



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Estratto da Tesi di Laurea Magistrale

Indagine sperimentale al simulatore di guida riguardante l'influenza della distanza di visuale libera sulla velocità operativa

Relatori

prof. Marco Bassani
ing. Lorenzo Catani

Candidato
Andrea Salussolia

Marzo 2017

Indice

Abstract	1
1. Introduzione	1
1.1 Motivazioni	2
1.2 Metodologia.....	2
2. Stato dell'arte.....	3
2.1 Percezione, comportamento del guidatore e compensazione del rischio	3
2.2 La velocità come parametro di studio del comportamento del guidatore	4
2.3 Utilizzo dei simulatori per l'analisi del comportamento di guida.....	5
3. Attività sperimentale	6
3.1 Scelte progettuali	6
3.3 Definizione dei tracciati stradali	7
3.4 Caratteristiche dello scenario.....	9
3.5 Esperimento	9
3.5.1 Guidatori	9
3.5.2 Procedura di guida al simulatore	10
4. Analisi dati.....	11
4.1 Analisi descrittiva	11
4.1.1 Velocità in funzione della distanza tra centro della corsia ed ostruzione visiva nel margine, fissati angolo di deviazione, raggio e verso di percorrenza della curva	12
4.1.2 Velocità in funzione del raggio fissati angolo di deviazione e distanza tra centro della corsia ed ostruzione visiva a lato della banchina.....	14
4.1.3 Valutazione dell'influenza dell'angolo di deviazione sul comportamento di guida.....	14
4.1.4 Velocità riscontrata in funzione di DVL per diverse combinazioni di raggio e distanza tra centro corsia ed ostacolo alla visibilità.....	15
4.1.5 Velocità in funzione della distanza di visibilità disponibile	16
4.2 Analisi statistica	17
4.2.1 Metodo.....	17
4.2.2 Analisi della varianza a quattro vie	17
4.2.3 Analisi della varianza a tre vie.....	18
5. Conclusioni	19
6. Bibliografia completa	21

Abstract

I dati di incidentalità disponibili mostrano che i comportamenti errati più frequentemente segnalati sulle infrastrutture stradali sono la guida distratta, il mancato rispetto della distanza di sicurezza e la velocità troppo elevata. La velocità è sicuramente un fattore centrale nella formazione dell'incidente e nella determinazione del corrispondente livello di severità per le persone coinvolte, pertanto agire su di essa sarebbe strategico per l'attuazione di politiche di contenimento della mortalità su strada. La comprensione dei fenomeni associati alla scelta di natura comportamentale sulla velocità di guida assume la medesima importanza.

È riconosciuto che la distanza di visuale libera abbia influenza sul comportamento longitudinale del guidatore espresso in termini di velocità. Tuttavia finora nessuno studio di ricerca è stato studiato opportunamente al fine di quantificare la relazione tra queste due grandezze. Questa tesi ha lo scopo di colmare questo vuoto di conoscenza. Ciò è stato possibile attraverso la progettazione e la realizzazione di una serie di esperimenti al simulatore di guida del Politecnico di Torino. Per raggiungere lo scopo, sono stati coinvolti quarantuno guidatori e ciascuno ha guidato due dei sei scenari complessivi creati per studiare diverse condizioni di visibilità lungo tratti di curva circolare, così da ricavare dati di velocità utili ai fini dell'analisi. Altri dati (biometrici, cognitivi e informazioni da questionari) hanno completato l'esperimento e sono stati utili per valutare la bontà dei dati raccolti ed avere informazioni riguardanti il comportamento del guidatore adottato nel corso delle prove.

I risultati confermano l'esistenza di un legame tra velocità e distanza di visuale libera, quantificando dunque una relazione utile a definire modelli previsionali di grande interesse per la progettazione geometrica avanzata delle infrastrutture stradali.

1. Introduzione

Le infrastrutture stradali rivestono oggi un ruolo fondamentale per la mobilità di persone e merci, e contribuiscono allo sviluppo delle società sebbene il loro uso determini impatti elevati in termini ambientali e di sicurezza dell'utenza. Pertanto, è evidente che sia necessario e doveroso progettarle al meglio, mitigando il più possibile gli impatti sull'ambiente e sugli utilizzatori. Ciò vale tanto per le opere di nuovo impianto, quanto per quelle già realizzate e che necessitano di interventi di manutenzione e/o adeguamento.

Il presente lavoro di tesi si colloca in questo ambito, e più precisamente tocca questioni riguardanti la progettazione geometrica delle infrastrutture e la sicurezza stradale.

Nello specifico, la tesi tratta degli effetti della distanza di visuale libera (DVL) sul comportamento longitudinale del guidatore. La DVL è una grandezza ben nota ai progettisti di infrastrutture stradali perché la considerano nella verifica della stessa progettazione. La DVL è la misura dello spazio lungo la potenziale traiettoria di marcia che il guidatore è in grado di vedere di fronte a sé, e che egli sfrutta per eseguire in sicurezza le manovre fondamentali quali l'arresto, il sorpasso o il cambio di corsia. La DVL è determinata per via geometrica sul modello di progetto collegando idealmente la testa del guidatore, posta convenzionalmente a 1,1 m sul piano stradale nel mezzo della corsia, con un potenziale ostacolo di altezza di 10 cm per il tramite di una linea di visuale. Fissata la posizione del guidatore e allontanando progressivamente l'ostacolo lungo la stessa traiettoria, la massima distanza di visibilità del guidatore corrisponde alla condizione in cui la linea di visuale è al più tangente ad una qualunque ostruzione ottica lungo la strada o nel suo intorno. In queste specifiche condizioni, il guidatore è in grado di vedere il potenziale ostacolo fisso, ad esempio un oggetto lungo la corsia rispetto al quale il guidatore dovrà arrestare il proprio veicolo per evitare la collisione, o mobile, quale può essere un veicolo precedente nella corsia opposta che il guidatore deve evitare nel mentre è impegnato nel sorpasso di un altro veicolo precedente lungo la sua corsia. In quest'ultimo caso l'ostacolo mobile è posto ad un'altezza 1,1 m ma nella corsia opposta.

Le norme tecniche, che contengono precise prescrizioni circa gli scenari su indicati e che il progettista valuta nella definizione delle caratteristiche geometriche del tracciato, non considerano il fatto che la DVL possa influenzare il comportamento del guidatore, misurabile attraverso la velocità (V) prescelta per la marcia. Non solo nelle norme, ma anche nell'ambito della letteratura scientifica di settore, al momento non sono disponibili strumenti per il progettista che possano portare alla stima degli effetti della DVL sulla V , la qual cosa sarebbe di fondamentale importanza per la valutazione degli effetti operativi prodotti dalle scelte progettuali di tipo geometrico, che il progettista esegue nel rispetto delle norme tecniche vigenti.

1.1 Motivazioni

Lo scopo della ricerca è dunque di capire se e come la distanza di visuale libera possa essere una misura da utilizzare come strumento di riduzione della velocità, studiando il legame intercorrente tra queste due grandezze.

Dato che la velocità elevata è una delle principali cause che portano ad un incremento dell'incidentalità, anche se quest'ultima non viene considerata direttamente nelle analisi, dall'indagine degli effetti comportamentali della visibilità disponibile deriverebbero conoscenze utili all'assunzione di scelte progettuali consapevoli e finalizzate alla riduzione dell'incidentalità.

Proprio in questa direzione è necessario guardare con occhio attento ai dati statistici disponibili di incidentalità a livello europeo e nazionale al fine di mettere a punto misure atte a ridurre il numero di incidenti stradali e, conseguentemente, di vittime e feriti ricordandosi che tra le cause principali di incidenti mortali vi sono l'eccesso di velocità (o l'adozione di velocità non commisurate alle reali condizioni di visibilità disponibili su strada), la distrazione, il mancato utilizzo delle cinture di sicurezza e l'alcool.

La velocità è sicuramente un fattore centrale nella formazione dell'incidente e nella determinazione del corrispondente livello di severità per le persone coinvolte, pertanto agire su di essa sarebbe strategico per l'attuazione di politiche di gestione delle velocità operative. La comprensione dei fenomeni associati alla scelta di natura comportamentale sulla velocità di guida assume la medesima importanza.

Queste premesse costituiscono di fatto le motivazioni di questo studio. Il legame funzionale tra velocità e visibilità disponibile sta alla base dei fenomeni rispetto ai quali è necessario avere una stima non solo qualitativa, ma anche quantitativa per poter giungere a definire anche dei modelli previsionali, molto utili per la definizione di regole di progettazione che siano basate su solidi principi di sicurezza.

1.2 Metodologia

In questa tesi la relazione tra distanza di visibilità disponibile e velocità operativa è stata indagata per mezzo della simulazione di guida. Allo scopo si è fatto ricorso al simulatore disponibile presso il Laboratorio di Sicurezza Stradale e Simulazione di Guida del DIATI.

Si tratta di un simulatore a base fissa che sebbene non consenta la percezione delle accelerazioni che si avrebbero nella guida reale, può simulare la guida per gli effetti di tipo visivo che già nella guida reale contribuiscono a condizionare per almeno il 90% il comportamento il guidatore.

Oggi si ricorre sempre più alla simulazione di guida poiché presenta una serie di vantaggi operativi e, ovviamente, anche alcuni svantaggi. Tra i vantaggi vi è il fatto di poter replicare esperienze di guida in condizioni controllate. Ciò consente di presentare a tutti i guidatori coinvolti negli esperimenti le medesime condizioni geometriche, ambientali e operative, in una situazione di sicurezza assoluta senza correre rischi di alcun genere. Quest'ultimo aspetto può però portare il guidatore ad assumere atteggiamenti diversi da quelli osservabili sulla strada, sia per la diversità delle condizioni, sia per la mancanza di un rischio reale percepito.

In questo studio sono stati ricreati in ambiente virtuale alcuni scenari che consentissero di studiare il comportamento di guida in funzione di fissate condizioni di visibilità. Questo è stato fatto manipolando alcune variabili geometriche per ottenere un campo di variazione della distanza di visuale libera. Una volta realizzato lo scenario di guida, alcuni guidatori hanno guidato in questi scenari, e da queste esperienze di guida sono stati raccolti dei dati di velocità.

Il trattamento dei dati è avvenuto attraverso un'analisi descrittiva con l'ausilio di grafici, ed un'analisi statistica mediante l'analisi della varianza (ANOVA). Entrambe le analisi hanno consentito di evidenziare risultati interessanti riguardanti la relazione tra velocità e distanza di visuale libera.

2. Stato dell'arte

2.1 Percezione, comportamento del guidatore e compensazione del rischio

La guida di un veicolo implica complessi fenomeni di interazione in cui il guidatore, il veicolo, la strada e l'ambiente interagiscono in modo dinamico. Il comportamento di un guidatore è influenzato da una serie di elementi come le sue personalità, esperienza ed attitudine (Shinar, 2007; Rudin-Brown et al., 2009) ma anche dalle prestazioni del veicolo, dalla presenza di altri veicoli sulla strada e dalle caratteristiche geometriche della strada stessa. L'interazione di tali fattori rende la guida un compito dinamico di controllo in cui i guidatori selezionano le informazioni pertinenti fornite dall'ambiente stradale, prendono decisioni ed eseguono controlli appropriati al fine di condurre il mezzo a destinazione (Bella, 2013).

Proprio a questo proposito è importante la corretta percezione delle curve stradali, punto critico della sicurezza delle strade extraurbane e della progettazione stradale (Zakowska, 2010). Alcuni studi (Brenac, 1996; NHTSA, 2008; Safetynet, 2009) hanno indicato che è più probabile che gli incidenti si verifichino lungo le curve orizzontali rispetto ai rettifili per la possibilità che su queste si possano violare i limiti di equilibrio conseguenti ad una errata scelta di velocità e traiettoria (Charlton, 2007; Hummer et al., 2010). In uno studio a simulatore di guida, Comte e Jamson (2000) hanno dimostrato che un'alta percentuale di incidenti in curva sono causati dall'eccesso di velocità del guidatore, che sfocia nella perdita di controllo del veicolo o nella forzatura allo sbandamento.

Secondo Charlton (2007) gli errori dei guidatori relativi alle curve orizzontali potrebbero essere causati dall'interazione di tre principali problemi del comportamento del guidatore: l'incapacità di conoscere le crescenti richieste di attenzione, la non percezione di velocità e curvatura, e l'incapacità di mantenere un corretto posizionamento in corsia. Sarebbe dunque importante che la strada inneschi le giuste aspettative nei riguardi di un comportamento di guida appropriato, e inoltre permetta ai guidatori di eseguire quel comportamento di guida più o meno automaticamente (Martens et al., 1997).

La percezione delle curve stradali è legata prima di tutto alla progettazione degli elementi geometrici. Nella progettazione sono scelte alcune caratteristiche quali la larghezza di corsie, banchina e spartitraffico, profilo planimetrico ed altimetrico e caratteristiche dell'ambiente circostante. Tutti questi fattori possono influenzare la percezione del guidatore e di conseguenza il suo comportamento di guida (Martens et al., 1997; Janssen et al., 2006). È stato dimostrato che la sezione trasversale, il raggio di curvatura, la condizione di visibilità, e la presenza della curva di transizione influenzano significativamente le velocità di guida e il modo in cui il guidatore affronta una curva in termini di traiettoria ed accelerazione trasversale (Calvi, 2015a).

