



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Validazione di un Simulatore di Guida con Sistema di Visione in Realtà Virtuale

Relatori

Prof. Marco Bassani

Ing. Lorenzo Catani

Candidato

Gianmarco Tenca

Dicembre 2019

Sommario

RIASSUNTO	IV
ABSTRACT.....	V
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1 VALIDAZIONE DEI SIMULATORI DI GUIDA	1
1.1 VALIDAZIONE FISICA E COMPORTAMENTALE	1
1.2 VALIDITÀ INTERNA ED ESTERNA	2
1.3 VALIDITÀ ASSOLUTA E RELATIVA	3
1.4 STUDI DI VALIDAZIONE	4
1.4.1 Velocità	4
1.4.2 Traiettoria	10
1.5 REALTÀ VIRTUALE (VR)	12
1.6 MALESSERE DA SIMULAZIONE (<i>SIMULATOR SICKNESS</i>)	13
1.7 IMMERSIONE E PRESENZA.....	15
1.8 ACQUISIZIONE DATI SOGGETTIVI	16
1.8.1 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)	16
1.8.2 Sviluppi del SSQ	17
1.8.3 Misura dell'esperienza	18
CAPITOLO 2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE	19
2.1 STRUMENTAZIONE	20
2.1.1 Simulatore di guida	20
2.1.2 Sistema di realtà virtuale	22
2.1.3 Registrazione dei dati in campo reale.....	23
2.2 VEICOLO VIRTUALE	24
2.3 I TRACCIATI	25
2.3.1 Il circuito di Stupinigi.....	26
2.3.2 I tracciati di prova.....	27
2.4 GUIDATORI.....	28
2.5 PROTOCOLLO SPERIMENTALE	30
2.6 TEST COGNITIVI	31

2.7	QUESTIONARI	31
2.8	ORGANIZZAZIONE DEI DATI	32
2.8.1	Trasformazione da coordinate locali a cartografiche	33
2.8.2	Confronto delle velocità	35
2.8.3	Confronto delle traiettorie	35
2.9	ANALISI.....	37
2.9.1	Analisi comparativa.....	37
2.9.2	Analisi statistica	37
CAPITOLO 3 RISULTATI - QUESTIONARI E SELEZIONE DEI		
GUIDATORI.....		44
3.1	QUESTIONARI	44
3.1.1	Sensazioni.....	44
3.1.2	Immersione.....	44
3.1.3	Presenza.....	46
3.1.4	Tecnologia usata.....	47
3.1.5	Conseguenze dell'esperienza (<i>Simulator Sickness</i>).....	48
3.2	TEST COGNITIVI	50
3.3	SCELTA DEI GUIDATORI.....	51
CAPITOLO 4 RISULTATI – VELOCITÀ.....		62
4.1	CONFRONTO REALTÀ E SISTEMA VR.....	62
	Tratto 0	63
	Tratto 1	64
	Tratto 2	65
	Tratto 3	69
	Tratto 4	71
	Tratto 6	72
	Tratto 7	75
4.2	CONFRONTO TRA L'INTERFACCIA VR E L'INTERFACCIA 3 SCHEMI.....	76
	Tratto 0	77
	Tratto 1	78
	Tratto 2	79
	Tratto 3	82
	Tratto 4	83
	Tratto 6	84

Tratto 7	87
CAPITOLO 5 RISULTATI – TRAIETTORIE	88
5.1 DISTANZA DI ANTICIPAZIONE	90
5.2 VARIAZIONE DI CURVATURA LUNGO LE CURVE DI TRANSIZIONE	94
5.3 CURVATURA MEDIA LUNGO LE CURVE CIRCOLARI	98
CAPITOLO 6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	101
CAPITOLO 7 CONCLUSIONI	106
BIBLIOGRAFIA	110
ALLEGATI	116
ALLEGATO 1	116
ALLEGATO 2.....	117
ALLEGATO 3.....	118
ALLEGATO 4.....	120
ALLEGATO 5.....	121
ALLEGATO 6.....	125
ALLEGATO 7.....	131
ALLEGATO 8.....	132
ALLEGATO 9.....	133
ALLEGATO 10.....	135
ALLEGATO 11	138

Il simulatore di guida del Politecnico di Torino è stato dotato di un sistema di visione di realtà virtuale. Prima di svolgere una qualsiasi ricerca, e per comprendere se i dati ottenuti al simulatore possano essere trasferiti al mondo reale, il nuovo componente deve essere validato dal punto di vista comportamentale. È stato condotto un esperimento coinvolgendo 33 *test driver* in una guida simulata, su un circuito costituito da strade extraurbane a due corsie e diviso in 7 tratti, separati da rotatorie e intersezioni a raso. I dati registrati al simulatore sono stati confrontati con dati derivanti da guide naturalistiche svolte sullo stesso circuito. Entrambe le guide sono avvenute in condizione di flusso libero. Il confronto è stato effettuato attraverso un'analisi comparativa e un'analisi statistica per verificare la validità assoluta e/o relativa del simulatore con il nuovo sistema di visione.

Il comportamento longitudinale del guidatore è stato valutato attraverso i dati di velocità estratti ogni 100 m, analizzando in totale 127 sezioni. La validità assoluta è stata raggiunta nel 29% dei casi, principalmente all'inizio di ogni tratto durante la fase di accelerazione. Nei restanti punti di misura, le velocità medie misurate nell'ambiente virtuale sono risultate maggiori di quelle registrate sul campo, con una differenza significativa e sempre positiva.

Il comportamento trasversale del guidatore è stato studiato considerando solo un tratto del circuito, lungo 3.65 km, valutando la distanza di anticipazione media, la variazione di curvatura media lungo gli elementi di transizione e la curvatura media adottata nei tratti curvilinei. Per le prime due grandezze non è stata raggiunta la validità assoluta, tuttavia le distanze di anticipazione in ambiente simulato sono risultate sempre maggiori di quelle misurate in campo reale; invece la variazione di curvatura media misurata nell'ambiente virtuale è risultata sempre inferiore. Infine, la validità assoluta è stata ottenuta per i valori di curvatura media lungo le curve con ampio raggio (550 m) e lunghezza inferiore a 110 m. Nelle curve restanti, la prima caratterizzata da piccolo raggio (80 m), e l'ultima caratterizzata da raggio e lunghezza superiore a 500 m, la curvatura media simulata (in valore assoluto) è risultata maggiore di quella ottenuta in ambiente reale.

In conclusione, sia per il comportamento longitudinale, sia per quello trasversale, si può assumere la validazione relativa del sistema di realtà virtuale.

The fixed-base driving simulator at the Politecnico di Torino has been recently equipped with a Virtual Reality vision system (VR). Before doing any research, and to understand if driving performance data collected by the simulator can be exported to the real world, the new system needs to be validated. To this scope, thirty-three test drivers were involved in a simulator driving experiment. The circuit is made up of 7 two-lane rural road segments, separated by intersections and roundabouts. Data collected by the simulator was compared with naturalistic observations carried out on the same real road circuit. Naturalistic and simulated drivings were carried out in free-flow conditions. Comparative and statistical analyses were used to verify absolute or relative validity of the simulator with the VR.

Driver longitudinal behavior was evaluated by speed data extracted at 100 m intervals along the circuit; overall 127 sections were analyzed. The absolute validity was achieved in 29% of cases, mainly along the initial part of each segment (where drivers accelerate to reach their preferred speed). In other measure points, mean virtual speed was higher than the real one, positive and statistically significant difference was always found, thus leading to a relative validity.

To evaluate transversal behavior of drivers, only a 3.65 km road section was considered. Data collected refers to anticipatory distance entering and exiting from compound curves (spiral-circular arc-spiral), average curvature change rate, and average curvature in circular arcs. For the first two variables, a relative validity was achieved: mean anticipatory distances collected in virtual environment were found always higher than those measured in the field, while virtual average curvature change rate was lower than the real one. Absolute validity was established for average curvature in circular arcs with radius equal to 550 m and length lower than 110 m. In other curves, one with small radius (80 m) and the others with radius values and length greater than 500 m, absolute curvature values related to the virtual scenario were higher than values observed in field.

In conclusion, a relative validity of the VR system was achieved both for longitudinal and transversal behavior.

Introduzione

L'utilizzo dei simulatori è comune a numerose discipline, caratterizzate dal rischio che l'errore umano possa generare eventi dannosi per i singoli individui, l'ambiente e la società. Lo scopo di un simulatore è di riprodurre un ambiente virtuale rappresentativo del mondo reale, sicuro per gli utenti e che consenta ai ricercatori di raccogliere dati rappresentativi della realtà (Taheri, 2017).

Già i settori aeronautico e ferroviario utilizzano da tempo la simulazione per addestrare le figure professionali di piloti e macchinisti, riproducendo in modo verosimile contesti ordinari e situazioni di emergenza. In ambito stradale, il simulatore è soprattutto usato per scopi di ricerca al fine di:

- misurare le prestazioni di guida e sviluppare modelli comportamentali specifici in determinate condizioni operative (per diversi livelli di traffico, tipologie di strada, e condizioni ambientali specifiche);
- valutare le prestazioni in funzione di cambiamenti legati all'età, all'uso di sostanze nocive, allo sviluppo di malattie;
- misurare la risposta comportamentale al variare dei parametri geometrici dell'infrastruttura stabiliti con la progettazione stradale.

I moderni simulatori di guida consentono di valutare il comportamento dei conducenti lungo un'infrastruttura prima che questa sia realizzata. La rappresentazione virtuale di un qualsivoglia scenario può essere controllata agendo sulle caratteristiche del veicolo, del traffico, del tracciato e dell'ambiente. Ad esempio, è possibile selezionare il materiale della pavimentazione stradale e del terreno adiacente, variare le condizioni meteorologiche, fissare le caratteristiche meccaniche dei veicoli e generare traffico in una specifica posizione del tracciato. Infine, l'utilizzo dei simulatori consente agli utenti di guidare, nelle medesime condizioni, all'interno di un ambiente simile a quello reale, ma controllato e sicuro. Il comportamento del conducente può essere valutato in situazioni di guida pericolose che difficilmente sarebbero osservabili in ambiente reale senza compromettere l'incolumità del guidatore stesso e di altri utenti della strada. È possibile,

ad esempio, valutare le prestazioni di guida condizionate da uno stato psico-fisico alterato, causato da sonnolenza, farmaci o altre sostanze.

Sono presenti anche aspetti negativi. La simulazione rimane un'approssimazione della realtà che è molto difficile da riprodurre. Durante la guida simulata la non perfetta corrispondenza di alcune componenti del simulatore (pedali, sterzo) e la consapevolezza della mancanza di rischio, possono indurre l'utente ad assumere un comportamento diverso da quello adottato nell'ambiente reale. Inoltre, il simulatore è anche fonte di malessere (*simulator sickness*) derivante da un conflitto di stimoli sensoriali o dalle strumentazioni utilizzate durante l'esperimento. I sintomi che si verificano possono essere tali da influenzare negativamente il comportamento dei partecipanti fino a renderli inabili a completare la guida.

I simulatori sono strumenti per la raccolta dati. Lo studio di validazione è una componente chiave per affermare se i dati raccolti nell'ambiente virtuale siano rappresentativi dei comportamenti reali che possono essere misurati con un'osservazione sul campo. Pertanto, prima di essere utilizzati, i simulatori devono essere validati effettuando un confronto tra dati raccolti nei due ambienti (Shechtman, 2009).

La validazione può riguardare la dinamica del simulatore (validazione fisica) o le prestazioni degli utenti (validazione comportamentale). I principali studi di validazione analizzano il comportamento longitudinale e trasversale dei conducenti al simulatore. Il primo è principalmente valutato in funzione della velocità adottata lungo il tracciato considerato; il secondo è definito dalla posizione del veicolo lungo la corsia di marcia. Per tutti gli esperimenti considerati in letteratura, l'ambiente virtuale è sempre stato riprodotto su uno o più schermi bidimensionali, mai mediante il ricorso alla realtà virtuale.

La presente tesi ha l'obiettivo di validare dal punto di vista comportamentale il sistema di realtà virtuale integrato al simulatore di guida del Politecnico di Torino. Il nuovo sistema di visualizzazione è costituito da una periferica (visore ottico), che può essere indossata come una maschera, in grado di trasformare l'ambiente virtuale in uno spazio 3D esplorabile dall'utente. Per la sua validazione, è stato quindi condotto un esperimento che ha coinvolto 33 partecipanti su un circuito diviso in 7 tratti che riproduce il tracciato circostante la Palazzina di Caccia di Stupinigi (Nichelino, TO).

L'analisi dei dati è stata eseguita con le metodologie di un precedente studio di validazione, nel quale era stato preso in considerazione lo stesso simulatore di guida ma con un'interfaccia di visualizzazione diversa, costituita da tre schermi LCD affiancati. Per analizzare il comportamento longitudinale sono stati confrontati i profili di velocità media misurati in ambiente reale e in quello simulato. Il comportamento trasversale, invece, è stato analizzato esclusivamente lungo il Tratto 2 (data la disponibilità dei dati reali), valutando i seguenti elementi: la distanza tra l'inizio della manovra di curvatura e il punto finale di un elemento rettilineo o curvilineo (chiamata distanza di anticipazione), la variazione di curvatura lungo gli elementi di transizione, e la curvatura media adottata nei tratti in curva. I dati registrati al simulatore sono stati confrontati con dati analoghi derivanti da guide naturalistiche avvenute sullo stesso circuito. Per stabilire se le prestazioni misurate in ambiente simulato fossero identiche a quelle reali (validità assoluta) è stata condotta una specifica analisi statistica.

Tale identità è stata raggiunta per le velocità nei tratti di accelerazione all'inizio di ogni tratto, e per i valori di curvatura media misurati lungo le curve con raggio pari a 550 m e lunghezza inferiore a 110 m. Per le altre variabili, la differenza tra i valori simulati e quelli reali è risultata significativa, e con segno costante in tutti i punti di misura (validità relativa). In particolare, i valori al simulatore sono risultati maggiori per le seguenti variabili: velocità (nelle altre fasi diverse da quella di accelerazione), distanza di anticipazione, curvatura media adottata dai partecipanti lungo la prima curva del Tratto 2, caratterizzata da raggio pari a 80 m, e l'ultima curva dello stesso tratto avente raggio e lunghezza superiore a 500 m; invece i valori relativi alla variazione di curvatura sono risultati sempre maggiori in ambiente reale.

Il lavoro di tesi è stato supportato da un'analisi della letteratura riguardante i principali studi di validazione comportamentale di un simulatore di guida, e le ricerche utilizzate per costruire i questionari sottoposti ai partecipanti. Successivamente è presentata l'attività sperimentale: gli strumenti, i tracciati, i questionari utilizzati, e le procedure adottate per acquisire e analizzare i dati. La tesi si conclude con la presentazione dei risultati a supporto del confronto tra le guide svolte in ambiente reale e quelle simulate con il sistema di realtà virtuale. È presente anche un ulteriore confronto tra queste ultime e i dati delle guide svolte al simulatore adoperando la precedente interfaccia di visualizzazione (schermi 2D). In definitiva, il sistema di realtà virtuale è risultato validato in modo relativo.

Capitolo 1

Validazione dei simulatori di guida

Negli studi di validazione sui simulatori di guida si pongono a confronto due diverse misure, quelle raccolte in ambiente reale che rappresentano il riferimento assoluto, e quelle raccolte nell'ambiente simulato. Ciò avviene nel corso di esperimenti in cui le caratteristiche del veicolo e le condizioni ambientali sono rese simili a quelle in cui è stata rilevata la guida reale (Leonard e Wierwille, 1975). La validità è stabilita per un contesto operativo specifico (Allen et al, 1979) non può essere trasferita a un qualunque altro simulatore per semplice similitudine (Hoskins e El-Gindy 2006). La validazione è tipicamente condotta misurando e confrontando più variabili indicative di uno stato fisico del veicolo o di una scelta legata al comportamento del guidatore.

Non è esclusa la validazione per una sola parte delle variabili osservate, ed essa può essere assoluta (uguaglianza di risultati) o relativa (differenza dello stesso segno tra valori delle variabili misurate).

1.1 Validazione fisica¹ e comportamentale²

La validazione fisica (*physical validity*) si esegue attraverso il confronto delle caratteristiche dinamiche del simulatore con quelle di un veicolo reale di cui si vuole riprodurre il comportamento su strada. Questo tipo di validazione è di esclusivo interesse per i progettisti di simulatori (Espie et al. 2005), i quali vogliono assicurarsi che gli stimoli percepiti dallo stesso guidatore siano identici, o almeno confrontabili, nei due ambienti (Triggs, 1996). La validazione fisica può essere ricercata solo nei simulatori di guida a

¹ In altri studi lo stesso concetto viene definito anche “valutazione analitica” (Mudd, 1968; McCormick, 1970); “corrispondenza fisica” (Brown, 1975; Blaauw, 1982); “validazione intrinseca” (Espie et al. 2005).

² In altri studi lo stesso concetto viene definito anche “valutazione empirica” (Mudd, 1968; McCormick, 1970); “corrispondenza comportamentale” (Brown, 1975; Blaauw, 1982); “validazione per obiettivo” (Espie et al. 2005).

base mobile, gli unici in grado di fornire un *feedback* dinamico al guidatore, mentre non ha alcun senso ricercarla nei simulatori a base fissa.

Diversa è la validità di tipo comportamentale (*behavioral validity*), con la quale si pongono a confronto le variabili che caratterizzano il comportamento del guidatore (Godley, 2002). In questo tipo di validazione, è necessario misurare grandezze riconducibili alle azioni dirette del guidatore sui comandi, pedali e volante su tutti (Blaauw, 1982).

Negli studi di validazione si è soliti distinguere le variabili caratterizzanti il cosiddetto *comportamento longitudinale* attraverso l'azione sui pedali (es. velocità, accelerazioni), da quelle caratterizzanti il *comportamento trasversale* attraverso l'azione sul volante (es. distanza dal margine laterale o dalla linea centrale). Le due serie di misure, raccolte dalle osservazioni su strada e dagli esperimenti al simulatore, dovranno necessariamente essere state influenzate dagli stessi fattori caratterizzanti l'ambiente stradale (geometria dell'infrastruttura, prestazioni del veicolo, traffico, condizioni di visibilità e di illuminamento ambientale).

Storicamente, i primi esperimenti di validazione consideravano la sola corrispondenza fisica. L'obiettivo di coloro che svilupparono i primi simulatori era quello di riprodurre nel modo più fedele possibile tutti i segnali tipici dell'ambiente stradale (informazioni visive, sonore, dinamica del veicolo). Solo più recentemente è stato osservato che un simulatore validato da un punto di vista fisico può non raggiungere una validità comportamentale (Flexman e Stark, 1987; Triggs, 1996). In ragione di ciò, per un simulatore è assai più importante raggiungere una validazione di tipo comportamentale anziché quella fisica (Godley, 2002).

L'uso dei simulatori a base fissa nell'ambito della ricerca è ovviamente possibile solo se la validazione comportamentale è stata conseguita.

1.2 Validità interna ed esterna

Negli studi di simulazione è fatta inoltre distinzione tra validazione “interna” ed “esterna” (Kaptein et al., 1996). La validità interna riguarda la relazione causa-effetto nell'ambiente virtuale, ossia che la variazione di un certo fattore (variabile indipendente) produca o

meno la variazione di una variabile da esso dipendente. Tale validità può non essere raggiunta a causa dei limiti del simulatore.

Ad esempio, un simulatore caratterizzato da un campo di visione limitato non consente al guidatore di percepire correttamente la velocità che gli deriva dalla visione periferica; in un esperimento in cui sia modificata la larghezza della corsia potrebbero non essere rilevate significative variazioni delle velocità adottate dai partecipanti all'esperimento.

La validità esterna riguarda la possibilità di trasferire i risultati dell'ambiente virtuale, in determinate condizioni sperimentali, a quello reale. In altri termini, con validità esterna si pone l'attenzione sui rapporti di causa-effetto nei due ambienti, reale e simulato. Le scelte fatte durante la progettazione dell'esperimento, come ad esempio il tipo di strada o il campione di guidatori coinvolti, possono limitare la trasferibilità dei risultati.

1.3 Validità assoluta e relativa

Blaauw (1982) introdusse per primo i concetti di validità "relativa" e "assoluta". La validità assoluta (*absolute validity*) richiede che i risultati ottenuti nei due ambienti di guida, in termini di media e deviazione standard, abbiano gli stessi valori numerici, o comunque siano quasi uguali. Poiché l'esperienza al simulatore non replica fedelmente quella reale, questo tipo di validità è conseguita solo raramente (Mullen et al, 2011). La validità relativa (*relative validity*) è conseguita quando la differenza tra misure corrispondenti tra ambiente reale e ambiente simulato ha lo stesso segno in diversi punti di misura.

Per considerare il simulatore uno strumento di ricerca, la validità relativa è necessaria, quella assoluta non è essenziale (Tornos, 1998). In molti esperimenti, più che la misura assoluta dell'effetto prodotto dalla variazione di un certo fattore, è più importante capire in quale direzione vada la variabile dipendente da tale fattore (se diminuisce o cresce in ragione di una variazione nota di tale fattore). Con riferimento all'esempio del paragrafo precedente, per un progettista è più importante capire se per una data strada, la riduzione della larghezza della corsia comporti un incremento o una riduzione delle velocità operative, al di là della variazione di velocità effettivamente ottenuta.

1.4 Studi di validazione

Tutti i principali studi di validazione comportamentale, riguardanti l'analisi della velocità o la traiettoria del veicolo, sono stati svolti lungo strade extraurbane, considerando esclusivamente veicoli in condizione di flusso libero.

1.4.1 Velocità

Blaauw, nel 1982, fu uno dei primi ricercatori ad affrontare il problema della validità comportamentale, concentrandosi sui valori di velocità registrati con il simulatore a base fissa dell'*Institute for Perception TNO* (Sosterberg, Olanda). L'esperimento è stato condotto su un tratto di rettilineo, in una strada a 4 corsie (due per senso di marcia), considerando quattro diverse condizioni: tre di queste vincolavano la velocità, la traiettoria o entrambe le variabili; la condizione di *free driving*, invece, consentiva al partecipante di comportarsi in modo naturale, senza dover rispettare indicazioni specifiche. I risultati hanno mostrato velocità reali tendenzialmente superiori a quelle adottate in campo simulato, tuttavia il simulatore ha raggiunto la validità assoluta per la condizione di guida libera e quella relativa per le condizioni di guida controllata. I dati, in entrambi gli ambienti, sono stati registrati su un nastro magnetico, con una frequenza di 4 Hz, e successivamente elaborati al computer.

Negli anni a seguire il metodo di acquisizione dei dati cambiò totalmente. Per validare il simulatore di guida VTI a base mobile del *Swedish Road and Transport Research Institute*, si svolsero tre studi di ricerca, ognuno di essi adoperò in campo reale un veicolo strumentato per registrare i dati con un intervallo di 5 metri, mentre in laboratorio i dati vennero registrati automaticamente dal simulatore.

Harms (1993) effettuò l'esperimento su una strada a due corsie lunga 8 km con 12 curve. Il simulatore VTI era dotato di un software di animazione poco sofisticato che permetteva la riproduzione di uno scenario semplice e della sola auto guidata dal *test driver*. Ogni partecipante ha eseguito la stessa guida tre volte in entrambi gli ambienti. L'autore confrontò la velocità media delle guide reali con quella simulata, dimostrando sia la validità assoluta sia quella relativa, con velocità superiori in ambito simulato.

Alm (1996) ripeté lo stesso studio di validazione di Harms, ma adoperando una versione aggiornata del software che consentiva la riproduzione del traffico e di un ambiente

stradale più complesso. In questo caso venne raggiunta la validità assoluta del simulatore. Inoltre, Alm effettuò un confronto sulle velocità attivando e disattivando la base mobile, riscontrando differenze significative tra i valori di varianza, ma non tra i valori medi.

Il terzo studio svolto presso l'istituto svedese è quello di Törnros (1998), che analizzò le prestazioni dei guidatori in due diverse condizioni (tachimetro visibile e oscurato), lungo un tratto di rettilineo e una curva circolare con raggio 375 m, all'interno di una galleria (Ekeberg tunnel, Oslo) non aperta al traffico. La base mobile del simulatore provocò effetti di *simulator sickness* su numerosi partecipanti, pertanto si decise di adoperare il simulatore come se fosse a base fissa. Anche in questo caso la velocità media simulata risultò maggiore di quella reale, tuttavia le due velocità presentavano differenze significative e, rispetto ai precedenti esperimenti, si ottenne solo la validità relativa del simulatore. Inoltre, come mostrato in Figura 1, l'oscuramento del tachimetro indusse i guidatori ad adottare velocità operative più elevate in entrambi gli ambienti.

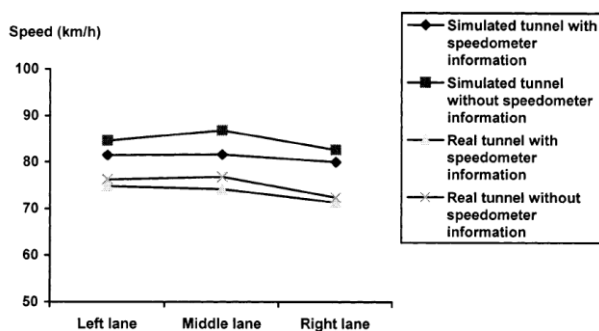


Figura 1 – Velocità media all'interno della galleria, con e senza tachimetro oscurato (Törnros, 1998)

Sia Blaauw che i ricercatori del *VTI simulator* hanno associato ad ogni guida un solo valore di velocità media. Lo studio di Klee (1999), svolto con il simulatore di guida dell'Università di Central Florida, fu il primo a valutare la velocità media in diversi punti del tracciato. I partecipanti guidarono su una strada interna del campus universitario sulla quale furono individuati 8 punti di misura. Le guide di andata e ritorno fornirono quindi 16 valori di velocità per ogni partecipante. In ogni punto fu valutata la velocità media e, successivamente, fu costruito il profilo delle velocità sia per le guide svolte sul campo che in laboratorio. In molti punti (ma non tutti) la velocità reale risultò superiore a quella simulata inoltre, nonostante i valori di velocità fossero simili, i test statistici non dimostrarono la validità assoluta del simulatore. I ricercatori attribuirono il comportamento maggiormente conservativo nell'ambiente virtuale alla bassa qualità dell'immagine e

quindi all'impossibilità dei partecipanti di indentificare correttamente le caratteristiche della carreggiata.

A partire dagli anni 2000, rispetto agli studi fin qui descritti, le ricerche si concentrarono sulla relazione tra geometria del tracciato e velocità adottata. I primi ricercatori furono Godley et al. (2002) e Bittner et al. (2002) che valutarono le prestazioni dei guidatori in curva.

Godley et al. validarono il simulatore con base mobile del *Monash University Accident Research Centre*, valutando la velocità dei conducenti in presenza di bande sonore (siti di trattamento) e in ambienti simili ma privi di bande (siti di controllo). Il comportamento dei guidatori fu analizzato in tre differenti condizioni: in prossimità di un segnale di stop (caso A), di una curva a destra (caso B) e di una curva a sinistra (caso C). Tralasciando l'impatto delle bande sonore e confrontando i profili di velocità relativi ai siti di controllo in ambito reale e simulato, non si poté assumere la validità assoluta del simulatore. Le velocità presentavano differenze significative, in particolare per i casi A e B le velocità simulate risultarono maggiori di quelle adottate in ambiente reale, invece per il caso C le velocità simulate furono inferiori. Inoltre in questo esperimento i ricercatori decisero di coinvolgere un gruppo diverso di guidatori nei due ambienti, ipotizzando che la conoscenza del tracciato inducesse i partecipanti a guidare più velocemente sul simulatore a causa della noia.

Bittner et al., invece, si concentrarono sulle caratteristiche geometriche della curva. L'autore analizzò la velocità media di ingresso in curva, individuando tre tipologie di curve:

- A. *Shallow curve*: curve ad ampio raggio, caratterizzate da un basso grado di difficoltà. In questi casi le velocità in laboratorio risultarono maggiori di quelle reali e, secondo i ricercatori, la guida simulata sarebbe stata influenzata dalla difficoltà del partecipante di riconoscere visivamente la curva e dall'assenza di vento e accelerazione trasversale;
- B. Curve affrontate alla velocità di crossover (23 m/s);
- C. *Sharp curve*: curve a piccolo raggio, caratterizzate da un grado di difficoltà maggiore. In questi casi la bassa risoluzione delle immagini e il campo visivo

limitato avrebbero indotto il guidatore ad adottare velocità simulate inferiori a quelle reali;

Inoltre Bittner effettuò anche un confronto sui profili di velocità media ottenuti in campo reale e simulato (Figura 2). Ad eccezione del caso B, gli altri due evidenziarono risultati significativamente differenti, considerando sia la velocità di ingresso in curva sia quella di percorrenza della curva.

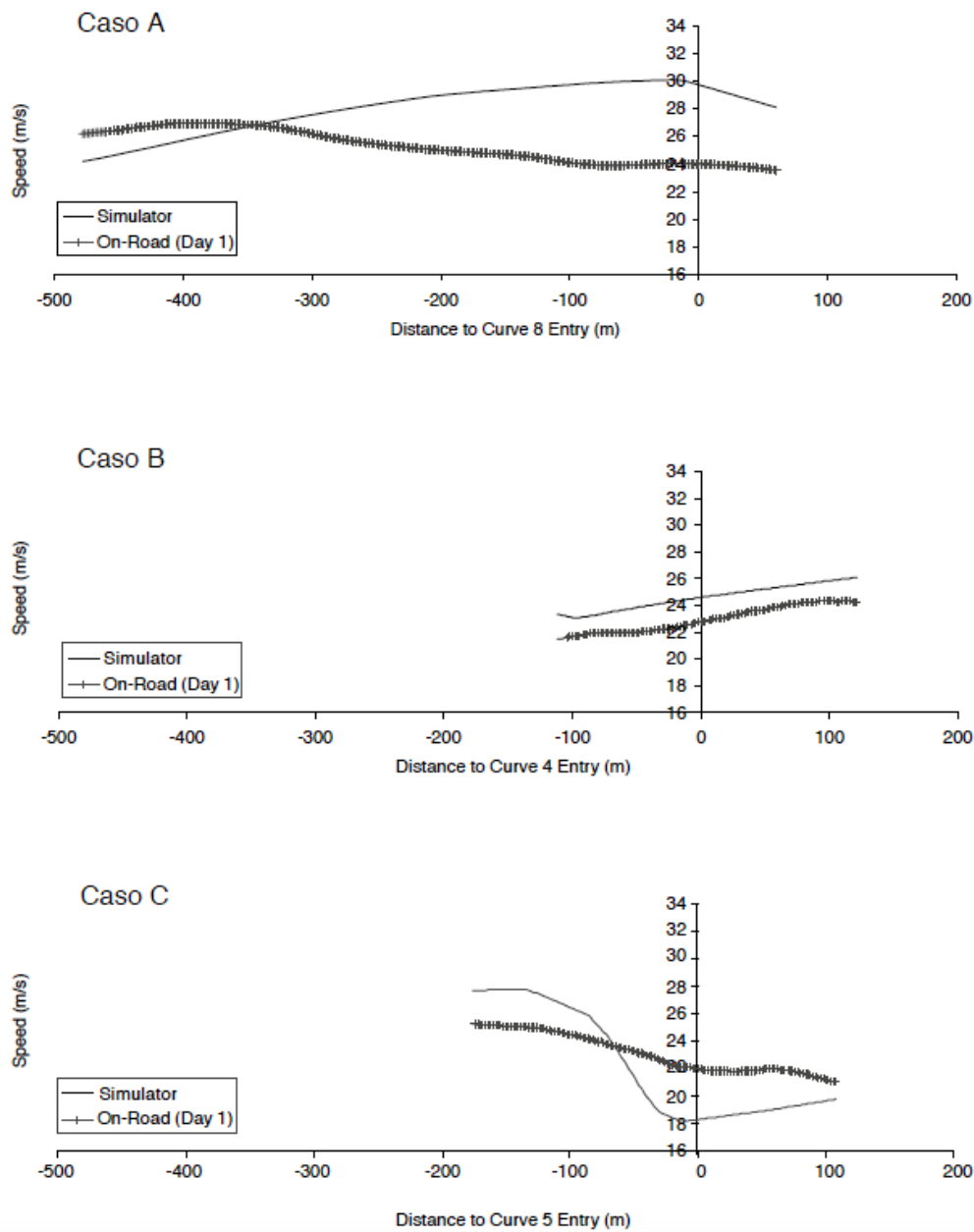


Figura 2 – Profili di velocità media durante l'ingresso in curva

Anche gli studi successivi a Godley e Bittner valutarono come la curvatura stradale potesse influenzare il comportamento dei guidatori, analizzando le prestazioni lungo tracciati, o circuiti, complessi.

Bella (2008) si occupò della validazione dell'*European Inter-University Research Center for Road Safety* (CRISS) a Roma. La ricerca si differenzia dai precedenti esperimenti soprattutto per il metodo di acquisizione dati. Le misure di velocità in campo reale furono registrate in 11 punti di misura (6 in rettilineo e 5 in curva), con un autovelox montato su un veicolo privato e nascosto al traffico. Al simulatore, invece, i dati furono registrati con un intervallo di 5 m. I risultati mostrarono una buona corrispondenza tra le velocità medie dei due ambienti, con 9 siti validati in modo assoluto. La differenza di velocità aumentò percorrendo gli elementi caratterizzati da una minore difficoltà di guida: un lungo rettilineo e una curva con raggio superiore a 500 m. Il simulatore fu validato relativamente in tutti i siti di misura poiché le velocità simulate si rivelarono sempre superiori a quelle reali.

