebon, D. *Handbook of vehicle road interaction*. Swets & Zeitlinger Publishers, The Netherlands p., 1999.
- Chandra, S. *Effect of Road Roughness on Capacity of Two-Lane Roads*. In ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 130, N.3, May/June 2004.
- Cho, Y., Yoon, Y. S. *Biomechanical model of human on seat with backrest for evaluating ride quality*. Int J Ind Ergon 27, 2001.
- Colinot, J.P., , Belay, G. *A multifunctional sound generator for the PSA's Sherpa driving simulator*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 2000, Paris, France 2000.
- Cnossen, F., Meijmann, T., & Rothengatter, J. A. *Adaptive strategy changes as a function of task demands: a study of car drivers*. Ergonomics, 47(2), 2004.
- Cnossen, F., Rothengatter, T., Meijmann, T. *Strategic changes in task performance in simulated car driving as an adaptive response to task demands*. Transportation Research Part F, 3, 2000.
- CROW *Recommendations for traffic provisions in built-up areas*. The Netherlands, 1998.
- de Waard, D. *The Measurement of Drivers' Mental Workload*. The Netherlands: The Traffic Research Centre VSC, University of Groningen, 1996.
- D'Apuzzo, M., Nicolosi, V., Mattarocci, M. *Predicting Roughness Progression of*

Asphalt Pavements by Empirical-Mechanistic Model. In Proceedings of the II International SIIV Congress, SIIV 2004, Florence, Italy, 2004.

Deyo, R., Briggs, J., Doenges, P. *Getting graphics in gear : graphics and dynamics in driving simulation*. Computer Graphics, 22(4), 1988.

DETR (Department of the Environment) *Traffic Calming on Major Roads*. Transport and the Regions, UK, 2005.

DFT (Department for Transport). *Village Traffic Calming - Reducing Accidents*. Traffic Advisory Leaflet 11/00, UK, 2000.

DFT (Department for Transport) *Traffic Calming on Major Roads*, UK, 2005.

Diana, G., Cheli, F. *Dinamica e vibrazione dei sistemi meccanici*. 2° Volume, UTET Torino, 1997.

Donges, E. *A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic*. Vehicle System Dynamics, 32(2/3), 1999.

Dulisse, B. *Methodological Issues in Testing the Hypothesis of Risk*. 1997

Dutta, A., Carpenter, R.A., Noyce, D.A., Susan, S.A., Fisher, D.L. Drivers' Understanding of Overhead Freeway Exit Guide Signs: Evaluation of Alternatives with Advanced Fixed-base Driving Simulator. Transportation Research Record, n 1803, 02-2618, (2002)

Dutta, A., Fisher, D.L., Noyce, D.A. Use of a Driving Simulator to Evaluate and Optimize Factors Affecting Understandability of Variable Message Signs. Transportation Research Part F 7, (2004)

Elvik, R., & Vaa, T. *The handbook of road safety measures*. Amsterdam: Elsevier, 2004.

- Espié, S., Mohellebi, H., Kheddar, A. *Haptic feedback models for driving simulator-vibrating seat and haptic feedback steering wheel* IEEE, International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2001,
- ETSC (European Transport Safety Council). *Reducing Traffic Injuries Resulting from Excess and Inappropriate Speed*. Brussels, Belgium, 1995.
- Evans, L. *Risk homeostasis theory and traffic accident data*. Risk Analysis, 6(1), 1986.
- Evans, L. *Traffic safety*. Bloomfield Hills, Mich.: Science Serving Society, 2004.
- Fuller, R. *Towards a general theory of driver behaviour*. Accident Analysis and Prevention, 37(3), 2005
- Gibson, J. J. *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale (New Jersey): Lawrence Erlbaum, 1986
- Grayson, G. B., & Hakkert, A. S. *Accident Analysis and Conflict Behaviour*. In J. A. Rothengatter & R. A. Bruin (Eds.), Road Users and Traffic Safety. Assen/Maastricht: Van Gorcum, 1987
- Green, P. *How driving simulator data quality can be improved*. In Proceedings of Driving Simulation Conference North America, Orlando, Florida (2005)
- Haigney, D.E., Taylor, R.G., Westerman, S.J. *Concurrent Mobile (cellular) Phone Use and Driving Performance: Task Demand Characteristics and Compensatory Processes*. Transportation Research Part F 3, 2000.
- Hallmark, S.L., Peterson, E., Fitzsimmons ,E., Hawkins, N., Resler, J., Welch, T. *Evaluation of Gateway and Low-Cost Traffic-Calming Treatments for Major Routes in Small Rural Communities*. CTRE Project 06-185, IHRB Project TR-523. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, US, 2007.