Una strada sicura e ben progettata dovrebbe essere pensata per l'utenza, minimizzando le possibilità di errore, riducendo al minimo i conflitti tra i diversi utenti (automobilisti, motociclisti, ciclisti e pedoni). Questo può però anche involontariamente creare una situazione in cui i conducenti si sentono troppo sicuri e quindi portati ad aumentare la velocità, e/o a ridurre l'attenzione. Ciò può essere evitato con la progettazione, adeguando le geometrie in un modo da trasmettere ancora sempre il rischio di comportamenti pericolosi (Shinar, 2007).

La capacità della strada di comunicare un'informazione adeguata al guidatore costituisce il fulcro della più avanzate filosofie di progettazione. Questo approccio si basa sul fatto che gli elementi geometrici di una strada incoraggiano i guidatori ad adottare il miglior comportamento possibile con il minimo bisogno di segnaletica. In conformità con il concetto di "*self-explaining road*", la conoscenza di come il comportamento del guidatore sia influenzato dagli elementi progettuali (rettifili, curve e loro successione lungo il tracciato così come dalle caratteristiche della sezione trasversale) è cruciale. L'andamento plano-altimetrico nello spazio dovrebbe dare una chiara guida visiva e le giuste informazioni circa la più appropriata velocità da

adottare (Vägverket, 2004). Assume quindi notevole rilevanza la valutazione soggettiva del guidatore della strada (Nunes & Recarte, 2005; De Waard et al., 1995).

La strada appare ai guidatori in movimento. La visione in movimento è la più importante fonte di informazione che influenza la percezione del guidatore ed il suo comportamento (Fuller & Santos, 2002; Summala, 2005). Nel loro studio, Zhao et al. (2013) hanno investigato quanto le informazioni di una curva possano influenzare la prestazione del guidatore, che potrebbe essere spiegato anche per il tramite della teoria cognitiva (Anderson et al., 1997), secondo la quale la guida consta di tre fasi: la percezione dell'informazione, la decisione, e l'esecuzione dell'azione sui comandi. Quanto più esatta è l'informazione elaborata, tanto più facile sarà per il guidatore compiere decisioni appropriate ed eseguire operazioni corrette.

La corretta percezione della strada dipende dalla distanza di visibilità disponibile al guidatore per ricevere l'informazione visiva. Per tale ragione le norme tecniche prescrivono una distanza di visibilità adeguata in modo da compiere le manovre in sicurezza. Si può concludere che la distanza di visibilità disponibile svolge un ruolo fondamentale nella percezione della curvatura orizzontale anche se tutte le curve presentano uguale curvatura orizzontale (Moreno et al., 2013). Al crescere della distanza di visibilità i guidatori hanno più tempo per pianificare le manovre, con la conseguenza che il guidatore non sia costretto a ricorrere ad una consistente variazione laterale della posizione per poter disporre di maggiore visibilità (Green et al., 1994). Zakowska (2010) osservò che una ridotta visibilità del margine interno delle curve costringe l'utente ad un atteggiamento più prudente perché costretta a velocità inferiori.

La teoria di Compensazione del Rischio (Summala, 1996; Fuller and Santos, 2002) è considerata la struttura concettuale consolidata ed appropriata per l'analisi del comportamento di guida. In accordo con essa, il guidatore è incline a reagire ai cambiamenti nell'ambiente stradale in accordo con le sue motivazioni: il guidatore controlla costantemente e istantaneamente il margine di sicurezza, e solo quando la soglia soggettiva del rischio percepito è superata, egli muta il suo comportamento. Il modello considera un "rischio soggettivo" che allarma e influenza le decisioni del guidatore quando la soglia del margine di sicurezza è sorpassata (Summala, 1996). Al superamento di tale soglia, il guidatore agisce sui parametri di controllo della guida, riduce la sua velocità e/o modifica la posizione laterale del veicolo sulla strada, così da portare il margine di sicurezza all'interno del limite accettato.

La compensazione del rischio è definita come un adattamento comportamentale ad una situazione di rischio percepito. Questo tipo di adattamento è discusso nella letteratura da un lungo periodo di tempo (OECD, 1990), il che ha portato allo sviluppo di alcune nuove teorie di adattamento comportamentale (Wilde, 1998).

In teoria non vi è una relazione diretta tra attitudini ed incidenti stradali ma almeno un legame. La relazione tra abitudini e rischio di incidente non è comunque molto evidente, ma sembra essere parte di un complesso di relazioni tra variabili demografiche (età e genere), comportamentali ed altre ancora (Assum, 1997). Ad esempio, guidatori tesi ed irritati hanno un più alto rischio di incidentalità rispetto ad altri guidatori più sereni e rilassati (Assum, 1997). Secondo Shinar (2007) le soluzioni ingegneristiche per incrementare la sicurezza rimarranno relativamente inefficaci a meno che esse non prendano in considerazione tutti i potenziali effetti sul comportamento oltre che essere "centrate sull'utente".

2.2 La velocità come parametro di studio del comportamento del guidatore

Per i progettisti di strade, la velocità dei veicoli è la grandezza maggiormente considerata ai fini della definizione del comportamento del guidatore. Essa riflette la percezione di sicurezza del guidatore, cosa che può indurlo a superare anche di molto la velocità di progetto (Misaghi & Hassan, 2005). Il controllo della velocità è considerato un modo efficace per migliorare la guida in sicurezza, infatti la velocità svolge un ruolo importante nell'eventualità di un incidente, poiché velocità più elevate portano ad un aumento della probabilità e della gravità dell'incidente medesimo (Martens et al., 1997).

La porzione di strada su cui il conducente ha visuale libera è importante nella valutazione soggettiva della velocità. Secondo Von Mömer (1984), la riduzione della velocità può avvenire attraverso la diminuzione della distanza di visibilità disponibile.

Questa diminuzione della distanza di visibilità può essere ottenuta aumentando la curvatura, o disponendo in modo adeguato la vegetazione lungo il margine.

In buone condizioni di visibilità, il comportamento atteso è una velocità maggiore di quella osservata nella medesima curva ma con restrizioni alla visibilità. Questa tendenza è tanto più forte al crescere del raggio, e può essere spiegata considerando che il comportamento del guidatore cambia quando si percepiscono situazioni pericolose. In tali casi i guidatori adottano probabilmente un comportamento più sicuro, prestando più attenzione alla guida (Zakowska, 2010).

La visibilità ridotta lungo il tracciato comporta una riduzione della velocità di marcia (Marconi, 1977; Brenac, 1989) ma tale effetto si osserva solo per distanze di visibilità inferiori a 500 m (Yagar & Van Aerde, 1983).

Secondo Coutton-Jean et al. (2009), la velocità lungo ogni curva è innanzitutto influenzata dal raggio di curvatura ma varia anche in una certa misura durante la curva, decrescendo inizialmente e successivamente aumentando per raggi di curvatura più piccoli, e aumentando progressivamente per raggi di curvatura più elevati. Ciò è il risultato di un adattamento della velocità di guida ai vincoli dati dalla curvatura della strada e convalida quindi, almeno qualitativamente, il comportamento di guida in riferimento a quanto avviene in una situazione reale (Herrin & Neuhardt, 1974; Ritchie et al., 1968).

Dall'analisi della letteratura tecnica se ne deriva che nella valutazione del legame tra comportamento del guidatore e distanza di visuale libera, occorre da un lato considerare i fattori che influenzano la visibilità e, dall'altro, analizzare il comportamento del guidatore e come questo sia influenzato da diverse condizioni (di visibilità). Queste dipendono dalla geometria della sezione trasversale (larghezza corsie, larghezza banchina, numero di corsie, pendenza trasversale), dalla geometria del tracciato d'asse, dalle condizioni di illuminamento (giorno, notte) e da quelle atmosferiche (sole, nebbia, pioggia intensa), dalla presenza di ostacoli a lato della banchina (barriere di sicurezza di diverso tipo, pali di illuminazione notturna, alberi, muri, siepi, vegetazione in generale).

2.3 Utilizzo dei simulatori per l'analisi del comportamento di guida

La guida ha impatti e conseguenze misurabili, pertanto è necessario stabilire dei metodi al fine di quantificare in sicurezza tale esperienza. A tal fine, possono essere condotti studi sperimentali "sulla strada" ma l'utilizzo di un simulatore di guida è più sicuro ed economico, fornisce misure oggettive e ripetibili della prestazione, permette il completo controllo dell'ambiente di guida (traffico, condizioni atmosferiche, ecc.), ed un esperimento di questo tipo può essere facilmente configurato in laboratorio (Fisher et al., 2011).

La simulazione di guida attualmente è quindi un elemento chiave al fine di sondare aspetti diversi, come l'impatto sul conducente di diverse tipologie di segnaletica orizzontale e verticale, vantaggi e svantaggi delle tecnologie introdotte in un veicolo, ma anche l'idoneità alla guida di pazienti la cui prestazione diminuisce a causa di invecchiamento, traumi cerebrali e malattie neurodegenerative, od ancora gli effetti di molti farmaci, ma il vantaggio principale è che possono essere utilizzati nella progettazione funzionale e geometrica stradale. Sono dunque utili per valutare l'impatto sulla prestazione di guida di diversi dispositivi di controllo del traffico, della geometria stradale, delle condizioni di luce ed atmosferiche.

Alcuni studi a livello europeo hanno dimostrato che i simulatori di guida sono uno strumento importante per migliorare la sicurezza stradale essendo utili nella valutazione dei vincoli sul comportamento del guidatore, delle distrazioni e del carico di lavoro.

La validità dei simulatori di guida come strumento per l'analisi del comportamento del guidatore è stata stabilita in diversi studi precedenti (ad esempio Kemeny & Panerai, 2003; Rosey et al., 2009; Rudin-Brown et al., 2009) ribadendo così il vantaggio di poter utilizzare tali dispositivi nella progettazione stradale funzionale e geometrica.

Il vantaggio di uno studio a simulatore di guida è che si possono avere parecchie persone che guidano esattamente la stessa strada sotto identiche condizioni, e variare unicamente il fattore oggetto di studio (Antonson et al., 2009). Inoltre, il simulatore di guida permette al ricercatore di raccogliere e trattare in continuo profili di velocità e traiettoria invece di soli dati puntuali,

evitando così le carenze incontrate nella raccolta dei dati sul posto (Bella & Calvi, 2013; Calvi et al., 2012; Calvi & De Blasiis, 2011).

3. Attività sperimentale

3.1 Scelte progettuali

L'obiettivo di valutare gli effetti della distanza di visuale libera sulla velocità di marcia è stato perseguito per mezzo di un simulatore di guida.

Le condizioni di visibilità sono funzione della combinazione degli aspetti precedentemente richiamati quali la larghezza di corsie e banchine, il numero di corsie, la pendenza trasversale, la geometria del tracciato, le condizioni di illuminamento (giorno, notte) ed atmosferiche (sole, nebbia, pioggia intensa), il livello di traffico e, soprattutto, la presenza di ostacoli a lato della banchina (barriere di sicurezza di diverso tipo, pali di illuminazione notturna, alberi, muri, siepi, vegetazione in generale).

L'indagine è stata eseguita riferendosi alla strada di categoria C1 con larghezza di corsie e banchine costanti per tutto lo sviluppo del tracciato. La scelta delle caratteristiche geometriche dell'asse planimetrico e dei margini stradali ha richiesto la gestione delle variabili indipendenti: raggio di curvatura (R), distanza dal centro della corsia all'ostruzione visiva posta nel margine (Δ), angolo di deviazione del tratto circolare del raccordo planimetrico (ω).

Si è scelto di considerare quattro diversi raggi di curvatura all'interno del campo di valori che, in base alle assunzioni della normativa tecnica italiana, sono associabili a velocità di progetto variabili nell'intervallo 60÷100 km/h.

Le distanze dal centro della corsia all'ostruzione visiva sono state scelte in modo da riproporre negli scenari di guida situazioni verosimili a casi reali. Sono state considerate tre diverse condizioni, rispettivamente con ostruzione collocata a filo della banchina (Δ_1), a 1,50 m (Δ_2) e a 3,00 m (Δ_3) da essa. In aggiunta è stata considerata anche la condizione di assenza di ostacolo (*Figura 3.1*).

Per valutare gli effetti della distanza di visuale libera, le curve sono state progettate con angoli di deviazione superiori a 60°, ciò al fine di disporre di tratti sufficientemente estesi nei quali il guidatore potesse essere sottoposto per un tempo sufficiente ad una distanza di visuale libera costante.

3.2 Calcolo della distanza di visibilità disponibile lungo le curve circolari

La distanza di visuale libera (DVL) è stata determinata in funzione del raggio R e della distanza dal centro della corsia dell'ostruzione visiva Δ secondo la:



Figura 3.1 Esempio delle quattro condizioni ritrovabili in curva

$$DVL = 2R \cdot \arccos\left(1 - \frac{\Delta}{R}\right)$$

Dalla combinazione dei quattro valori di raggio planimetrico (R), delle tre distanze tra asse della corsia ed ostruzione ottica (Δ), e delle due direzioni di svolta si ottengono i ventiquattro valori della distanza di visuale libera (DVL) riportati in *Tabella 3-1*.