La novità dei tre studi di validazione presentati qui di seguito riguarda il confronto tra i profili di velocità, ottenuti in modo continuo in entrambi gli ambienti (reale e virtuale). L'acquisizione dei dati in campo simulato fu svolta direttamente dal simulatore con una frequenza imposta dal ricercatore, i dati in campo reale furono invece registrati da Ahlström et al. (2012) e Bassani (2018) con un sistema inerziale IMU, montato sul veicolo reale, con una frequenza di campionamento, rispettivamente, di 50 e 10 Hz. Llopis-Castelló et al. (2016), invece, registrò i dati con una frequenza di 10 Hz per mezzo di una camera digitale dotata di GPS.

Ahlström et al. validarono il VTI Simulator III a base mobile. Le guide furono svolte su tre strade, lunghe non più di 3.4 km, situate a sud di Linköping in Svezia:

1. *Road Kisa*: caratterizzata da tratti in rettilineo e curve ad ampio raggio, con limite di velocità fissato a 90 km/h;
2. *Road Nykil*: caratterizzata da un lungo rettifilo e curve a piccolo raggio, con limite di velocità fissato a 80 km/h;
3. *Road Skeda*: caratterizzata da un rettilineo e due curve ad ampio raggio, ma numerose variazioni del limite di velocità.

Per le strade 1 e 2 l'analisi statistica non mostrò differenze significative tra la velocità simulata e quella reale, ottenendo quindi la validità assoluta. Gli autori associarono il risultato alla brevità dei tratti, alla presenza di segnali che ricordavano il limite di velocità e alla mobilità del simulatore. Tuttavia, le differenze aumentarono sulla strada 3, dove la velocità doveva essere regolata frequentemente; infatti in prossimità dei segnali stradali fu riscontrata la sola validità relativa.

Llopis-Castelló et al. validarono il simulatore a base fissa SE²RCO dell'Universitat Politècnica de València. Le velocità furono analizzate lungo un tracciato di 30 km diviso in tre segmenti stradali omogenei: il primo composto da curve di ampio raggio e lunghi rettilinei; il secondo e il terzo caratterizzati da rettilinei e curve a piccolo raggio. I risultati ottenuti dall'analisi statistica, effettuata su 79 curve e 52 rettilinei, validarono in modo assoluto il simulatore nell'86% dei casi. Inoltre, fu anche osservato che per velocità simulate inferiori a 87,66 km/h, la velocità media nel simulatore di guida era simile a quella reale. Invece, per valori simulati superiori a detta soglia (associati a geometrie semplici come rettilinei e curve di ampio raggio), le velocità medie simulate risultarono più elevate, con differenze significative rispetto a quelle reali.

Infine, Bassani et al. (2018) validarono il simulatore a base fissa del Politecnico di Torino effettuando le guide lungo il circuito di Stupinigi. La validità assoluta raggiunta fu del 56% dei casi, principalmente lungo brevi rettilinei, curve circolari con lunghezza ridotta e raggio inferiore a 300 m, e lungo le parti iniziali e finali dei tratti che compongono il percorso (quindi in corrispondenza delle fasi di accelerazione e decelerazione). La validità relativa, invece, fu raggiunta nel 41% dei casi: nelle curve con raggio superiore a 300 m e nei rettilinei lunghi più di 200 m; in tutti questi casi la velocità media del simulatore risultò sempre maggiore di quella reale.

Tabella 1 - Sintesi dei test statistici (Bassani et al, 2018)

Road element	No. of sections	Null hypothesis accepted (absolute validation)	Null hypothesis rejected (relative validation)	
			$V_S > V_R$	$V_S \leq V_R$
Short tangents ($L \leq 200$ m)	2	2 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Long tangents ($L > 200$ m)	64	35 (55%)	27 (42%)	2 (3%)
Curves ($R \leq 300$ m)	23	17 (74%)	6 (26%)	0 (0%)
Curves ($R > 300$ m)	24	9 (38%)	15 (62%)	0 (0%)
Intersection approaches	7	4 (57%)	2 (29%)	1 (14%)
Intersection departures	7	4 (57%)	2 (29%)	1 (14%)
Total	127	71 (56%)	52 (41%)	4 (3%)

Questi ultimi studi mettono in evidenza come la curvatura del tracciato influenzi la velocità adottata dai partecipanti, in particolare la differenza di velocità media tra

ambiente reale e ambiente simulato aumenta in corrispondenza di geometrie più semplici, caratterizzate da curvatura piccola o nulla. Generalmente la velocità simulata risulta maggiore e le cause sono legate a una differente percezione del rischio nei due ambienti (Fuller, 2005) e alla mancanza di accelerazione sul corpo del guidatore durante la guida simulata.

1.4.2 Traiettoria

La maggior parte degli studi di validazione presenti in letteratura valutarono la traiettoria misurando la distanza tra un punto del veicolo e un elemento della segnaletica orizzontale presente sulla strada.

Alcune ricerche presero come riferimento una delle strisce presenti a margine della carreggiata, Blaauw (1982) misurò la distanza tra la linea di margine destro e la posizione del guidatore, oppure Törnros (1998) misurò la distanza tra il centro del veicolo e la linea di margine prossima alla parete più vicina (avendo svolto l'esperimento in galleria). Per entrambi, la distanza media e i relativi valori di deviazione standard registrati al simulatore risultarono più grandi di quelli misurati in ambiente reale, mostrando una differenza statisticamente significativa; pertanto i simulatori furono validati in modo relativo.

Blana & Golias (2002), studiando la validazione del *Leeds Advanced Driving Simulator* (LADS), misurarono la distanza tra la ruota anteriore sinistra e la linea di margine sinistro, quest'ultima, essendo in Inghilterra, risulta essere la linea più vicina al guidatore. Rispetto ai lavori precedenti le misure furono effettuate puntualmente prima della curva, all'inizio, al centro e alla fine della curva e in tre punti lungo il rettilineo. I risultati mostrarono valori di deviazione standard simulati maggiori di quelli reali (coerentemente con i lavori precedenti), invece la distanza media risultò maggiore in campo reale. Un'ulteriore analisi fu eseguita valutando l'effetto della velocità sulla posizione laterale: per la guida reale in rettilineo, ad un aumento della velocità era corrisposto anche un aumento della distanza dal margine esterno. Il comportamento fu spiegato ipotizzando che, durante le guide sul campo, all'aumentare della velocità i conducenti disponevano di un tempo di reazione insufficiente per rispondere alla comparsa di qualcosa di inaspettato sulla strada, quindi è possibile che si sentissero meno sicuri, e di conseguenza aumentassero la loro distanza laterale. Al simulatore, invece, i partecipanti sembrarono non percepire questa sensazione di rischio.

Gli studi di Harms, Alm e Wade & Hammond (1998) invece valutarono la traiettoria misurando la distanza tra la ruota anteriore sinistra e linea centrale che divide i due sensi di marcia. Nessuno dei tre esperimenti raggiunse la validità assoluta del simulatore, tuttavia la distanza registrata in laboratorio risultò sempre inferiore rispetto a quella misurata in ambiente reale.

Harms affermò di aver raggiunto la validità relativa del simulatore e che l'assenza di altre vetture, in direzione opposta a quella del *test driver*, avesse portato i partecipanti ad avvicinarsi maggiormente alla linea centrale durante guida simulata. Questa ipotesi fu confermata da Alm che, utilizzando uno scenario più complesso e inserendo il traffico veicolare nella direzione opposta, riscontrò un incremento del 10% rispetto al valore di distanza misurato da Harms. È possibile quindi che il traffico in arrivo abbia avuto un effetto significativo sulla posizione laterale. Alm affermò anche che durante la guida in curva il sistema a base mobile si rivelò migliore di quello alla base fissa, poiché ridusse al minimo l'effetto di nausea e aiutò il guidatore a mantenere l'auto su una rotta costante lungo la strada.

Tutti gli studi riportati hanno evidenziato la tendenza dei guidatori, in campo simulato, ad avvicinarsi alla linea (di margine o centrale) più vicina alla propria postazione di guida, rispetto a quanto avvenga in campo reale. Inoltre la posizione laterale risulterebbe influenzata dalla mancanza di percezione dello spostamento laterale (Blaauw, Blana & Golias), dalla percezione della corsia stradale (Blana & Golias), dalla presenza del traffico in direzione opposta e dalla mobilità del simulatore (Blaauw, Harms, Alm).

Infine, Catani & Bassani (2018) presentarono un metodo del tutto innovativo per studiare le traiettorie, basato sulla misura di tre parametri: la distanza di anticipazione, la curvatura media adottata lungo un tratto in curva e la variazione di curvatura lungo gli elementi di transizione. Il lavoro avvenne contemporaneamente allo studio di validazione del simulatore del Politecnico di Torino per quanto riguarda la velocità, quindi in ambito reale e simulato vennero utilizzati gli stessi tracciati e le stesse strumentazioni. I risultati mostrarono che, in entrambi gli ambienti di guida, tutti i conducenti anticipavano l'inizio della manovra di sterzata prima di avvicinarsi alla curva di transizione. I valori simulati riguardanti la distanza di anticipazione furono sempre superiori a quelli registrati sul campo, suggerendo quindi la validità relativa; gli autori sostennero che le distanze egocentriche percepite al simulatore siano state costantemente sottostimate se comparate

ad una valutazione delle stesse nel mondo reale. Gli errori commessi anticipando l'inizio della manovra di curvatura, furono compensati riducendo la velocità angolare del volante (ovvero i valori di variazione di curvatura); i valori medi si rivelarono inferiori a quelli di progetto (definiti dalla variazione di curvatura dell'elemento di transizione) e a quelli misurati durante la guida reale, confermando anche in questo caso la validità relativa. Infine, per le curve di lunghezza ridotta (inferiore a 100 m), i valori di curvatura assoluta media osservati sul campo e in laboratorio furono (con una sola eccezione) inferiori a quelli di progetto, dimostrando quindi la validità relativa del simulatore.

1.5 Realtà virtuale (VR)

Il sistema di realtà virtuale ha l'obiettivo di offrire al guidatore un'esperienza di guida altamente immersiva rispetto a quella dei simulatori che utilizzano schermi bidimensionali. Tuttavia, ad oggi, pochi studi hanno preso in considerazione l'uso dei dispositivi VR in attività di ricerca.

Ihemedu-Steinke et al., nel 2015, condussero un esperimento con il simulatore di guida del *Heilbronn University*, utilizzando il dispositivo di realtà virtuale *Oculus Rift*. L'esperimento prevedeva l'esecuzione di una guida simulata in diverse situazioni: guida in curva, marcia indietro, frenata, e reazione all'improvvisa comparsa di una motocicletta per evitare la collisione frontale. L'obiettivo della ricerca fu di ricavare informazioni utili su come migliorare il simulatore, infatti alla fine della guida a ciascun partecipante fu chiesto di compilare il *IGroup Presence Questionnaire* (IPQ), le cui domande riguardavano il confronto tra ambiente reale e ambiente simulato e, domande relative al sistema VR, giudicato positivamente dai partecipanti anche se molti di loro manifestarono sintomi di malessere.

Taheri et al. nel 2017 studiarono le prestazioni di 10 giovani conducenti con il simulatore di guida della *Gifu University* (Giappone), integrato con il dispositivo di realtà virtuale HTC Vive. I partecipanti percorsero per 10 volte un circuito virtuale in cui l'utente doveva affrontare diverse situazioni (regolare la velocità in prossimità di un ponte, oltrepassare un incrocio, controllare l'auto in caso di frenata improvvisa del veicolo che precede). Successivamente fu chiesto loro di compilare un questionario. Lo scopo dell'esperimento fu di valutare l'adattamento degli utenti alla tecnologia VR e come le caratteristiche dell'individuo (es. condizioni fisiche, affaticamento, pazienza,

rilassamento durante la guida, ecc..) potessero influire sulle sue prestazioni. I risultati evidenziarono un forte legame tra le diverse caratteristiche dei partecipanti e il loro comportamento, ad esempio i conducenti con prestazioni migliori tendevano a guardarsi attorno, a essere più attenti e a controllare costantemente la propria velocità, a differenza dei partecipanti che, annoiati, raggiungevano velocità più elevate fino a perdere il controllo del veicolo. Inoltre, fu constatato che la *simulator sickness* può essere ridotta significativamente evitando curve brusche o arresti, e adottando sessioni di guida della durata inferiore a 10 minuti, alternate a pause di riposo.

L'ultimo studio è di Hooi-Siang et al. (2017) che svilupparono un ambiente virtuale basato sulla tecnologia VR, ricostruendo una parte del campus dell'*Universiti Teknologi Malaysia*, senza adoperare simulatori di guida professionali. L'obiettivo fu di studiare il livello di precisione dell'ambiente virtuale e la dinamica del veicolo virtuale, riducendo il ritardo delle immagini trasmesse al dispositivo. I risultati convalidarono la sincronizzazione tra i movimenti del veicolo e l'ambiente virtuale.

1.6 Malessere da simulazione (*simulator sickness*)

Tutti i mezzi di trasporto, terrestri, marittimi e aerei, sono capaci di generare stimoli potenzialmente nauseogenici, chiamati disturbi da movimento (chinetosi). Secondo Reason & Brand (1975) lo spostamento stimola diversi sistemi sensoriali (sistemi visivo, vestibolare³ e propriocettivo⁴) che controllano l'equilibrio dell'individuo, generando informazioni relative all'orientamento e al movimento del corpo nello spazio. Le informazioni afferiscono in parallelo nel cosiddetto *comparator*, un deposito percettivo neurale di tutti i modelli sensoriali pregressi derivanti dal movimento (*patterns*). Il *comparator* confronta il *pattern* di movimento "attuale" con quello atteso (basato sulle precedenti esperienze di movimento). Se le percezioni attuali sono in armonia con il

³ Sistema vestibolare: componente dell'orecchio interno, assicura l'equilibrio del corpo e il mantenimento del tono posturale, registrando la posizione ed il movimento della testa nello spazio. Agisce in sinergia con altri due apparati visivo e somatosensitivo (muscoli, tendini, articolazioni, cute)

⁴ Sistema propriocettivo: terminazioni nervose presenti nei muscoli, nei tendini e nelle articolazioni che forniscono informazioni al cervello per percepire e riconoscere la posizione del corpo nello spazio e lo stato di contrazione dei muscoli, indipendentemente dalla vista.

modello neurale interno, allora il sistema rimane in equilibrio e non si genera alcun disturbo. Se invece si è in presenza di un *mismatch* sensoriale tra l'evento attuale e quello atteso, dal *comparator* emerge un segnale alterato che determina la comparsa della chinetosi ma, al contempo, consente anche l'avvio del processo di adattamento al movimento e quindi la successiva scomparsa della chinetosi. Tuttavia, il processo adattivo non è immediato. L'incidenza della chinetosi è estremamente variabile, dipende dalla natura dello stimolo inusuale di movimento, dalla soglia di sensibilità individuale e dalla rapidità di adattamento interindividuale (Dobie et al. 2001).

I sintomi chinetosici possono essere distinti in due categorie: disfunzioni del (a) sistema vestibolare e (b) del sistema neurovegetativo⁵. La sintomatologia è caratterizzata da vertigini, pallore cutaneo, sudorazione, nausea e vomito. In aggiunta, sia in laboratorio sia in prove sul campo, si è evidenziato un peggioramento nell'esecuzione dei compiti cognitivi e psico-motori (Graybiel, 1968).

La chinetosi può essere determinata anche dalla presenza esclusiva di stimoli visivi a cui non sono associate accelerazioni del corpo. L'utilizzo sempre più estensivo dei simulatori in ambito addestrativo ha di fatto svelato l'esistenza di una nuova forma di chinetosi: la *simulator sickness* (Kennedy et al. 1989). L'illusione di movimento, anche definita *vection*, è provocata dalla stimolazione di regioni periferiche della retina con flussi ottici, generati da schermi con alta dinamica degli input e campi visivi molto ampi. Il movimento di una scena visiva può essere interpretato come il movimento di un oggetto nel campo visivo rispetto all'osservatore, oppure è l'individuo che percepisce il movimento rispetto alla scena stazionaria (Duh et al. 2004).

I disturbi da movimento sono un fenomeno fisiologico che si sviluppa a seguito dell'esposizione a un movimento inusuale (reale o virtuale) e sufficientemente prolungato in un soggetto non ancora adattato al movimento stesso (Oosterveld 1995). È lo stimolo

⁵ Sistema neurovegetativo: chiamato anche Sistema Nervoso Autonomo, è la parte del sistema nervoso periferico che controlla le funzioni dell'organismo a riposo, le reazioni riflesse e le funzioni degli organi interni (come cuore, stomaco e intestino) e di alcuni muscoli. Per farlo agisce sui muscoli lisci (ad esempio quelli attorno ai vasi sanguigni, quelli nell'occhio e quelli dello stomaco, dell'intestino e della vescica) e su quello cardiaco.

a essere anormale, non il soggetto a essere “malato”. Kolasinski (1995) suddivide le principali cause delle sensazioni di malessere in tre categorie:

- fattori relativi al soggetto, i cui sintomi variano da un individuo all’altro, ma tipicamente è segnalata un’incidenza maggiore nelle persone più anziane e nel sesso femminile. Le prime difficilmente riescono ad adattarsi a nuovi stimoli, le donne invece, a causa del campo visivo più ampio, sono soggette ad un flusso ottico maggiore (Kennedy et al. 1995);
- fattori relativi al simulatore, le cui caratteristiche di costruzione del display e l’ampiezza del campo visivo determinano un flusso ottico ampio e veloce, quindi una maggiore stimolazione visiva;
- fattori relativi ai compiti di guida, tipici di sessioni di lunga durata al simulatore e manovre brusche, caratterizzate da un elevato tasso di variazione di velocità angolare (condizione per cui si intensifica il flusso visivo percepito);

Il malessere da simulazione ha caratteristiche cliniche assolutamente simili (ma non uguali) alle altre forme di chinetosi, e può manifestarsi anche con gli *after-effect*, cioè con disturbi che compaiono al termine della sessione al simulatore.

Ad oggi la problematica è stata affrontata con varie modalità, ma nessuno studio ha realmente individuato reali ed efficaci contromisure per ridurre drasticamente la *simulator sickness*. La letteratura scientifica si limita a fornire una descrizione clinica della sindrome.

1.7 Immersione e Presenza

I concetti di immersione e presenza sono stati introdotti per spiegare l’esperienza soggettiva di trovarsi in un ambiente (quello virtuale), anche se si è fisicamente in un altro (Witmer & Singer, 1998). L’attività che consiste nel guardare lo schermo di un qualsiasi dispositivo tecnologico equivale a guardare attraverso un vetro, in cui lo scenario e gli eventi che accadono sono lontani nello spazio e nel tempo. L’obiettivo della simulazione consiste nel realizzare il “passaggio attraverso”.

L’immersione è la descrizione oggettiva e quantificabile di ciò che il sistema fornisce, ed è del tutto indipendente dalla risposta della persona nell’ambiente virtuale. L’immersione è la misura di come il display mostra al partecipante un’illusione (Slater, 1999):

- vivida (*vivid*), considerando ad esempio la risoluzione visiva e cromatica, il contenuto informativo e la qualità dei display;
- attorniante (*surrounding*), misura per cui la realtà virtuale è panoramica o limitata in un campo ristretto;
- estensiva (*extensive*), considerando la gamma di modalità sensoriali coinvolte;
- inclusiva (*inclusive*), ovvero la misura in cui la realtà fisica viene esclusa dall'ambiente virtuale.

La presenza invece è la tendenza degli utenti a comportarsi nell'ambiente virtuale come nella realtà quotidiana. La presenza include tre aspetti: il senso di “essere lì” (nell'ambiente virtuale); la misura in cui gli individui tendono a rispondere agli eventi nell'ambiente virtuale piuttosto che nel mondo reale; e la misura in cui i partecipanti, dopo l'esperienza nell'ambiente virtuale, si ricordano di aver visitato un “luogo” piuttosto che aver visto solo immagini generate da un computer. Il significato di presenza può essere riassunto come: le persone sono “là”, rispondono a ciò che è “lì” e lo ricordano come un “luogo” (Slater, 1999). Un metodo per valutare il senso di presenza è rappresentato dal questionario ITQ (*Immersive Tendencies Questionnaire*) sviluppato da Witmer & Singer (1998).

1.8 Acquisizione dati soggettivi

Il metodo più comune per considerare le opinioni dei partecipanti consiste nella somministrazione di questionari riguardanti lo stato di salute, l'esperienza vissuta e l'ambiente virtuale. Alcune ricerche hanno provato a stimare la *simulator sickness* in funzione delle variabili fisiologiche, tuttavia i risultati sono stati insoddisfacenti poiché risulta complicato trovare una relazione tra il compito di guida e la risposta fisiologica dei conducenti (Blaauw, 1982).

1.8.1 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Il questionario più diffuso è il *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) (Balk et al, 2013). La sua origine è da ricercare nel *Motion Sickness Questionnaire* (MSQ) (Frank et al., 1983), un questionario utilizzato per valutare la chinetosi in diversi mezzi di trasporto. Tuttavia, il MSQ non costituisce il miglior metodo per determinare i sintomi derivanti dal simulatore, simili ma meno intensi rispetto a quelli provati in condizioni reali (Kim et al., 2018).

Kennedy et al. (1993) eliminarono dal MSQ gli articoli non ritenuti adatti alle misurazioni della *simulator sickness* e quantificarono l'intensità del malessere, creando quindi il SSQ. Il SSQ individua 16 sintomi, a ognuno di essi l'utente attribuisce un punteggio su una scala di quattro punti, assegnando un valore da 0 a 3 (0: assenza di disturbi; 1: disturbi lievi; 2: disturbi moderati; 3: disturbi intensi). Questi sintomi possono essere suddivisi in tre categorie generali (*cluster*):

- nausea (N), elaborazione psichica di alcune sensazioni tra le quali il fatto che essa preceda temporalmente il vomito, anche se non necessariamente debba da questo essere seguita. La nausea è accompagnata usualmente da disturbi vasomotori a carico del sistema nervoso vegetativo (EOC, 2007).
- oculomotorio (O), categoria che individua i parametri relativi alla natura percettiva dei movimenti oculari, in modo da identificare la fatica visiva;
- disorientamento (D), dalla definizione originale di AJ Benson (1978) secondo cui “il disorientamento spaziale è la condizione in cui il pilota non percepisce correttamente la posizione, il movimento, l'assetto del velivolo o di sé stesso rispetto al sistema di coordinate di riferimento rappresentato dal piano della superficie terrestre e dalla verticale gravitazionale”;

Nell'ALLEGATO 1 è presente il SSQ e la metodologia proposta per calcolare 4 punteggi: tre punteggi parziali (uno per ogni *cluster*) che indicano l'impatto del simulatore su ciascuno di questi sistemi, e un punteggio totale (TS) espressione della gravità generale dei sintomi, che può essere considerata la misura in cui il simulatore può generare *discomfort* negli utenti.

Il SSQ e la letteratura relativa ai simulatori di guida sviluppata fino a oggi, non forniscono una scala di punteggi soglia che portino all'esclusione o all'abbandono dei partecipanti. I valori soglia possono cambiare a seconda dell'esperimento, per stabilirli si dovrebbe svolgere uno studio epidemiologico.

1.8.2 Sviluppi del SSQ

La tecnologia del simulatore è cambiata in modo significativo negli ultimi anni, così alcuni studiosi hanno ritenuto importante rivisitare il SSQ. In particolare, nel seguente capitolo è stata posta l'attenzione su due ricerche.

Balk et al. (2013) confrontarono i dati di SSQ derivanti esperimenti condotti con un simulatore di guida, e i dati raccolti da Kennedy nel 1993 (utilizzando simulatori di volo) con i quali fu creato il SSQ. Gli autori hanno affermato che la somiglianza dei risultati rende ancora oggi il SSQ un questionario valido per individuare il malessere da simulazione. Tuttavia, per considerarlo a tutti gli effetti uno strumento diagnostico, sarebbe necessario rivalutare il sistema di pesi e/o il calcolo del punteggio finale (Balk, 2013).

Il secondo studio, sviluppato da Kim et al. (2017), propone un nuovo questionario VRSQ (*Virtual Reality Sickness Questionnaire*) per misurare il malessere da simulazione in un ambiente di realtà virtuale (VR). Furono rilevate differenze significative (in termini di punteggi SSQ) tra i simulatori che sfruttano schermi bidimensionali e i sistemi VR (Kennedy et al., 2010). Gli autori modificarono il SSQ per soddisfare i criteri dell'ambiente VR. Il VRSQ e il metodo di quantificazione della *simulator sickness* sono riportati in ALLEGATO 2.

1.8.3 Misura dell'esperienza

Tcha-Tokey et al. (2016) svilupparono uno studio per creare e validare un questionario unificato che valutasse diversi aspetti dell'esperienza di un utente all'interno dell'ambiente virtuale. Riprendendo uno studio precedente (Tcha-Tokey, 2015), gli autori individuarono 10 componenti chiave che caratterizzano un'esperienza virtuale: *Presence, Engagment, Immersion, Flow, Skill, Emotion, Usability, Technology adoption, Judgment, consequence experience*. Ogni componente è costituito da diversi elementi (domande) prese da un questionario esistente.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è di validare il sistema di visione realtà virtuale di cui è stato recentemente dotato il simulatore del DIATI (Politecnico di Torino). A differenza dei convenzionali schermi 2D utilizzati nei precedenti esperimenti, il componente crea una nuova interfaccia di visualizzazione, offrendo una simulazione di guida altamente immersiva in cui l'ambiente virtuale è di fatto trasformato in uno spazio tridimensionale e come tale percepito dal guidatore.

Il simulatore fu validato inizialmente nel 2018 per il comportamento longitudinale, e sempre nel 2018 anche per il comportamento trasversale (Bassani et al., 2018; Catani & Bassani, 2018). In entrambe le ricerche furono apportate alcune novità rispetto alla letteratura. Il primo studio valutò il comportamento longitudinale dei conducenti (*longitudinal behavior*) ricavando profili di velocità in modo continuo anziché discreto. Il confronto tra i dati venne fatto con passo di 100 m. Il secondo studio introdusse un metodo alternativo per lo studio del comportamento trasversale (*transversal behaviour*). La gestione dello sterzo non fu determinata analizzando la posizione del veicolo all'interno della corsia, ma furono misurate tre nuove variabili: la distanza di anticipazione, la variazione della curvatura e il tasso di variazione della curvatura.

Il presente studio si propone come sviluppo delle ricerche passate e, utilizzando lo stesso circuito e le stesse tecniche dal punto di vista metodologico, ha l'obiettivo di determinare se il comportamento adottato durante le guide con la nuova interfaccia sia rappresentativo del comportamento in guide reali. La tesi, quindi, si occupa di validare dal punto di vista comportamentale il dispositivo di realtà virtuale del simulatore di guida del Politecnico. La validità assoluta, relativa o la non validità del dispositivo è stata valutata confrontando i dati registrati al simulatore con quelli registrati in ambiente reale, durante gli studi sopra citati.

Inoltre, in letteratura gli esperimenti che integrano un dispositivo VR ad un simulatore di guida, hanno studiato la validità fisica del dispositivo (Hooi-Siang, 2017), l'esperienza soggettiva del guidatore (Ihemedu-Steinke et al, 2015) e le prestazioni di guida in funzione delle caratteristiche individuali dei conducenti (Taheri, 2017). Nessuno ha mai

validato un sistema di realtà virtuale per quanto concerne il comportamento longitudinale e trasversale, considerando anche i dati registrati nelle guide reali.

2.1 Strumentazione

Durante la guida reale, la velocità e la posizione del veicolo sono state registrate attraverso un sistema inerziale montato sull'autovettura. Le guide simulate invece sono state registrate automaticamente dal software di simulazione.

2.1.1 Simulatore di guida

Il simulatore di guida del Politecnico di Torino è un simulatore a base fissa. Le componenti hardware e il software (che permette la generazione dell'ambiente virtuale e la registrazione dei dati) sono distribuiti sul mercato dall'azienda francese *AV Simulation* (ex *Oktal*).

Hardware

Il simulatore è costituito da tre pc e numerosi dispositivi che permettono all'utente di interagire con l'ambiente virtuale. Il computer principale, posizionato sotto la postazione di guida, è un Dell Precision T3610 con processore Intel® Xeon® da 3.50 GHz, scheda grafica NVIDIA GTX 780 Ti e memoria RAM da 8 GB; consente la progettazione dell'ambiente virtuale, controlla le componenti del simulatore e registra i dati. Gli altri due pc si occupano dell'elaborazione grafica dell'ambiente virtuale, riproducendo quest'ultimo sui tre monitor (Samsung - 32" LED/LCD Full HD) o sul dispositivo VR; rispettivamente sono un Dell Precision T3610 con le stesse caratteristiche del computer principale e un HP Z440 Workstation con processore Intel® Xeon® da 3.50 GHz, scheda grafica NVIDIA GTX 1080 e memoria RAM da 32 GB.

È presente anche un impianto audio che riproduce il rumore del motore e delle ruote sulla pavimentazione stradale. Esso è costituito da un subwoofer, posizionato sotto il sedile, e quattro altoparlanti, due dei quali posizionati a lato del subwoofer e i restanti sotto gli schermi laterali.

I dispositivi che permettono all'utente di muoversi e interagire con l'ambiente e il veicolo virtuale sono:

- una plancia con tre pulsanti, utilizzati per accendere il veicolo, suonare il clacson e azionare il freno di stazionamento;
- un pulsante di emergenza che permette di disattivare il simulatore;
- un sedile, dotato di schienale reclinabile, che può essere traslato avanti e indietro come quello di una vera automobile;
- un volante in grado di restituire un feedback di forza simulando la ruvidità della pavimentazione e gli urti. Inoltre, sono presenti anche due levette che azionano gli indicatori di direzione, le luci dei fanali e i tergicristalli;
- un display che riproduce il tachimetro, il contagiri, le spie e la marcia inserita;
- il cambio manuale costituito da 6 marce e dalla retromarcia;
- un sistema di pedali in grado di vibrare, costituito da acceleratore, freno e frizione. Quest'ultima durante l'esperimento è disattivata per agevolare l'utente durante il cambio marcia.

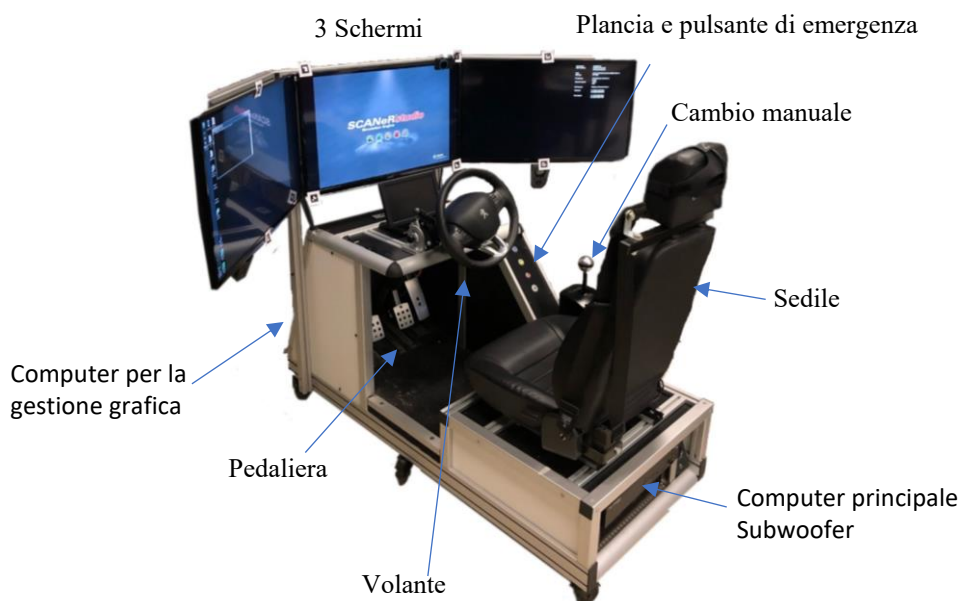


Figura 3 - Simulatore di guida a base fissa del Politecnico di Torino

Software

SCANeR™ studio è una suite software completa dedicata alla simulazione automobilistica. Fornisce tutti gli strumenti e i modelli necessari per costruire un mondo

virtuale ultra-realistico. Il software è composto da 5 moduli che permettono al progettista di controllare ogni aspetto dell'ambiente virtuale.

Il modulo Terreno genera il tracciato stradale e le relative caratteristiche planimetriche, altimetriche, le caratteristiche della pavimentazione come il materiale e la rugosità; consente anche la generazione dell'ambiente che circonda la strada e permette l'inserimento di oggetti come alberi, barriere, segnaletica orizzontale e verticale.

Il modulo Veicolo permette la gestione dei parametri del veicolo virtuale, tuttavia il Politecnico non possiede le licenze per apporre modifiche;

Il modulo Scenario gestisce entità e oggetti all'interno del terreno generato, imposta le traiettorie dei veicoli autonomi e la frequenza di campionamento con cui vengono registrati i dati. Inoltre, utilizzando le funzioni preimpostate del software, l'utente può eseguire uno script per rendere automatici alcuni eventi in particolari condizioni: per esempio è possibile cambiare le condizioni metereologiche o attivare/disattivare il movimento di alcuni veicoli virtuali quando l'auto guidata dal partecipante passa in un punto del tracciato;

Il modulo Simulazione riproduce lo scenario virtuale e consente la modifica di alcune caratteristiche durante la simulazione, come l'ora del giorno o le condizioni metereologiche durante la simulazione;

Infine, il modulo Analisi consente l'accesso ai file con i dati registrati, che possono essere esportati e trattati con fogli di calcolo.