Heino, A., van der Molen, H. H., & Wilde, G. J. S. *Differences in risk experience between sensation avoiders and sensation seekers*. *Personality and Individual Differences*, 20(1), 1996.

Highways Agency *Traffic Calming on Trunk Roads: a Practical Guide*. Design Manual of Roads and Bridges. Volume 6, Section 3, Part 5, TA 87/04, UK, 2004.

Hoedemaekera, M., Brookhuis, K.A. *Behavioural Adaptation to Driving with an Adaptive Cruise Control (ACC)*. Transportation Research Part F 1, 1998.

Hudson, J. A., & Fivush, R. K., Janet. *Scripts and episodes: The development of event memory*. *Applied Cognitive Psychology*, 6(6), 1992.

ISO 10075. *Ergonomic principles related to mental work-load - General terms and definitions*. Geneva: International Organization for Standardization, 1991.

ISO, Standard 8608, *Mechanical vibration – Road Surfaces Profiles – Reporting of measured data*, International Standard Organization, Geneva, 1995.

Jamson, A. H., Pyne, H. C., Carsten, O. M. J. *Evaluation of traffic calming measures using the Leeds Driving Simulator*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe, Paris, France, 1999.

Janssen, W., & Tenkink, E. *Risk homeostasis theory and its critics: time for an agreement*. *Ergonomics*, 31(4), 1988.

Kahneman, D. *Attention and effort*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1973.

Karan, M. A., Haas, R., Kher, R. *Effects of Pavement Roughness on Vehicle Speeds*. Transportation Research Record No. 602, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1978.

Kawamura, A., Maeda, C., Shirakawa, T., Ishida, T., Nakatsuji, T. and Himeno, K.

Applicability of a Driving Simulator as a New Tool for the Pavement Surface Evaluation. International SIIV Congress, SIIV 2004: New Technologies and Modeling Tools for Road applications to design and management. Florence, Italy, 2004.

Kawamura, A., Shirakawa, T., Ishida, T., Nakatsuji, T. and Tako, J. Using the KIT Driving Simulator to Evaluate Road Surface Roughness. In Proceedings of 86th Transportation Research Board Annual Meeting, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2007.

Kawamura, A., Ishida, T., Tomiyama, K. Quantitative Evaluation of Ride Comfort Using a Driving Simulator. In Proceedings of 87th Transportation Research Board Annual Meeting, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2008.

Kennedy, R.S. *Simulator sickness and other after effects implications for the design of driving simulator* In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 1997, Lyon, France, 1997.

Kruysse, H. W. *How slips result in traffic conflicts and accidents*. Applied Cognitive Psychology, 6(7), 1992.

Liang, C. C., Chiang, C. F. *Modeling of a seated human body exposed to vertical vibrations in various auto motive postures*. Industrial Health 46, 2008.

Leung, S., Starmer, G. *Gap Acceptance and Risk-Taking by Young and Mature Drivers, both Sober and Alcohol-Intoxicated, in a Simulated Driving Task*. Accident Analysis & Prevention 37, 2005.

Liu, Y.C. *Effects of Taiwan In-Vehicle Cellular Audio Phone System on Driving Performance*. Safety Science 41, 2003.

Liu, Y.C., Wen, M.H. Comparison of Head-up Display (HUD) vs. *Head-down Display*

(HDD): Driving Performance of Commercial Vehicle Operators in Taiwan. In J. Human-Computer Studies 61, (2004)

Lockwood, C.R. *Using the TRL driving simulator to evaluate traffic calming measures*. TRL Report 245, Crowtorne, UK, 1997.