Tabella 3-1 Valori della distanza di visuale libera ottenuti per i diversi raggi e distanze tra ostruzione e centro corsia, per i due versi di percorrenza

	Curve destrorse		Curve sinistrorse	
		DVL [m]		DVL [m]
R1 = 120 m	$\Delta 1 = 3,375$ m	56,610	$\Delta 1 = 7,125$ m	83,759
	$\Delta 2 = 4,875$ m	68,110	$\Delta 2 = 8,625$ m	92,252
	$\Delta 3 = 6,375$ m	77,970	$\Delta 3 = 10,125$ m	100,058
R2 = 225 m	$\Delta 1 = 3,375$ m	77,715	$\Delta 1 = 7,125$ m	114,018
	$\Delta 2 = 4,875$ m	93,455	$\Delta 2 = 8,625$ m	125,517
	$\Delta 3 = 6,375$ m	106,930	$\Delta 3 = 10,125$ m	136,071
R3 = 300 m	$\Delta 1 = 3,375$ m	89,803	$\Delta 1 = 7,125$ m	131,434
	$\Delta 2 = 4,875$ m	107,975	$\Delta 2 = 8,625$ m	144,670
	$\Delta 3 = 6,375$ m	123,527	$\Delta 3 = 10,125$ m	156,811
R4 = 430 m	$\Delta 1 = 3,375$ m	107,585	$\Delta 1 = 7,125$ m	157,114
	$\Delta 2 = 4,875$ m	129,339	$\Delta 2 = 8,625$ m	172,914
	$\Delta 3 = 6,375$ m	147,949	$\Delta 3 = 10,125$ m	187,402

3.3 Definizione dei tracciati stradali

Si è voluto optare per tracciati chiusi, in quanto ciò permette di ridurre l'area occupata dalla strada da realizzarsi in ambiente virtuale, ed una più agevole circolazione nelle due direzioni di percorrenza.

Dalla combinazione dei quattro raggi di curvatura con i tre angoli di deviazione e le tre diverse configurazioni dell'ostacolo a lato della banchina si ottengono trentasei curve che, percorse nelle due direzioni, danno luogo a settantadue diverse situazioni. Nella costruzione del tracciato si è scelto di mantenere una certa gradualità nella successione dei raggi, ovvero ogni curva è stata collocata in prossimità di una curva di raggio simile (ad esempio, una curva di raggio 120 m è stata preceduta o seguita solo da curve di raggio 120 o 225 m; una curva di raggio 300 m è stata preceduta o seguita da curve di raggio, 225, 300, 430 m ma non da una di raggio 120 m).

Il tracciato composto dalla successione dei valori prescelti risulterebbe troppo lungo, sia come estensione spaziale, sia temporale. I tempi di percorrenza sarebbero pari a 20-25 minuti. Ciò può costituire un problema nella simulazione, poiché sarebbe richiesto un impegno rilevante da parte dei test-driver. Per tale ragione sono stati generati due diversi tracciati, denominati A e B, contenenti ciascuno 18 delle 36 curve oggetto di studio. Le curve nei due tracciati sono state scelte in modo da avere in entrambi valori complessivamente simili. I due circuiti sono stati chiusi inserendo curve e rettili con caratteristiche non rispondenti ai criteri prima indicati. In conclusione, il tracciato A è risultato avere una lunghezza di 12.888,52 m, il tracciato B di 14.443,94 m. I tracciati sono stati predimensionati in ambiente *Autodesk AutoCAD*, il tracciamento vero e proprio è stato eseguito all'interno del software di gestione del simulatore di guida *SCANeR™studio*.

Come anticipato, si è considerata una strada di categoria C1 con una corsia per senso di marcia di larghezza pari a 3,75 m e banchine di larghezza pari a 1,50 m. I muri con i quali sono state generate le ostruzioni ottiche a lato della sede stradale sono iniziati a partire dai rettili così da incrementare l'avvicinamento progressivo alle condizioni di visibilità ridotta.

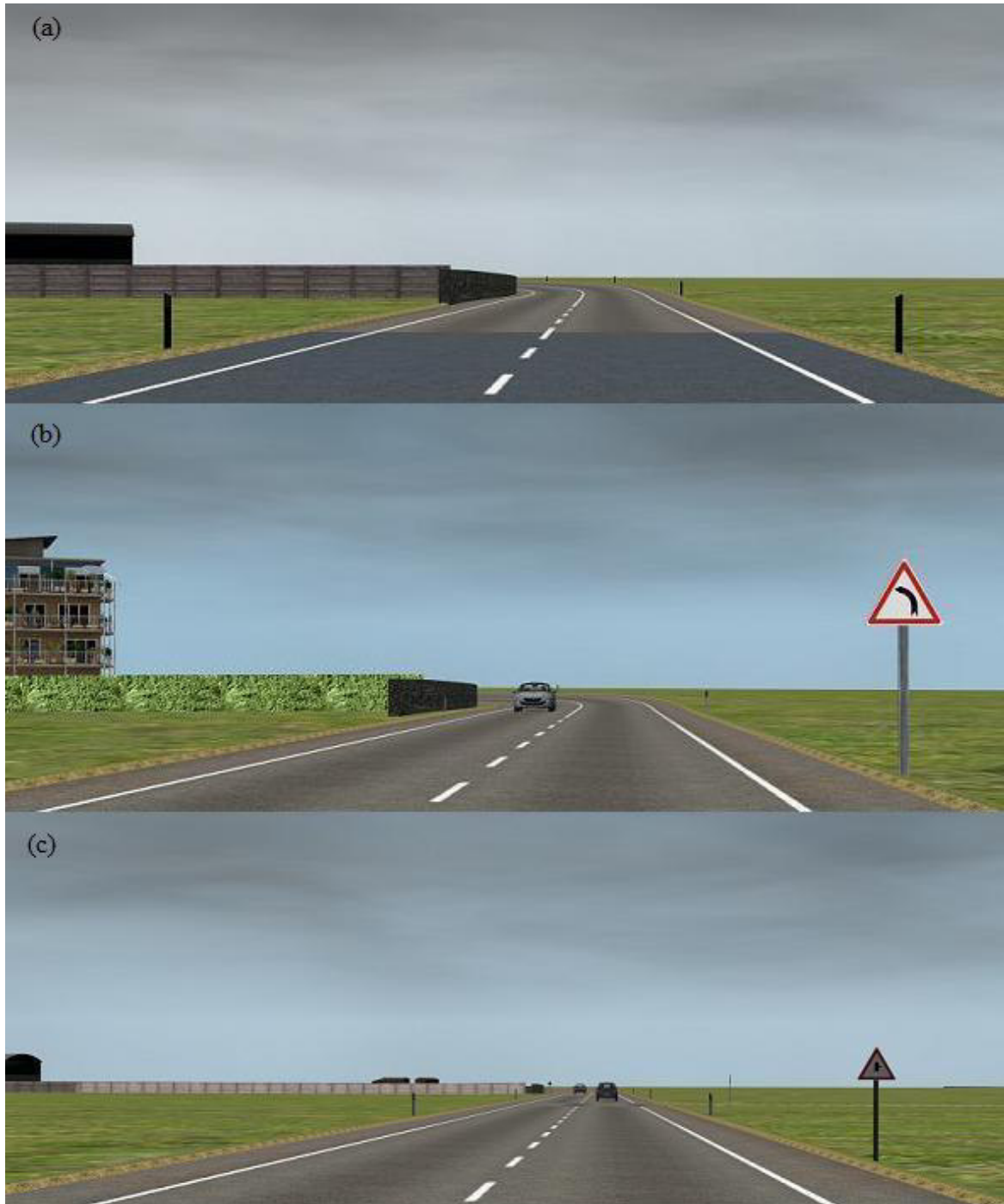


Figura 3.2 Esempi di posizionamento di elementi nella parte interna della curva e di segnaletica verticale

Al fine di accrescere la verosimiglianza degli esperimenti, gli scenari sono stati generati variando in modo casuale la tessitura superficiale della pavimentazione.

Inoltre, si è avuta cura di arricchire il paesaggio con edifici e alberi nella parte interna di ogni curva anche al fine di mascherare l'ostruzione presente in curva. Ciò è stato eseguito allo scopo di incrementare il livello di attenzione e partecipazione dei guidatori (Figura 3.2a-b). A supporto di ciò, sono state inserite anche alcune intersezioni con strade di categoria inferiore ed un certo numero di piazzole di sosta, specialmente lungo rettifili di più grande sviluppo. La segnaletica verticale è stata usata per segnalare le curve di raggio 120 m (Figura 3.2b) e la presenza di intersezioni con diritto di precedenza (Figura 3.2c).

Lungo il tracciato si è pensato di applicare alcuni cambi di tessitura a diverso livello di rugosità (Figura 3.3) con lo scopo di ottenere un ambiente più realistico.

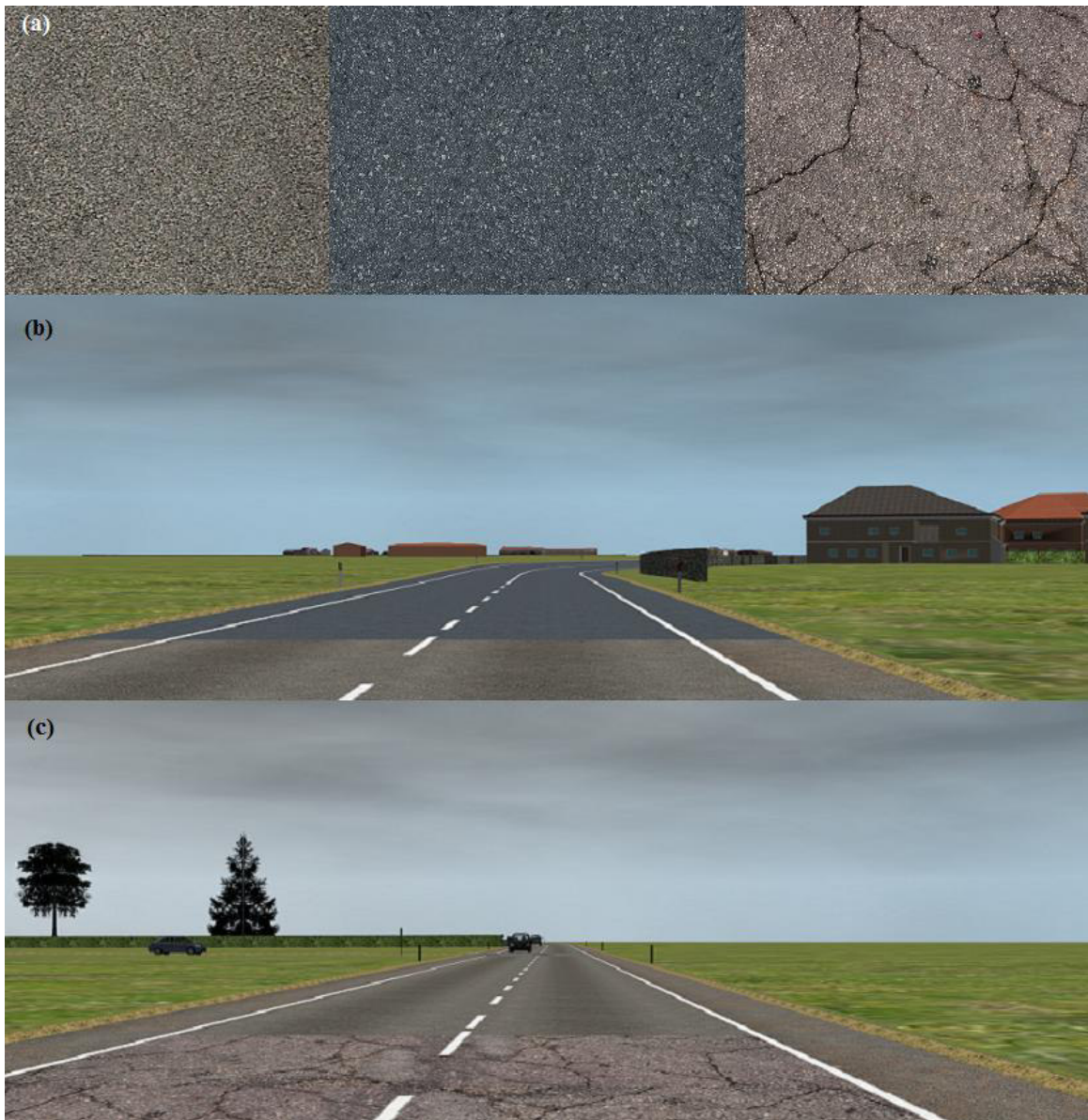


Figura 3.3 Tre diverse tessiture impiegate (a) e loro riproposizione nell'ambiente stradale (b)(c)

All'inizio del muro, in alcune curve, sono stati posizionati oggetti semplici per mantenere alto il livello di attenzione, evitare monotonia e creare una sorta di condizionamento sui guidatori in modo che fossero consapevoli della possibilità di poter trovare ostacoli di vario genere nella percorrenza della curva, avvicinando così il livello di attenzione a quello che si ha usualmente alla guida reale.

Ai tracciati A e B è stato aggiunto un terzo tracciato (ANM) in cui sono state inserite alcune delle curve prive di ostruzione.