2.1.2 Sistema di realtà virtuale

La realtà virtuale necessita di alcune periferiche per essere impiegata: il visore ottico, una *base station* e un controller, tutti questi elementi costituiscono il sistema VR. Questo sistema è basato sulla tecnologia "*room scale*" che sfrutta dispositivi di localizzazione a 360° per monitorare il movimento dell'utente in tutte le direzioni e lo traduce istantaneamente nel mondo virtuale. Il sistema VR trasforma l'ambiente attorno all'utente in uno spazio 3D, dove l'utente è in grado di interagire e muoversi (quasi) liberamente. Il Politecnico di Torino ha acquisito il *VIVE VR SYSTEM*, progettato da Valve Corporation, azienda statunitense sviluppatrice di software, in collaborazione con HTC, compagnia di

Taiwan produttrice di *smartphone* e altri dispositivi informatici, che si è occupata dell'*hardware*.



Figura 4 – Hardware del sistema di realtà virtuale HTC Vive

Il visore ottico HTC VIVE è una maschera, costituita da due schermi Dual AMOLED 3.6'' diagonal, con risoluzione 1080 x 1200 pixel per occhio. Gli schermi riproducono l'ambiente virtuale attraverso immagini stereoscopiche, con *refresh rate* massimo di 90 Hz, e forniscono un campo di visualizzazione di 110°. Al suo interno il visore incorpora un giroscopio, un sensore G, il sistema di tracciamento "*SteamVR Tracking*" e il sistema "*Chaperone*" che avvisa l'utente dei confini dell'area di gioco.

Sono presenti anche due controller che incorporano lo stesso sistema di tracciamento presente nel visore; sulla superficie sono presenti diversi tasti che consentono all'utente di interagire con il mondo virtuale. Nel presente esperimento i controller non sono stati utilizzati poiché il partecipante durante la guida impugnava il volante.

La *base station* è costituita da due cubi neri, disposti frontalmente in due angoli della stanza, in grado di tracciare il casco e i controller, coprendo l'area di gioco a 360°.

2.1.3 Registrazione dei dati in campo reale

Le misure di velocità e posizione del veicolo nell'ambiente reale sono state registrate mediante un *Mobile Mapping System*, un sistema composto da una camera frontale e un dispositivo di misura inerziale accoppiati a un sensore di posizionamento globale, il tutto installato a bordo di un veicolo.

I sistemi inerziali sono costituiti da una terna di accelerometri e giroscopi; la disposizione di questi ultimi, lungo gli assi di un sistema cartesiano, su una piattaforma rigida, definisce un sistema di riferimento strumentale chiamato "body" o "b-frame" (Cina,

2014). Nell'esperimento viene utilizzato il sistema inerziale Xsens Mti-G integrato con un'antenna GPS.



Figura 5 - Xsens Mti-G e antenna GPS (Ignazzi, 2016)

L'Xsens Mti-G è un *Inertial Measurement Unit* (IMU) che restituisce dati di accelerazione e velocità angolare compensati degli errori sistematici di misura; il sistema inerziale è solidale a una piattaforma rigida vincolata al mezzo in movimento. Gli accelerometri seguono l'autovettura nella sua dinamica e i dati sono registrati direttamente nel sistema *body*.

Il sistema inerziale da solo non è sufficiente per raggiungere risultati ottimali. Durante la navigazione i processi di integrazione dell'accelerazione tendono a far divergere la soluzione a causa della costante presenza di errori sistematici o accidentali che si propagano nel dato acquisito. Esso pertanto necessita di un sistema GPS, indipendente da quello inerziale, che fornisce periodicamente la posizione corretta. In questo modo il sistema calcola le differenze tra le misure inerziali e quelle del GPS, queste differenze sono combinate con la loro dinamica e il loro peso all'interno di un filtro di Kalman che produce una stima della soluzione navigazionale (posizione, velocità e assetto del veicolo) più precisa (Cina, 2014).

2.2 Veicolo virtuale

Con il dispositivo di realtà virtuale il guidatore si vede all'interno dell'abitacolo di un veicolo virtuale. A differenza dell'interfaccia di visione a tre schermi in cui il guidatore vede lo scenario e un tergicristallo (virtuale), nella realtà virtuale il *test driver* è in grado di vedere l'intera plancia dell'auto e, ruotando la testa, anche le portiere e i sedili passeggero anteriori e posteriori. Tuttavia, il software non riproduce il corpo virtuale e l'immagine negli specchietti retrovisori.

Per le licenze in possesso dal Politecnico di Torino, il software dispone di due tipologie di *cockpit*: quello della Lexus NX 200 (Figura 6) e della Renault Scénic I (Figura 7).



Figura 6 – Cockpit di Lexus NX 200, a sinistra l'auto virtuale a destra quella reale



Figura 7 - Cockpit di Renault Scenic I, a sinistra l'auto virtuale a destra quella reale

Entrambi i *cockpit* presentano alcuni difetti: il modello Lexus è caratterizzato da una plancia fissa, ma l'immagine non risulta stabile in corrispondenza dell'interfaccia strada-cruscotto a causa di un costante tremolio presente sul tergicristallo; il modello Scenic presenta un'interfaccia ben definita con la strada, ma alcuni elementi che compongono la plancia sono soggetti a repentini cambi di colore.

Alcuni *test driver* hanno provato entrambi i veicoli e, dopo aver chiesto loro quale preferissero, si è deciso di condurre l'esperimento utilizzando il modello di *cockpit* relativo alla Renault Scenic, poiché il modello Lexus causava un discreto fastidio agli utenti.

2.3 I tracciati

I tracciati utilizzati per l'esperimento sono gli stessi dei precedenti studi di validazione (Bassani et al, Catani & Bassani, 2018), in questo modo è stato possibile confrontare i dati registrati utilizzando l'interfaccia VR, con quelli ottenuti in ambiente reale e al simulatore con la modalità tre schermi.

2.3.1 Il circuito di Stupinigi

Le guide naturalistiche sono state svolte su un circuito che si estende per 16 km attorno al Parco Nazionale di Stupinigi (Figura 8). Il circuito è costituito prevalentemente da strade extraurbane a due corsie, in cui è favorevole la condizione di flusso libero per i veicoli.

Lo stesso circuito è stato costruito al simulatore da Ignazzi (2017), nel suo lavoro di tesi, utilizzando il software SCANeR™ studio. Lungo il percorso sono presenti tre rotatorie e quattro intersezioni a raso, poiché in queste zone il simulatore non è programmato per registrare i dati, il circuito è stato diviso in 7 tratti (Figura 8). Per ognuno di essi si riportano le caratteristiche geometriche e il diagramma delle curvature all'interno dell'ALLEGATO 3.



Figura 8 – Circuito di Stupinigi diviso in tratti (Ignazzi, 2016)

2.3.2 I tracciati di prova

Tutti i guidatori, prima di affrontare il circuito di Stupinigi, hanno guidato su due circuiti di prova. Questi sono stati sviluppati affinché il partecipante prendesse confidenza con il simulatore, la visualizzazione fornita dal dispositivo di realtà virtuale e la sensazione relativa alla mancanza di accelerazione del corpo, in particolar modo durante la fase di frenata e la guida in curva.

Il primo circuito di prova (Figura 9) ha la forma di un 8.

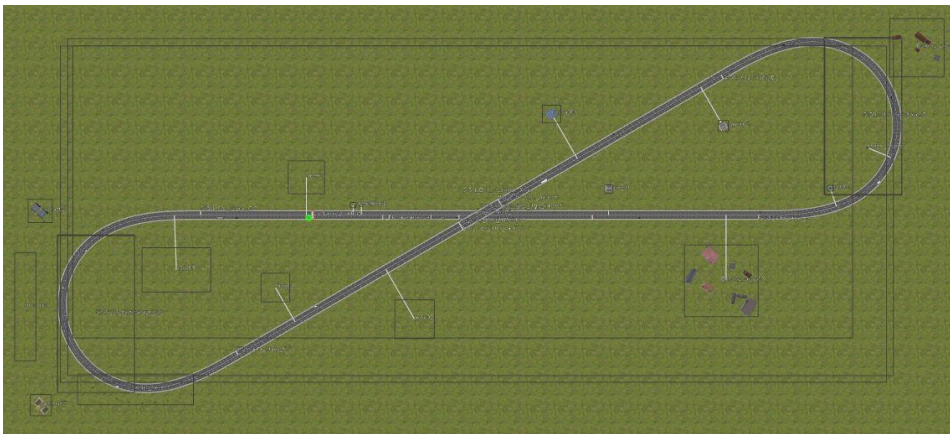


Figura 9 – Primo circuito di prova, con forma a 8

Il secondo circuito di prova (Figura 10), più complesso, è costituito da elementi simili a quelli che compongono il circuito di Stupinigi.

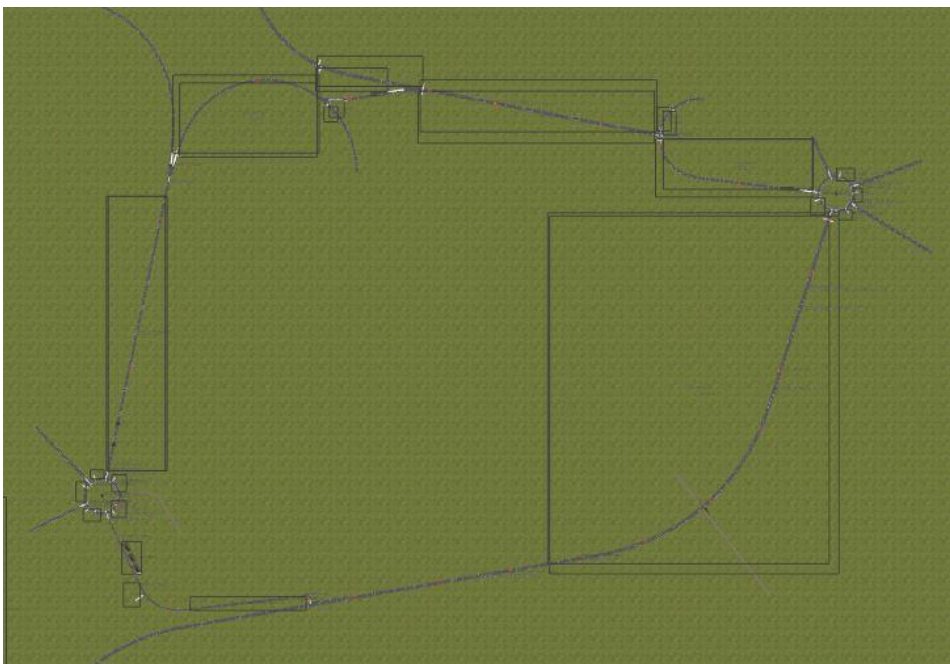


Figura 10 – Secondo circuito di prova

2.4 Guidatori

Coerentemente al precedente studio di validazione, il campione di partecipanti è stato costruito per essere rappresentativo della popolazione di patentati in Italia. Alla fine dell'esperimento si otterranno dei valori medi campionari e, dal teorema centrale del limite, la media campionaria tenderà al valore medio reale quanto più grande (numeroso) sarà il campione scelto.

La dimensione minima del campione n è stabilita con la teoria della probabilità, si suppone che dipenda dalla numerosità N della popolazione, dalla precisione del valore medio che si vuole ottenere e dalla dispersione dei dati attorno al valore medio. La dimensione n di un campione casuale semplice viene calcolata con la seguente formula (de Dios Ortuzar & Willumsen, 2011):

$$n = \frac{n'}{1 + \frac{n'}{N}} \quad \text{considerando} \quad n' = \left(\frac{CV \cdot z}{e_r} \right)^2 \quad [1] [2]$$

dove:

- CV è il coefficiente di variazione, il rapporto tra la deviazione standard σ e la media μ della popolazione; la σ può essere stimata attraverso dei dati precedentemente registrati;
- z è la deviazione standard di una distribuzione normale standardizzata; essa dipende dal livello di confidenza deciso dal progettista; ad un livello di confidenza del 95% corrisponde il valore $z = 1.96$.
- e_r è l'errore relativo, ossia la misura del livello di precisione che si vuole ottenere, scelta dal progettista, e definita come il rapporto tra l'errore assoluto e_a e la media μ della popolazione.

Sostituendo nella formula precedente si ottiene:

$$n' = \left(\frac{\sigma \cdot z}{e_a} \right)^2 \quad [3]$$

Per ogni sezione del tracciato è stata valutata la dimensione minima del campione casuale. Considerando $z = 1.96$, $e_a = 4 \text{ km/h}$ e i valori di σ dai dati di velocità registrati sul campo durante il precedente studio di validazione. La Tabella 2 riporta per ogni tratto il

valore minimo di n , individuato come il valore più grande di n delle sezioni che compongono ciascun tratto.

Tabella 2 – Dimensione minima del campione casuale semplice per ogni tratto

Tratto	0	1	2	3	4	6	7
n_{min}	11	26	24	17	19	21	26

Come nei precedenti studi di validazione del simulatore, è stato scelto $n = 33$ *test driver*.

Successivamente il campione casuale semplice è stato stratificato considerando la diversa età dei partecipanti. Il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) fornisce la seguente divisione dei patentati in Italia:

Tabella 3 – Suddivisione dei patentati in Italia a seconda della fascia di età (MIT, 2017)

Classe	Fascia di età	%
A	< 25 anni	7.96
B	25 – 34 anni	14.66
C	35 – 44 anni	19.14
D	45– 65 anni	38.90
E	> 65 anni	19.33

A causa della scarsa disponibilità di *test driver* con età superiore a 65 anni, la classe E è stata eliminata, ridistribuendo in modo proporzionale il 19.33% nelle altre classi; le classi B e C sono state unite e, come nei precedenti studi di validazione, si è deciso di coinvolgere 8 donne e 25 uomini. La Tabella 4 mostra la composizione del campione stratificato.

Tabella 4 – Campione stratificato usato nel presente esperimento

Suddivisione età come da MIT				Campione stratificato				
Classe MIT	Classe	Fascia di età	%	Tot	M	F	Marrotondato	Farrotondato
A	I	<25	9.9%	3	2.48	0.79	2	1
B+C	II	25-44	41.9%	14	10.48	3.35	11	3
D	III	45-64	48.2%	16	12.05	3.86	12	4

I *test driver* sono stati selezionati dal database del Politecnico di Torino e tutti hanno vissuto la loro prima esperienza con il dispositivo di realtà virtuale. Undici di questi *test driver*, nel 2017, hanno effettuato la guida in ambiente reale e al simulatore (con gli schermi 2D), è ragionevole ipotizzare che quell'esperienza di guida non abbia in alcun modo condizionato quella del presente esperimento, dato l'intervallo temporale che separa i due studi.

2.5 Protocollo sperimentale

Durante l'esperimento si è osservato che, in caso di *simulator sickness*, i sintomi di malessere sopraggiungevano pochi minuti dopo l'inizio della sessione di prova (*training*); qualora i sintomi non si fossero verificati, i partecipanti erano in grado di completare anche la guida sul tracciato di Stupinigi. Data anche la disponibilità dei *test driver* (tutti volontari), è stata presa la decisione di svolgere le due sessioni una di seguito all'altra, ovviamente separandole da un periodo di pausa.

Durante tutte le guide, le indicazioni riguardanti le svolte e il percorso da seguire sono state fornite a voce.

Il protocollo con cui è stato svolto l'esperimento viene descritto qui di seguito:

- compilazione del questionario pre-guida e invito al partecipante ad affrontare le guide come se si trovasse in ambiente reale;
- svolgimento di test cognitivi visivi e uditivi pre-guida;
- svolgimento della sessione di *training*;
- periodo di pausa della durata di 5/10 min in cui sono state verificate le condizioni fisiche del partecipante;
- svolgimento della guida sul circuito di Stupinigi;
- svolgimento dei test cognitivi visivi e uditivi post-guida;
- compilazione del questionario post-guida.

La sessione di *training* ha permesso di selezionare quali fossero i *test driver* in grado di completare l'esperienza di guida in ambiente virtuale. Tale sessione prevedeva una prima guida lungo il "tracciato 8", in cui il guidatore poteva prendere confidenza con il simulatore. Nei casi nei quali il conducente non ha mostrato sintomi di malessere, è stata eseguita la guida lungo il secondo tracciato di prova. In questa fase il *test driver* ha dovuto affrontare rotatorie e curve strette, questi elementi sono stati la principale causa di intensi sintomi di malessere.

In totale sono stati contattati 41 potenziali *test driver*: 33 persone hanno completato l'esperimento, le restanti 8 invece hanno preferito interrompere la guida simulata durante la sessione di prova a causa della *simulator sickness*.

2.6 Test cognitivi

Dall'analisi della letteratura è emerso che i sintomi di *simulator sickness* sono comuni nella maggior parte degli esperimenti svolti al simulatore. Graybiel (1968) affermò che gli utenti soggetti a sintomi chinestetici mostravano, sia in laboratorio sia in campo, un peggioramento nell'esecuzione dei compiti cognitivi e psico-motori. Per questo motivo sono stati eseguiti alcuni test cognitivi, con un confronto dei dati prima e dopo la guida per valutare gli effetti legati ai sintomi di malessere (nei casi in cui si fossero manifestati).

I test cognitivi somministrati sono stati di tipo visivo e uditivo. Nel primo, si è misurato il tempo impiegato dall'utente per agire sulla barra spaziatrice dopo la comparsa del punto verde (Figura 11) sullo sfondo bianco del monitor. L'intervallo di tempo trascorso tra la comparsa dello stimolo visivo e l'istante in cui si è agito sulla barra spaziatrice indica il tempo di percezione e reazione. Il test uditivo è analogo a quello visivo, con l'emissione di un suono e la stessa azione sulla barra spaziatrice.

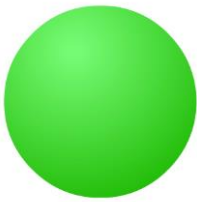


Figura 11 – Punto verde del test cognitivo visivo

In ogni sessione sono stati raccolti i tempi di percezione e reazione di 17 stimoli visivi e 17 stimoli uditivi. I test sono stati condotti sul sito www.cognitivefun.net

2.7 Questionari

Ogni partecipante ha dovuto compilare due questionari.

Il questionario pre-guida (ALLEGATO 4) ha permesso di raccogliere dati sullo stato di salute del partecipante, l'eventuale assunzione di farmaci e/o sostanze stimolanti, e a quante ore risalisse l'ultimo pasto prima dell'inizio dell'esperimento. Nei precedenti studi di ricerca è stato riscontrato che tutti questi fattori possono indurre o accentuare i sintomi di malessere.

Il questionario post-guida, riportato in ALLEGATO 5, è stato creato prendendo spunto dalla letteratura. Con esso sono state raccolte informazioni circa i sintomi legati alla

simulator sickness, oltre al giudizio sull'esperienza di guida. Il questionario è stato diviso in sei sezioni:

- *sensazioni*: il guidatore esprime le emozioni provate durante la guida;
- *conseguenze dell'esperienza*: il guidatore esprime il proprio stato di malessere;
- *immersione*: il guidatore esprime un giudizio sull'ambiente virtuale e sui dispositivi utilizzati;
- *tecnologia usata*: il partecipante valuta il visore ottico ed esprime una preferenza sul tipo di interfaccia di visualizzazione (VR o tre schermi);
- *presenza*: il guidatore esprime un giudizio legato alla sensazione di trovarsi all'interno dell'ambiente virtuale;
- *consigli*: con tre domande aperte il partecipante ha potuto fornire consigli su come migliorare lo scenario.

Esclusa l'ultima sezione i partecipanti hanno risposto attraverso una scala *likert* a 4 punti:

- [per nulla, lieve, moderato, intenso] per i sintomi di *simulator sickness*;
- [pessimo, sufficiente, buono, ottimo] nella sezione *immersione*;
- [per nulla, poco, abbastanza, molto] per le sezioni 1, 4 e 5.

Inoltre, le sezioni 1 e 2 sono state compilate anche dagli 8 partecipanti che, a seguito dei sintomi di malessere, hanno interrotto l'esperimento durante la sessione di prova.

2.8 Organizzazione dei dati

Il simulatore è stato impostato per registrare i dati con una frequenza di 10 Hz. Le variabili velocità, posizione locale e distanza percorsa sono state associate all'istante di tempo e salvati su un file CSV.

Per confrontare i risultati con quelli ottenuti dai precedenti esperimenti è stato necessario ricondurre i dati allo stesso sistema di riferimento: coordinate cartografiche UTM, svincolate dalle coordinate altimetriche, a causa della bassa precisione del sistema inerziale.

Questo capitolo illustra il procedimento utilizzato per effettuare la trasformazione di coordinate (da locali a cartografiche) e come sono stati trattati i dati per confrontare i profili di velocità e i diagrammi di curvatura.

2.8.1 Trasformazione da coordinate locali a cartografiche

Avendo escluso l'altimetria dall'analisi, il modello geometrico utilizzato per effettuare il passaggio di coordinate è la rototraslazione piana con variazione di scala isotropa (Cina, 2014). Se le coordinate cartografiche vengono identificate con (E, N) e quelle locali con (x, y) , allora la trasformazione può essere espressa dal sistema matriciale che segue:

$$\begin{pmatrix} E \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \\ N_0 \end{pmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad [4]$$

Il cambio del sistema di riferimento richiede la conoscenza di quattro parametri: (E_0, N_0) che rappresentano la traslazione dell'origine del sistema di riferimento, la rotazione α e il fattore di scala λ . Questi parametri non sono noti a priori, ma possono essere ricavati conoscendo le coordinate di alcuni punti in entrambi i sistemi di riferimento, ed effettuando una procedura a ritroso (Cina, 2014). In questo caso i quattro parametri sono le incognite, e i punti (E, N) e (x, y) sono noti. Il sistema può essere riscritto come:

$$\begin{cases} E_0 + \lambda \cos(\alpha) x + \lambda \sin(\alpha) y - E = 0 \\ N_0 - \lambda \sin(\alpha) x + \lambda \cos(\alpha) y - N = 0 \end{cases} \quad [5]$$

Con il cambio di variabile $a = \lambda \cos(\alpha)$ e $b = \lambda \sin(\alpha)$ il sistema è stato linearizzato. Note le coordinate di almeno due punti: $(E_1, N_1) - (x_1, y_1)$ e $(E_2, N_2) - (x_2, y_2)$ è possibile scrivere quattro equazioni. Supponendo di conoscere più punti, il sistema linearizzato espresso in forma matriciale risulta essere:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & x_1 & y_1 \\ 0 & 1 & y_1 & -x_1 \\ 1 & 0 & x_2 & y_2 \\ 0 & 1 & y_2 & -x_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_0 \\ N_0 \\ a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ N_1 \\ E_2 \\ N_2 \\ \dots \end{pmatrix} \quad [6]$$

Il sistema [6] può essere riscritto considerando $[A] = \text{matrice disegno}$, $(X) = \text{vettore delle incognite}$ e $(T) = \text{vettore dei termini noti}$.

$$[A] \cdot (X) = (T) \quad [7]$$

Il problema può essere risolto con il metodo dei minimi quadrati:

$$A^T A x = A^T T \quad [8]$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T T \quad [9]$$

$$X = N^{-1} T_n \quad [10]$$

N viene definita matrice normale e T_n vettore dei termini noti normalizzati.

Da un precedente lavoro di tesi (Raviglione, 2016), è possibile ricavare una serie di punti (Tabella 5) noti in entrambi i sistemi di riferimento.

Tabella 5 – Coordinate geografiche, cartografiche e locali di una serie di punti noti

	Latitudine	Longitudine	E	N	x	y
Inizio registrazione	44.997958	7.607511	390246.723	4983666.686	-460.014	1985.187
Inizio tratto 1	44.990461	7.607272	390213.570	4982834.189	-493.156	1152.751
Fine tratto1	44.980278	7.612849	390633.831	4981695.447	-72.904	14.012
Inizio tratto 2	44.979706	7.612337	390592.375	4981632.596	-114.338	-48.929
Fine tratto2	44.962515	7.577617	387821.433	4979770.362	-2885.361	-1911.187
Inizio tratto 3	44.962695	7.576319	387719.416	4979792.155	-2987.358	-1889.318
Fine tratto3	44.967694	7.568223	387090.723	4980358.723	-3616.043	-1322.782
Inizio tratto 4	44.968630	7.566716	386973.720	4980464.800	-3733.041	-1216.729
Fine tratto4	44.979226	7.554838	386058.031	4981658.509	-4648.770	-22.912
Inizio tratto 5	44.979815	7.554152	386005.111	4981724.904	-4701.736	44.433
Fine tratto5	44.994713	7.562667	386705.815	4983367.938	-4000.950	1686.474
Inizio tratto 6	44.995392	7.566173	386983.501	4983438.469	-3723.319	1756.991
Fine tratto 6	44.996183	7.595960	389332.880	4983485.219	-1373.883	1803.791
Fine registrazione	44.997906	7.607566	390250.959	4983660.835	-455.774	1979.334
Piazzola	44.994196	7.605480	390079.451	4983251.529	-627.253	1570.035
Inizio curva1	44.965826	7.597920	389429.023	4980110.275	-1277.710	-1571.205
Fine curva 1	44.964171	7.592216	388976.001	4979934.223	-1730.759	-1747.243
Inizio curva 2	44.970030	7.564595	386809.216	4980623.282	-3897.603	-1058.259
Fine curva2	44.970911	7.563797	386748.023	4980722.264	-3958.787	-959.257
Inizio curva 3	44.980414	7.553372	385944.802	4981792.542	-4761.984	111.088
Fine curva 3	44.980716	7.553306	385940.197	4981826.183	-4766.641	144.760

Sostituendo questi punti in [6] e risolvendo il sistema, si ottengono i valori dei quattro parametri:

$$E_0 = 390706.709, N_0 = 4981681.5, a = 0.999976376, b = 2.58215 \cdot 10^{-5}$$

Questi valori sostituiti nel sistema iniziale [4] permettono di esprimere le coordinate cartografiche di un punto noto solo nel sistema di riferimento locale.

2.8.2 Confronto delle velocità

I profili di velocità sono stati ricavati per tutti i tratti con il seguente procedimento.

A ogni guida simulata è stato associato un file di dati espressi in funzione del tempo. Inizialmente, utilizzando lo script Matlab[®] presente in ALLEGATO 6, è stato eseguito il processo di “separazione” che ha permesso di frazionare il file iniziale CSV in 8 file, ciascuno corrispondente a un tratto diverso. Considerando la traiettoria di un conducente, lo script ricerca il punto della traiettoria più vicino ai punti di inizio e fine di ogni tratto, e suddivide la traiettoria in 8 tratti.

Segue il processo di “assegnazione” eseguito con lo script Matlab[®], presente in ALLEGATO 7. Lo script considera la traiettoria di un conducente e la traiettoria di riferimento (creata nei precedenti studi), fissa un punto di quest’ultima (punto A), ricerca il punto più vicino della traiettoria del conducente (Punto B) e associa la velocità del Punto B al Punto A. Questo procedimento è ripetuto per tutti i punti della traiettoria di riferimento, la quale, così facendo, risulta essere percorsa da ogni guidatore, ma a velocità diverse.

Il processo di “assegnazione” non è stato utilizzato per i tratti 0 e 7, prevalentemente curvilinei, perché potrebbe comportare errori non trascurabili. Si è deciso quindi di normalizzare le traiettorie dei conducenti rispetto alle traiettorie di riferimento, individuando un fattore di scala (dato dal rapporto tra la distanza totale percorsa della generica traiettoria di un conducente e la traiettoria di riferimento). Moltiplicando la distanza percorsa da ogni conducente per il fattore di scala, si ottengono delle traiettorie della stessa lunghezza. Quello appena descritto è il processo di “normalizzazione”, anch’esso viene eseguito con uno script Matlab[®], riportato in ALLEGATO 8.

I processi di “assegnazione” e “normalizzazione” creano per tutti i tratti diverse traiettorie (una per ogni guidatore) confrontabili tra loro, dalle quali sono stati costruiti i profili di velocità.

2.8.3 Confronto delle traiettorie

In questa fase è stato considerato solo il Tratto 2 del circuito di Stupinigi, data la disponibilità dei dati registrati in campo reale.

Le traiettorie dei guidatori sono espresse in funzione delle coordinate locali e cartografiche, ma per essere confrontate tra loro è necessario associare a ogni punto anche il valore della progressiva lungo il Tratto 2. L'ALLEGATO 9 riporta lo script Matlab[®] utilizzato: esso considera la traiettoria di un conducente e fissa un Punto A, cerca il punto più vicino (Punto B) appartenente all'asse stradale (discretizzato ogni 12 cm), infine assegna al punto A la progressiva del punto B. Questa procedura viene ripetuta per tutti i punti della traiettoria del guidatore considerato, in questo modo le traiettorie di tutti i guidatori sono confrontabili.

Successivamente, considerando la posizione del baricentro del veicolo in due istanti successivi (E_i, N_i) e (E_{i+1}, N_{i+1}) , si determina il valore di *heading* θ :

$$\theta = \arctan\left(\frac{E_{i+1}-E_i}{N_{i+1}-N_i}\right) \quad [11]$$

La derivata di θ rappresenta la curvatura della traiettoria del guidatore e, per piccole differenze di progressiva (ovvero alti tassi di campionamento), valgono le seguenti relazioni:

$$\theta' = c_i = \text{curvatura} = \frac{d\theta}{ds} \cong \left(\frac{\theta_{i+1}-\theta_i}{s_{i+1}-s_i}\right) \quad [12]$$

$$\theta'' = c_{r,i} = \text{tasso di variazione di curvatura} = \frac{dc}{ds} \cong \left(\frac{c_{i+1}-c_i}{s_{i+1}-s_i}\right) \quad [13]$$

Considerando s la progressiva dei punti considerati.

I valori di θ ottenuti però sono soggetti a rumore gaussiano che colpisce i sistemi di posizionamento. Per rimuovere il rumore, i dati sono stati filtrati secondo il metodo del semivariogramma proposto da Gikas & Stratakis (2012). L'*heading* è stimato come la media mobile di un intervallo con ampiezza definita, in modo da ridurre la componente locale del rumore nei dati senza influire sul contenuto informativo effettivo della geometria della traiettoria (Catani & Bassani, 2018). Riprendendo lo studio di Catani & Bassani, la condizione ottimale per ridurre il rumore è di calcolare la media mobile considerando un set di 18 dati.

Una volta ottenuti i valori di curvatura per ogni punto della traiettoria di un guidatore, questi sono stati rappresentati su un diagramma delle curvature e confrontati con la curvatura del tracciato. Dai grafici ottenuti sono stati calcolati i seguenti parametri:

- d_a = *distanza di anticipazione*, è la distanza tra la progressiva del punto in cui il guidatore inizia la manovra di sterzata e la progressiva del punto iniziale della clotoide (punti TS: *tangent to spiral* oppure punti CS: *curve to spiral*);
- c = *curvatura media* lungo un arco circolare;
- $c_{r,i}$ = *variazione di curvatura lungo gli elementi di transizione*,
variabile identifica la velocità con cui il conducente ruota il volante.

La Figura 12 mostra i diversi casi in cui sono state misurate le variabili. La linea nera indica la curvatura del tracciato stradale e quella verde la curvatura adottata dal partecipante durante la guida al simulatore.

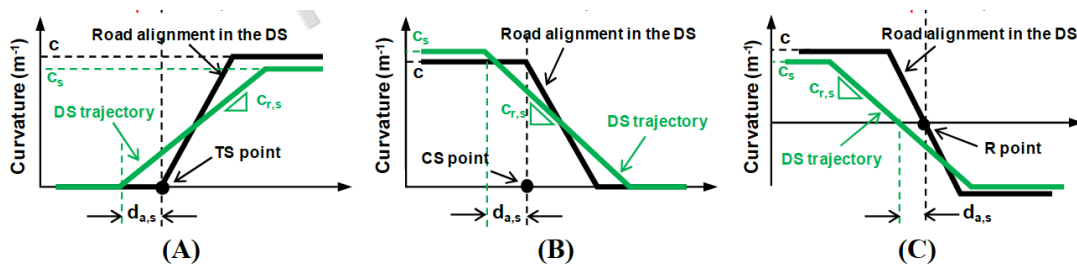


Figura 12 - Rappresentazione schematica dei profili di curvatura utilizzati per elaborare la distanza di anticipazione (d_a) e il tasso di variazione della curvatura media (c_r) passando da rettilineo a clotoide (Caso A), da curva a transizione (Caso B) e da curva a curva (Caso C). La curvatura media adottata dal guidatore lungo le curve circolari è c_s .

2.9 Analisi

La validazione del dispositivo di realtà virtuale è stata condotta eseguendo un'analisi comparativa e una di tipo statistico, sia per quanto riguarda il comportamento longitudinale sia quello trasversale.

2.9.1 Analisi comparativa

In questo tipo di analisi si svolge un confronto grafico e numerico dei dati (media e deviazione standard) ottenuti in ambiente reale e al simulatore. Considerando una qualsiasi variabile studiata nel presente esperimento, si ottiene la validità relativa se la differenza tra le media dai dati simulati e quella dei dati reali mantiene segno costante in tutti i punti di misura. Per determinare la validità assoluta è necessaria l'analisi statistica.

2.9.2 Analisi statistica

Questa utilizza le informazioni provenienti da una statistica campionaria per fare inferenza sulla popolazione da cui è stato tratto il campione (Garetto, 2002). L'obiettivo

dell'analisi consiste nel determinare la veridicità dell'ipotesi statistica H_0 (o ipotesi nulla): una teoria o una proposizione riguardante un particolare parametro della popolazione. Il procedimento utilizzato per accettare o rifiutare l'ipotesi statistica è chiamato test di ipotesi.