Luck, S. J., & Vecera, S. P. Attention. In H. Pashler & S. Yantis (Eds.), *Stevens' Handbook of Experimental Psychology: Vol. 1. Sensation and Perception* (3 ed.). New York: Wiley, 2002.

Maycock, G. *Accident liability: the human perspective*. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic & Transport Psychology. Theory and Application*. Amsterdam: Pergamon, 1997

McKenna, F. P. *What role should the concept of risk play in theories of accident involvement?* Ergonomics, 31(4), 1988.

Michon, J. A. *A critical view of driver behavior models: What do we know, what should we do?*.L. Evans & R. C. Schwing (Eds), *Human behaviour and traffic safety*, New York - London: Plenum Press, 1985.

Ministero LL.PP., Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale *Indirizzi Generali e Linee Guida di Attuazione del Piano Nazionale della Sicurezza Stradale*, 2000.

Ministero LL.PP., Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale *Definizione dei Principali Temi di Ricerca per il Miglioramento della Sicurezza delle Infrastrutture nel Breve, Medio e Lungo Periodo. Scheda 2: Strategie per la Gestione della Velocità in Ambito Urbano*. 2000.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ispettorato Generale per la Circolazione e la Sicurezza Stradale *Norme Funzionali e Geometriche per la Costruzione delle Strade*. D.M. 5 novembre 2001, n.6792, 2001.

Mudd, S. *Assessment of the fidelity of dynamic driving simulator* Human Factors 10,

(1968)

Näätänen, R., & Summala, H. (1976). *Road-user behavior and traffic accidents*. Amsterdam, Oxford: North-Holland Publishing Company.

Neuschatz, J. S., Lampinen, J., & Preston, E. L. *The effect of memory schemata on memory and the phenomenological experience of naturalistic situations*. *Applied Cognitive Psychology*, 16(6), 2002.

Noland, R. B. *Traffic fatalities and injuries: the effect of changes in infrastructure and other trends*. *Accident Analysis and Prevention*, 35(4), 2003.

NRA (National Roads Authority) *Guidelines on Traffic Calming for Towns and Villages on National Routes*, Dublin, Ireland. 2005.

OECD. *Behavioural adaptations to changes in the road transport system*. Paris: OECD expert group, 1990

Parker, D., Reason, J. T., Manstead, A. S. R., & Stradling, S. *Driving errors, driving violations and accident involvement*. *Ergonomics*, 38(5), 1995.

Paterson, W.D.O., Watanatada, T. *Relationships Between Vehicle Speed, Ride Quality, and Road Roughness*. In *Measuring Road Roughness and its Effects on User Cost and Comfort*. ASTM STP 884. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985.

Ranney, T. A. *Models of driving behavior: a review of their evolution*. *Accident Analysis & Prevention*, 26(6), 1994.

Rasmussen, J. *Information processing and human-machine interaction. An approach to cognitive engineering*. New York: North-Holland, 1986.

Reason, J. T. *Human Error*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

- Reymond, G., Kemeny, A. *Motion cueing in the Renault driving simulator*. Vehicle System Dynamic 34, 2000.
- Riemersma, J. B. J., van der Horst, A. R. A., Hoekstra, W., Alink, G. M. M., Otten, N. *The validity of driving simulator in evaluating speed-reduction measures*. Traffic Engineering + Control, Printerhall Ltd, London, 1990.
- Road Directorate *Speed Management in Urban Area*. Road Directorate, Ministry of Transport, Report n.168, Copenhagen, Denmark, 1999.
- Rolfe, J.M., Hammertone-Frase, A.M., Poulter, R.F., Smith, E.M.B. *Pilot response in flight and simulated flight*. Ergonomics 13, 1970.
- Rothengatter, T. *Drivers' illusions--no more risk*. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 5(4), 2002.
- Rumar, K. The role of perceptual and cognitive filters in observed behaviour. In L. Evans & R. C. Sching (Eds.), *Human Behaviour and Traffic Safety*, New York: Plenum Press, 1985.
- Salvucci, D.D., Liu, A. *The Time Course of a Lane Change: Driver Control and Eye-Movement Behavior*. Transportation Research Part F 5, 2002.
- Sanders, A. F. *Some aspects of the selective process in the functional visual field*. Ergonomics, 13(1), 1970.
- Sanders, A. F. *Towards a model of stress and human performance*. Acta Psychologica, 53(1), 1983.
- Sanders, A. F. *A summary of resource theories from a behavioral perspective*. 1997.
- Sayers, M. *On the calculation of the International Roughness Index*. Transportation

Research Record no. 1501, Transportation Research Board, Washington D.C., U.S.A, 1961

Schank, R. C., & Abelson, R. *Scripts, plans, goals and understanding*. Hillsdale: Erlbaum, 1977.