3.4 Caratteristiche dello scenario

Per rendere più realistica l'attività a simulatore e per evitare noia ed adattamento da parte del guidatore, gli scenari sono stati progettati inserendo un certo livello di traffico con veicoli presenti sia nella direzione di marcia seguita dai test-driver, sia in direzione opposta.

3.5 Esperimento

3.5.1 Guidatori

L'esperimento a simulatore di guida ha visto la partecipazione di 41 guidatori volontari, 26 maschi e 15 femmine, con età compresa tra i 20 e i 60 anni. Le caratteristiche del campione sono riportate in *Tabella 3-2*.



Figura 3.4 Esempi di veicoli provenienti in senso opposto inseriti all'interno dello scenario

Nella scelta del campione si sono conciliati aspetti diversi. Mentre da un lato non è stato troppo facile reperire volontari, dall'altro si è voluto cercare di ottenere un campione capace di rispecchiare la popolazione di guidatori nel mondo reale, e soprattutto focalizzarsi su quelle fasce di età che, dai dati statistici disponibili, risultano essere più legate a incidenti mortali o con feriti, ovvero quelle categorie che manifestano una più alta incidentalità.

Il 54% del campione è costituito da persone che in passato si erano già sottoposte ad esperimenti a simulatore di guida mentre il restante 46% da individui alla prima esperienza. Questi ultimi sono stati sottoposti due giorni prima della data fissata per l'esperimento di guida ad una sessione di *training* della durata di circa venti minuti in modo da prendere padronanza con la strumentazione in vista dell'esperimento vero e proprio.

All'inizio di ogni sessione è stato somministrato un modulo informativo sullo scopo della ricerca ed un questionario di tipo demografico, e l'informativa sulla privacy (ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 "Codice in materia di protezione dei dati personali") per il trattamento dei dati personali.

Tabella 3-2 Caratteristiche sintetiche del campione di guidatori

Riassunto	Numero	Età [media]	Età [SD]	Età patente [media]	km annui percorsi [media]	N° incidenti [media]
Maschi	26	36	12	17	13462	1.12
Femmine	15	31	10	12	4500	0.47
Complessivo	41	34	11	15	10325	0.88

3.5.2 Procedura di guida al simulatore

Prima dell'esecuzione delle simulazioni sono stati condotti alcuni test cognitivi (CognitiveFun, 2017) al fine di valutare il tempo di reazione a stimoli visivi e uditivi, per verificare l'eventuale cambiamento di prestazioni dovute alla simulazione.

Successivamente il guidatore è stato fatto accomodare al simulatore di guida. Per i guidatori già esperti, è stata prevista in questa fase una breve guida di *training* di circa cinque minuti per riprendere confidenza con la strumentazione già utilizzata in passato. A questa è seguita la prova vera e propria, cioè a ciascun individuo è proposto di guidare due scenari della durata di circa dieci minuti ciascuno, intervallati da una pausa di circa dieci che permette di ristabilire le condizioni psicofisiche simili a quelle iniziali.

I due scenari selezionati per l'esperimento di ciascun guidatore sono scelti tra i sei scenari complessivi, ottenibili dalla combinazione dei tre tracciati chiusi realizzati (A, B, ANM) con le due possibili direzioni di marcia. All'interno di ciascuno scenario, il punto di partenza è sempre il medesimo per ogni guidatore e coincide con il punto di arrivo siccome il percorso è chiuso.

Il criterio considerato per scegliere quali due scenari tra i sei disponibili deve guidare il singolo individuo, prevede la formazione di una matrice di due righe e nove colonne esprime le combinazioni possibili dei sei scenari complessivi.

Tale modo di procedere consente di avere una certa distribuzione degli scenari, bilanciando gli errori che potrebbero influenzare i dati raccolti nel caso in cui uno scenario sia sempre proposto per primo ed un altro sempre per secondo in quanto tra una guida e l'altra il comportamento del generico guidatore potrebbe cambiare (a causa ad esempio di adattamento alla guida, noia, ecc.).

All'inizio ed al termine di ciascuna guida è fissata la misurazione e registrazione dei battiti cardiaci per un tempo di un minuto attraverso un sensore biometrico. Durante la guida sono state misurate la temperatura corporea e la conduttanza della pelle, o attività galvanica (che risulta essere un indice del livello di sudorazione).

Inoltre, il software di gestione del simulatore permette la continua registrazione di moltissimi parametri di tipo dinamico, cinematico o relativi al veicolo. È importante sottolineare che negli scenari che il partecipante si trova a dover guidare con l'ausilio del simulatore, non sono inseriti limiti di velocità in quanto si vuole che questi siano condizionati unicamente dalla percezione dell'ambiente stradale e dalla visibilità disponibile, mentre l'introduzione di limiti potrebbe sfalsare il comportamento oggetto di studio. Il guidatore è stato invitato a mantenere un atteggiamento alla guida quanto più naturale e simile a quello usualmente adottato nell'attività di guida reale.

Una volta concluse le due guide a simulatore, sono stati riproposti i test cognitivi con la stessa procedura illustrata per la fase pre-guida. Questi sono da confrontare con i valori precedentemente raccolti per valutare se vi fossero differenze significative.

In ultimo, ad ogni partecipante è stato sottoposto un questionario di post-simulazione composto di tre parti:

- domande a risposta multipla per la valutazione dello stato di malessere del guidatore (*Simulator Sickness Questionnaire*¹);
- domande per la valutazione della corretta progettazione degli scenari volta ad innescare le giuste percezioni sul test-driver;
- domande riguardanti unicamente le caratteristiche intrinseche del simulatore di guida, quali ad esempio la veridicità di effetti sonori e visivi od in generale la risposta dello strumento, a cui devono rispondere soltanto coloro alla prima esperienza.

La durata complessiva dell'esperimento così strutturato è di circa quarantacinque minuti.

4. Analisi dati

È possibile manipolare i dati raccolti al fine di una loro analisi finalizzata a conclusioni interessanti che possano essere utili per considerazioni presenti ma anche come valido *input* per lavori di ricerca futura.

La presente fase di analisi dati è strutturata in due parti: una prima parte in cui è sviluppata un'analisi descrittiva, con l'ausilio di grafici, consente di avere un'idea immediata del risultato ottenuto, partendo dai dati raccolti e finendo con un'aggregazione progressiva degli stessi; ed una seconda parte costituita da un'analisi di tipo statistico per mezzo dell'analisi della varianza (ANOVA). Si potrà visualizzare come le due diverse analisi portino alle medesime conclusioni, sebbene tramite vie differenti.

4.1 Analisi descrittiva

Questa tipologia di analisi consente di ottenere una chiara e diretta visione del risultato ottenuto, partendo dai dati raccolti.

È possibile valutare come cambi il comportamento, espresso in termini di velocità, al variare delle combinazioni delle tre variabili indipendenti considerate.

¹ Kennedy et al., 1993

4.1.1 Velocità in funzione della distanza tra centro della corsia ed ostruzione visiva nel margine, fissati angolo di deviazione, raggio e verso di percorrenza della curva

Fissati l'angolo di deviazione, il raggio della curva ed il verso di percorrenza, è possibile riportare su un grafico l'andamento delle velocità in funzione della diversa distanza tra il centro della corsia ed il muro a lato.

In questo senso, ogni profilo di velocità è quello medio ottenuto dalle serie di dati dei guidatori che hanno percorso la curva avente quelle determinate caratteristiche.

I grafici proposti in *Figura 4.1* si prestano a svariati commenti. Sono riportati i profili medi di velocità per ciascuna diversa distanza tra il centro della corsia ed il muro a lato della banchina. Ogni grafico è relativo ad un angolo di deviazione di sessanta

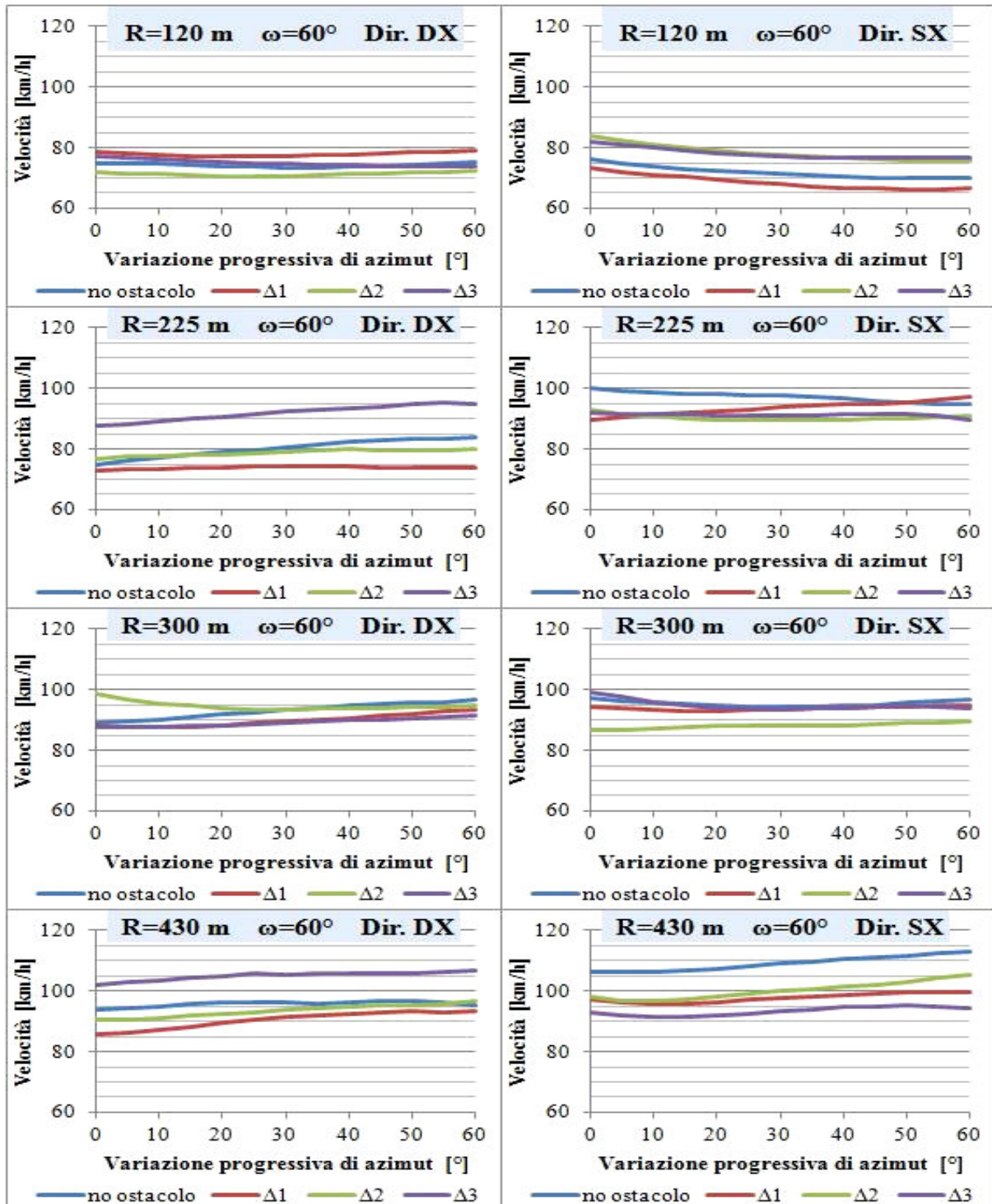


Figura 4.1 Velocità in funzione di Δ , fissati R , $\omega = 60^\circ$ e verso di percorrenza della curva

gradi e, mentre a sinistra sono riportate le curve percorse in senso destrorso (ovvero con l'ostacolo continuo sulla destra), a destra sono riportate le curve con le stesse caratteristiche ma percorse in senso inverso, ossia con l'ostruzione alla visibilità presente a sinistra e quindi a più grande distanza dalla traiettoria percorsa.

Nel caso di curva di raggio 120 m percorsa con l'ostruzione a destra, le velocità per ciascun Δ sono tendenzialmente costanti e raccolte in un campo piuttosto stretto come probabile conseguenza del fatto che il guidatore sia condizionato dal piccolo raggio e meno della distanza dall'ostruzione. Tuttavia le velocità più elevate si hanno in condizioni più gravose in termini di visibilità e questo potrebbe essere imputato al fatto che il guidatore utilizzi il muro come indirizzamento nella scelta della traiettoria, e ciò lo renda più sicuro nell'adottare una velocità relativamente alta.

Sempre considerando le condizioni con l'ostruzione presente a destra, al crescere del raggio (ovvero per raggi di 225 e 430 m) si ha che le velocità più alte tendono a riscontrarsi in presenza di ostacolo a 3 m dalla banchina ($\Delta 3$) come conseguenza del fatto che l'ostacolo a distanza più elevata invogli il conducente ad aumentare la velocità mentre nel caso di distanza minore ($\Delta 1$ e $\Delta 2$) il guidatore subisca l'influenza dell'ostruzione visiva che lo porta quindi ad essere relativamente più prudente. È anche da notare come la velocità sia superiore nel caso $\Delta 3$ rispetto alla condizione di nessuna ostruzione alla visibilità, come possibile conseguenza che il muro continuo sia un'ostruzione alla visibilità ma allo stesso tempo un riferimento per il guidatore, mentre nel secondo caso egli potrebbe non riconoscere chiaramente il corso della strada ed essere votato ad una maggior prudenza. Un'eccezione si ha nel caso di raggio 300 m poiché in questa situazione le velocità sembrano essere raccolte in un *range* più limitato, specialmente nella fase terminale della curva, mentre inizialmente sono più elevate in caso di $\Delta 2$ ma poi tendono a decrescere e ad uniformarsi al comportamento riscontrato per gli altri valori di Δ . Questo potrebbe essere dovuto al fatto che il guidatore inizialmente non abbia idea chiara di come approcciare la curva ed entri con velocità elevata, per poi ridurla progressivamente lungo la sua percorrenza.