Nel presente esperimento l'ipotesi statistica prevede che i *test driver* della guida su strada e della guida al simulatore appartengano alla stessa popolazione. In termini matematici l'ipotesi statistica è definita imponendo l'uguaglianza della media delle popolazioni dei due campioni. Nel caso in cui l'ipotesi sia vera, la validità è assoluta.

I test di ipotesi realizzati sono lo Z-test bilatero e il t-test bilatero, quest'ultimo è stato preceduto dal F-test che verifica l'uguaglianza delle varianze dei due campioni. Tutti e tre i test sono stati eseguiti con Excel®. I parametri di output sono: le variabili Z, F e t (chiamate anche statistica test), i rispettivi valori critici e il *p-value*. Quest'ultima variabile rappresenta la probabilità di ottenere un valore della statistica test uguale o più estremo del valore fornito dal campione, ipotizzando che l'ipotesi nulla sia vera.

L'ipotesi nulla è accettata se il valore della statistica test è inferiore al valore critico, oppure se il *p-value* rispetta determinati limiti, anche definiti livelli di significatività del test; nella pratica statistica i valori critici sono fissati dalla seguente convenzione:

- $p \geq 0.05$, la discrepanza tra dato osservato e valore atteso non è statisticamente significativa (cioè può trattarsi di un effetto casuale del campionamento) e H_0 viene accettata;
- $p < 0.05$, H_0 viene rifiutata. In questo caso la differenza tra dato osservato e valore atteso è statisticamente significativa.

Z-test

Lo *Z-test* è un test di ipotesi che viene effettuato quando si vogliono confrontare le medie di due popolazioni diverse, μ_{reale} e μ_{sim} , nel caso in cui le varianze σ_{reale}^2 e σ_{sim}^2 siano note. Tipicamente il test è utilizzato quando si dispone di grandi campioni (generalmente $n \geq 30$), in questo caso le varianze della popolazione σ_{reale}^2 e σ_{sim}^2 possono essere approssimate con le varianze campionarie s_{reale}^2 e s_{sim}^2 .

L'ipotesi nulla H_0 e la variabile statistica Z sono definite come segue:

$$H_0: \mu_{reale} - \mu_{sim} = d \quad [14]$$

$$Z = \frac{(\bar{X}_{reale} - \bar{X}_{sim}) - d}{\sqrt{\frac{\sigma_{reale}^2}{n_{reale}} + \frac{\sigma_{sim}^2}{n_{sim}}}} \quad [15]$$

$\bar{X}_{reale}$ e $\bar{X}_{sim}$ sono le medie campionarie, d è una costante specificata, n_{reale} e n_{sim} sono rispettivamente la numerosità del campione di *test driver* in ambiente reale e simulato. Il valore $Z_{critico}$ dipende da n_{reale} e n_{sim} e dal livello di significatività, che in questo caso viene fissato $\alpha = 0.05$.

Considerando grandi campioni la distribuzione della differenza fra le medie campionarie può essere approssimata dalla distribuzione normale e la variabile aleatoria Z ha approssimativamente la distribuzione normale standardizzata (Garetto, 2002).

Per imporre l'uguaglianza delle medie, si definisce la costante $d = 0$.

Qui di seguito si riporta un esempio di come Excel® permetta di svolgere il test statistico (Figura 13) e i risultati di output (Tabella 6). La validazione assoluta viene raggiunta se l'ipotesi H_0 viene accettata, quindi nel caso in cui risulti $|Z| < Z_{critico \text{ due code}}$ (oppure $p(Z \leq z)_{due \text{ code}} \geq 0.05$). In caso contrario la sezione può essere validata relativamente se la differenza tra le medie è dello stesso segno anche nelle altre sezioni.

Figura 13 – Interfaccia Excel per svolgere lo Z-test

Tabella 6 – Esempio di risultato per lo Z-test

Test z: due campioni per medie		
Z-test Sezione: 200	Variabile 1	Variabile 2
Media	61.53	63.65
Varianza nota	23.19	63.94
Osservazioni	23	26
Differenza ipotizzata per le medie	0	
z	-1.14	
p(Z ≤ z) una coda	0.13	
z critico una coda	1.64	
p(Z ≤ z) due code	0.26	
z critico due code	1.96	

Poiché in alcune sezioni $n_{reale} < 30$, allora lo z-test è stato affiancato anche dal t-test.

F-test

Il t-test può essere eseguito in due diversi modi a seconda che le varianze delle popolazioni dei due campioni siano uguali o differenti. L'obiettivo del F-test consiste nel determinare l'uguaglianza delle varianze.

Considerando due popolazioni con distribuzione normale e varianza σ_1^2 e σ_2^2 , da cui vengono estratti due campioni di numerosità n_1 e n_2 con varianza campionaria s_1^2 e s_2^2 , si definisce l'ipotesi nulla H_0 e la statistica test F come:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad [16]$$

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad [17]$$

La variabile F ha distribuzione di Fisher, con gradi di libertà $v_1 = n_1 - 1$ e $v_2 = n_2 - 1$.

La Figura 14 mostra la schermata di input proposta da Excel® per svolgere il test statistico e la Tabella 7 invece mostra i dati di output.

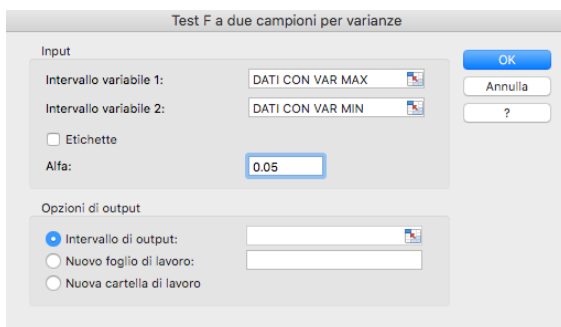


Figura 14 - Interfaccia Excel per svolgere l'F-test

Tabella 7 - Esempio di risultato per l'F-test

Test F a due campioni per varianze		
<i>F-test Sezione: 200</i>	<i>Variabile 1</i>	<i>Variabile 2</i>
Media	63.65	61.53
Varianza	63.94	23.19
Osservazioni	26	23
gdl	25	22
F	2.76	
P(F ≤ f) una coda	0.009	
F critico una coda	2.02	

I valori di $F_{critico}$ dipendono dalle numerosità dei campioni e dal livello di significatività (fissato $\alpha = 0.05$). L'ipotesi nulla è accettata quando $|F| < F_{critico\ una\ coda}$, in questo caso viene eseguito il t-test per campioni con uguale varianza; nel caso in cui l'F-test sia rifiutato, allora si esegue il t-test per campioni con varianza diversa.

t-test

Il *t-test* si esegue per campioni estratti da popolazioni aventi distribuzioni normali, ma numerosità limitata, tali per cui le varianze della popolazione σ_1^2 e σ_2^2 non possono essere approssimate con le varianze campionarie s_1^2 e s_2^2 . Di conseguenza σ_1^2 e σ_2^2 rimangono incognite, e la stima della differenza tra le medie delle due popolazioni si può determinare facendo ricorso alla distribuzione *t*.

Come riportato nel paragrafo precedente, occorre distinguere due casi: quando le varianze delle due popolazioni sono uguali e quando sono diverse. Per entrambi, l'ipotesi H_0 è accettata (validazione assoluta) nel caso in cui $|Stat\ t| < t_{critico\ due\ code}$ (oppure $p(T \leq t)_{due\ code} \geq 0.05$). In caso contrario si ottiene la validata relativa se la differenza tra le medie è dello stesso in tutti i punti di misura.

t-test con campioni ad uguale varianza

Definendo n_{reale} e n_{sim} la numerosità dei campioni di *test driver* in ambiente reale e simulato e s_{reale}^2 e s_{sim}^2 le rispettive varianze campionarie, si calcola la stima congiunta della varianza comune considerando la formula che segue:

$$s^2 = \frac{(n_{reale}-1)s_{reale}^2 + (n_{sim}-1)s_{sim}^2}{n_{reale} + n_{sim} - 2} \quad [18]$$

La statistica test ha distribuzione t , grado di libertà $v = n_{reale} + n_{sim} - 2$, e viene definita come:

$$t = \frac{(\bar{X}_{reale} - \bar{X}_{sim}) - d}{\sqrt{s^2 \left(\frac{1}{n_{reale}} + \frac{1}{n_{sim}} \right)}} \quad [19]$$

con $\bar{X}_{reale}$ e $\bar{X}_{sim}$ medie campionarie e d è costante specificata. Come per lo Z-test si impone $d = 0$ e il valore $t_{critico}$ dipende dalla numerosità del campione e dal livello di significatività, fissato $\alpha = 0.05$.

Qui di seguito si riporta un esempio di come Excel permetta di svolgere il test statistico (Figura 15) e i risultati di output (Tabella 8).

Figura 15 - Interfaccia Excel per svolgere il t-test per campioni con uguale varianza

Tabella 8 - Esempio di risultato per il t-test per campioni con uguale varianza

Test t: due campioni assumendo uguale varianza		
	Variabile 1	Variabile 2
Media	49.67148	52.15435
Varianza	22.5343	39.21216
Osservazioni	23	33
Varianza complessiva	32.41748	
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	54	
Stat t	-1.60543	
P(T ≤ t) una coda	0.057116	
t critico una coda	1.673565	
P(T ≤ t) due code	0.114232	
t critico due code	2.004879	

t-test per campioni con varianze diverse

Questo test è utilizzato nel caso in cui l'F-test sia rifiutato, ovvero la varianza delle due popolazioni non è uguale e deve essere stimata separatamente. Considerando le stesse definizioni delle variabili usate in precedenza, si stima la variabile statistica test come:

$$t = \frac{(\bar{X}_{reale} - \bar{X}_{sim}) - d}{s_{\bar{d}}} \quad \text{con} \quad s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{s_{reale}^2}{n_{reale}} + \frac{s_{sim}^2}{n_{sim}}} \quad [20] [21]$$

La distribuzione della statistica test è approssimata alla distribuzione ordinaria del t di *Student*, con i gradi di libertà calcolati utilizzando la formula [22].

$$v = \frac{\left(\frac{s_{reale}^2}{n_{reale}} + \frac{s_{sim}^2}{n_{sim}}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_{reale}^2}{n_{reale}}\right)^2}{(n_{reale}-1)} + \frac{\left(\frac{s_{sim}^2}{n_{sim}}\right)^2}{(n_{sim}-1)}} \quad [22]$$

Anche in questo caso si riporta un esempio di come Excel permetta di svolgere il test statistico (Figura 16) e i risultati di output (Tabella 9).

Figura 16 - Interfaccia Excel per svolgere il t-test per campioni con varianza diversa

Tabella 9 - Esempio di risultato per il t-test per campioni con varianza diversa

Test t: due campioni assumendo varianze diverse		
t-test Sezione: 200	Variabile 1	Variabile 2
Media	61.53	63.65
Varianza	23.19	63.94
Osservazioni	23	26
Differenza ipotizzata per le medie	0	
gdl	42	
Stat t	-1.14	
P(T ≤ t) una coda	0.13	
t critico una coda	1.68	
P(T ≤ t) due code	0.26	
t critico due code	2.02	

Risultati - Questionari e selezione dei guidatori

In questo capitolo sono analizzate le risposte ai questionari, i test cognitivi e si riporta la procedura adottata per selezionare i *test driver* da non considerare nelle analisi data la presenza di *simulator sickness*.

3.1 Questionari

3.1.1 Sensazioni

In questa sezione i *test driver* hanno potuto esprimere le sensazioni provate durante la simulazione. I risultati mostrano che, in generale, il dispositivo VR non ha provocato un senso di disagio agli utenti. Le percentuali di tutte le risposte sono riportate in ALLEGATO 10.

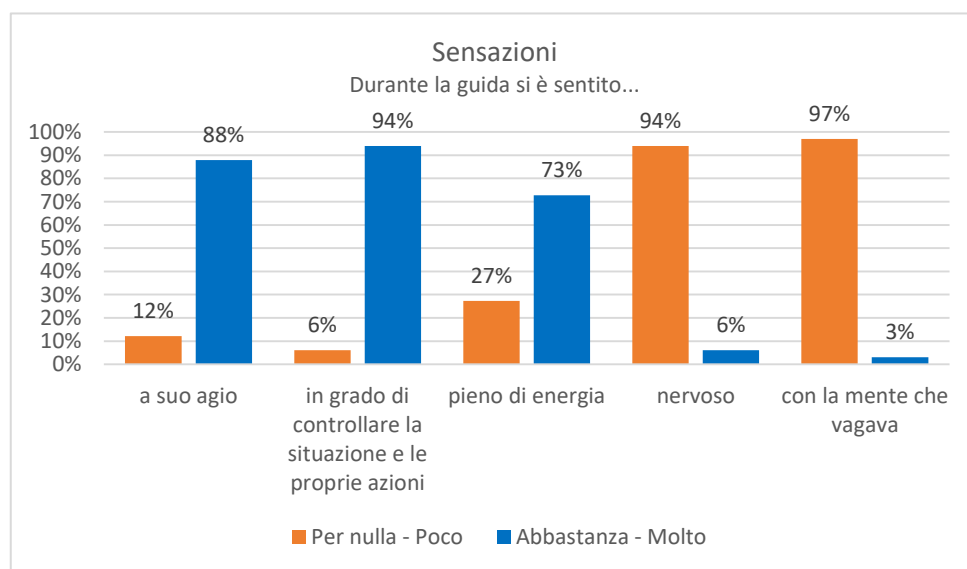


Figura 17 – Sensazioni dichiarate dai partecipanti durante la guida

3.1.2 Immersione

In questa sezione è stato chiesto ai *test driver* di valutare la realistica dello scenario virtuale (Figura 18) e dei dispositivi utilizzati (Figura 19). Tutti i giudizi, differenziati a seconda della risposta, sono riportati in ALLEGATO 10.

I partecipanti hanno espresso giudizi positivi riguardo lo scenario, sia per gli elementi che caratterizzano la strada sia per il traffico presente. Tuttavia, il 73% ha valutato in modo pessimo/sufficiente la qualità dell'immagine. Numerosi partecipanti sono stati disturbati

dal fatto che i pixel degli schermi del visore ottico fossero ben visibili, e che l'immagine non fosse sufficientemente nitida per riconoscere le scritte sul cruscotto o sulla segnaletica verticale.

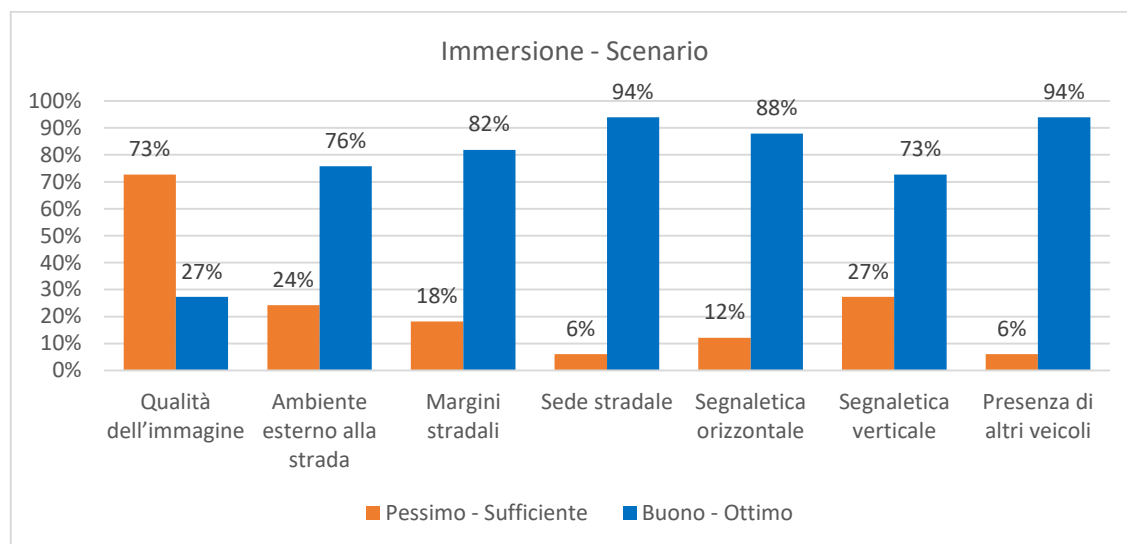


Figura 18 - Giudizi sullo scenario del circuito di Stupinigi

Anche la corrispondenza tra il simulatore e il veicolo virtuale è stata valutata in modo positivo. In particolare, emergono i dati riguardanti gli effetti sonori, il volante e il campo visivo ritenuti tutti molto realistici dai partecipanti. Si notano anche giudizi negativi attribuiti al freno e agli specchietti: il primo molto diverso da quello di una vera automobile, i secondi invece non mostravano l'immagine della strada retrostante.

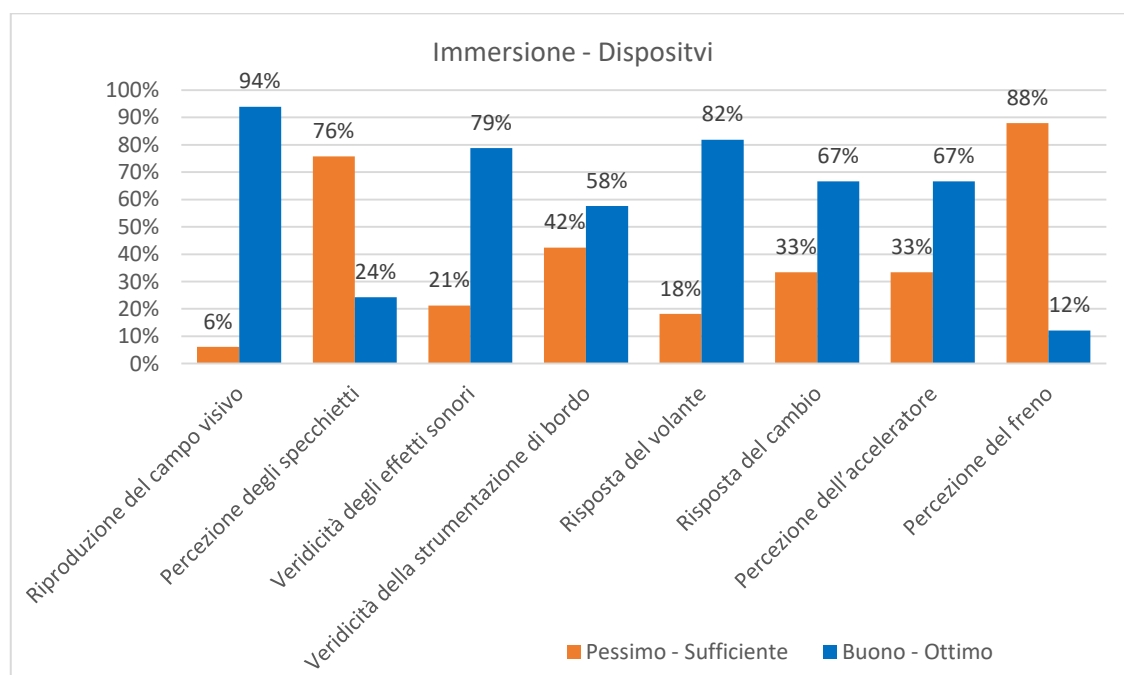


Figura 19 - Giudizi riguardanti la corrispondenza tra simulatore e veicolo virtuale

3.1.3 Presenza

In questa sezione i partecipanti hanno valutato come l'esperienza virtuale potesse essere paragonata a quella reale. In generale i risultati mostrano un buon livello di presenza. Le prime domande (Tabella 10) dimostrano come i partecipanti si siano sentiti coinvolti dall'ambiente virtuale e dall'esperienza di guida. La Q4 attesta che più della metà degli utenti fosse ben isolata dall'ambiente esterno.

Tabella 10 – Domande presenti nel questionario all'interno della sezione Presenza

Q1	Si è sentito fisicamente inserito nell'ambiente virtuale?
Q2	Si è sentito stimolato dall'ambiente virtuale?
Q3	Durante la guida si è sentito coinvolto come se fosse dentro l'ambiente virtuale e non stesse guardando uno schermo o utilizzando le componenti del simulatore?
Q4	Durante la guida si è sentito coinvolto al punto tale da non sapere cosa stesse accadendo attorno a sé?
Q5	Durante la guida si è sentito coinvolto dall'ambiente virtuale al punto da perdere la cognizione del tempo?

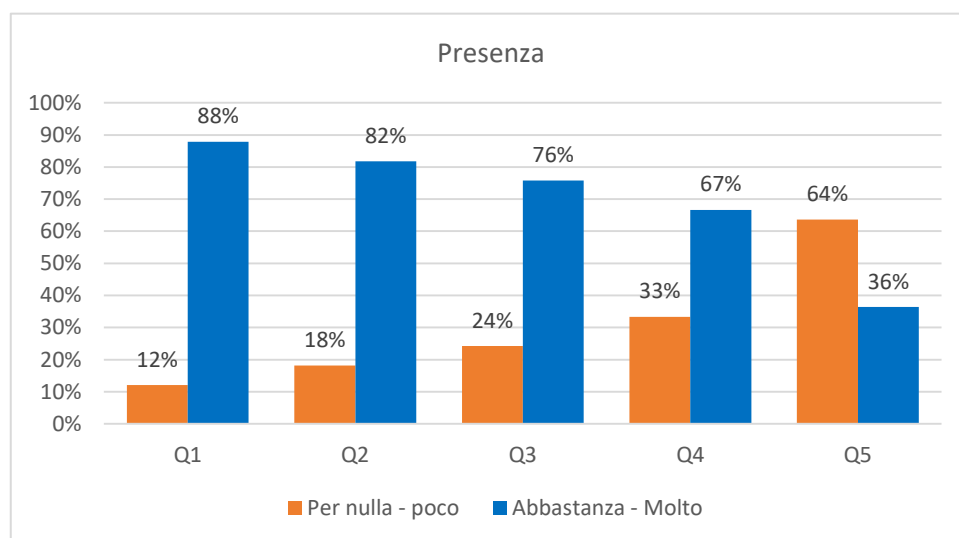


Figura 20 - Risposte legate alla presenza dei guidatori durante la simulazione

Inoltre, sono state poste due domande per valutare se il comportamento dei partecipanti fosse stato condizionato da qualcosa in particolare. I risultati in Figura 21 mostrano come la segnaletica orizzontale e la presenza del traffico in direzione opposta abbiano avuto un ruolo determinante durante la guida, poiché segnalati rispettivamente dal 94% e dal 64% degli utenti.

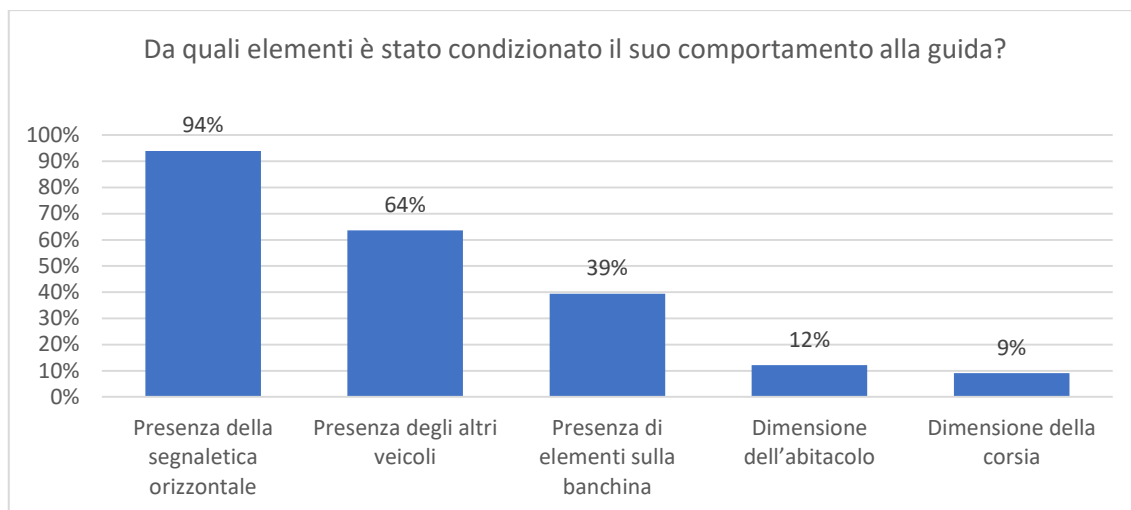


Figura 21 – Elementi che hanno influenzato il comportamento del partecipante durante la guida

La Figura 22 invece mostra come la percezione della velocità non sia strettamente legata a un unico un fattore predominante, ma essa dipende dalle caratteristiche di ogni partecipante. Inoltre, tutti gli utenti hanno prestato attenzione alla velocità adottata durante la guida, a dimostrazione dell'elevato senso di presenza.

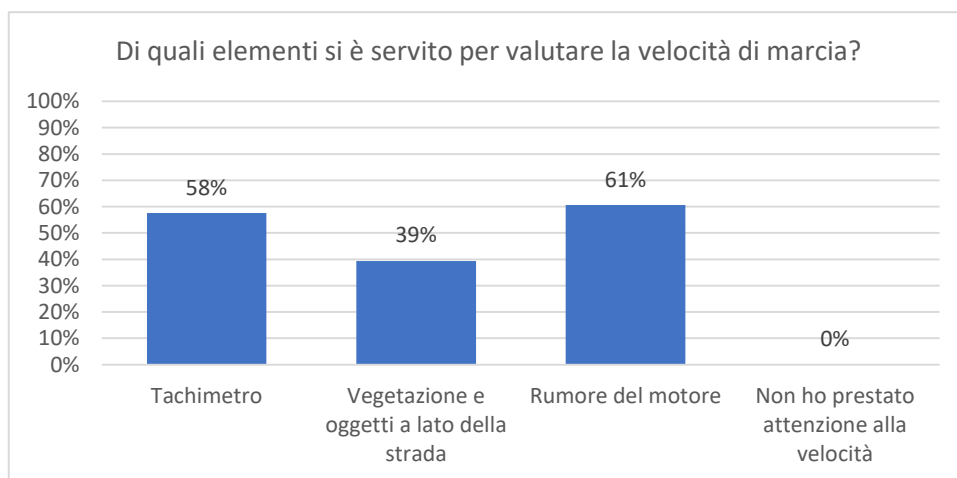


Figura 22 – Percezione della velocità

Infine, è importante evidenziare che il 45% dei partecipanti ha dichiarato di avere difficoltà a gestire il veicolo nelle curve strette (intersezioni a raso e rotatorie) ma, come scritto in precedenza, queste non riproducono fedelmente l'ambiente reale poiché sono generate direttamente dal software e non possono essere modificate.

3.1.4 Tecnologia usata

Questa sezione è stata creata affinché gli utenti valutassero il dispositivo di realtà virtuale, confrontandolo anche con la precedente modalità di visualizzazione a tre schermi. I

grafici di Figura 23 mostrano che per l'82% dei partecipanti il visore non è stato un elemento di disturbo durante la guida e, considerando i 27 *test driver* che in passato hanno partecipato ad altri esperimenti con il simulatore, la maggior parte (17) di loro hanno dichiarato di preferire l'interfaccia VR rispetto alla modalità tre schermi.

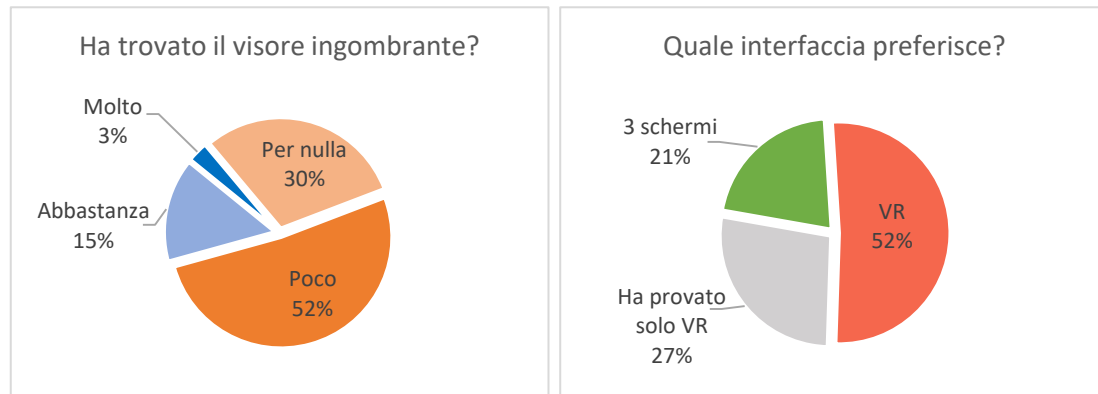


Figura 23 – Giudizi sul visore HTC Vive

3.1.5 Conseguenze dell'esperienza (*Simulator Sickness*)

L'analisi della letteratura ha messo in dubbio il metodo proposto dal SSQ per calcolare la *simulator sickness*. Balk (2013) ha affermato che nonostante il SSQ sia ancora rilevante sarebbe meglio rivalutare i pesi da attribuire ai diversi sintomi; inoltre Kim (2017) propone un nuovo questionario (VRSQ) per gli esperimenti che adottano dispositivi di realtà virtuale, dal quale rimuove il cluster Nausea del SSQ.

Tuttavia, prima di scegliere il VRSQ, sono stati valutati i sintomi degli 8 partecipanti che, dopo la sessione di *training*, hanno deciso di non proseguire l'esperimento. Nella Figura 24 gli elementi indicati con l'asterisco compongono il cluster Nausea. In particolare, si evidenzia che la maggior parte dei *test driver* considerati ha riscontrato i sintomi (1,6,7,13) in modo Moderato/Intenso. Si ritiene che questi fattori siano fondamentali per valutare lo stato di salute dei partecipanti che hanno completato il circuito di Stupinigi (e la loro eventuale eliminazione); di conseguenza il VRSQ, che non considera il cluster Nausea per la quantificazione della *simulator sickness*, risulta inadatto. Pertanto tutti i sintomi presenti nel questionario sono stati esaminati solo in modo qualitativo, tralasciando la determinazione dei punteggi proposti dal SSQ o dal VRSQ.

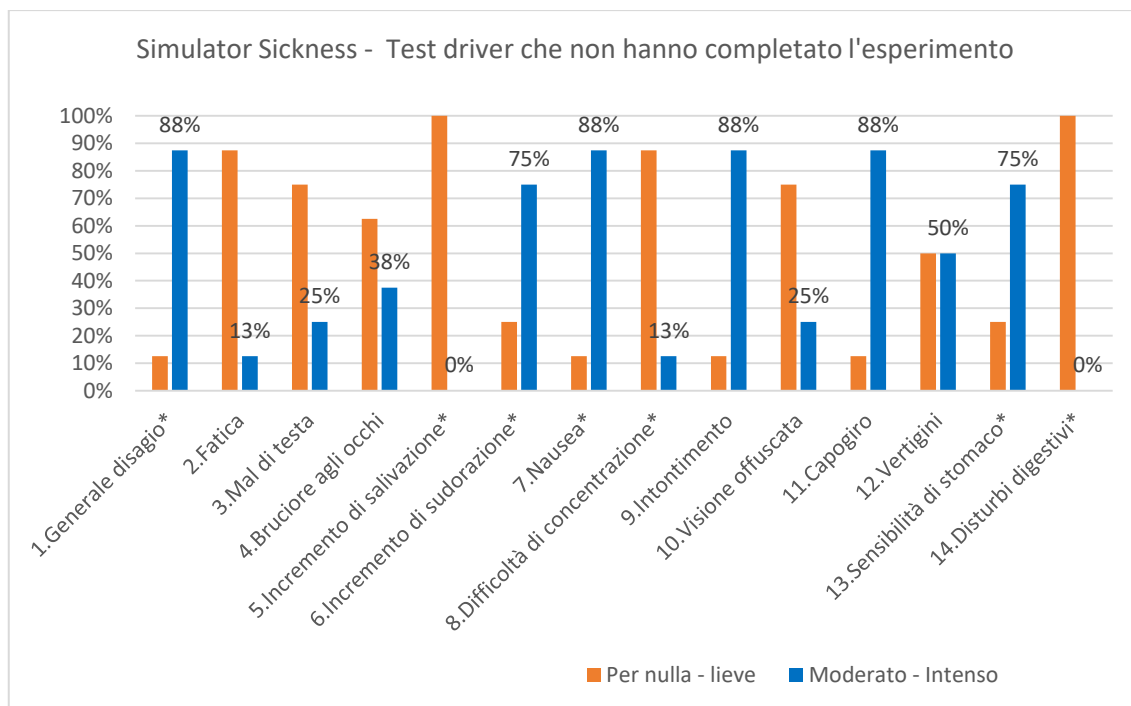


Figura 24 – Simulator sickness dei partecipanti che hanno abbandonato l'esperimento dopo la sessione di training

Le risposte dei partecipanti che hanno completato il circuito di Stupinigi sono riportate in Figura 25 (e in dettaglio per ogni guidatore nell'ALLEGATO 10). I sintomi (6,7) si sono verificati con la più alta percentuale di risposte Moderato/Intenso, tuttavia tale percentuale non supera il 24%. In generale la *simulator sickness* è presente ma non in modo rilevante.