Suda, Y., Shladover, S.E., Takahashi, Y., Onuki, M., Matsushita, K., Kanoh, M., Honda, K., Shiraishi, T. *Validation of the Universal Driving Simulator with Interactive Traffic Simulation*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Asia/Pacific 2006, Tsukuba, Japan (2006)

Summala, H. (). *Hierarchical model of behavioural adaptation and traffic accidents*. In T. Rothengatter & E. C. Vaya (Eds.), *Traffic & Transport Psychology. Theory and Application*. Amsterdam: Pergamon, 1997.

Sung, E.J., Min, B.C., Kim, S.C., Kim, C.J. *Effects of Oxygen Concentrations on Driver Fatigue during Simulated Driving*. *Applied Ergonomics* 36, 2005.

Taylor, M., Wheeler, A.. *Traffic Calming in Villages on Major Roads*. In Proceedings of Seminar Traffic Management and Road Safety, Loughborough, UK, 1998.

Taylor, M., Wheeler, A. 2000. *Accidents Reductions Resulting from Village Traffic Calming*. In Proceedings of Seminar Demand Management and Safety Systems, Cambridge, UK, 2000.

Technical Specifications for the Simulator from the Driver Simulator Laboratory Center for Intelligent Systems Research, (2006)
http://www.cisr.gwu.edu/lab_simulator.html

Törnros, J., Harmas, L., Alm, H. *The VTI driving simulator – validation studies*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Europe 1997, Lyon, France 1997.

Treat, J. R., Tumbas, N. S., McDonald, S. T., Shinar, D., Hume, R. D., Mayer, R. E., et

- al. *Tri-level study of the causes of traffic accidents. Volume I: Casual factor tabulations and assessment*. Final report (No. DOT-HS-034-3-534), Washington: National Highway Traffic Safety Administration, 1977.
- Upchurch, J., Fisher, D.L., Carpenter R.A., Dutta, A. *Freeway Guide Sign Design with Driving Simulator for Central Artery-Tunnel: Boston Massachusetts*. Transportation Research Record, n 1801, 02-2981, 2002.
- Uzzell, D., Muckle, R.: *Simulating Traffic Engineering Solutions to Predict Changes in Driving Behaviour*. Transportation Research Part F 8, 2005.
- VISP (Village Speed Control Working Group) *VISP - A Summary*. Traffic Advisory Leaflet 1/94, UK, 1994.
- Wang, Y., Zhang W., Zhang, E.D., Zeng, H., Leu, M.C. *Development of A Low-cost Driving Simulation System for Safety Study and Training*. In Proceedings of Driving Simulation Conference Asia/Pacific 2006, Tsukuba, Japan (2006)
- Watanatada, T., Dhareshwar, A., Rezende-Lima, P.R.S. *The Highway Design and Maintenance Standards Model - Volume 1: Description of the HDM-III Model*. World Bank Report, Johns Hopkins Press, Baltimore 1987.
- Wilde, G. J. S. *Target risk*. Toronto: PDE, 1994.
- Wittmanna, M., Kiss, M., Gugg, P., Steffen, A., Fink, M., Pöppel, E., Kamiya, H. *Effects of Display Position of a Visual In-Vehicle Task on Simulated Driving*. Applied Ergonomics 37, 2006.
- Young, M. S., & Stanton, N. A. *Malleable Attentional Resources Theory: A New Explanation for the Effects of Mental Underload on Performance*. Human Factors, 44(3), 2002.
- Zuckerman, M. *Behavioral expressions and biosocial bases of sensation seeking*. New York: Cambridge University Press, 1994.