Per quanto concerne le curve percorse in verso sinistrorso, ovvero con l'ostruzione a più elevata distanza, si può notare che per raggio di 120 m le curve sono affrontate con velocità d'ingresso superiore a quella di uscita, ovvero si osserva una sua progressiva diminuzione. Inoltre le velocità più alte si osservano per $\Delta 2$ e $\Delta 3$ siccome in questi casi sembra che il muro renda più chiaro il percorso da adottare e consenta più alte velocità. Nel caso di $\Delta 1$ e nessuna ostruzione visiva le velocità sono inferiori come conseguenza che queste situazioni non innescano le corrette aspettative sul guidatore, ovvero non rendono chiaro il percorso da seguire, ma per due motivi diversi entrambi plausibili: in presenza di $\Delta 1$ il guidatore potrebbe risentire dell'ostruzione alla visibilità e portato ad essere prudente mentre nel caso di nessuna ostruzione non percepisca chiaramente quale sia il percorso da adottare ovvero non abbia chiaro l'andamento della curva. Per raggi superiori emerge che le velocità più elevate si hanno tendenzialmente in assenza di ostruzione alla visibilità: per raggi di 225 e 300 m, tuttavia, i valori di velocità sono più raccolti che nel caso di raggio 430 m, nel qual caso è importante notare come le velocità relativamente più basse si abbiano in presenza di $\Delta 3$.

Al passaggio ad un confronto per pari raggio ma differente verso di percorrenza, si può dire che le velocità tendono ad essere racchiuse approssimativamente nello stesso intervallo, anche se per condizioni di Δ diverse.

Si possono anche studiare le curve con angolo di deviazione pari a novanta gradi relativamente a raggi di 120 e 430 m poiché anche per tali combinazioni è stata studiata l'assenza di ostruzione alla visibilità. Nel caso di raggio pari a 120 m si ha il medesimo comportamento registrato precedentemente per un angolo di deviazione di sessanta gradi mentre per il raggio di entità 430 m le osservazioni sono un poco diverse: nel caso di curva percorsa con l'ostruzione a destra, si evince il medesimo comportamento nel caso di $\Delta 2$, $\Delta 3$, e nessun ostacolo alla visibilità mentre velocità inferiori sono riscontrate nel caso di ostacolo a filo banchina, come conseguenza che, mentre le prime tre situazioni innescano le giuste aspettative sul conducente, ovvero lo indirizzano nell'approccio di quella curva, l'ultima lo spinge ad essere prudente dato che non sa cosa aspettarsi dalla condizione di minima visibilità.

Sorprendentemente, nel caso di ostacoli alla visibilità presenti sulla sinistra si ha un comportamento più variabile ed è soprattutto la condizione più restrittiva ad implicare la velocità più elevata insieme con la condizione di nessuna ostruzione alla visibilità. Le condizioni di velocità minori si hanno progressivamente per $\Delta 2$ e $\Delta 3$ in considerazione del fatto che in tali condizioni il guidatore è spinto ad essere più prudente.

4.1.2 Velocità in funzione del raggio fissati angolo di deviazione e distanza tra centro della corsia ed ostruzione visiva a lato della banchina

Considerazioni simili alle precedenti possono svolgersi considerando un modo diverso di esprimere i risultati, ovvero si possono fissare angolo di deviazione e distanza dell'ostruzione visiva dal centro della corsia di marcia e valutare quale comportamento è osservabile in funzione dei diversi raggi di curvatura.

4.1.3 Valutazione dell'influenza dell'angolo di deviazione sul comportamento di guida

L'angolo di deviazione di una curva non rientra nel calcolo della distanza di visuale libera (DVL). Pertanto, in vista di un'aggregazione dei dati ed un loro confronto in funzione della distanza di visuale libera, si vuole vedere se sia possibile svincolarsi totalmente dall'angolo di deviazione nel caso in cui non abbia un effetto direttamente riscontrabile. A tal scopo, per ogni verso di percorrenza, il valore di velocità media su una curva di date caratteristiche è stato messo in relazione con la distanza di visuale libera che si ha in quella curva dalla combinazione di raggio e distanza tra centro della corsia e ostruzione laterale alla visibilità. Questo procedimento è stato fatto per i valori di velocità relativi a ciascun diverso angolo di deviazione del tratto circolare del raccordo planimetrico (Figura 4.2).

Come si può riscontare dai grafici, i punti di ciascuna serie di valori sono allineati lungo una retta che ha una pendenza dello stesso ordine di grandezza ed inoltre le tre diverse rette sono pressochè coincidenti. Tale comportamento lo si può evincere sia per il verso di percorrenza destrorso (Figura 4.2), sia per quello sinistrorso e significa appunto che l'angolo di deviazione non ha alcuna influenza sulla scelta della velocità dato che l'andamento delle velocità è pressochè lo stesso al variare dell'angolo medesimo. Di conseguenza i dati possono essere aggregati, svincolandosi dal contributo fornito da questa variabile.

È da notare però che le rette di interpolazione lineare relative alle due diverse direzioni di marcia hanno una pendenza diversa, ad indicare una probabile differente scelta nel comportamento adottato dal guidatore nelle due diverse situazioni.

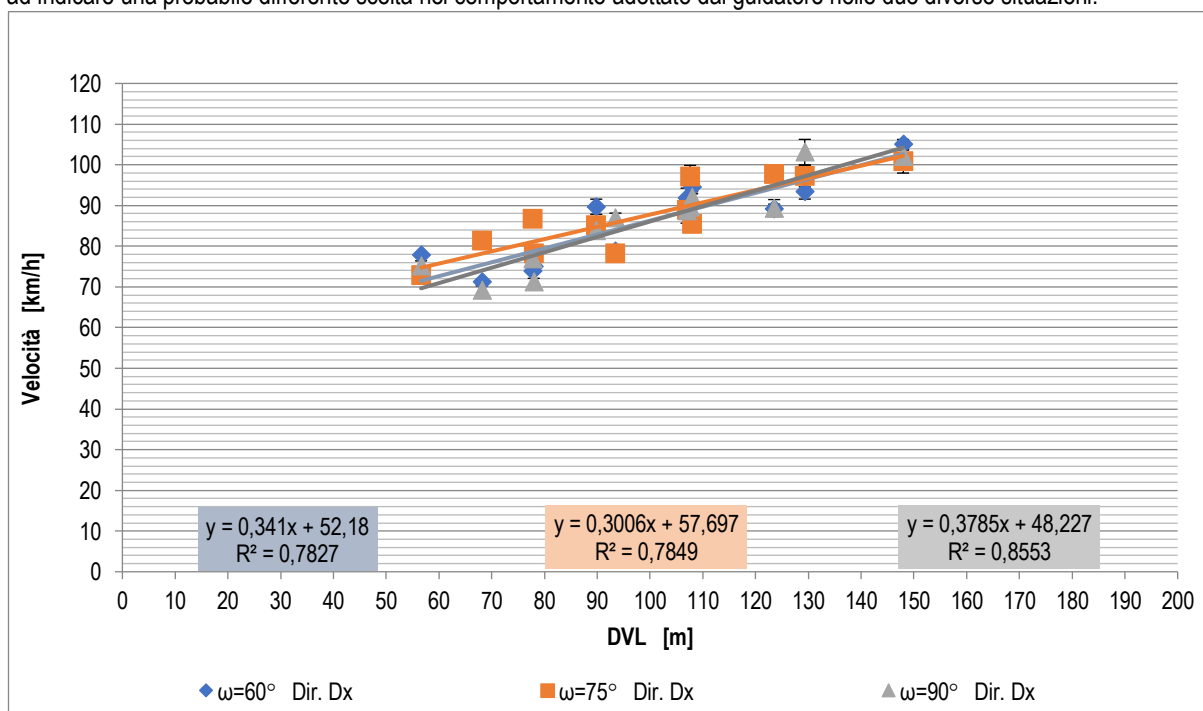


Figura 4.2 Valutazione dell'influenza dell'angolo di deviazione sul comportamento riscontrato in verso destrorso

4.1.4 Velocità riscontrata in funzione di DVL per diverse combinazioni di raggio e distanza tra centro corsia ed ostacolo alla visibilità

Provata la possibilità di svincolarsi dalla variabile angolo di deviazione, i dati di velocità sono stati aggregati ottenendo un valore di velocità media delle curve aventi un certo raggio R ed una particolare distanza tra centro corsia e ostruzione visiva nel margine Δ . È possibile dunque esprimere tali velocità in funzione della distanza di visuale libera risultante dalle caratteristiche di quella generica curva, per ogni direzione di percorrenza. Si può vedere, specialmente nel caso di verso di percorrenza della curva destrorso, come, per valori di DVL confrontabili ma ottenuti per combinazioni diverse di R e Δ , si abbia un comportamento simile (Figura 4.3). Questo effetto è presente, anche se in modo meno marcato, nel caso di percorrenza della curva in senso opposto, ovvero con l'ostruzione sulla sinistra e quindi a più elevata distanza dalla traiettoria adottata.

A parità di raggio, sembra che per quello di 120 m non vi sia alcun condizionamento causato dalla presenza del muro, in entrambi i sensi di marcia, ma la velocità sia condizionata unicamente dal raggio e non dalla diversa distanza del muro a lato della banchina.

Per quanto riguarda i rimanenti tre raggi ed una percorrenza con l'ostruzione a destra, la velocità è crescente al crescere della distanza tra centro della corsia ed ostacolo, ovvero al crescere della visibilità si ha un incremento della velocità. Specialmente per i due raggi superiori la corrispondenza con una regressione lineare è pressoché perfetta ovvero si ha un aumento lineare della velocità al crescere della distanza di visuale libera.

Sempre per quanto concerne questi tre raggi ma secondo una percorrenza in direzione opposta, cioè con l'ostacolo alla visibilità presente a sinistra, si ha un comportamento diverso. In queste situazioni non si registra nessun effetto dell'aumento della distanza del muro dal centro della corsia, probabilmente perché è lontano dal guidatore che non ne percepisce l'influenza oppure poiché è appunto presente a sinistra e questo non condiziona il guidatore che magari è più concentrato nel guardare il corso della strada piuttosto che l'ostacolo. Più precisamente si registra una lieve diminuzione della velocità al crescere di tale distanza, in quanto potrebbe essere che, quando il muro è più vicino alla banchina, svolge una funzione di indirizzamento sul conducente che si perde all'aumentare di tale distanza e porta il guidatore stesso ad avere meno chiaro il corso della strada e conseguentemente a rallentare.

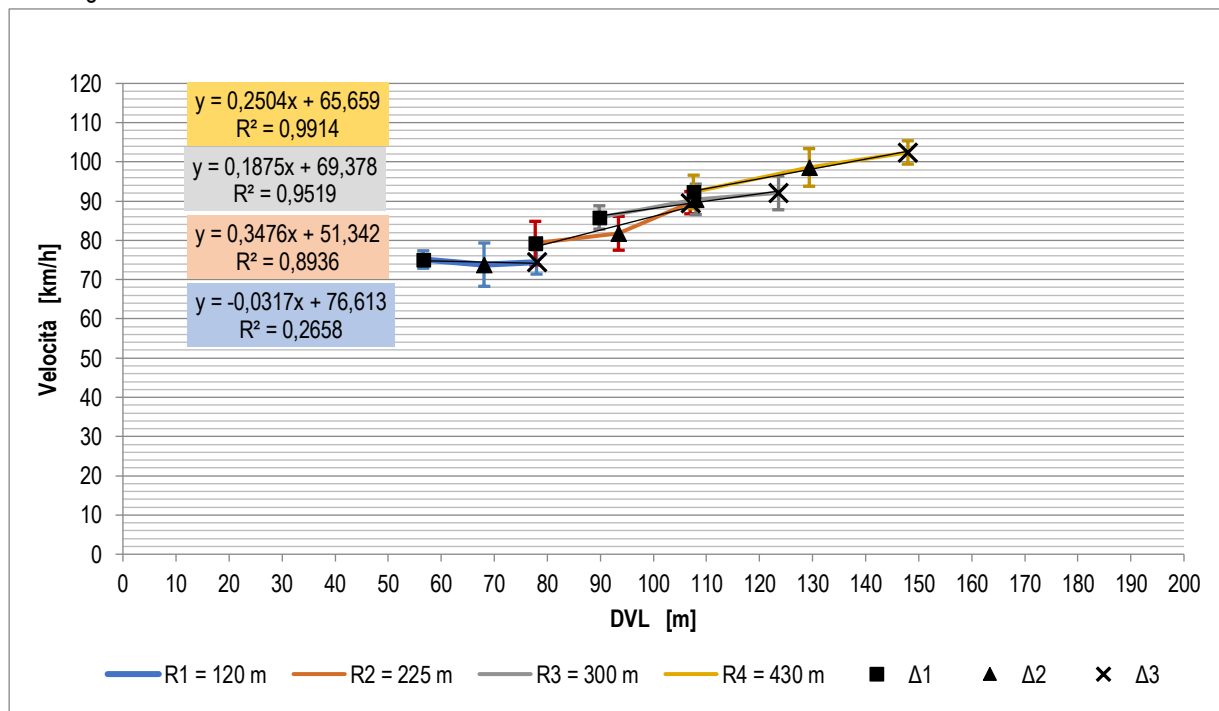


Figura 4.3 Velocità espressa in funzione della distanza di visuale libera (DVL), per diverse combinazioni di R e Δ e curve percorse in senso destrorso

Si è fatto questo passo intermedio per evidenziare come per valori di DVL confrontabili, ma ottenuti diversamente si abbia lo stesso comportamento in termini di velocità, ma occorre ricordare che la vera rilevanza dei risultati ottenuti è quella del considerare la DVL in sé, mentre la combinazione delle variabili che porta alla sua determinazione ha una rilevanza minore.