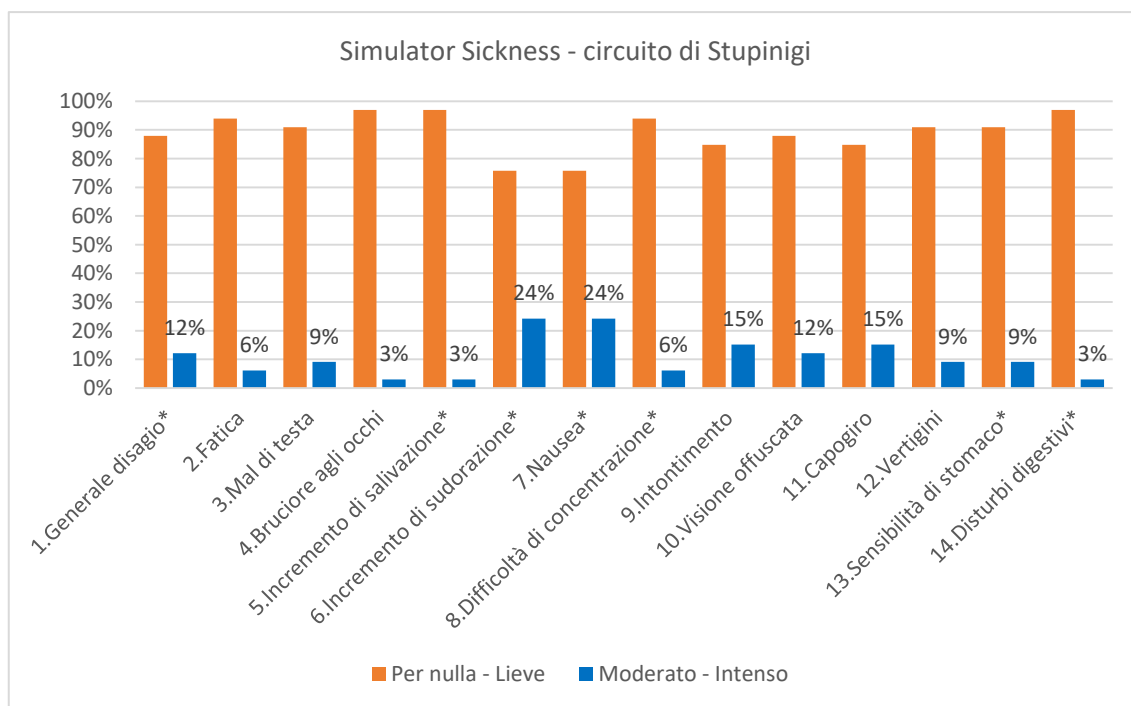
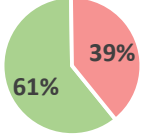
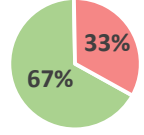


Figura 25 – Valutazione generale della simulator sickness su tutto il campione di test driver

3.2 Test cognitivi

La Tabella 11 riporta i risultati dei test cognitivi di tutti i partecipanti. Sia per il test visivo sia per quello uditivo, il tempo di percezione e reazione medio della sessione post-guida è inferiore rispetto a quello della sessione pre-guida; invece la dispersione dei dati valutata nei due momenti è simile.

Tabella 11 – Test cognitivi

	Visivo		Uditivo	
	Pre-guida	Post-guida	Pre-guida	Post-guida
Media	293.38	285.41	205.85	202.47
Dev.st	28.94	32.83	34.26	33.50
	Miglioramento	Peggioramento	Miglioramento	Peggioramento
# partecipanti	20	13	22	11
				

La maggior parte dei partecipanti ha migliorato il proprio tempo di reazione. I risultati possono essere spiegati considerando un aumento dell'attenzione dell'utente dopo la guida al simulatore.

Inoltre, si è deciso di suddividere i *test driver* in due gruppi: HS (*High Sickness*) e LS (*Low Sickness*). Il primo è costituito da tutti i guidatori che hanno risposto al questionario con almeno un sintomo Moderato o Intenso, il secondo dai *test driver* restanti. Si nota per entrambi i gruppi che i tempi di reazione medi pre e post guida sono simili. I risultati non concordano con l'affermazione di Graybiel (1968) secondo cui il malessere generi un peggioramento nei compiti cognitivi. Pertanto, attraverso i test cognitivi non è possibile giungere a una quantificazione del malessere da simulazione.

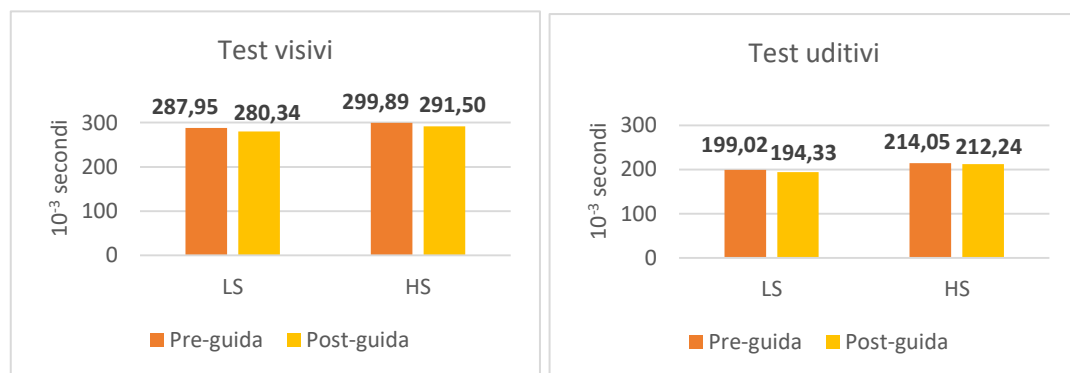


Figura 26 – Tempi di reazione medi per i gruppi HS (*High Sickness*) e LS (*Low Sickness*)

3.3 Scelta dei guidatori

Giunti alla fine dell'esperimento, tutte le guide (relative ai 33 *test driver* che hanno completato il circuito di Stupinigi) sono state considerate nello studio di validazione. Tuttavia prima di svolgere l'analisi statistica, data l'assenza di un metodo valido per quantificare la *simulator sickness*, sono state fatte delle considerazioni per valutare se lo stato di malessere avesse condizionato la guida di alcuni partecipanti e, in tal caso, l'esclusione degli stessi. Il procedimento adottato viene descritto qui di seguito.

Per ogni tratto (dalla Figura 27 alla Figura 34), sono stati tracciati:

- i profili di velocità di tutti i *test driver* (in grigio);
- il profilo di velocità medio (μ);
- i profili di velocità che identificano l'intervallo di confidenza ($\mu \pm 3\sigma$);

L'intervallo di confidenza è stato individuato considerando il profilo medio $\pm 3\sigma$, con σ la deviazione standard delle velocità di tutti i guidatori. Nell'ipotesi che i dati di velocità siano normalmente distribuiti, e che i valori utilizzati per calcolare la media abbiano il 99.7% di probabilità di ricadere all'interno dell'intervallo, tutti i profili esterni sono di guidatori che si discostano eccessivamente dall'andamento medio.

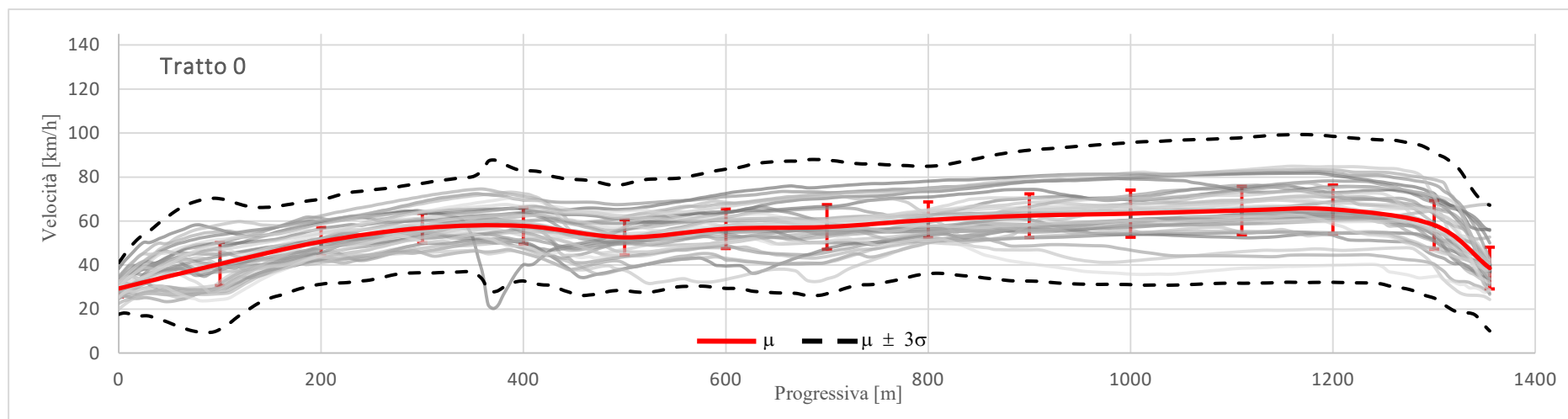


Figura 27 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 0

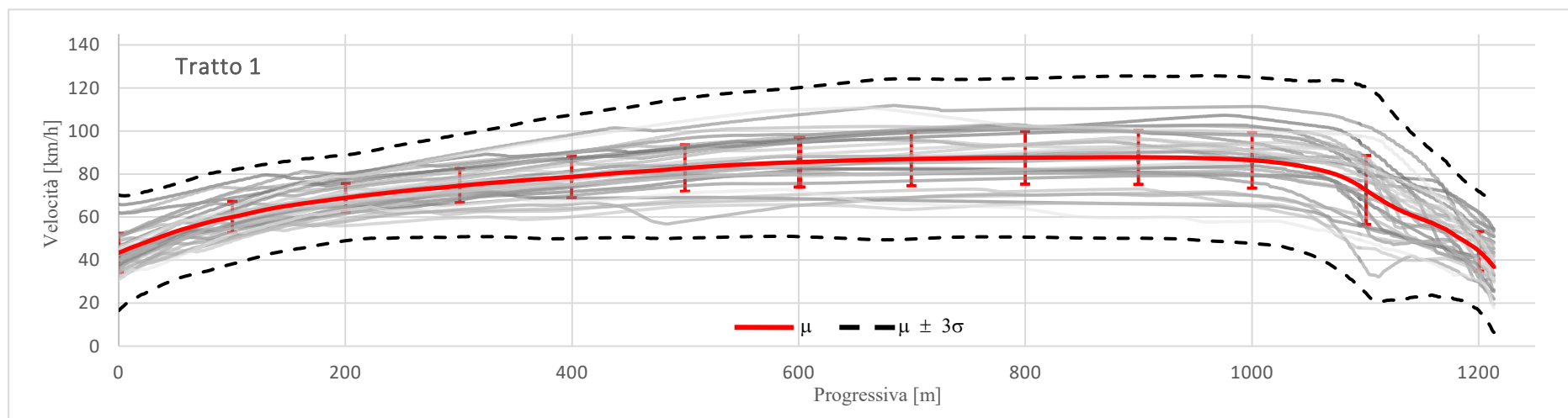


Figura 28 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 1

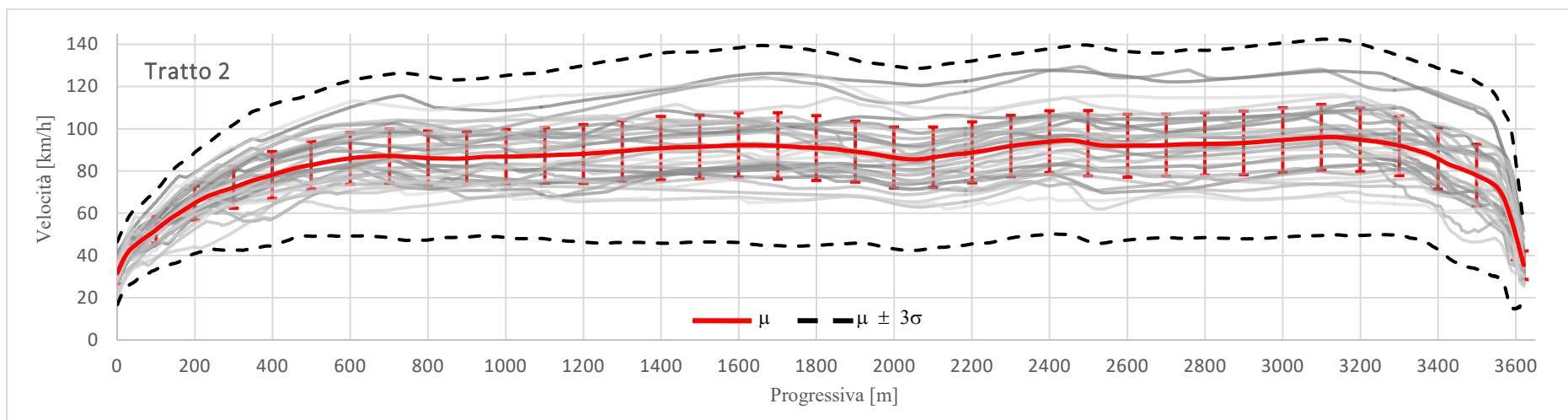


Figura 29 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 2

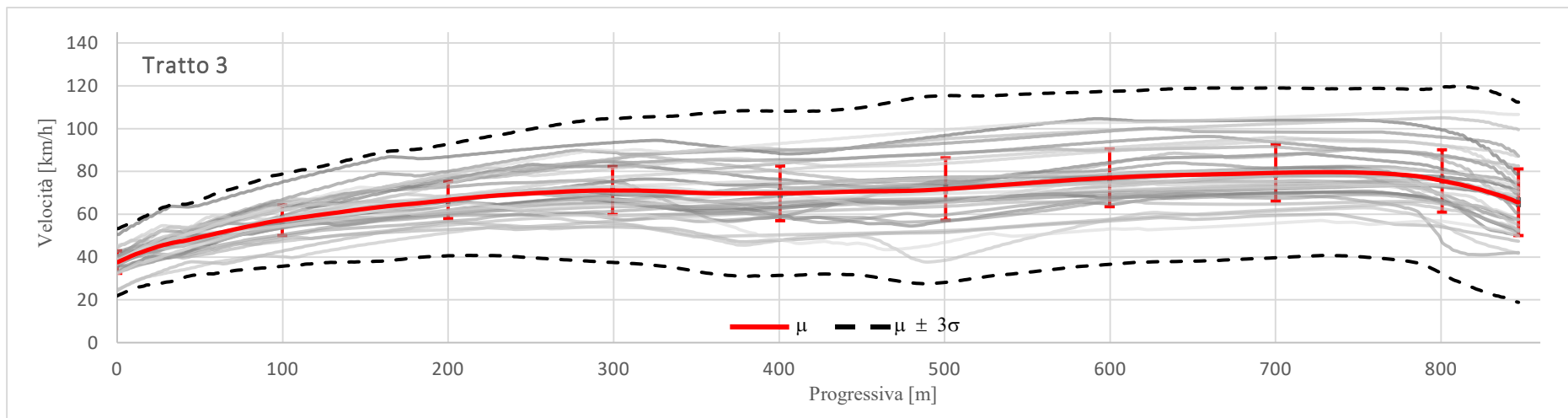


Figura 30 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 3

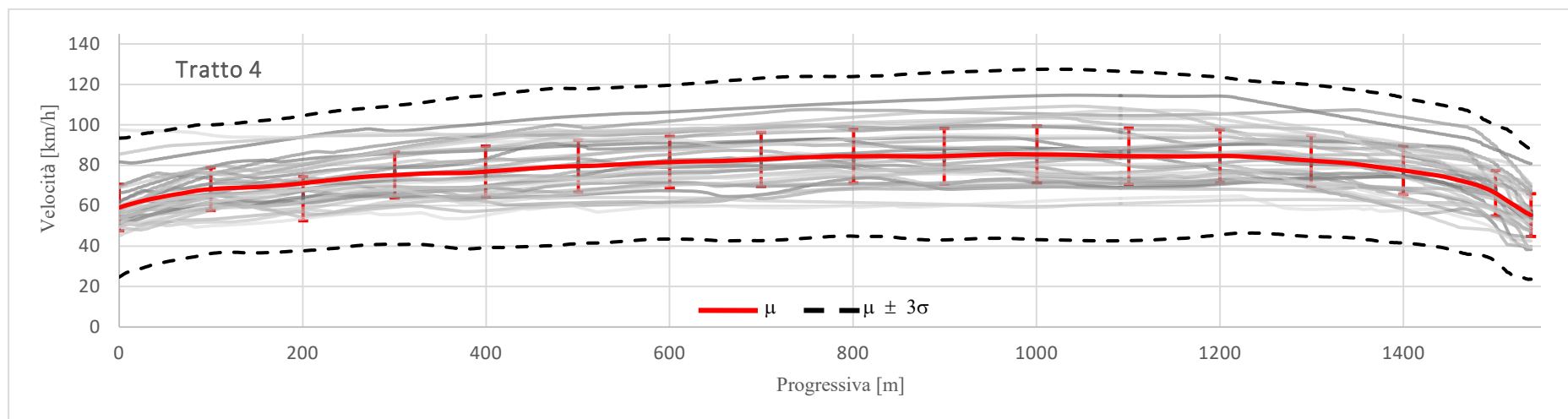


Figura 31 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 4

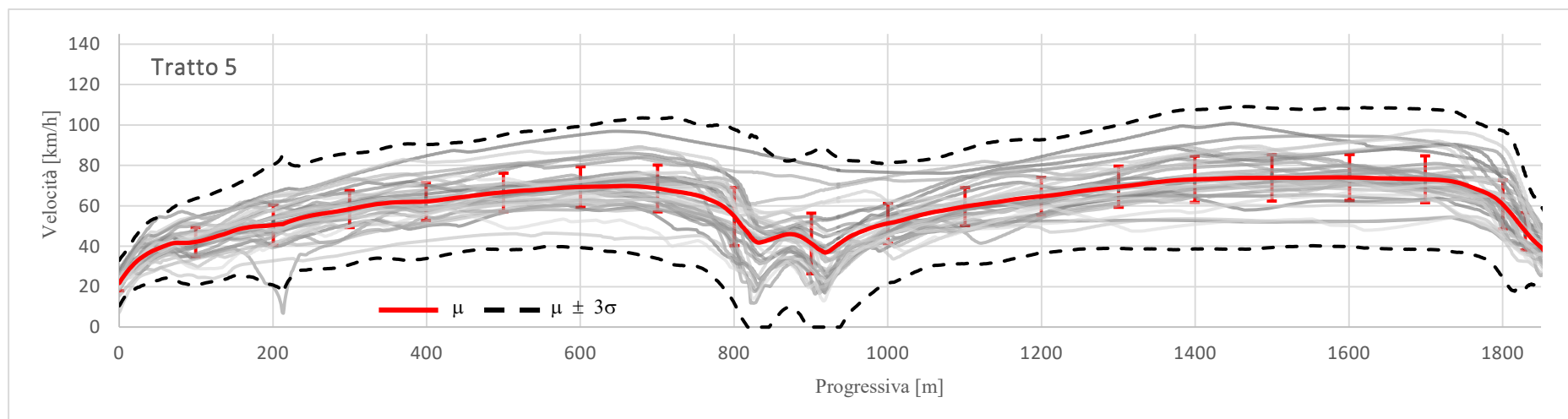


Figura 32 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 5

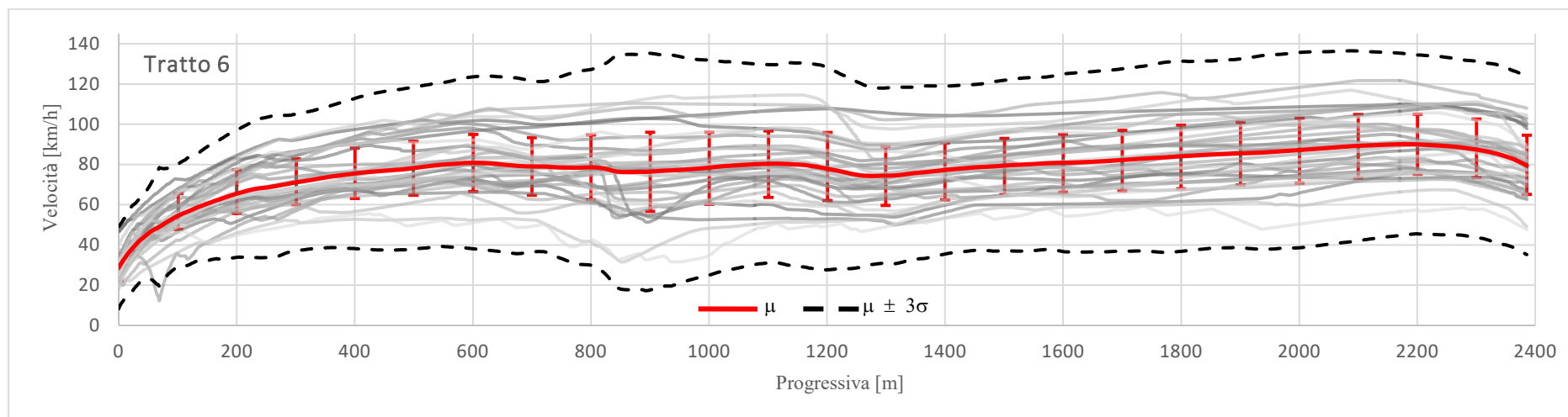


Figura 33 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 6

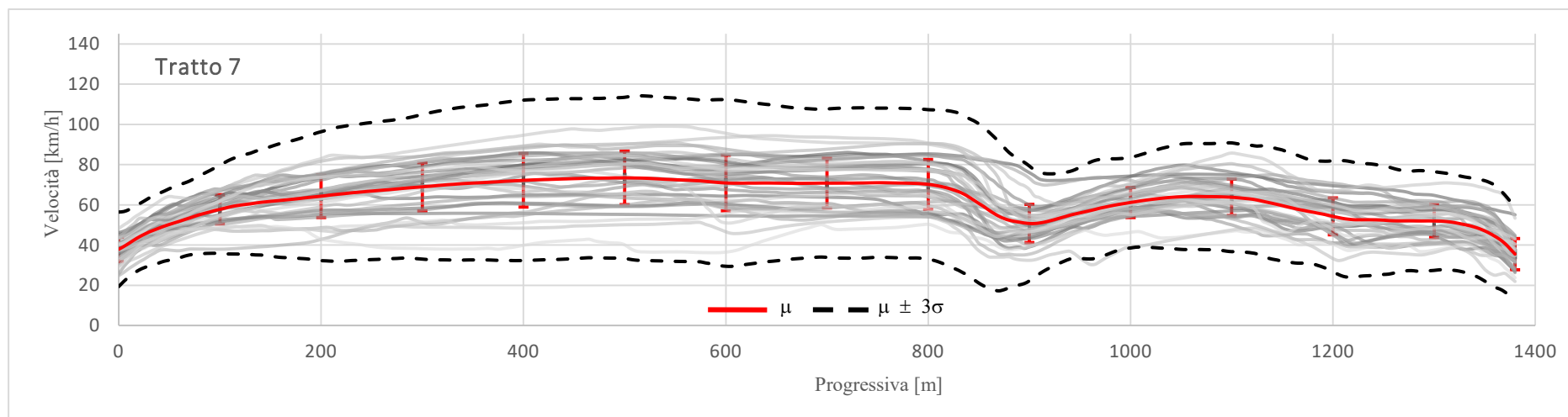


Figura 34 - Profili di velocità di tutti i test driver, profilo di velocità medio e intervallo di confidenza per il tratto 7

In questa fase, nessun guidatore è stato escluso poiché, tutti i profili sono risultati compresi all'interno dell'intervallo di confidenza. Solo in alcune sezioni sono presenti dei punti esterni, i quali non sono dovuti a cause associate al malessere da simulazione, ma possono essere associati a incertezze dell'utente durante la guida che lo hanno indotto a ridurre la velocità.

Lo studio di Ignazzi (2017) ha evidenziato dei problemi per il Tratto 5. La non perfetta corrispondenza tra ambiente reale e ambiente simulato non ha reso possibile l'accostamento dei dati provenienti dai due diversi ambienti, pertanto si è deciso di escludere il tratto dallo studio di validazione.

Successivamente sono stati confrontati i profili di velocità media dei due gruppi LS e HS per valutare se i componenti di quest'ultimo mostrassero un comportamento significativamente diverso. Dalla Figura 35 alla Figura 41 si nota che gli andamenti sono simili lungo tutto il circuito: nei tratti 0, 1, 2, 3 e 4 il gruppo LS è caratterizzato da valori di velocità maggiori, invece nei tratti 6 e 7 i due profili arrivano a convergenza. Per i primi cinque tratti la differenza tra i due profili è data dalla presenza di TD 1, TD 9 e TD 22 (tutti appartenenti a LS) che hanno mostrato un comportamento di guida maggiormente aggressivo rispetto agli altri partecipanti.