4.1.5 Velocità in funzione della distanza di visibilità disponibile

In Figura 4.4 sono riportati i valori di velocità media ottenuti per quella specifica condizione di visibilità data dalla combinazione di generici R e Δ e sono, in un primo momento, mantenuti distinti i due differenti versi di percorrenza delle curve, destrorso e sinistrorso. In entrambi i casi si ha che i dati di velocità media sono allineati secondo una retta crescente.

Mentre nel primo caso i punti trovano compatibilità quasi ottimale con un modello di regressione lineare, nel secondo tale compatibilità è comunque da ritenersi buona. Inoltre nel secondo caso la retta ha una pendenza inferiore ed è spostata verso

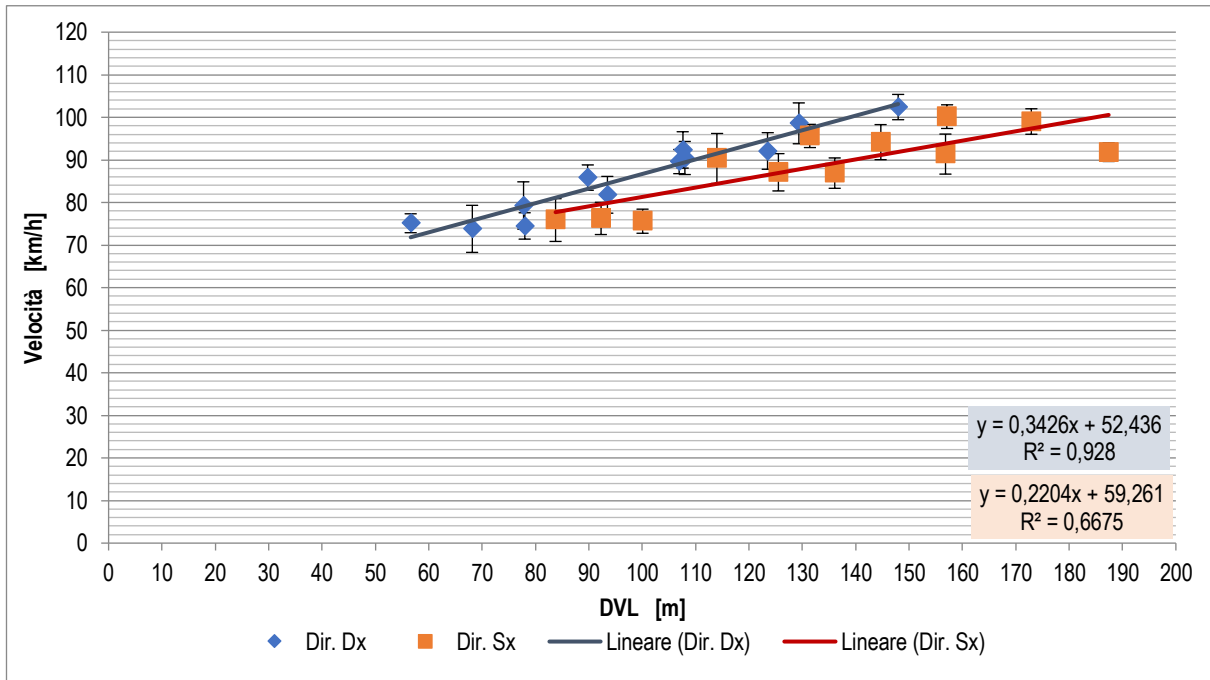


Figura 4.4 Velocità in funzione della distanza di visuale libera (DVL) per ciascun verso di percorrenza delle curve

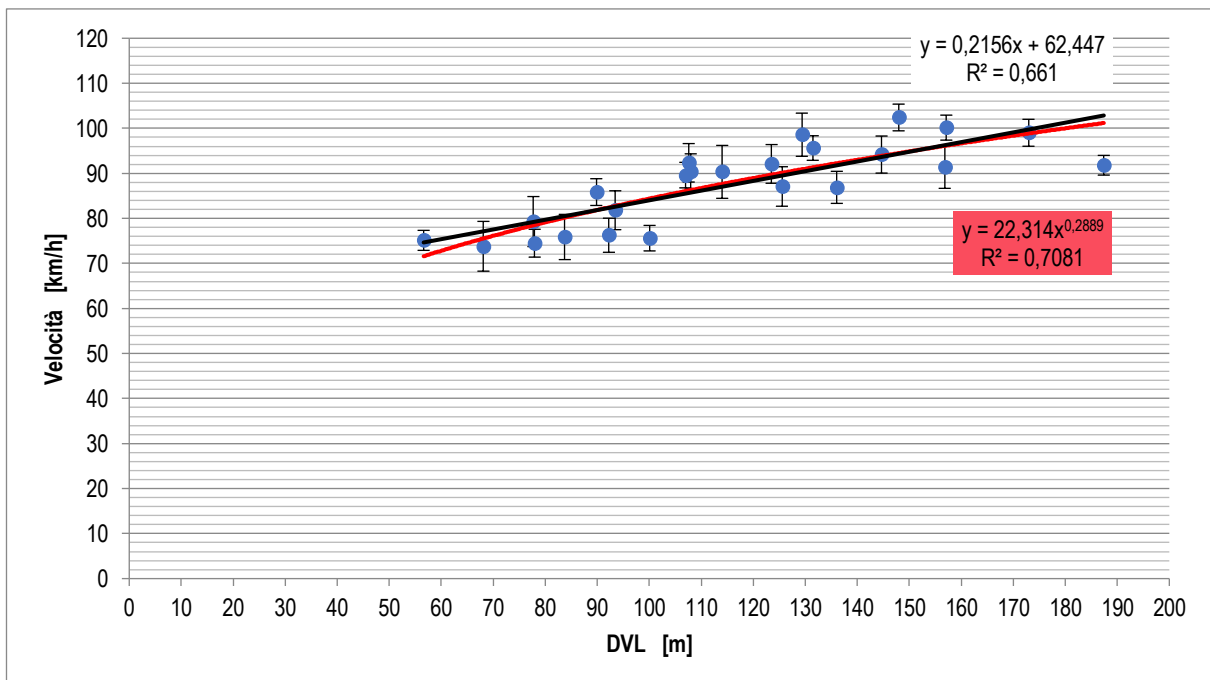


Figura 4.5 Velocità in funzione della distanza di visuale libera (DVL)

destra ad indicare che in tal caso la velocità, per pari condizione di visibilità, è inferiore, forse per la maggior incertezza e minor indirizzamento forniti al conducente da una curva sinistrorsa. In ogni caso il risultato ottenuto è molto importante. Si è infatti trovato e soprattutto quantificato un legame tra due grandezze, velocità e distanza di visuale libera, che ad ora non era ancora stato investigato con uno studio diretto a tal scopo.

Un modello di regressione lineare ha senso in questa fase dato che la distanza di visibilità è comunque inferiore a 200 m. Nel caso di un più ampio spettro di valori si avrebbe da considerare magari un diverso modello di regressione più idoneo.

Si può notare anche dal medesimo grafico come punti identificanti condizioni diverse di R, Δ e verso di percorrenza ma con DVL confrontabili, corrispondano a velocità molto simili tra loro.

In un secondo momento si può pensare di svincolarsi dal diverso contributo dei due sensi di marcia considerando tutti i valori di velocità come appartenenti ad un'unica serie di dati (*Figura 4.5*).

Secondo tale scelta si ottiene che i punti sono sempre allineati lungo una retta di pendenza positiva e si ha una buona compatibilità con un modello di regressione lineare. La retta però ha una pendenza inferiore a quella che si avrebbe considerando i due versi distintamente. Oltretutto, in tal caso, più che un modello di regressione lineare è auspicabile una potenza al fine di meglio descrivere il comportamento riscontrato.

4.2 Analisi statistica

4.2.1 Metodo

La variabile velocità è stata analizzata dal punto di vista statistico per mezzo dell'analisi della varianza (ANOVA) al fine di poter valutare quali grandezze, o combinazioni delle stesse, abbiano un effetto maggiore su di essa dal punto di vista statistico.

Si sono pertanto considerati i valori medi di velocità di ciascun guidatore per ogni curva percorsa e, al fine dell'analisi, è stato utilizzato il programma *R Studio*. Infine è importante chiarire che il livello di significatività scelto è del 5%.

4.2.2 Analisi della varianza a quattro vie

In un primo momento si è pensato di sviluppare un'analisi della varianza a quattro vie (ANOVA 2x4x4x3) considerando i due versi di percorrenza delle curve, i quattro diversi raggi, le tre possibili distanze dell'ostruzione dal bordo della banchina più la condizione di nessun ostacolo alla visibilità, ed infine i tre angoli di deviazione del tratto circolare di un raccordo planimetrico. Il risultato di tale procedimento è riportato in *Tabella 4-1*, da cui si può valutare quali siano gli effetti significativi. Per quanto riguarda gli effetti di interazione, l'analisi della varianza ha evidenziato un'interazione significativa tra verso di percorrenza e distanza tra centro della corsia ed ostacolo, e tra verso di percorrenza e raggio, ovvero le presenti combinazioni delle variabili comportano un effetto sulla velocità adottata.

Un altro effetto di interazione significativo è quello tra le variabili raggio, distanza tra ostruzione e centro corsia, e verso di percorrenza ma un effetto importante è dato anche dalla combinazione di tutte le variabili, la quale produce un effetto molto significativo sulla velocità. La combinazione di queste variabili fornisce la distanza di visuale libera, pertanto in un certo senso si vede come tale grandezza abbia un effetto sulla velocità.

È importante sottolineare come tramite tale analisi si ritrovi anche che l'angolo di deviazione non sia una variabile significativa per l'intervallo di valori considerato. Questo conferma quanto precedentemente ottenuto per mezzo dell'analisi descrittiva.

Tabella 4-1 Risultati ANOVA 2x4x4x3

<i>Effetti principali</i>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Verso di percorrenza	1	1412	1412	6.484	0.010998	*
Raggio	3	97533	32511	149.3	< 2.20E-16	***
Distanza ostacolo-centro corsia	3	1121	374	1.7165	0.161719	
Angolo di deviazione	2	13	7	0.0302	0.970277	

<i>Effetti di interazione</i>						
Verso percorrenza * Raggio	3	2098	699	3.2112	0.022268	*
Verso di percorrenza * Δ	3	4005	1335	6.131	0.000386	***
Raggio * Δ	9	2712	301	1.3836	0.1903	
Verso di percorrenza * Angolo dev.	2	1033	516	2.3714	0.093751	.
Raggio * Angolo di deviazione	6	726	121	0.5558	0.765703	
Δ * Angolo di deviazione	5	994	199	0.913	0.471593	
Verso di percorrenza * Raggio * Δ	9	4547	505	2.3199	0.01371	*
Verso di percorrenza * Raggio * Ang.dev.	6	1067	178	0.8167	0.556863	
Verso di percorrenza * Δ * Angolo di deviaz.	5	1588	318	1.4584	0.200612	
Raggio * Δ * Angolo di deviazione	13	1443	111	0.5099	0.919772	
Verso di percorrenza * Raggio * Δ * Angolo dev.	13	10781	829	3.8083	4.78E-06	***
Residui	1321	287656	218			

4.2.3 Analisi della varianza a tre vie

In un secondo momento è stata effettuata un'analisi della varianza a tre vie, accorpando verso di percorrenza e distanza tra ostruzione e centro della corsia, in modo da ottenere un numero complessivo di sette diverse situazioni concernenti la distanza tra la traiettoria ideale ed il muro a lato della banchina. Tali configurazioni sono date dalla condizione di nessuna ostruzione più le tre diverse posizioni dell'ostacolo ($\Delta 1$, $\Delta 2$, $\Delta 3$) considerate sia a sinistra del guidatore (nel caso di curva sinistrorsa) sia a destra dello stesso (nelle curve destrorse).

Nell'analisi svolta si considerano perciò i quattro diversi raggi di curvatura, le sette condizioni di ostruzione alla visibilità ed i tre angoli di deviazione (ANOVA 4x7x3).

Il risultato è riportato in *Tabella 4-2* ove si può riscontrare, come in precedenza, l'effetto significativo del raggio di curvatura e quello non significativo dell'angolo di deviazione. Al contrario, in questa analisi risulta significativo l'effetto dato dalla distanza tra centro della corsia ed ostruzione alla visibilità.