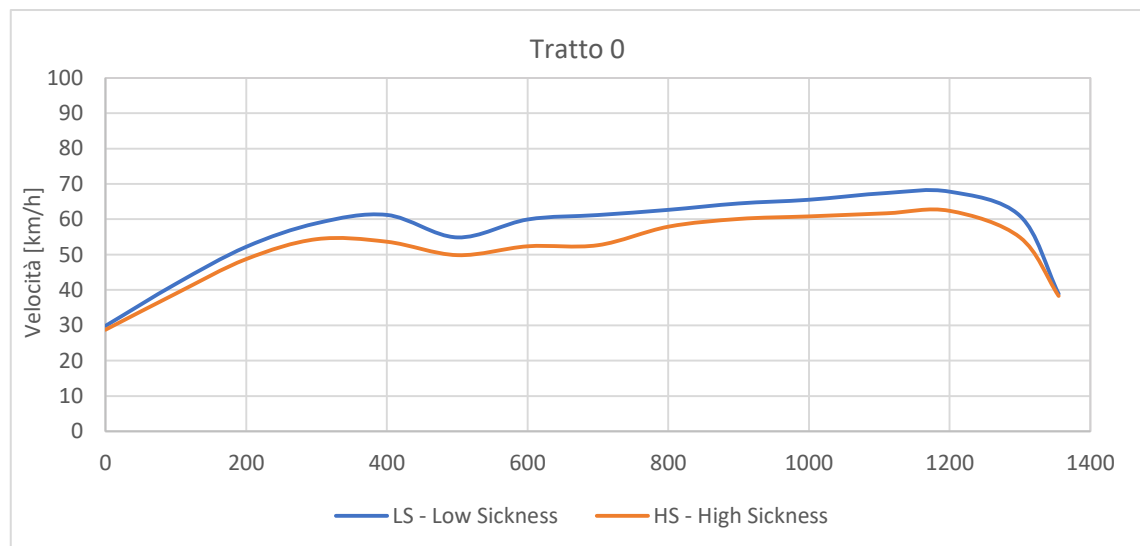


Figura 35 – Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 0

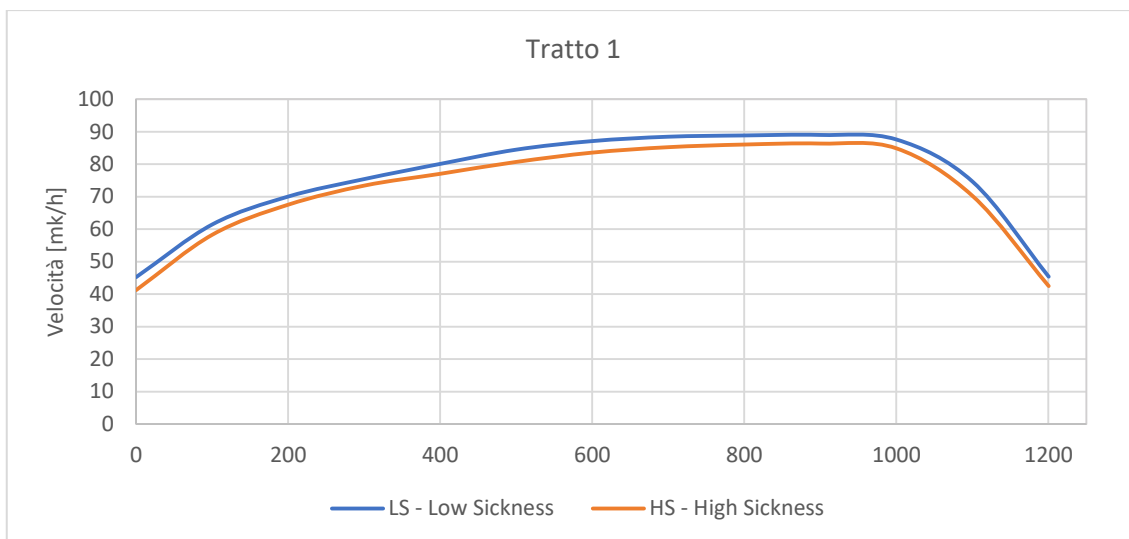


Figura 36 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 1

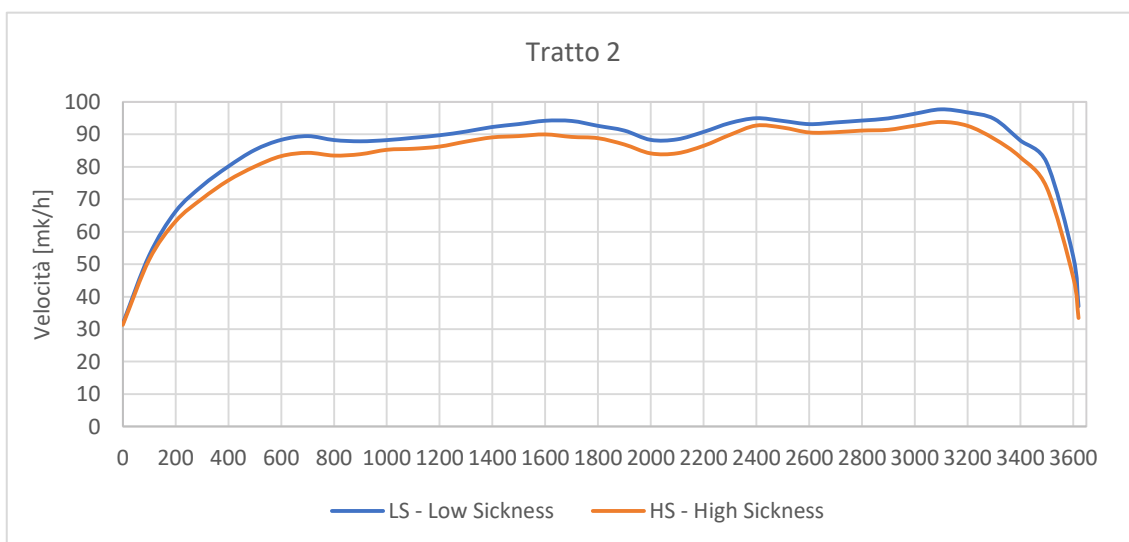


Figura 37 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 2

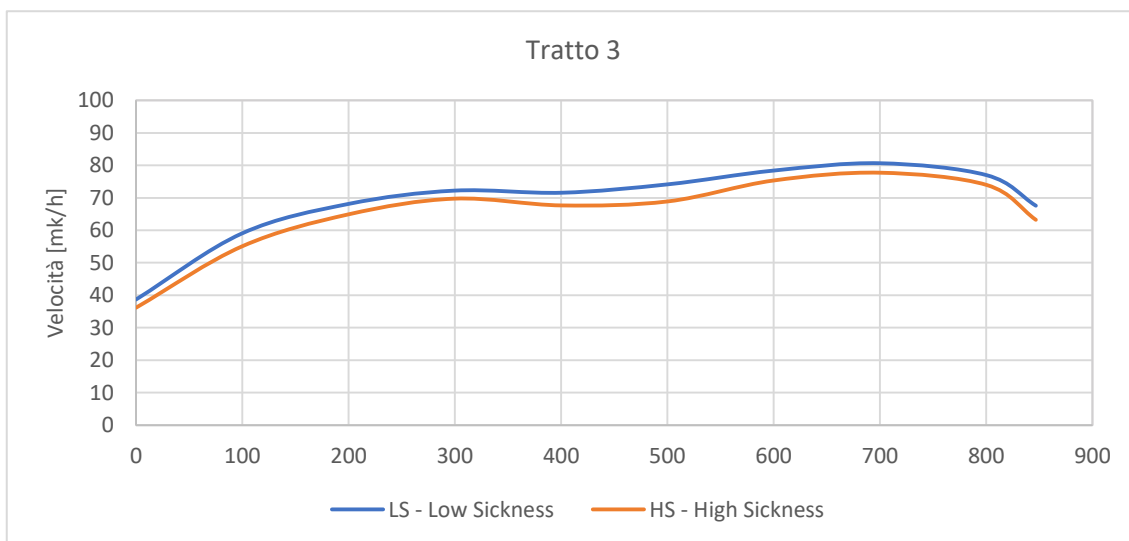


Figura 38 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 3

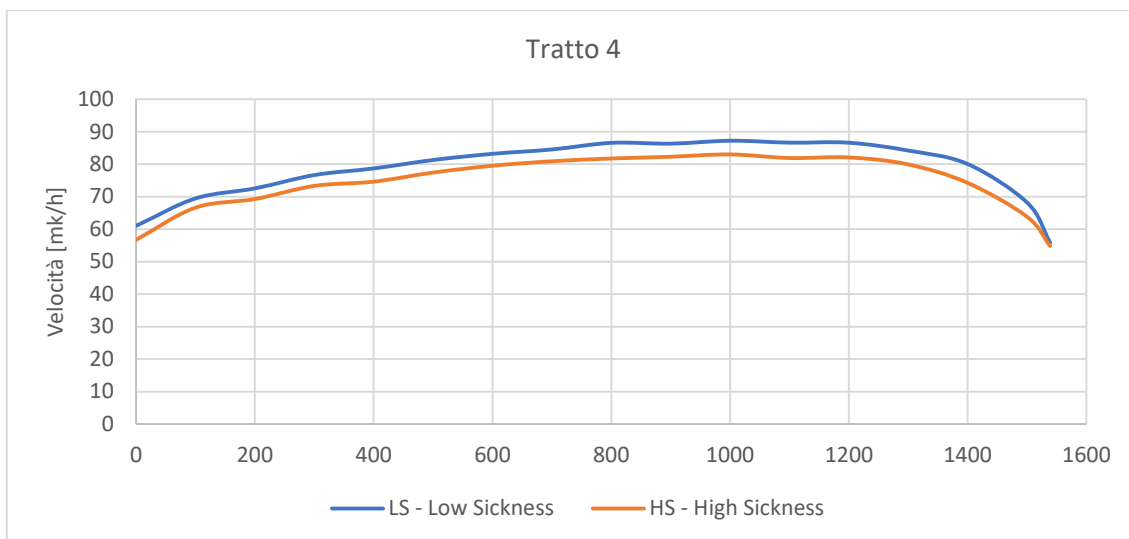


Figura 39 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 4

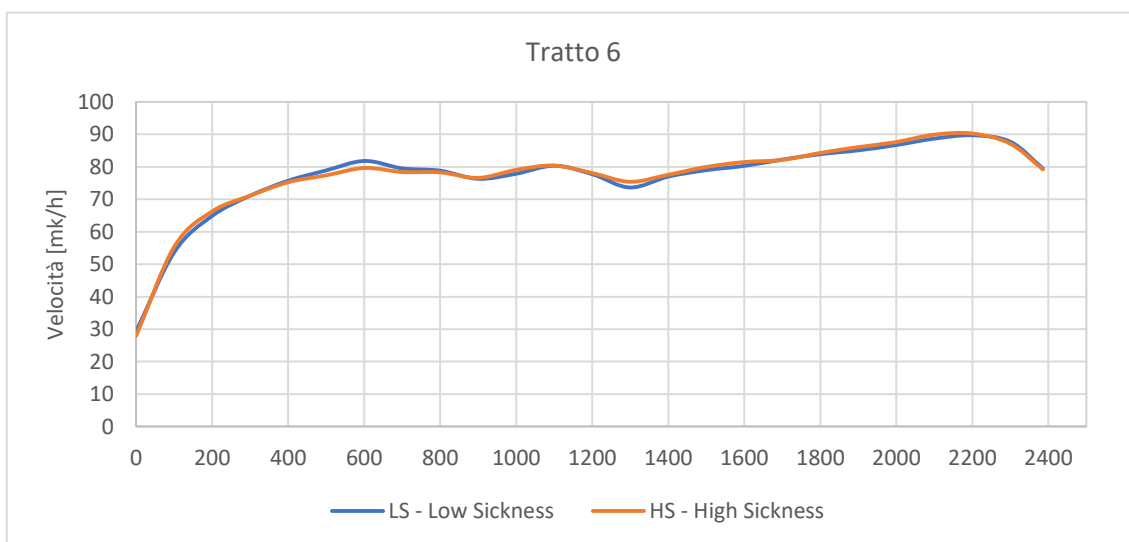


Figura 40 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 6

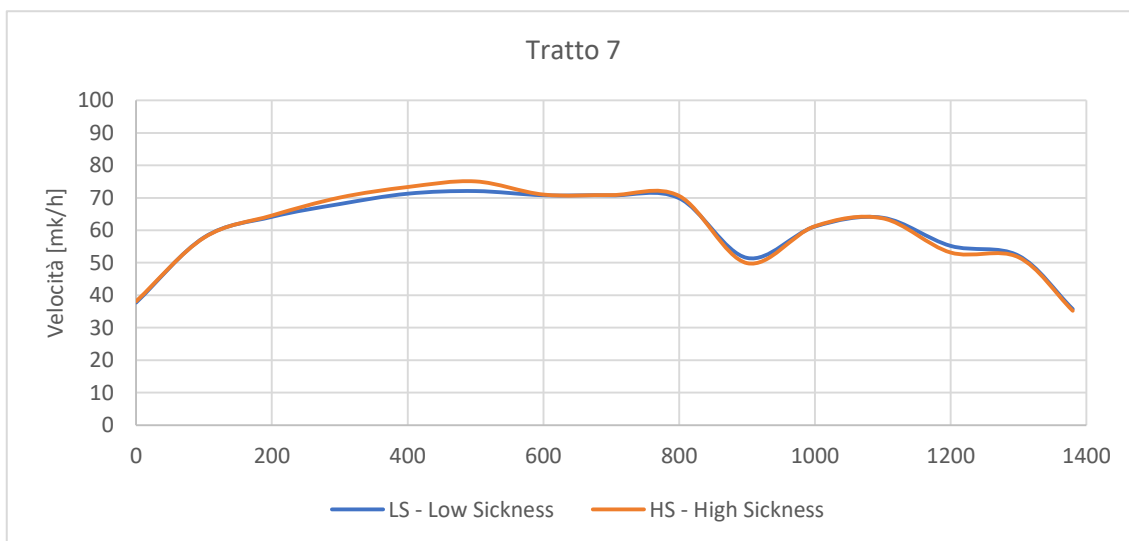


Figura 41 - Confronto tra i profili di velocità media dei gruppi LS e HS per il Tratto 7

Un'ulteriore analisi è stata eseguita mediante la predisposizione di *box plot*. Questa rappresentazione permette di comparare le distribuzioni di velocità dei due gruppi in ogni sezione del circuito, individuando possibili *outliers* (guidatori con velocità che si discostano eccessivamente dalla media). Tuttavia, il confronto visivo da solo non è sufficiente, per cui è stata svolta anche un'analisi statistica attraverso l'F-test e il t-test. Il superamento di quest'ultimo stabilisce se i dati delle due distribuzioni appartengono o meno alla stessa popolazione.

In generale i *box plot* confrontati occupano gli stessi intervalli di velocità e il t-test risulta superato in 130 sezioni su 133. Quindi, anche in questa fase, nessun guidatore è stato eliminato dal campione. A titolo di esempio si riporta nella Figura 42 il confronto effettuato nella sez700 del Tratto 3. I risultati di tutte le sezioni e i relativi test statistici sono presenti all'interno dell'ALLEGATO 11.

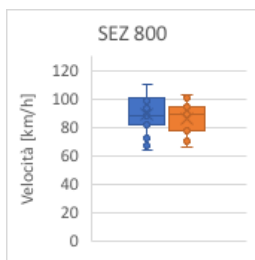


Figura 42 – Box plot delle velocità dei gruppi LS (a sinistra, in blu) e HS (a destra, in arancione)

Infine, la Figura 43 rappresenta i box plot delle velocità del gruppo HS in 5 sezioni di rettilineo scelte in modo casuale, su tratti diversi, sufficientemente distanti dai punti di inizio e fine del rettilineo (quindi dalle fasi di accelerazione e frenatura). Sono evidenziati i valori di velocità dei guidatori che hanno dichiarato un sintomo “Intenso”. In questo modo si è osservato se la presenza *simulator sickness* ha indotto i partecipanti a ridurre notevolmente la propria velocità.

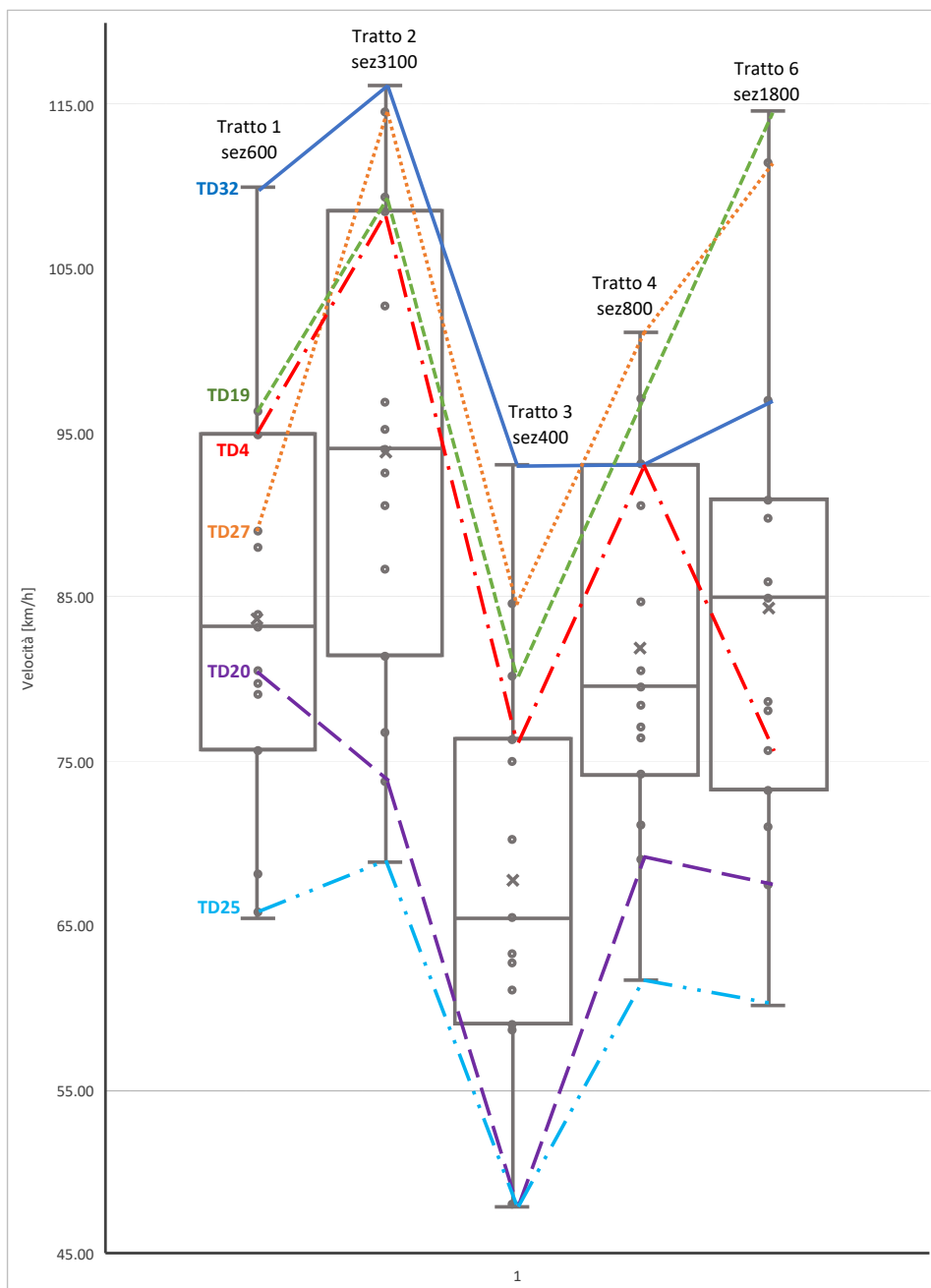


Figura 43 – Analisi test driver che hanno dichiarato almeno un sintomo “Intenso”

Dalla Figura 43 risulta che i TD 19, 20, 25, 27 e 32 hanno mantenuto un comportamento “coerente”, ovvero sempre sopra o sotto la media. Il TD 4 invece ha adottato velocità superiori alla media, per i tratti da 0 a 4, e velocità sotto la media per il tratto 6. Il comportamento del TD 4 è stato analizzato valutando il suo profilo di velocità nel penultimo tratto: rispetto a tutti i *test driver* che diminuiscono la loro velocità in modo progressivo, il TD 4 ha eseguito una brusca frenata tra la sez700 e la sez1000. Questo comportamento è dovuto ad un errore del guidatore che, invece di proseguire dritto, ha

pensato di dover svoltare in un'intersezione presente lungo quelle progressive. Infatti, subito dopo la sez1000 il TD 4 ha ripreso velocità più coerenti con il suo profilo.

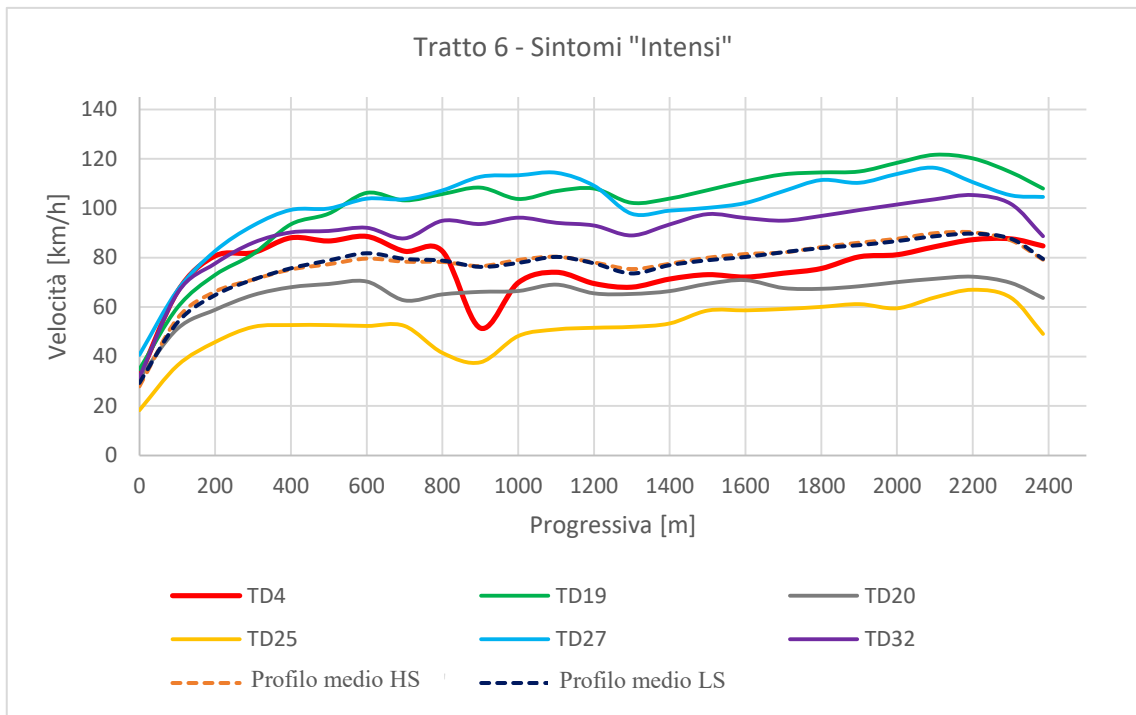


Figura 44 – Profili di velocità dei test driver che hanno risposto con almeno un sintomo "Intenso"

In conclusione, non esiste un valido motivo per eliminare uno o più guidatori. Le analisi comparative e statistiche, descritte nei paragrafi successivi, sono state svolte tenendo in considerazione tutti i partecipanti.

I dati di velocità sono stati estratti a intervalli di 100 m lungo tutti i tratti del circuito, successivamente con i valori medi sono stati costruiti i profili di velocità relativi alle guide avvenute sul campo e al simulatore.

Inizialmente sono confrontati i dati reali con quelli registrati al simulatore utilizzando il sistema di realtà virtuale. Nel capitolo 4.2, invece, si valutano le differenze tra i profili di velocità media ottenuti al simulatore, ma con 2 interfacce differenti (VR e tre schermi).

4.1 Confronto realtà e sistema VR

Le tabelle presenti nei paragrafi successivi riportano le seguenti variabili:

- μ_{reale} = velocità media delle guide naturalistiche [km/h];
- σ_{reale} = deviazione standard (velocità) delle guide naturalistiche [km/h];
- μ_{VR} = velocità media delle guide simulate ottenute con il VR [km/h];
- σ_{VR} = deviazione standard (velocità) delle guide simulate con il VR [km/h];
- $\Delta\mu = (\mu_{VR} - \mu_{reale})$, nei casi nei quali lo Z-test e il t-test risultano respinti, le celle assumono uno sfondo verde se $\Delta\mu > 0$, invece se $\Delta\mu < 0$ lo sfondo è rosso;
- $P(Z \leq z) \text{ \& } P(T \leq t) = p\text{-value}$ rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
- Z e t = statistica test, rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
- Z_{crit} e t_{crit} = valori critici di Z e t , rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
-  (Z-test) e  (t-test) = l'ipotesi nulla è accettata;
-  (Z-test) e  (t-test) = l'ipotesi nulla è respinta;

Tratto 0

Il Tratto 0 fiancheggia il lato destro della palazzina di caccia di Stupinigi ed è prevalentemente curvilineo. Nella prima parte del tratto è presente un rettilo che separa due curve circolari rispettivamente con raggio pari a 100 e 60 m, fino alla sez600 (esclusa la sezione in curva con raggio 60 m) le velocità al simulatore sono inferiori rispetto a quelle registrate in campo reale. Segue poi una curva circolare con raggio di 230 m e lunghezza superiore a 700 m, in questa parte di tratto l'andamento dei due profili medi si inverte e la differenza tra le due velocità aumenta progressivamente. Tuttavia, mentre nelle prime due sezioni i profili si discostano di circa 5 km/h, in quelle successive i profili si sovrappongono, la differenza di velocità varia da un minimo di 0.33 ad un massimo di 3.88 km/h. La convergenza dei due profili viene riscontrata anche dalle analisi statistiche: in questo tratto 12 sezioni su 14 risultano validate in modo assoluto; sono escluse la sez0 e la sez100, le quali presentano una variazione di velocità statisticamente significativa.

I risultati in Tabella 12 mostrano anche che in tutte le sezioni la guida al simulatore è caratterizzata da valori di deviazione standard maggiori rispetto alla guida reale.

Tabella 12 – Velocità medie e deviazioni standard dei due campioni di test driver e test statistici per il Tratto 0

Tratto 0						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}	H_0	$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	H_0
0	34.41	3.81	29.35	3.90	-5.06	0.000	5.07	1.96		0.000	2.00	5.06	
100	45.78	4.42	40.48	9.89	-5.30	0.006	2.76	1.96		0.008	2.01	2.76	
200	51.06	5.28	50.63	6.44	-0.44	0.774	0.29	1.96		0.779	2.00	0.28	
300	57.82	5.34	56.83	6.77	-1.00	0.523	0.64	1.96		0.536	2.00	0.62	
400	58.14	6.76	57.78	8.33	-0.36	0.854	0.18	1.96		0.857	2.00	0.18	
500	50.10	4.17	52.59	8.05	2.49	0.123	1.54	1.96		0.130	2.01	1.54	
600	58.37	4.80	56.49	9.03	-1.88	0.302	1.03	1.96		0.307	2.01	1.03	
700	56.87	5.38	57.32	10.10	0.45	0.827	0.22	1.96		0.828	2.01	0.22	
800	60.17	6.52	60.50	8.14	0.33	0.863	0.17	1.96		0.867	2.00	0.17	
900	61.75	6.68	62.48	9.91	0.73	0.736	0.34	1.96		0.737	2.00	0.34	
1000	61.59	6.06	63.38	10.76	1.79	0.417	0.81	1.96		0.421	2.01	0.81	
1100	60.94	6.00	64.82	11.02	3.88	0.083	1.73	1.96		0.089	2.01	1.73	
1200	61.70	5.56	65.34	11.05	3.64	0.098	1.65	1.96		0.105	2.01	1.65	
1300	57.11	6.03	58.20	11.06	1.09	0.628	0.48	1.96		0.630	2.01	0.48	
			# sezioni										
Totali			14										
Val. Assoluta			12	86%									
Test rifiutato			2	14%		$\mu_{sim_VR} > \mu_{real}$	0		$\mu_{sim_VR} < \mu_{real}$		2		

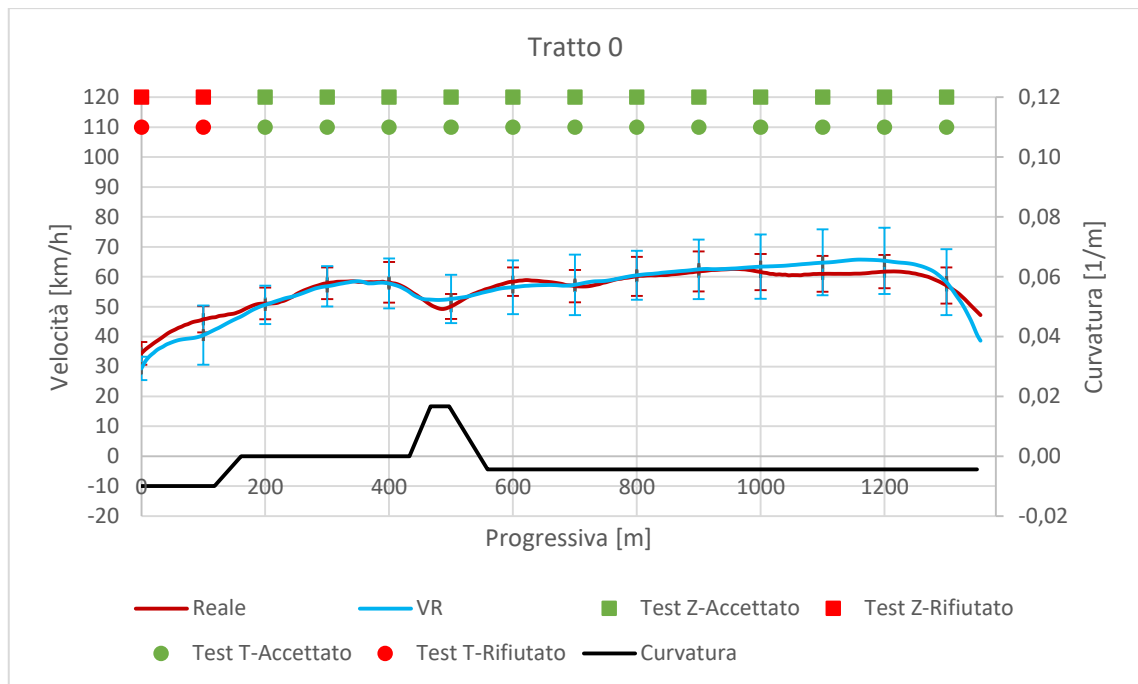


Figura 45 – Profili di velocità medi e test statistici per il Tratto 0

Tratto 1

Il tratto 1 è un rettifilo. Nella prima sezione la velocità media simulata è più piccola di circa di 10 km/h rispetto alla velocità media della guida reale. All'interno dell'ambiente virtuale la curva d'immissione che precede l'inizio del tratto è caratterizzata da un grado di difficoltà maggiore rispetto alla medesima curva presente sul circuito reale; la non perfetta riproduzione al simulatore influenza i conducenti ad iniziare il Tratto 1 con una velocità inferiore. Per questo motivo le prime due sezioni possono essere invalidate.

La Figura 46 mostra un comportamento differente nei due ambienti durante la fase di accelerazione; nella guida reale gli utenti raggiungono rapidamente la velocità di crociera (in prossimità della sez300), invece i *test driver* al simulatore mantengono una velocità stabile, e maggiore di quella reale, a partire della sez500. In queste sezioni, dove la differenza delle velocità medie cambia segno, è stata raggiunta la validazione assoluta.

Nelle sezioni successive, fino alla fine del tratto, la velocità media simulata risulta maggiore di quella reale con una differenza che varia tra 8.91 e 15.53 km/h. Per entrambi i test statistici tale differenza risulta significativa, si può quindi assumere la validazione relativa.

Tabella 13 - Velocità medie e deviazioni standard dei due campioni di test driver e test statistici per il Tratto 1

Tratto 1						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	53.34	6.93	43.41	8.95	-9.93	0.000	4.84	1.96		0.000	4.72	2.00	
100	63.95	5.78	60.03	7.27	-3.92	0.020	2.33	1.96		0.027	2.27	2.00	
200	70.81	6.47	68.92	6.64	-1.88	0.268	1.11	1.96		0.273	1.11	2.00	
300	74.47	7.77	74.55	7.91	0.08	0.969	0.04	1.96		0.969	0.04	2.00	
400	74.82	8.25	78.69	9.58	3.87	0.096	1.67	1.96		0.107	1.64	2.00	
500	73.85	8.67	82.76	10.83	8.91	0.000	3.51	1.96		0.001	3.42	2.00	
600	75.05	9.01	85.51	11.55	10.46	0.000	3.88	1.96		0.000	3.75	2.00	
700	76.24	8.36	87.00	12.41	10.76	0.000	3.94	1.96		0.000	3.94	2.00	
800	76.95	8.13	87.59	12.30	10.65	0.000	3.96	1.96		0.000	3.96	2.00	
900	76.27	9.05	87.81	12.55	11.54	0.000	4.07	1.96		0.000	3.89	2.00	
1000	71.92	10.36	86.37	12.88	14.45	0.000	4.69	1.96		0.000	4.53	2.00	
1100	61.53	9.24	72.57	15.96	11.05	0.001	3.31	1.96		0.002	3.31	2.01	
1200	28.54	8.30	44.06	9.21	15.52	0.000	6.72	1.96		0.000	6.63	2.00	
			# sezioni										
Totali			13										
Val. Assoluta			3	23%									
Test rifiutato			10	77%		$\mu_{sim\ VR} > \mu_{real}$	8		$\mu_{sim\ VR} < \mu_{real}$	2			

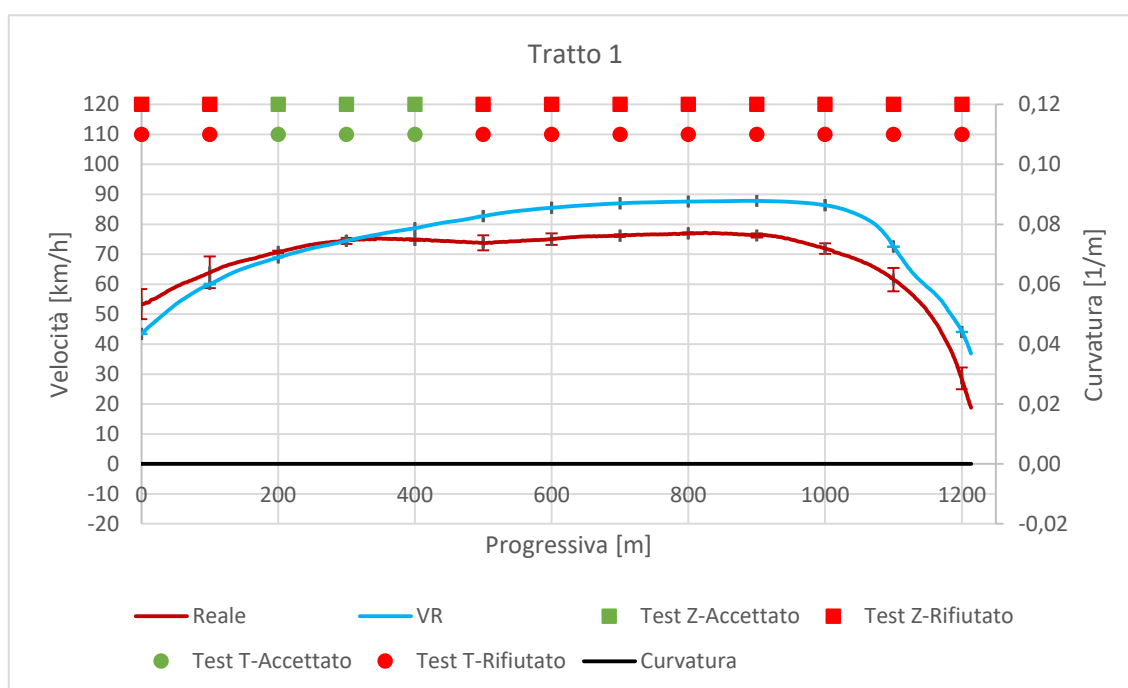


Figura 46 - Profili di velocità medi e test statistici per il Tratto 1

Tratto 2

Nella prima parte del tratto 2 è presente una curva stretta (C1) con raggio di 80 m, in cui le velocità nei due ambienti si discostano di 2.48 km/h. Segue poi un breve tratto in rettilineo, una curva (C2) con raggio di 550 m e un lungo rettilineo, anche in queste sezioni

le velocità medie dei due ambienti sono pressoché simili, con una differenza inferiore ai 5 km/h. I test statistici confermano la validazione assoluta per le prime 5 sezioni.

Successivamente la differenza tra le velocità media delle due guide aumenta. Sono presenti due curve (C3, C4) con raggio uguale a 550 m e lunghezza inferiore a 100 m intervallate da un rettilineo lungo 75 m. Dai profili si nota che al simulatore i guidatori riducono la velocità prima del cambio di curvatura, invece le misure sul campo mostrano una riduzione della velocità in corrispondenza della curva C4. Segue poi un tratto in rettilineo lungo più di 600 m e, ad eccezione della sez800 (che anticipa la curva C3) validata in modo assoluto, tra la sez500 e la sez1900 la differenza tra la velocità media simulata e quella reale è statisticamente significativa, con valori che variano tra 4.72 e 9.58 km/h.

Successivamente il tratto è caratterizzato da un rettilineo lungo più di 600 m; in entrambi gli ambienti i guidatori tendono ad aumentare la propria velocità per poi ridurla in prossimità della curva con raggio di 550 m; la differenza di velocità in questo caso varia in un intervallo tra 6.93 e 9.23 km/h.

In corrispondenza della curva C5, a differenza della guida reale, il profilo simulato mostra una brusca riduzione di velocità. In questo caso la differenza di velocità media nelle sez2000 e sez2100 si riduce a circa 4 km/h e i test statistici mostrano il raggiungimento della validità assoluta.

Durante lo sviluppo della curva C5 (che si estende per 504.76 m) nell'ambiente reale la velocità rimane pressoché costante, invece in quello virtuale i guidatori tendono ad accelerare. Successivamente i due profili mostrano un andamento simile. La curva C5 è collegata, attraverso una clotoide di flesso, ad un'altra curva (C6) con stesso raggio ma di segno opposto e lunga 108.80 m. In entrambi gli ambienti la clotoide di flesso induce i guidatori a diminuire la velocità. Infine, il Tratto 2 si conclude con un rettilineo lungo più di 700 m e una curva (C7) con raggio uguale a 500 m e lunghezza inferiore a 100 m. Tra la sez2200 e la fine del tratto la differenza di velocità è sempre positiva e varia tra 7.05 e 15.56 km/h; tale differenza risulta statisticamente significativa.

In conclusione, per entrambi i test statistici, il Tratto 2 presenta 8 sezioni su 37 validate in modo assoluto, e 4 di queste sono le prime. Nelle restanti sezioni la velocità al simulatore risulta sempre maggiore di quella adottata in ambiente reale, pertanto, anche per il Tratto 2, è stata ottenuta la validità relativa.

I risultati presenti in Tabella 14 mostrano anche che la deviazione standard è maggiore per il campione di *test driver* che ha guidato al simulatore.

Tabella 14 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar dei due campioni di test driver per il Tratto 2

Tratto 2						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	32.73	2.92	31.56	4.96	-1.17	0.270	1.10	1.96		0.275	1.10	2.01	
100	49.67	4.75	52.15	6.26	2.48	0.092	1.69	1.96		0.114	1.61	2.00	
200	61.53	4.82	64.86	7.99	3.33	0.052	1.94	1.96		0.058	1.94	2.01	
300	69.00	5.07	72.29	9.92	3.29	0.104	1.62	1.96		0.111	1.62	2.01	
400	74.57	5.41	78.12	11.13	3.56	0.113	1.59	1.96		0.119	1.59	2.01	
500	78.11	5.99	82.83	11.25	4.72	0.042	2.03	1.96		0.047	2.03	2.01	
600	80.13	7.03	86.01	12.24	5.88	0.023	2.27	1.96		0.027	2.27	2.01	
700	81.43	7.63	87.10	12.91	5.67	0.040	2.06	1.96		0.044	2.06	2.01	
800	80.93	7.37	86.05	12.90	5.12	0.069	1.82	1.96		0.075	1.82	2.01	
900	80.50	6.56	86.04	12.46	5.53	0.036	2.10	1.96		0.041	2.10	2.01	
1000	80.20	7.06	86.86	12.80	6.66	0.016	2.42	1.96		0.019	2.42	2.01	
1100	78.87	7.06	87.39	13.16	8.52	0.002	3.04	1.96		0.004	3.04	2.01	
1200	78.54	7.01	88.12	13.94	9.58	0.001	3.29	1.96		0.002	3.29	2.01	
1300	80.21	6.09	89.44	14.47	9.23	0.001	3.20	1.96		0.002	3.20	2.01	
1400	82.32	5.76	90.79	15.00	8.47	0.003	2.92	1.96		0.005	2.92	2.01	
1500	84.02	6.37	91.46	15.02	7.44	0.012	2.51	1.96		0.015	2.51	2.01	
1600	84.47	6.21	92.25	15.37	7.78	0.010	2.58	1.96		0.013	2.58	2.01	
1700	83.63	6.18	91.87	15.74	8.24	0.007	2.68	1.96		0.010	2.68	2.01	
1800	82.78	6.47	90.87	15.36	8.09	0.008	2.66	1.96		0.011	2.66	2.01	
1900	82.27	6.65	89.20	14.47	6.93	0.018	2.37	1.96		0.022	2.37	2.01	
2000	82.19	6.53	86.39	14.43	4.20	0.148	1.45	1.96		0.155	1.45	2.01	
2100	82.15	7.33	86.50	14.30	4.34	0.156	1.42	1.96		0.162	1.42	2.01	
2200	81.75	7.02	88.81	14.44	7.05	0.020	2.32	1.96		0.024	2.32	2.01	
2300	81.76	6.97	91.82	14.52	10.06	0.001	3.31	1.96		0.002	3.31	2.01	
2400	82.11	7.31	93.92	14.65	11.81	0.000	3.80	1.96		0.000	3.80	2.01	
2500	81.74	6.97	93.19	15.48	11.45	0.000	3.60	1.96		0.001	3.60	2.01	
2600	81.66	6.71	91.95	14.88	10.29	0.001	3.36	1.96		0.002	3.36	2.01	
2700	82.41	7.87	92.28	14.61	9.86	0.002	3.10	1.96		0.003	3.10	2.01	
2800	83.43	8.79	92.83	14.79	9.39	0.006	2.78	1.96		0.008	2.78	2.01	
2900	84.59	9.35	93.30	15.14	8.71	0.013	2.47	1.96		0.017	2.47	2.02	
3000	85.91	9.96	94.66	15.32	8.75	0.016	2.40	1.96		0.021	2.40	2.02	
3100	85.86	9.70	95.92	15.49	10.06	0.006	2.77	1.96		0.008	2.77	2.02	
3200	84.27	9.50	94.87	15.12	10.60	0.003	2.99	1.96		0.005	2.99	2.02	
3300	81.83	7.90	91.99	14.14	10.16	0.001	3.22	1.96		0.002	3.22	2.01	
3400	76.77	6.73	85.77	14.30	9.00	0.001	3.22	1.96		0.002	3.22	2.01	
3500	65.46	5.51	77.86	14.78	12.40	0.000	4.25	1.96		0.000	4.25	2.01	
3600	33.97	8.82	49.53	11.55	15.56	0.000	5.21	1.96		0.000	4.75	2.01	
			# sezioni										
Totali			37										
Val. Assoluta			8	22%									
Test rifiutato			29	78%		$\mu_{sim_VR} > \mu_{real}$	29		$\mu_{sim_VR} < \mu_{real}$	0			

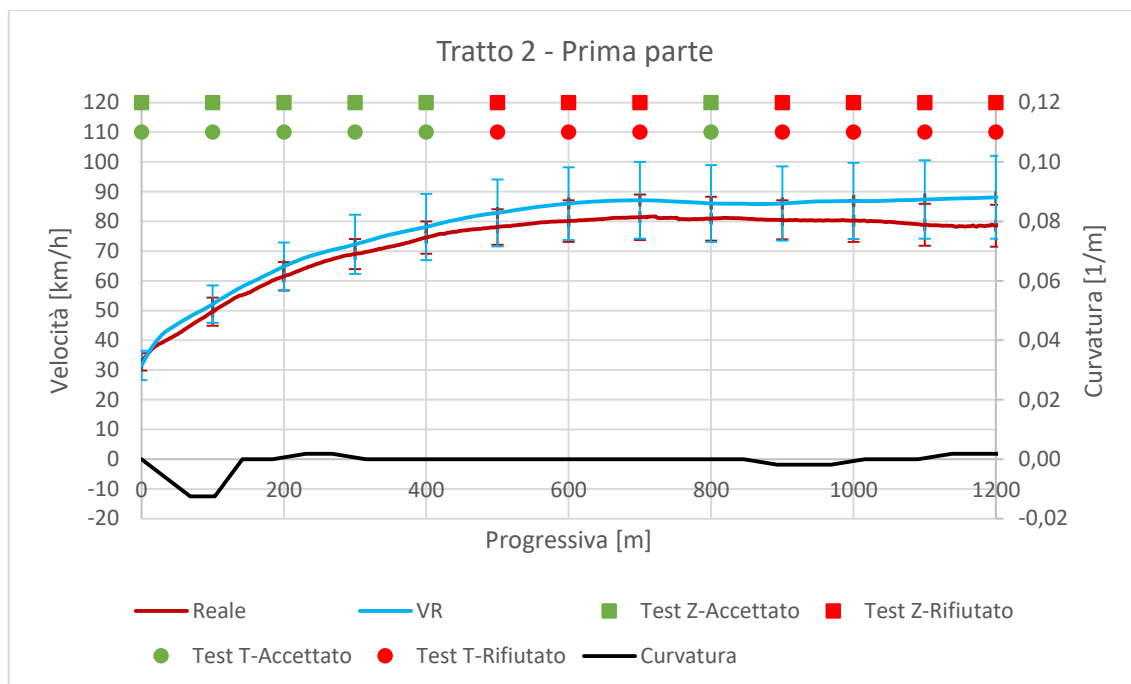


Figura 47 - Profili di velocità medi e test statistici per la prima parte del Tratto 2

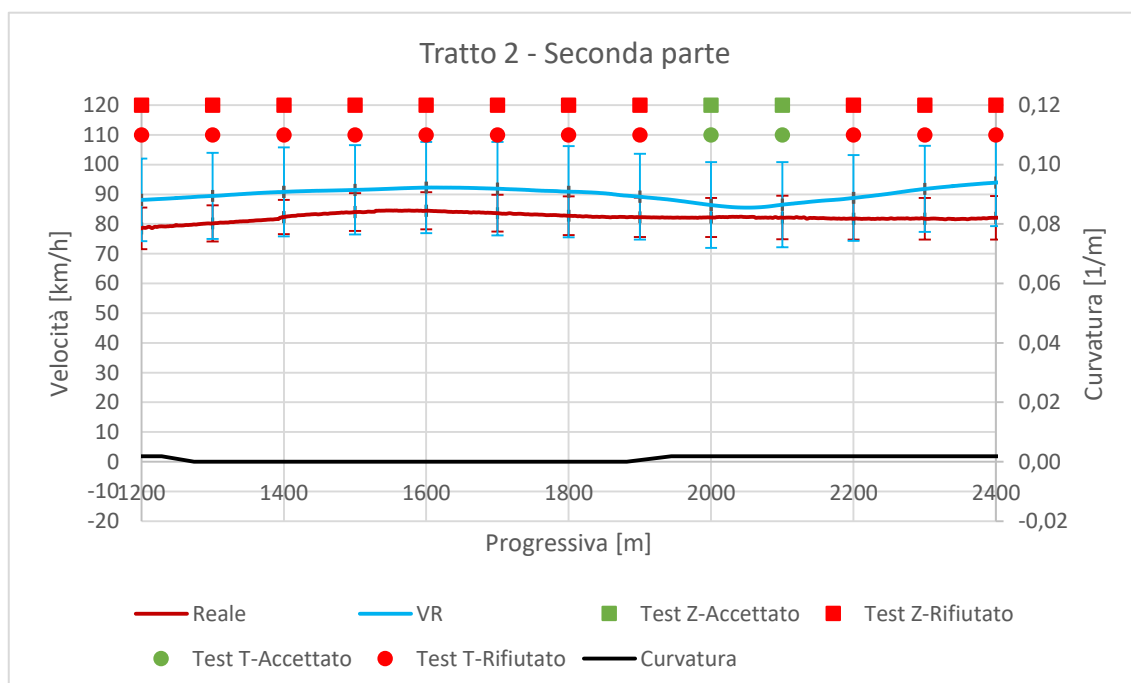


Figura 48 - Profili di velocità medi e test statistici per la seconda parte del Tratto 2

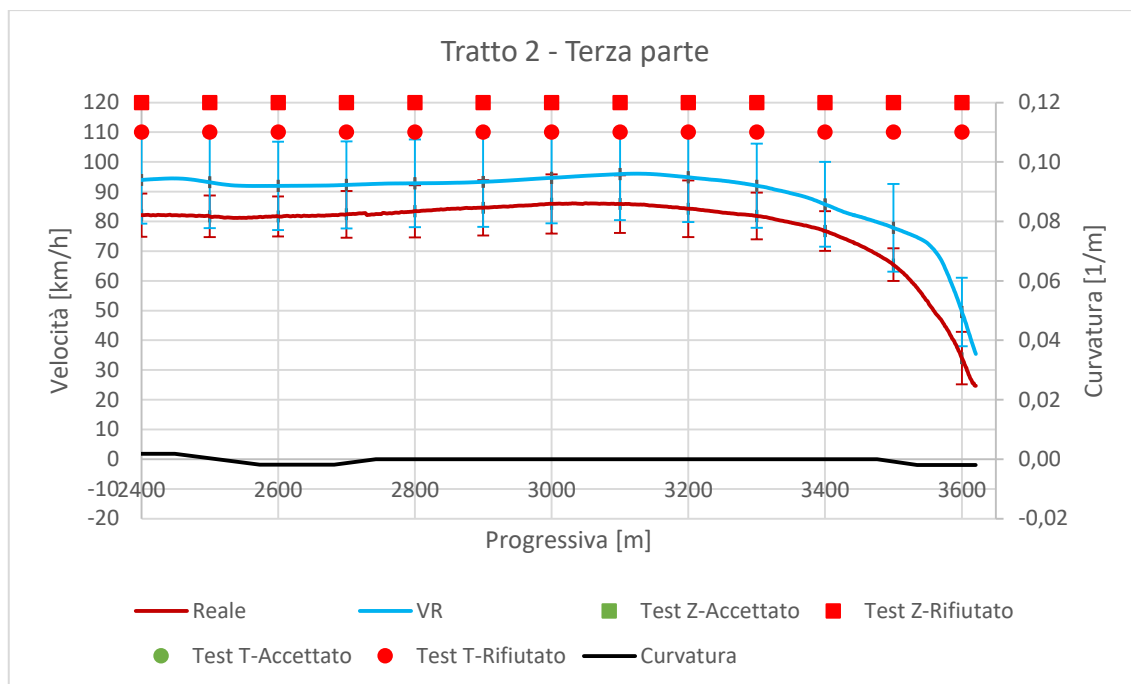


Figura 49 - Profili di velocità medi e test statistici per la terza parte del Tratto 2

Tratto 3

Il tratto 3 è un rettilineo compreso tra due rotonde. La Figura 50 mostra un andamento simile dei profili di velocità media ottenuti nei due ambienti. In fase di accelerazione (fino alla sez200) i due profili sono quasi coincidenti, invece nella restante parte del tratto la differenza di velocità aumenta progressivamente passando da 5.48 a 12.23 km/h. Anche l'analisi statistica evidenzia questo comportamento: le prime tre sezioni sono validate in modo assoluto, nelle sei rimanenti è stata ottenuta una validità relativa, considerando che la velocità media in ambiente reale è inferiore alla velocità simulata, e la differenza tra le due viene definita statisticamente significativa da entrambi i test di ipotesi.

Come nei casi precedenti la deviazione standard in ambiente simulato è maggiore di quella reale.

Tabella 15 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar dei due campioni di test driver per il Tratto 3

Tratto 3						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	38.15	4.09	37.56	5.23	-0.59	0.634	0.48	1.96		0.648	0.46	2.00	
100	55.88	6.59	57.24	7.18	1.35	0.461	0.74	1.96		0.470	0.73	2.00	
200	63.35	7.99	66.67	8.69	3.31	0.137	1.49	1.96		0.147	1.47	2.00	
300	65.20	7.99	71.09	8.69	5.89	0.024	2.26	1.96		0.037	2.14	2.00	
400	64.31	7.32	69.78	12.78	5.48	0.042	2.03	1.96		0.048	2.03	2.01	
500	64.55	7.76	71.77	14.53	7.22	0.016	2.40	1.96		0.020	2.40	2.01	
600	67.36	8.00	76.99	13.47	9.63	0.001	3.29	1.96		0.002	3.29	2.01	
700	69.16	8.09	79.32	13.22	10.16	0.000	3.53	1.96		0.001	3.53	2.01	
800	63.36	6.44	75.59	14.56	12.23	0.000	4.26	1.96		0.000	4.26	2.01	
			# sezioni										
Totali		9											
Val. Assoluta		4	44%										
Test rifiutato			5	56%		$\mu_{sim \ VR} > \mu_{real}$	5		$\mu_{sim \ VR} < \mu_{real}$	0			

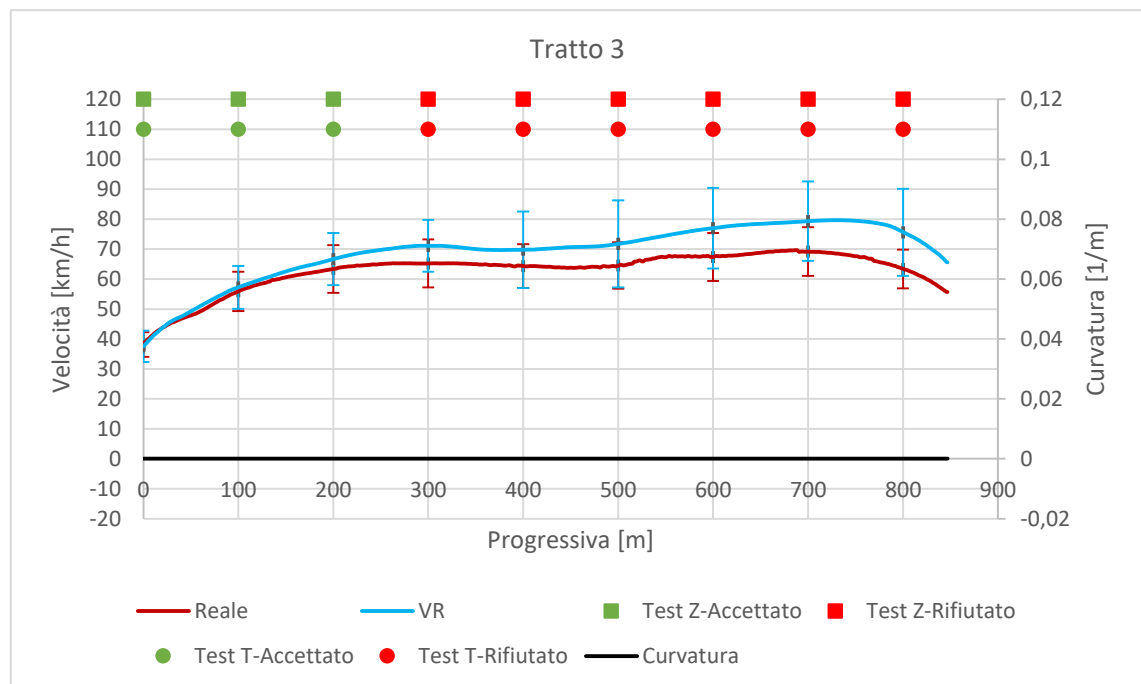


Figura 50 - Profili di velocità medi e test statistici per il Tratto 3

Tratto 4

La velocità della sezione di ingresso è influenzata dall'elevata velocità con cui i partecipanti escono dal Tratto 3. Inizialmente, tra la sez0 e la sez600, il Tratto 4 presenta due rettilinei alternati a due curve circolari di raggio 300 e 350 m, e lunghezza inferiore a 120 m; successivamente seguono due rettifili lunghi più di 300 m, separati da una curva di raggio 500 m e lunga 80.92 m. La sez400 (sezione di uscita della prima curva) è l'unica validata assolutamente. In generale il Tratto 4 presenta profili con andamento simile e velocità media simulata maggiore di quella reale, con differenze statisticamente significative che variano tra 5.19 e 10.04 km/h. Quindi si può assumere la validità relativa.

Anche in questo tratto, in tutte le sezioni, la deviazione standard relativa alle velocità in ambiente simulato è maggiore della deviazione standard delle guide in campo reale.

Tabella 16 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar dei due campioni di test driver per il Tratto 4

Tratto 4						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	50.40	4.90	59.08	11.46	8.68	0.000	3.87	1.96		0.000	3.87	2.01	
100	61.51	4.18	68.16	10.62	6.66	0.001	3.26	1.96		0.002	3.26	2.01	
200	65.84	4.92	71.09	11.14	5.25	0.017	2.39	1.96		0.021	2.39	2.01	
300	69.97	6.24	75.16	11.45	5.19	0.029	2.18	1.96		0.034	2.18	2.01	
400	72.98	7.14	76.84	12.57	3.86	0.145	1.46	1.96		0.151	1.46	2.01	
500	73.44	6.64	79.55	12.79	6.11	0.020	2.33	1.96		0.024	2.33	2.01	
600	74.16	6.50	81.54	12.69	7.38	0.005	2.81	1.96		0.007	2.81	2.01	
700	74.38	6.82	82.89	13.41	8.51	0.002	3.08	1.96		0.003	3.08	2.01	
800	75.79	7.09	84.39	13.16	8.60	0.002	3.06	1.96		0.004	3.06	2.01	
900	75.68	8.44	84.50	13.81	8.82	0.005	2.79	1.96		0.008	2.79	2.01	
1000	75.27	7.38	85.31	14.04	10.04	0.005	2.79	1.96		0.008	2.79	2.01	
1100	74.57	8.02	84.49	13.93	9.91	0.001	3.19	1.96		0.003	3.19	2.01	
1200	75.31	8.85	84.56	13.00	9.25	0.003	3.00	1.96		0.004	3.00	2.01	
1300	73.95	8.06	82.29	12.51	8.34	0.004	2.89	1.96		0.006	2.89	2.01	
1400	67.86	6.41	77.44	11.98	9.58	0.000	3.72	1.96		0.001	3.72	2.01	
1500	58.06	5.42	66.17	11.26	8.11	0.001	3.47	1.96		0.001	3.47	2.01	
			# sezioni										
Totali			16										
Val. Assoluta			1		6%								
Test rifiutato			15				$\mu_{sim VR} > \mu_{real}$	15			$\mu_{sim VR} < \mu_{real}$	0	

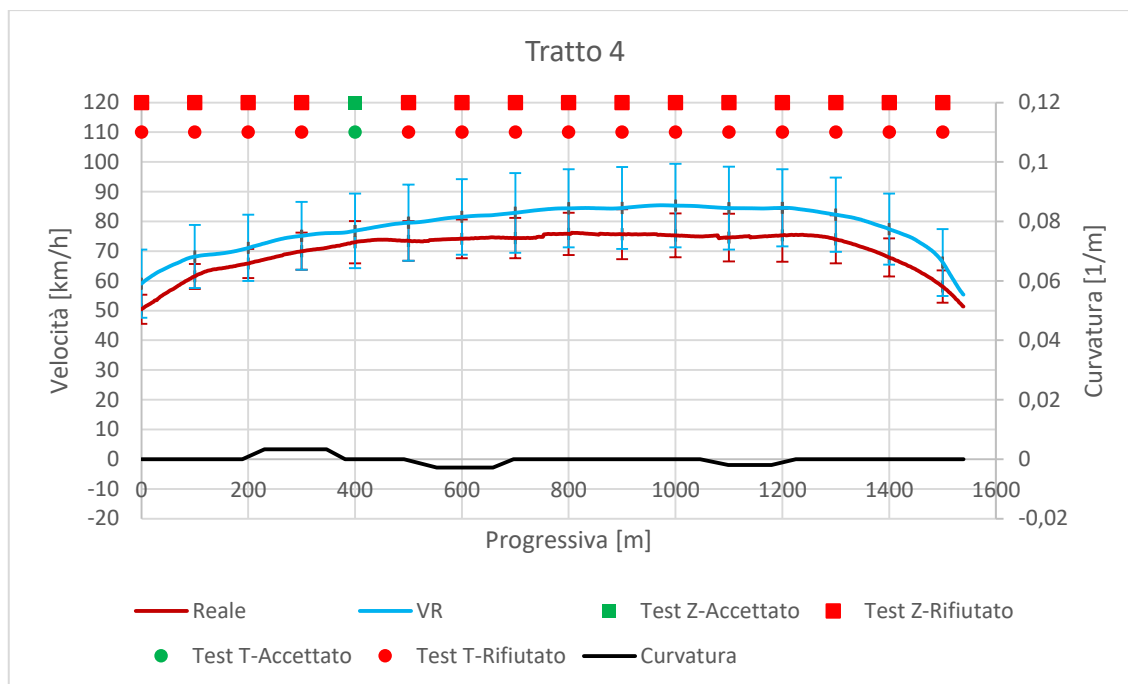


Figura 51 - Profili di velocità medi e test statistici per il Tratto 4

Tratto 6

La prima parte del tratto 6 è caratterizzata da un rettilineo lungo 648 m. Durante la fase di accelerazione i profili di velocità reale e simulato sono quasi convergenti. Esclusa la sezione di ingresso, l'analisi statistica rileva per le prime cinque sezioni una validazione assoluta.

Successivamente segue una curva con raggio uguale a 400 e lunghezza di 247 m. Per entrambe le guide si nota una riduzione di velocità, ma una sola sezione (su tre) risulta validata in modo assoluto.

La curva è collegata, attraverso una clotoide di flesso, ad un'altra curva lunga 40 m con raggio uguale a 700 m e segno opposto, a cui segue un rettilineo lungo 200 m. In questa fase il profilo simulato mostra un incremento di velocità e un comportamento diverso dal profilo medio reale, dove invece la velocità si riduce ancora. La differenza tra la velocità media simulata e quella reale varia da 8.05 a 16.62 km/h.

Il Tratto 6 si conclude con una curva lunga 40 m con raggio uguale a 200 m, e un rettilineo lungo più di 1 km. In corrispondenza dell'ultima curva si nota una riduzione di velocità in entrambi gli ambienti di guida. Lungo il rettilineo finale i profili di velocità mostrano un andamento simile caratterizzato da un aumento della velocità media, tuttavia

l'incremento è maggiore per la guida avvenuta nell'ambiente virtuale, e la differenza con la velocità reale varia tra 10.78 e 19.17 km/h.

In conclusione, a partire dalla sez600 il Tratto 6 mostra differenze di velocità statisticamente significative, con valori di velocità simulata maggiori di quelli reali. Anche il Tratto 6 risulta validato in modo relativo. Inoltre, come riportato all'interno della Tabella 17, in tutte le sezioni la deviazione standard simulata è maggiore di quella reale.

Tabella 17 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar dei due campioni di test driver per il Tratto

Tratto 6						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	19.17	5.41	28.68	6.82	9.50	0.000	5.92	1.96		0.000	5.73	2.00	
100	52.42	3.54	54.56	8.50	2.14	0.191	1.31	1.96		0.198	1.31	2.01	
200	65.32	5.52	65.48	10.56	0.16	0.939	0.08	1.96		0.939	0.08	2.01	
300	69.67	7.66	71.12	11.32	1.45	0.561	0.58	1.96		0.563	0.58	2.00	
400	70.86	9.15	75.50	12.44	4.64	0.105	1.62	1.96		0.128	1.55	2.00	
500	72.98	8.33	78.17	13.38	5.20	0.071	1.80	1.96		0.077	1.80	2.00	
600	73.37	7.52	80.81	14.26	7.45	0.011	2.55	1.96		0.014	2.55	2.01	
700	72.77	7.48	78.99	14.20	6.22	0.036	2.10	1.96		0.041	2.10	2.01	
800	70.17	7.98	78.56	16.22	8.39	0.014	2.45	1.96		0.018	2.45	2.01	
900	70.84	8.53	76.41	19.61	5.58	0.162	1.40	1.96		0.169	1.40	2.01	
1000	70.37	7.86	78.42	17.81	8.05	0.027	2.21	1.96		0.032	2.21	2.01	
1100	66.40	6.62	80.34	16.43	13.94	0.000	4.28	1.96		0.000	4.28	2.01	
1200	61.23	6.14	77.85	16.73	16.62	0.000	5.08	1.96		0.000	5.08	2.01	
1300	63.37	6.20	74.42	14.53	11.06	0.000	5.08	1.96		0.000	5.08	2.01	
1400	66.45	6.92	77.23	13.92	10.78	0.000	3.72	1.96		0.001	3.72	2.01	
1500	67.47	7.42	79.41	14.15	11.95	0.000	3.99	1.96		0.000	3.99	2.01	
1600	68.39	6.37	80.81	14.70	12.43	0.000	4.16	1.96		0.000	4.16	2.01	
1700	69.28	6.17	82.18	15.13	12.89	0.000	4.26	1.96		0.000	4.26	2.01	
1800	69.01	7.34	84.05	15.75	15.04	0.000	4.56	1.96		0.000	4.56	2.01	
1900	70.10	7.32	85.52	15.66	15.43	0.000	4.78	1.96		0.000	4.78	2.01	
2000	70.56	7.87	87.13	16.19	16.58	0.000	4.92	1.96		0.000	4.92	2.01	
2100	71.05	7.89	89.23	15.72	18.18	0.000	5.49	1.96		0.000	5.49	2.01	
2200	70.77	6.88	89.95	14.82	19.17	0.000	6.29	1.96		0.000	6.29	2.01	
2300	68.56	7.12	87.40	14.62	18.84	0.000	6.18	1.96		0.000	6.18	2.01	
			# sezioni										
Totali		24											
Val. Assoluta		6	25%										
Test rifiutato			18	75%		$\mu_{sim VR} > \mu_{real}$	18		$\mu_{sim VR} < \mu_{real}$	0			

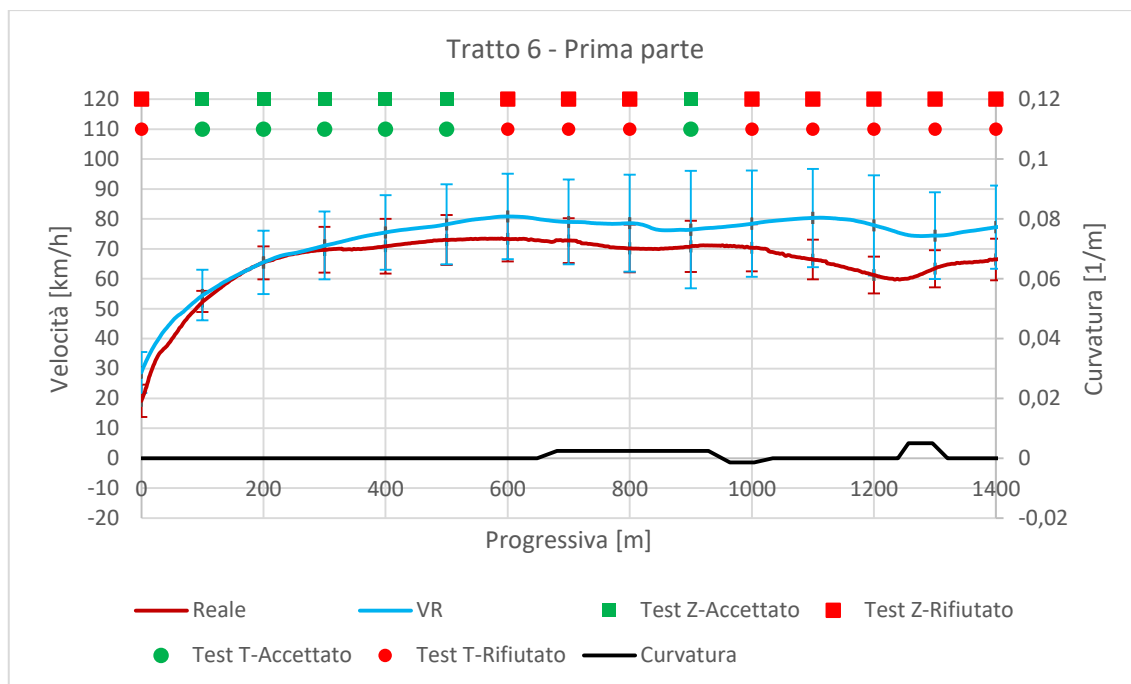


Figura 52 - Profili di velocità medi e test statistici per la prima parte del Tratto 6

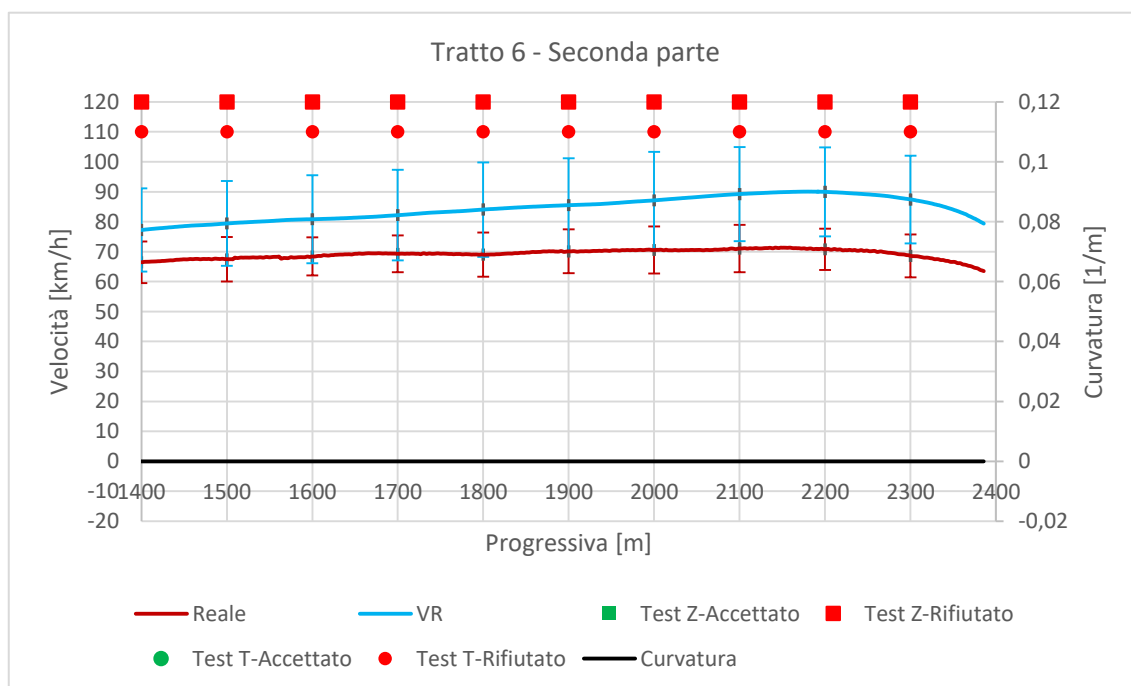


Figura 53 - Profili di velocità medi e test statistici per la seconda parte del Tratto 6

Tratto 7

Il Tratto 7 è un tratto prevalentemente curvilineo, che ripercorre parte del Tratto 0 e costeggia il lato sinistro della Palazzina di Caccia di Stupinigi. Durante la fase di accelerazione, identificata nelle prime tre sezioni, la differenza tra la velocità simulata e quella reale è inferiore a 5 km/h. L'analisi statistica valida in modo assoluto la prima e la terza sezione.

Tra la sez300 e la sez800 la geometria del Tratto 7 rimane costante, e la differenza di velocità varia tra 4.79 e 9.25 km/h. In questa settore solo la sez700 è validata in modo assoluto.

Successivamente il tratto presenta due repentini cambi di curvatura, la sez900 si trova in prossimità del primo ed è validata in modo assoluto, le altre sezioni mostrano una differenza di velocità che varia tra 3.90 e 7.84 km/h.

In generale i profili in Figura 54 mostrano un andamento simile, la velocità media reale è inferiore a quella simulata e le differenze sono statisticamente significative, quindi è si assume la validità relativa.