Tabella 4-2 Risultati ANOVA 4x7x3

<i>Effetti principali</i>	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Raggio	3	97483	32494	148.118	< 2.20E-16	***
Distanza ostacolo-centro corsia	6	5766	961	4.3806	0.000216	***
Angolo di deviazione	2	14	7	0.0326	0.967906	
<i>Effetti di interazione</i>						
Raggio * Δ	18	7586	421	1.921	0.01143	*
Raggio * Angolo di deviazione	6	729	122	0.554	0.767074	
Δ * Angolo di deviazione	11	3009	274	1.2467	0.250621	
Raggio * Δ * Angolo di deviazione	31	13023	420	1.915	0.001912	**
Residui	1327	291119	219			

Per quanto concerne gli effetti di interazione, diventa ora significativo sulla velocità l'effetto combinato di raggio e distanza tra centro corsia ed ostacolo a lato della banchina. Infine risulta ancora rilevante l'effetto combinato di tutte e tre le variabili. Tali due situazioni racchiudono al loro interno la distanza di visuale libera; pertanto se ne evince ancora una volta l'effetto significativo sulla velocità registrata.

5. Conclusioni

Attualmente, le norme tecniche non considerano il fatto che la distanza di visuale libera (DVL) possa influenzare il comportamento del guidatore, misurabile attraverso la velocità (V) prescelta per la marcia. Inoltre, anche nell'ambito della letteratura scientifica di settore, al momento non sono disponibili strumenti per il progettista che possano portare alla stima degli effetti della distanza di visuale libera sulla velocità.

La velocità è sicuramente un fattore centrale nella formazione dell'incidente e nella determinazione del corrispondente livello di severità per le persone coinvolte, pertanto agire su di essa sarebbe strategico per l'attuazione di politiche di gestione delle velocità operative. Studiare gli effetti della distanza di visuale libera sulla velocità potrebbe portare ad un loro controllo con conseguente miglioramento di aspetti riguardanti la sicurezza stradale, visto ancora l'elevato numero di incidenti, anche mortali, che al presente si verificano anche in Italia.

Per queste motivazioni, nella presente tesi si è deciso di trattare gli effetti della DVL sul comportamento longitudinale del guidatore in termini di velocità. Questo è stato possibile grazie alla realizzazione di un esperimento tramite l'uso del simulatore di guida presente al Laboratorio di Sicurezza Stradale e Simulazione di Guida del DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture).

La complessità del tema in termini di variabili in gioco ha richiesto di effettuare alcune scelte alla base dell'esperimento stesso, considerando come variabili indipendenti il raggio di curvatura, la distanza dal centro della corsia all'ostruzione visiva posta nel margine e l'angolo di deviazione del tratto circolare del raccordo planimetrico.

Al fine di studiare tutte le condizioni di visibilità fissate è stata richiesta la costruzione di sei scenari di guida. Ciascun guidatore che ha preso parte all'esperimento ha guidato in due scenari dei sei a disposizione.

La compilazione del questionario di post-simulazione non ha evidenziato alcuna sorta di malessere significativo sperimentato dai guidatori e questo è molto importante per la bontà dei dati raccolti ed evidenzia come la progettazione degli scenari abbia avuto un riscontro positivo da questo punto di vista. Questo ha consentito di poter considerare l'intero campione di dati.

Sempre dal questionario di post-simulazione si ha che trentaquattro dei quarantuno guidatori hanno espresso direttamente influenza della distanza di visuale libera sul proprio comportamento. Da costoro emerge che gli elementi maggiormente condizionanti sono la presenza degli oggetti in banchina, il raggio delle curve, e la presenza del muro a lato, mentre invece poca influenza si è trovata per lo sviluppo delle curve (ovvero per l'angolo di deviazione).

Dall'analisi descrittiva dei dati di velocità espressi in funzione delle variabili indipendenti, emerge la dipendenza della velocità adottata dal raggio di curvatura e dalla distanza dal centro della corsia all'ostruzione visiva mentre sembra non esserci alcuna dipendenza dall'angolo di deviazione del tratto circolare del raccordo planimetrico. Il guidatore potrebbe invece adottare un comportamento diverso in funzione del verso di percorrenza di una curva.

In generale si riscontra un aumento della velocità al crescere del raggio e della distanza dall'ostruzione anche se comunque si sono registrati alcuni casi singolari. In altre condizioni, specialmente con raggi medio-grandi, si è osservato che le velocità più elevate fossero in presenza di muro a tre metri della banchina e non in assenza di ostacolo ad indicare che per quella particolare configurazione il muro fosse percepito come utile indirizzamento nell'innesco delle giuste aspettative sul conducente a differenza della situazione libera da ostruzioni ottiche.

L'ostruzione ottica è quindi utile al guidatore nella scelta della traiettoria e favorisce l'adozione di velocità superiori, mentre senza tale guida il guidatore appare più incerto nel percepire le caratteristiche della curva. In alcuni casi si osservano velocità non troppo diverse per i due raggi superiori ovvero sembrerebbe che il contributo del raggio influisca fino ad una certa soglia, dopodiché il comportamento potrebbe essere influenzato dalla percezione della combinazione di raggio ed ostruzione ottica nel margine, ovvero dalla distanza di visuale libera.

Le velocità più elevate a parità di distanza di visibilità, si hanno in presenza di ostacolo a bordo banchina come conseguenza della funzione di indirizzamento che esso è capace di fornire.

Si può ancora notare che al crescere della distanza tra centro della corsia ed ostruzione alla visibilità viene meno la funzione di indirizzamento data dal muro e si tenderebbe ad avere una velocità identica, in verso sinistrorso, per qualsiasi tipo di raggio, come se la curva non fosse più capace di comunicare le corrette informazioni al guidatore.

L'analisi statistica mediante l'analisi della varianza ha confermato i risultati trovati attraverso l'analisi descrittiva. Ha rivelato un effetto principale significativo soprattutto del raggio ed in secondo luogo del verso di percorrenza mentre le altre variabili sembrano non essere significative ma, svincolandosi dal verso di percorrenza si evince il contributo dato dalla distanza dal centro della corsia dell'ostruzione alla visibilità che diventa a questo punto significativo.

Inoltre si è trovato un effetto di interazione significativo tra le variabili raggio, distanza tra ostruzione e centro corsia e verso di percorrenza ed anche dalla combinazione di tutte le variabili, la quale produce un effetto molto significativo sulla velocità. La combinazione di queste variabili fornisce la distanza di visuale libera, pertanto in un certo senso si vede anche dall'analisi statistica come tale grandezza abbia un effetto sulla velocità. È importante sottolineare come tramite l'analisi statistica si ritrovi anche che l'angolo di deviazione non sia una variabile significativa, come precedentemente ottenuto per mezzo dell'analisi descrittiva a conferma del fatto che le due tipologie di analisi portano a risultati in linea tra di loro e con quanto emerso dai questionari di post-simulazione.

Queste considerazioni spingono a credere che la vera dipendenza non sia da ricercare tra variabili indipendenti (raggio e distanza dell'ostruzione dal centro della corsia) e velocità ma tra velocità e distanza di visuale libera ossia il vero condizionamento sulla velocità non sia dato da tali variabili considerate singolarmente ma dalla loro combinazione che risulta in una specifica DVL. Tale intuizione è giustificata dal fatto che si può osservare un incremento della velocità al crescere della distanza di visibilità indipendentemente dalla combinazione di raggio e distanza dell'ostruzione che portano alla determinazione del singolo valore di DVL. In un certo senso velocità adottate per condizioni di visibilità confrontabili ma ottenute da combinazioni diverse di raggio e distanza dall'ostruzione, sono molto simili tra di loro.

Quello che risulta davvero importante all'interno del campo di DVL analizzato, è il legame quantificato, che ribadisce come distanza di visibilità e velocità siano tra di loro legate da una dipendenza che calza perfettamente con un modello di regressione lineare. La relazione tra le due variabili è descritta da una retta a pendenza crescente che calza perfettamente i dati ottenuti dall'esperimento, specialmente considerando unicamente il verso di percorrenza destrorso anche se risultati molto buoni si riscontrano anche per il verso di percorrenza sinistrorso e considerando tutte le condizioni di visibilità senza distinzione tra verso di percorrenza. In quest'ultima situazione si è introdotto anche un modello di regressione non più lineare, ma di potenza che vuole essere di spunto per l'analisi futura di più ampi spettri di DVL.

In futuro si potrebbe investigare se valori di DVL, qui garantiti per una percorrenza sinistrorsa delle curve trovino lo stesso comportamento nel caso essi siano garantiti da curve con verso di percorrenza destrorso. Importante sarebbe cercare di validare il modello di regressione trovato, coinvolgendo alcuni test-driver, e valutare se il loro comportamento lo convalida.

Sicuramente in futuro si consiglia di estendere il campo di variazione di DVL ad almeno 500 m, valutare quale modello di regressione risulti in questi casi e soprattutto valutare oltre quali valori di DVL non vi sia più alcuna influenza sulla velocità, ovvero identificare una sorta di condizione limite che possa verificare quanto espresso da Yagar & Van Aerde (1983) secondo i quali l'effetto della visibilità si perde quando questa è superiore a 500 m. Gli spunti futuri di ricerca non mancano ed investigare essi non può che essere utile per confermare il lavoro svolto nell'ambito della presente tesi, sempre con lo scopo di studiare il comportamento del guidatore in vista di strumenti progettuali che possano portare alla stima degli effetti della distanza di visuale libera sulla velocità e rendere le strade più sicure agli utenti per una società più avanzata e veramente moderna.

6. Bibliografia completa

- American Association of State Highway Transportation Officials., (2010). Highway safety manual. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Anderson, J. R., Matessa, M., & Lebiere, C. (1997). ACT-R: A theory of higher level cognition and its relation to visual attention. *Human-Computer Interaction*, 12(4), 439-462.
- Antonson, H., Mårdh, S., Wiklund, M., & Blomqvist, G. (2009). Effect of surrounding landscape on driving behaviour: A driving simulator study. *Journal of Environmental Psychology*, 29(4), 493-502.
- Appleyard, D., Lynch, K., & Myer, J. R. (1964). The view from the road.
- Assum, T. (1997). Attitudes and road accident risk. *Accident Analysis & Prevention*, 29(2), 153-159.
- Bella, F. (2005a). Operating speed predicting models on two-lane rural roads from driving simulation. In *84th Annual Meeting Transportation Research Board*. Transportation Research Board.
- Bella, F. (2005b). Speeds and lateral placements on two-lane rural roads: analysis at the driving simulator. In *13th International Conference "Road Safety on Four Continents"*.
- Bella, F. (2009). Can driving simulators contribute to solving critical issues in geometric design?. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2138), 120-126.
- Bella, F. (2013). Driver perception of roadside configurations on two-lane rural roads: Effects on speed and lateral placement. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 251-262.
- Bella, F., & Calvi, A. (2013). Effects of simulated day and night driving on the speed differential in tangent–curve transition: a pilot study using driving simulator. *Traffic injury prevention*, 14(4), 413-423.
- Ben-Bassat, T., & Shinar, D. (2011). Effect of shoulder width, guardrail and roadway geometry on driver perception and behavior. *Accident Analysis & Prevention*, 43(6), 2142-2152.
- Benedetto, A., Calvi, A., D'Amico, F., & Zakowska, L. (2009). The effect of curve characteristics on driving behavior: a driving simulator study. In *88th TRB Annual Meeting*.
- Blaauw, & Van der Horst, (1982). Lateral Positioning Behaviour of Car Drivers Near Tunnel Walls. Final Report (Report IZF 1982 C-30). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- Brandt, T., Wist, E. R., & Dichgans, J. (1975). Foreground and background in dynamic spatial orientation. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 17(5), 497-503.
- Brenac, T., (1989). Speed, Safety and Highway Design. *Recherche Transports Securite*, Vol. 5, pp. 69-74.
- Brenac, T. (1996). Safety at curves and road geometry standards in some European countries. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1523), 99-106.
- Brüde, U., & Peter, W. (1998). 13-m vägar o samband utformning, hastighet och olyckor. *PM rev*, 01-21.

- Calvi, A. (2015a). A study on driving performance along horizontal curves of rural roads. *Journal of Transportation Safety & Security*, 7(3), 243-267.
- Calvi, A. (2015b). Does Roadside Vegetation Affect Driving Performance? Driving Simulator Study on the Effects of Trees on Drivers' Speed and Lateral Position. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2518), 1-8.
- Calvi, A., & De Blasiis, M. (2011). Driver behavior on acceleration lanes: driving simulator study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2248), 96-103.
- Calvi, A., Benedetto, A., & De Blasiis, M. R. (2012). A driving simulator study of driver performance on deceleration lanes. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 195-203.
- Carsten, O., (2002). Multiple perspectives. In R. Fuller & J. A. Santos (Eds.), *Human factors for highway engineers* (pp. 11–22). New York: Pergamon, Elsevier Sciences.
- Charlton, S. G. (2007). The role of attention in horizontal curves: A comparison of advance warning, delineation, and road marking treatments. *Accident Analysis & Prevention*, 39(5), 873-885.
- Choueiri, E. M., Lamm, R., Kloeckner, J. H., & Mailaender, T. (1994). Safety aspects of individual design elements and their interactions on two-lane highways: international perspective. *Transportation Research Record*, (1445).
- CognitiveFun, 2017. [Online] Available at: <http://cognitivefun.net/>
- Cohen, A. S., & Studach, H. (1977). Eye movements while driving cars around curves. *Perceptual and motor skills*, 44(3), 683-689.
- Comte, S. L., & Jamson, A. H. (2000). Traditional and innovative speed-reducing measures for curves: an investigation of driver behaviour using a driving simulator. *Safety Science*, 36(3), 137-150.
- CookingHacks, 2017. *e-Health Sensor Platform V2.0 for Arduino and Raspberry Pi*. [Online] Available at: <https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/ehealth-biometric-sensor-platform-arduino-raspberry-pi-medical/>
- Coutton-Jean, C., Mestre, D. R., Goulon, C., & Bootsma, R. J. (2009). The role of edge lines in curve driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(6), 483-493.
- De Waard, D., Jessurun, M., Steyvers, F.J., Raggatt, P.T., Brookhuis, K.A., 1995. Effect of road layout and road environment on driving performance, drivers' physiology and road appreciation. *Ergonomics* 38 (7), 1395–1407
- Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In *Perception* (pp. 755-804). Springer Berlin Heidelberg.
- Drottenborg, H. (2002). Are beautiful traffic environments safer than ugly traffic environments?. *Bulletin/Lunds tekniska högskola, Institutionen för teknik och samhälle, Lunds universitet*, 211.

- Elvik, R. (1995). The safety value of guardrails and crash cushions: a meta-analysis of evidence from evaluation studies. *Accident Analysis & Prevention*, 27(4), 523-549.
- Felipe, E., & Navin, F. (1998). Automobiles on horizontal curves: experiments and observations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1628), 50-56.
- Fisher, D. L., Rizzo, M., Caird, J., & Lee, J. D. (Eds.). (2011). *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*. CRC Press.
- Fuller, R., & Santos, J. A. (Eds.). (2002). *Human factors for highway engineers*. Amsterdam, The Netherlands: Pergamon.
- Gawron, V. J., & Ranney, T. A. (1990). Curve negotiation performance in a driving simulator as a function of curve geometry. *Applied ergonomics*, 21(1), 33-38.
- Gibson, J. J., & Crooks, L. E. (1938). A theoretical field-analysis of automobile-driving. *The American journal of psychology*, 51(3), 453-471.
- Glennon, J. C., Neuman, T. R., & Leisch, J. E. (1983). *SAFETY AND OPERATIONAL CONSIDERATIONS FOR DESIGN OF RURAL HIGHWAY CURVES. FINAL REPORT* (No. FHWA-RD-83-035).
- Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2004). Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds. *Ergonomics*, 47(3), 237-256.
- Green, P. (1994). Driver workload as a function of road geometry: A pilot experiment.
- Hauer, E. (2000). Shoulder width, shoulder paving and safety. *unpublished draft*. Toronto: RoadSafetyResearch.com, March. <http://ca.geocities.com/hauer@rogers.com/Pubs/Shoulderwidth.pdf>.
- Herrin, G. D., & Neuhardt, J. B. (1974). An empirical model for automobile driver horizontal curve negotiation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 16(2), 129-133.
- Hummer, J. E., Rasdorf, W., Findley, D. J., Zegeer, C. V., & Sundstrom, C. A. (2010). Curve collisions: road and collision characteristics and countermeasures. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2(3), 203-220.
- Istat, ACI, (2016). Incidenti stradali anno 2015.
- Jamson, S., Lai, F., & Jamson, H. (2010). Driving simulators for robust comparisons: A case study evaluating road safety engineering treatments. *Accident Analysis & Prevention*, 42(3), 961-971.
- Janssen, W. H., De Ridder, S., Brouwer, R. F. T., Thomson, R., Fagerlind, H., Lanner, G., ... & Papi, J. (2006). *Roadside infrastructure for safer European roads: D02 Summary of driver behaviour and driver interactions with roadside infrastructure*.
- Kanellaidis, G., Golias, J., & Efstathiadis, S. (1990). Drivers' speed behaviour on rural road curves. *Traffic Engineering and Control*, 31(7-8), 414-415.

- Kanellaidis, G., Zervas, A., & Karagioules, V. (2000). Drivers' risk perception of road design elements. *Transportation Human Factors*, 2(1), 39-48.
- Kemeny, A., & Panerai, F. (2003). Evaluating perception in driving simulation experiments. *Trends in cognitive sciences*, 7(1), 31-37.
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3), 203-220.
- Knoflacher, H. & Gatterer, G. (1981) Der Einfluss Seitlicher Hindernisse auf die Verkehrssicherheit. Kuratorium fuer Verkehrssicherheit, Wenen.
- Kraus, J. F., Anderson, C. L., Arzemanian, S., Salatka, M., Hemyari, P., & Sun, G. (1993). Epidemiological aspects of fatal and severe injury urban freeway crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 25(3), 229-239.
- Lee, J., & Mannering, F. (2002). Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 34(2), 149-161.
- Lippold, C., Dietze, M., & SCHEUCHENPFLUG, R. (2006). Einfluss der Strassenbepflanzung und Seitenraumgestaltung auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer und auf die Sicherheit im Strassenverkehr/Influence of Roadside Vegetation on Driver Behaviour and Road Safety. *Straße Und Autobahn*, 57(11).
- Lunenfeld, H., & Alexander, G. J. (1990). *User's Guide to Positive Guidance*(No. FHWA/SA-90/017).
- Macura, D. (1984). Psychological factor in dimensioning of the horizontal road curves.
- Marconi, W. (1977). Speed control measures in residential areas. *Traffic Engineering*, 47(3), 28-30.
- Martens, M. H., Compte, S., & Kaptein, N. A. (1997). The effects of road design on speed behaviour: a literature review.
- McGee, H. W., & Hanscom, F. R. (2006). *Low-cost treatments for horizontal curve safety* (No. FHWA-SA-07-002).
- Michie, J. D., & Bronstad, M. E. (1994). Highway guardrails: Safety feature or roadside hazard?. *Transportation Research Record*, (1468).
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, (2001). Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade. *Decreto Ministeriale*, 6792.
- Misaghi, P., & Hassan, Y. (2005). Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads. *Journal of transportation Engineering*, 131(6), 408-418.

- Moreno, A. T., Garcia, A., Camacho-Torregrosa, F. J., & Llorca, C. (2013). Influence of highway three-dimensional coordination on drivers' perception of horizontal curvature and available sight distance. *IET Intelligent Transport Systems*, 7(2), 244-250.
- Nelson, T. M. (1997). Fatigue, mindset and ecology in the hazard dominant environment. *Accident Analysis & Prevention*, 29(4), 409-415.
- National Highway Traffic Safety Administration. (1989). General Estimates System 1989—A Review of Information on Police-Reported Traffic Crashes in the United States. *National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC*.
- National Highway Traffic Safety Administration, (1991). General Estimates System. A Review of Information on Police- Reported Traffic Crashes in the United States. *Washington, DC: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration*.
- National Highway Traffic Safety Administration, (2008). Fatality analysis reporting system. Retrieved from <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/Pubs/811171.pdf>
- Nunes, L. M., & Recarte, M. A. (2005). SPEED, TRAFFIC COMPLEXITY AND VISUAL. *Traffic and transport psychology: Theory and application*, 339.
- OECD Road Research Group. (1990). Behavioural Adaptations to Changes in the Road Transport System.
- Ritchie, M. L., Mccoy, W. K., & Welde, W. L. (1968). A Study of the Relation between Forward Velocity and Lateral Acceleration in Curves During Normal Driving¹. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 10(3), 255-258.
- Rosey, F., Auberlet, J. M., Moisan, O., & Dupré, G. (2009). Impact of narrower lane width: Comparison between fixed-base simulator and real data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2138), 112-119.
- Rudin-Brown, C.M., Williamson, A., Lenne, M.G., (2009). Can driving simulator can be used to predict changes in real-world crash risk? Monash University Accident Research Center, Report No. 299.
- Rushton, S. K., & Salvucci, D. D. (2001). An egocentric account of the visual guidance of locomotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(1), 6-7.
- Safetynet, (2009). Roads.
- Said, D., Abd El Halim, A., & Hassan, Y. (2009). Desirable spiral length based on driver steering behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2092), 28-38.
- Sävenhed, H., & Wretling, P. (1996). *Röjningsstandard: effekt på siktsträcka, fordons sidoläge och hastighet*. Statens väg-och transportforskningsinstitut., VTI meddelande 803.

- Sétra. (2006). Landscape and road legibility: some ideas for an approach that brings together road safety and landscape. June 2006. Begneux Cedex, France: Sétra, Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- Shinar, D. (Ed.). (2007). *Traffic safety and human behavior*. Emerald Group Publishing Limited.
- Shinar, D., McDowell, E. D., & Rockwell, T. H. (1977). Eye movements in curve negotiation. *Human Factors*, 19(1), 63-71.
- Shinar, D., Rockwell, T. H., & Malecki, J. A. (1980). The effects of changes in driver perception on rural curve negotiation*. *Ergonomics*, 23(3), 263-275.
- Srinivasan, R., Baek, J., Carter, D., Persaud, B., Lyon, C., Eccles, K. A., ... & Lefler, N. X. (2009). *Safety evaluation of improved curve delineation* (No. FHWA-HRT-09-045).
- Stamatiadis, N., Bailey, K., Grossardt, T., Ripy, J., & Strombotne, A. (2007). Use of Context-Sensitive Methods to Influence Operating Speeds: Case Study of Rural Highway by Casewise Visual Evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2025), 90-97.
- Stamatiadis, N., Pigman, J. G., Sacksteder, J., Ruff, W., & Lord, D. (2009). *Impact of Shoulder Width and Median Width on Safety* (No. Project 15-27).
- Stamatiadis, N., Bailey, K., Grossardt, T., & Ripy, J. (2010). Evaluation of highway design parameters on influencing operator speeds through casewise visual evaluation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2195), 143-149.
- Strathman, J. G., Dueker, K., Zhang, J., & Williams, T. (2001). Analysis of design attributes and crashes on the Oregon highway system.
- Summala, H. (1996). Accident risk and driver behaviour. *Safety Science*, 22(1), 103-117.
- Summala, H. (2005). Traffic Psychology Theories: Towards Understanding Driving Behaviour and Safety Factors. In *International Conference of Traffic and Transport Psychology*.
- Taylor, J.I., McGee, H.W., Seguin, E.L., & Hostetter, R.S., (1972). Roadway delineation systems. National Cooperative Highway Research Program Report no. 130. Washington, DC: Highway Research Board.
- Theeuwes, J., & Godthelp, H. (1995). Self-explaining roads. *Safety science*, 19(2), 217-225.
- Vägverket. (2004). Vägar och gators utformning. [The configuration of roads and streets]. Borlänge, Sweden: Vägverket. Publication 2004:80. Available from: <http://www.vv.se/templates/page3Listing___8090.aspx>.
- Van der Heijden, 1978. *The Influence of Road and Traffic Characteristics in Driving Speeds of Cars* [De Invloed van Weg- en Verkeerskenmerken op Rijsnelheden van Personenauto's]. Nota 1106 van Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding Wageningen, December 1978.

- Van Der Horst, R., & De Ridder, S. (2007). Influence of roadside infrastructure on driving behavior: driving simulator study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2018), 36-44.
- Van der, Horst & Riemersma, 1984. Redesign Traffic Lanes Heinenoord tunnel: Effects on Driving Behaviour? [Herindeling rijstroken Heinenoordtunnel: Effecten op Rijgedrag?] (Memo IZF 1984 M-28). Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors Research Institute.
- Van Winsum, W., & Godthelp, H. (1996). Speed choice and steering behavior in curve driving. *Human factors*, 38(3), 434-441.
- Von Mörner, 1984. Verkehrsberuhigung mit Tempo 30. Städte und Gemeindebund, Vol. 2 Feb., pp. 47-50.
- Wilde, G. J. (1998). Risk homeostasis theory: an overview. *Injury prevention*, 4(2), 89-91.
- Xiao, R. M., Yun, W. G., & Xu, T. B. (2007). Driving safety on long-even-straight-line road on highland. *Chang'an Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*, 27(3), 76-79.
- Yagar, S., & Van Aerde, M. (1983). Geometric and environmental effects on speeds of 2-lane highways. *Transportation Research Part A: General*, 17(4), 315-325.
- Yamanaka, A., & Kobayashi, M. (1970). *Dynamic visibility of motor vehicles* (No. 700393). SAE Technical Paper.
- Zador, P., Stein, H. S., Wright, P., & Hall, J. (1987). Effects of chevrons, post-mounted delineators, and raised pavement markers on driver behavior at roadway curves. *Transportation Research Record*, (1114).
- Zakowska, L. (2010). Operational and Safety Effects of Transition Curves in Highway Design-a Driving Simulator Study. In *4th International Symposium on Highway Geometric Design*.
- Zegeer, C. V., Stewart, J. R., Council, F. M., Reinfurt, D. W., & Hamilton, E. (1992). Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. *Transportation Research Record*, (1356).
- Zhao, X., Guan, W., & Liu, X. (2013). A pilot study verifying how the curve information impacts on the driver performance with cognition model. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.