Tabella 18 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar dei due campioni di test driver per il Tratto 7

Tratto 7						Z-test				t-test			
Sez	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	$P(Z \leq z)$	Z	Z_{crit}		$P(T \leq t)$	t_{crit}	t	
0	33.73	10.29	37.92	6.17	4.19	0.063	1.86	1.96		0.070	1.86	2.02	
100	53.62	4.95	57.76	7.27	4.14	0.009	2.62	1.96		0.011	2.62	2.00	
200	61.68	4.85	64.32	10.68	2.65	0.204	1.27	1.96		0.210	1.27	2.01	
300	61.97	5.95	68.99	11.98	7.02	0.003	2.92	1.96		0.005	2.92	2.01	
400	62.95	6.33	72.20	13.29	9.25	0.000	3.51	1.96		0.001	3.51	2.01	
500	64.73	6.27	73.43	13.35	8.70	0.001	3.31	1.96		0.002	3.31	2.01	
600	63.26	6.47	70.88	13.80	7.62	0.005	2.82	1.96		0.007	2.82	2.01	
700	66.00	6.63	70.79	12.30	4.79	0.054	1.92	1.96		0.060	1.92	2.01	
800	64.53	5.89	70.20	12.37	5.67	0.020	2.33	1.96		0.024	2.33	2.01	
900	47.68	4.33	50.76	9.52	3.08	0.097	1.66	1.96		0.104	1.66	2.01	
1000	55.75	6.89	61.19	7.55	5.44	0.004	2.91	1.96		0.005	2.89	2.00	
1100	55.94	6.41	63.78	9.01	7.84	0.000	3.87	1.96		0.000	3.87	2.00	
1200	50.37	4.51	54.27	9.21	3.90	0.036	2.10	1.96		0.041	2.10	2.01	
1300	46.49	4.57	51.97	8.18	5.48	0.001	3.20	1.96		0.002	3.20	2.01	
			# sezioni										
Totali			14										
Val. Assoluta			4	29%									
Test rifiutato			10	71%		$\mu_{sim_VR} > \mu_{real}$	10		$\mu_{sim_VR} < \mu_{real}$	0			

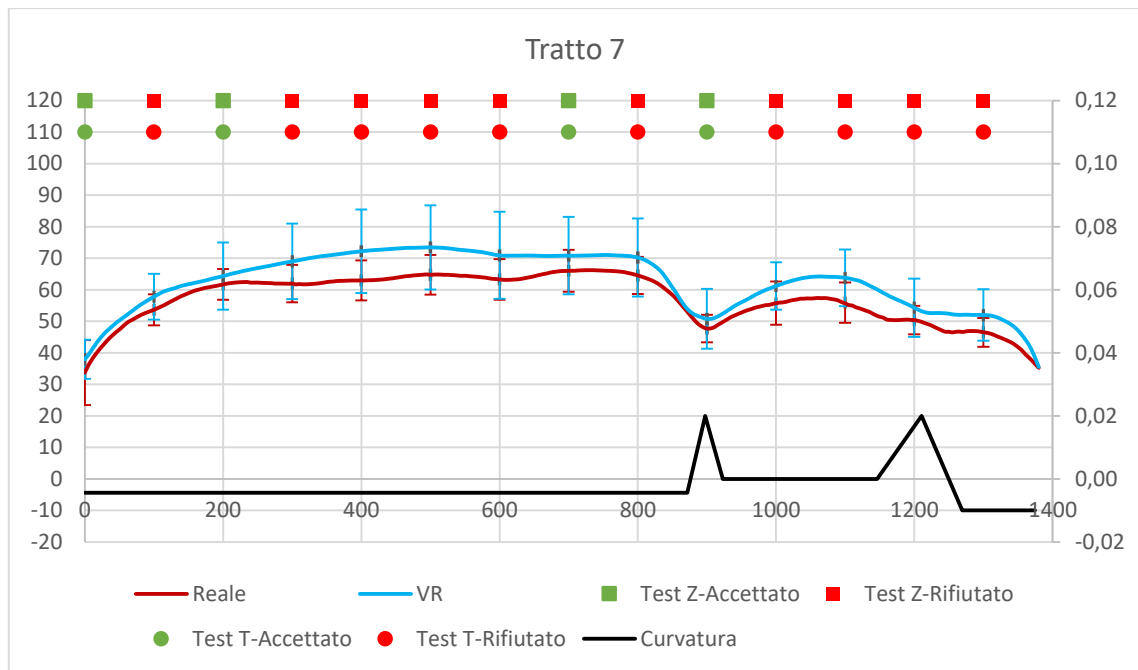


Figura 54 - Profili di velocità medi e test statistici per il Tratto 7

4.2 Confronto tra l'interfaccia VR e l'interfaccia 3 schermi

Nei paragrafi successivi sono stati confrontati i profili di velocità ottenuti al simulatore con il sistema di realtà virtuale e adottando l'interfaccia tre schermi. Nelle tabelle che seguono sono presenti le variabili qui descritte:

- μ_{3s} = velocità media delle guide simulate con l'interfaccia tre schermi [km/h];
- σ_{3s} = deviazione standard (velocità) delle guide simulate con l'interfaccia tre schermi [km/h];
- μ_{VR} = velocità media delle guide simulate con il VR [km/h];
- σ_{VR} = deviazione standard (velocità) delle guide simulate con il VR [km/h];
- $\Delta\mu = (\mu_{VR} - \mu_{3s})$, le celle assumono uno sfondo verde se $\Delta\mu > 0$, e uno sfondo rosso se $\Delta\mu < 0$;
- Z_{VR} e t_{VR} sono i risultati dei test statistici eseguiti confrontando le guide naturalistiche e quelle simulate con il VR (risultati del capitolo 4.1).
 ■ (Z-test) e ● (t-test) se l'ipotesi nulla è accettata, ■ (Z-test) e ● (t-test) se l'ipotesi nulla è respinta;
- Z_{3s} e t_{3s} sono i risultati dei test statistici eseguiti confrontando le guide naturalistiche e quelle simulate con l'interfaccia tre schermi (risultati del precedente studio di validazione Bassani, 2018).
 ◆ (Z-test) e ▲ (t-test) se l'ipotesi nulla è accettata, ◆ (Z-test) e ▲ (t-test) se l'ipotesi nulla è respinta.

Tratto 0

Lungo il Tratto 0 i due profili simulati sono simili, la differenza di velocità media, adottando l'interfaccia VR e i tre schermi, varia tra -3.21 e 5.32 km/h.

Inoltre, i test statistici mostrano che è stata ottenuta la validità assoluta in quasi tutte le sezioni del Tratto 0 per entrambe le modalità di guida simulata: in particolare 11 sezioni su 13 (escluse la prime due) per l'interfaccia VR, e 12 sezioni su 13 (esclusa l'ultima) per l'interfaccia 3 schermi.

Tabella 19 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 0

Sez	Tratto 0 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi					Test statistici			
	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	32.15	4.59	29.35	3.90	-2.80				
100	43.70	7.94	40.48	9.89	-3.21				
200	51.92	8.75	50.63	6.44	-1.30				
300	57.58	9.86	56.83	6.77	-0.75				
400	55.39	8.81	57.78	8.33	2.39				
500	48.03	7.09	52.59	8.05	4.56				
600	55.65	7.20	56.49	9.03	0.84				
700	58.47	7.53	57.32	10.10	-1.15				
800	58.97	8.48	60.50	8.14	1.52				
900	62.72	7.64	62.48	9.91	-0.23				
1000	63.66	8.85	63.38	10.76	-0.28				
1100	64.73	9.21	64.82	11.02	0.09				
1200	60.10	9.15	65.34	11.05	5.24				
1300	52.87	8.87	58.20	11.06	5.32				

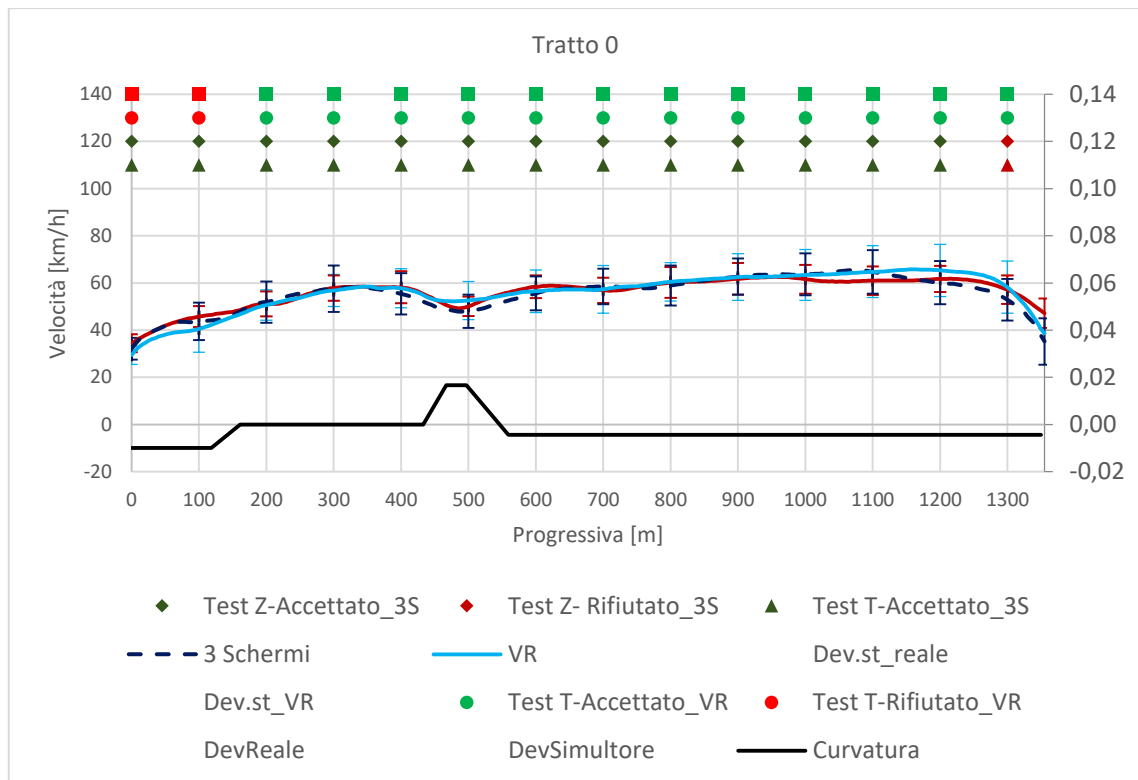


Figura 55 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per il Tratto 0

Tratto 1

L'andamento e i valori di velocità dei due profili simulati risultano simili sia durante la fase di accelerazione, sia nella parte centrale del tratto, quest'ultima caratterizzata da un incremento di velocità. La differenza di velocità tra le guide simulate varia tra -2.10 e 3.68 km/h.

A partire dalla sez800, in cui inizia la fase di decelerazione, i profili simulati si discostano di un maggiore quantità, il sistema tre schermi mostra valori di velocità più simili a quelli reali, raggiungendo anche una validazione assoluta (in 3 delle ultime 4 sezioni) rispetto al sistema VR.

Inoltre, per la maggior parte delle sezioni, i valori di deviazione standard sono maggiori per l'interfaccia tre schermi.

Tabella 20 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 1

Sez	Tratto 1 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi					Test statistici			
	μ_{3S}	σ_{3S}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3S}	t_{VR}	t_{3S}
0	37.82	7.49	43.41	8.95	5.60	■	◆	●	▲
100	60.53	6.47	60.03	7.27	-0.49	■	◆	●	▲
200	71.02	6.82	68.92	6.64	-2.10	■	◆	●	▲
300	76.15	9.30	74.55	7.91	-1.60	■	◆	●	▲
400	77.23	12.36	78.69	9.58	1.47	■	◆	●	▲
500	80.28	12.67	82.76	10.83	2.47	■	◆	●	▲
600	83.24	13.43	85.51	11.55	2.27	■	◆	●	▲
700	84.00	13.42	87.00	12.41	3.00	■	◆	●	▲
800	83.91	13.82	87.59	12.30	3.68	■	◆	●	▲
900	82.26	13.42	87.81	12.55	5.55	■	◆	●	▲
1000	77.16	12.70	86.37	12.88	9.22	■	◆	●	▲
1100	64.07	14.53	72.57	15.96	8.50	■	◆	●	▲
1200	37.93	9.43	44.06	9.21	6.13	■	◆	●	▲

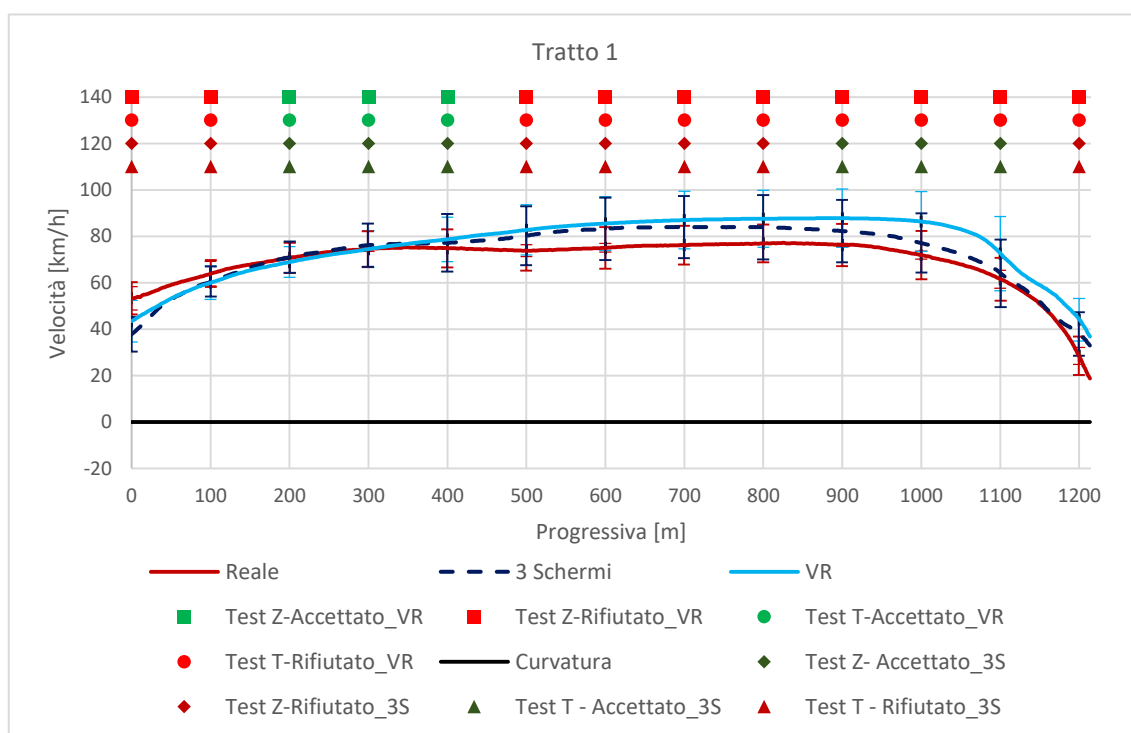


Figura 56 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per il Tratto 1

Tratto 2

Indipendentemente dalla tipologia di interfaccia (VR e tre schermi), i guidatori adottano al simulatore una velocità maggiore di quella reale. Lungo tutto il tratto i due profili simulati mostrano andamenti e valori simili tra loro. In fase di accelerazione, fino alla sez500, la differenza tra le due velocità cambia segno e non supera i 2 km/h. Successivamente la velocità media ottenuta con i 3 schermi risulta inferiore e, escluse le ultime due sezioni, la differenza non supera i 3.79 km/h. In fase di decelerazione la

differenza di velocità aumenta, in particolare vale 5.20 e 10.85 km/h rispettivamente per la penultima e l'ultima sezione.

Data la velocità più bassa, il sistema 3 schermi presenta un numero maggiore di sezioni validate in modo assoluto rispetto al sistema VR. Quest'ultimo è caratterizzato anche da una maggiore dispersione dei dati.

Tabella 21 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 2

Sez	Tratto 2 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi					Test statistici			
	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	32.60	3.89	31.56	4.96	-1.03	■	◆	●	▲
100	50.52	7.39	52.15	6.26	1.64	■	◆	●	▲
200	63.65	8.00	64.86	7.99	1.21	■	◆	●	▲
300	73.33	8.02	72.29	9.92	-1.04	■	◆	●	▲
400	78.80	9.93	78.12	11.13	-0.68	■	◆	●	▲
500	81.74	11.35	82.83	11.25	1.09	■	◆	●	▲
600	83.73	12.31	86.01	12.24	2.28	■	◆	●	▲
700	84.53	12.05	87.10	12.91	2.57	■	◆	●	▲
800	84.24	11.53	86.05	12.90	1.81	■	◆	●	▲
900	85.81	10.84	86.04	12.46	0.23	■	◆	●	▲
1000	86.15	10.85	86.86	12.80	0.71	■	◆	●	▲
1100	84.65	12.92	87.39	13.16	2.74	■	◆	●	▲
1200	84.37	12.75	88.12	13.94	3.75	■	◆	●	▲
1300	85.75	13.15	89.44	14.47	3.69	■	◆	●	▲
1400	88.01	13.16	90.79	15.00	2.78	■	◆	●	▲
1500	90.17	12.62	91.46	15.02	1.29	■	◆	●	▲
1600	91.29	13.00	92.25	15.37	0.97	■	◆	●	▲
1700	90.80	13.81	91.87	15.74	1.07	■	◆	●	▲
1800	89.92	12.97	90.87	15.36	0.95	■	◆	●	▲
1900	88.91	12.57	89.20	14.47	0.29	■	◆	●	▲
2000	85.87	11.85	86.39	14.43	0.52	■	◆	●	▲
2100	85.51	11.08	86.50	14.30	0.98	■	◆	●	▲
2200	87.93	10.76	88.81	14.44	0.88	■	◆	●	▲
2300	90.93	10.64	91.82	14.52	0.89	■	◆	●	▲
2400	92.76	10.95	93.92	14.65	1.16	■	◆	●	▲
2500	90.07	11.57	93.19	15.48	3.12	■	◆	●	▲
2600	88.17	12.09	91.95	14.88	3.79	■	◆	●	▲
2700	89.07	11.85	92.28	14.61	3.21	■	◆	●	▲
2800	89.51	11.85	92.83	14.79	3.32	■	◆	●	▲
2900	90.37	11.72	93.30	15.14	2.93	■	◆	●	▲
3000	91.88	11.78	94.66	15.32	2.78	■	◆	●	▲
3100	93.30	12.49	95.92	15.49	2.62	■	◆	●	▲
3200	91.35	13.17	94.87	15.12	3.51	■	◆	●	▲
3300	89.44	14.13	91.99	14.14	2.55	■	◆	●	▲
3400	84.75	15.96	85.77	14.30	1.02	■	◆	●	▲
3500	72.67	17.32	77.86	14.78	5.20	■	◆	●	▲
3600	38.68	12.00	49.53	11.55	10.85	■	◆	●	▲

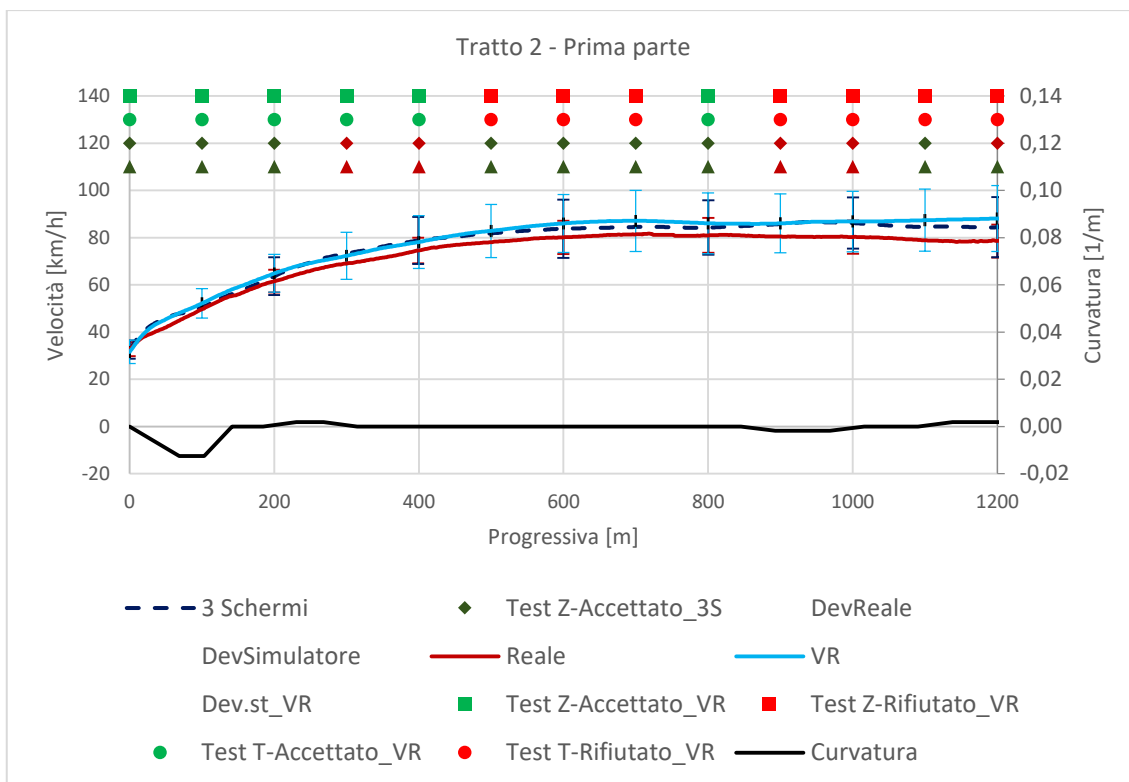


Figura 57 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la prima parte del Tratto 2

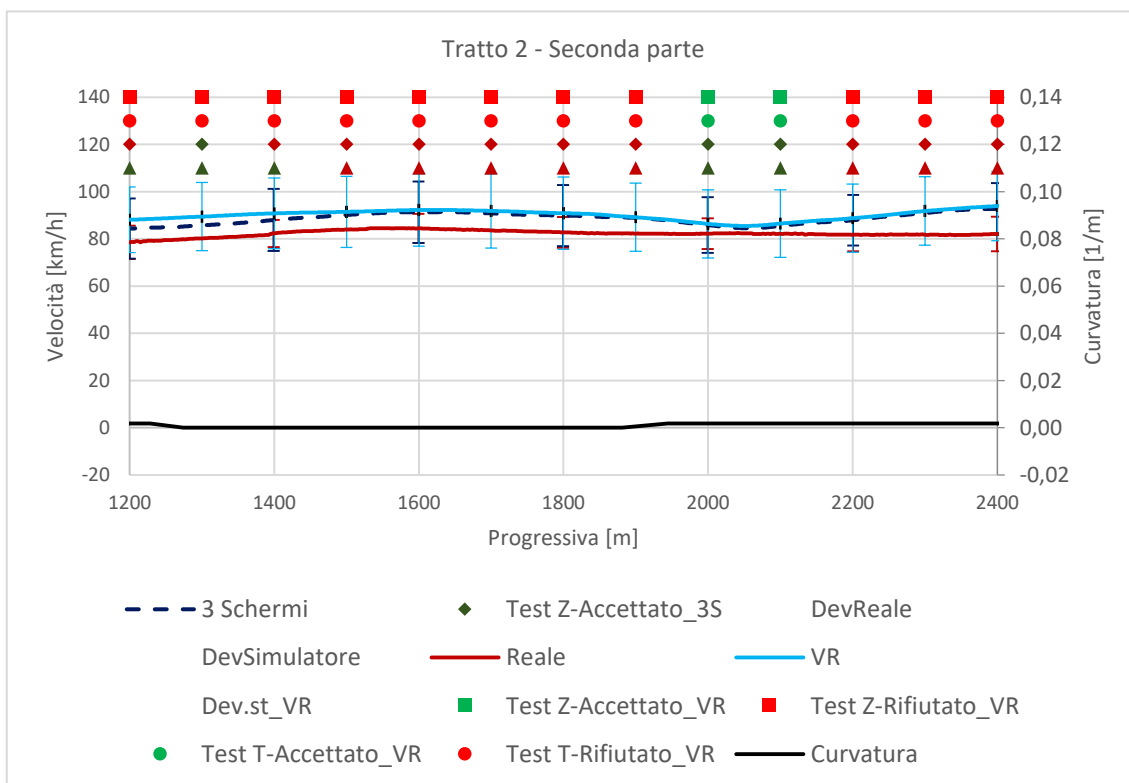


Figura 58 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la seconda parte del Tratto 2

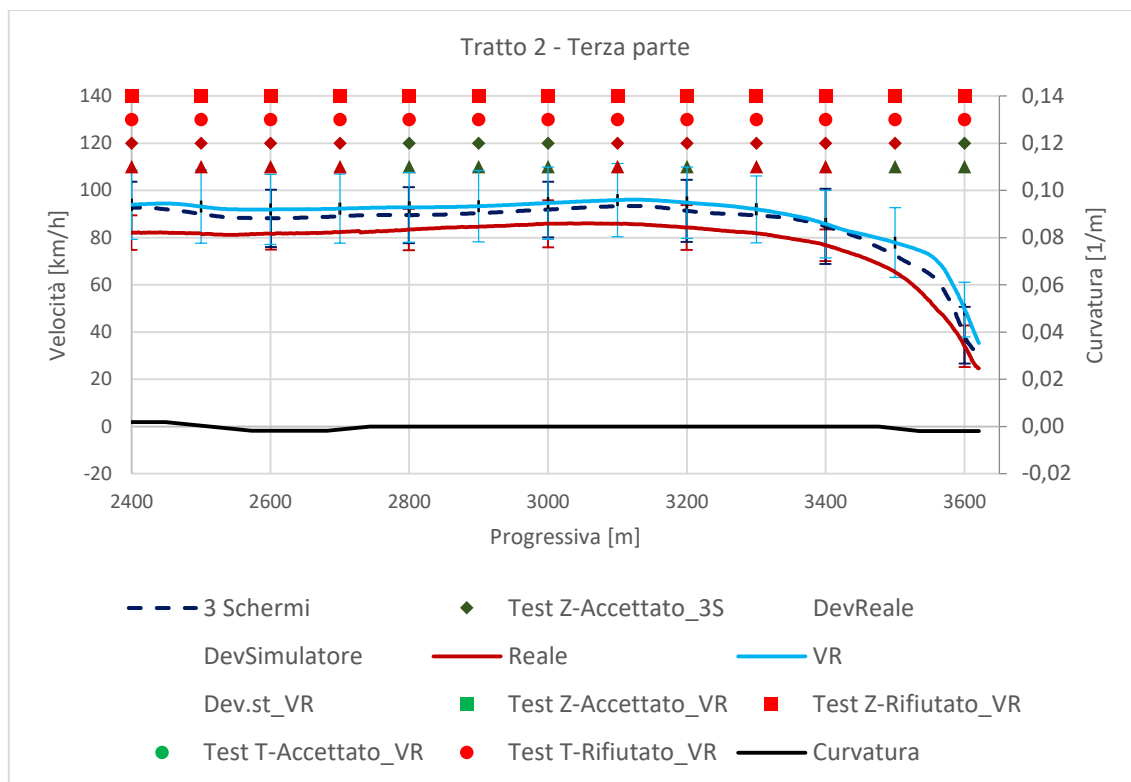


Figura 59 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la terza parte del Tratto 2

Tratto 3

Il profilo di velocità medio della modalità tre schermi è caratterizzato da un valore di picco negativo, in corrispondenza di un'intersezione chiusa non percepita correttamente dagli utenti all'interno dell'ambiente virtuale. La decelerazione anomala, invece, non è presente nel profilo reale e nel profilo VR.

Durante la fase di accelerazione i due profili simulati sono quasi convergenti, con differenze di velocità inferiori ai 2 km/h; a partire dalla sez300 la modalità tre schermi mostra velocità inferiori e un maggior numero di sezioni validate in modo assoluto rispetto al sistema VR.

Tabella 22 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 3

Tratto 3 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi						Test statistici			
Sez	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	37.51	3.49	37.56	5.23	0.05	■	◆	●	▲
100	58.94	5.99	57.24	7.18	-1.70	■	◆	●	▲
200	68.10	8.50	66.67	8.69	-1.44	■	◆	●	●
300	67.29	10.32	71.09	11.20	3.80	■	◆	●	▲
400	56.86	13.08	69.78	12.78	12.93	■	◆	●	▲
500	64.52	12.29	71.77	14.53	7.25	■	◆	●	▲
600	72.78	11.71	76.99	13.47	4.21	■	◆	●	▲
700	73.55	13.10	79.32	13.22	5.77	■	◆	●	▲
800	63.06	12.34	75.59	14.56	12.52	■	◆	●	▲

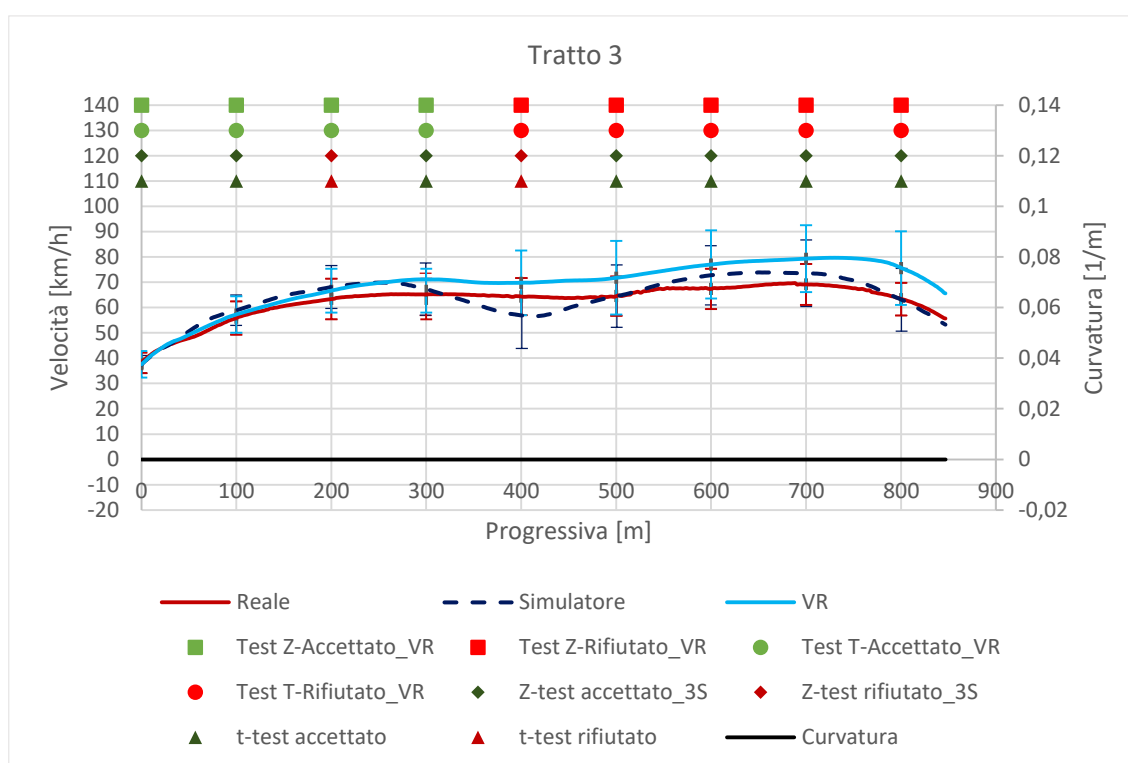


Figura 60 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per il Tratto 3

Tratto 4

Il profilo di velocità simulato ottenuto con l'interfaccia VR mostra un andamento più simile a quello reale rispetto al profilo della modalità tre schermi. Quest'ultimo è caratterizzato da un andamento maggiormente oscillante, con cambi repentini di velocità non presenti negli altri profili. Ad esempio, è presente una fase accelerazione tra la sez400 e la sez600; oppure un rallentamento in prossimità della sez900 e una fase di accelerazione fino alla sez1200. Tuttavia a questo andamento, caratterizzato da velocità inferiori a quelle ottenute con il sistema di realtà virtuale, corrisponde un maggior numero di sezioni validate in modo assoluto.

Tabella 23 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 4

Tratto 4 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi						Test statistici			
Sez	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	54.87	6.18	59.08	11.46	4.21	■	◆	●	▲
100	63.80	8.60	68.16	10.62	4.36	■	◆	●	▲
200	67.13	8.61	71.09	11.14	3.96	■	◆	●	▲
300	70.24	10.25	75.16	11.45	4.91	■	◆	●	▲
400	71.05	9.88	76.84	12.57	5.79	■	◆	●	▲
500	75.88	9.20	79.55	12.79	3.67	■	◆	●	▲
600	79.12	9.49	81.54	12.69	2.42	■	◆	●	▲
700	78.62	10.01	82.89	13.41	4.27	■	◆	●	▲
800	78.82	10.99	84.39	13.16	5.57	■	◆	●	▲
900	77.50	9.92	84.50	13.81	7.00	■	◆	●	▲
1000	79.18	9.46	85.31	14.04	6.13	■	◆	●	▲
1100	79.72	8.83	84.49	13.93	4.77	■	◆	●	▲
1200	81.78	9.46	84.56	13.00	2.78	■	◆	●	▲
1300	80.07	11.19	82.29	12.51	2.22	■	◆	●	▲
1400	72.17	11.16	77.44	11.98	5.27	■	◆	●	▲
1500	61.21	13.00	66.17	11.26	4.96	■	◆	●	▲

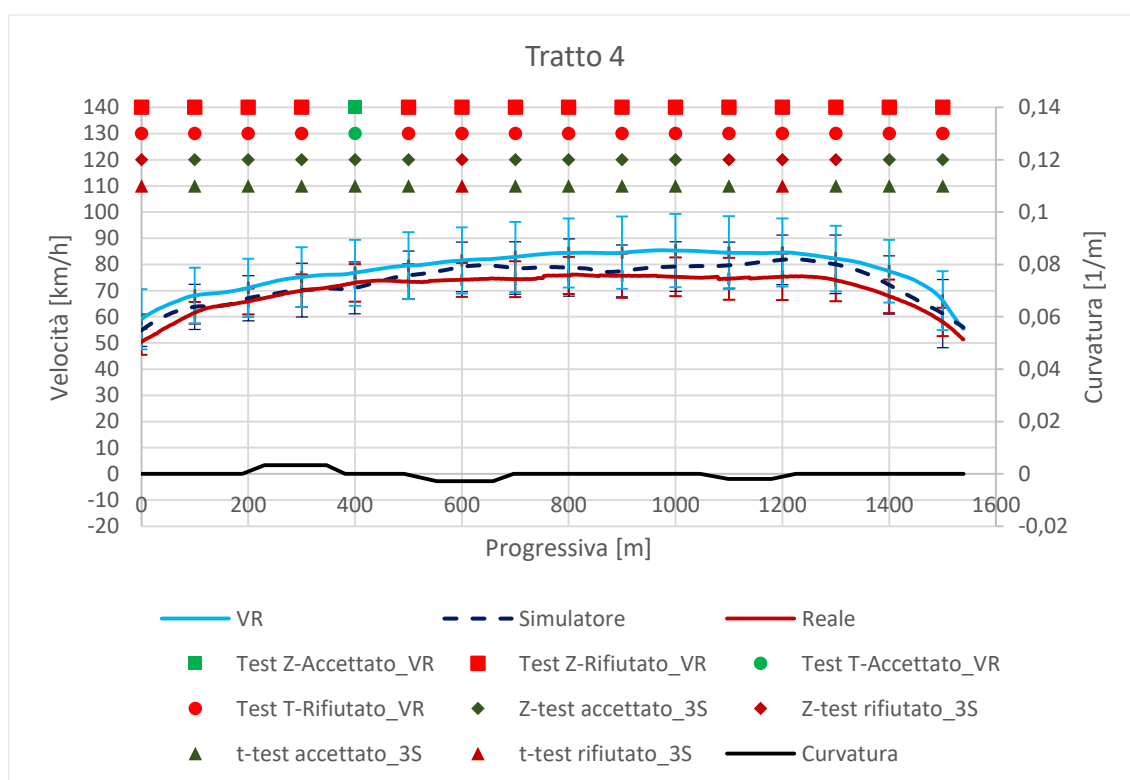


Figura 61 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per il Tratto 4

Tratto 6

Durante la fase di accelerazione (fino alla sez500) i due profili di velocità simulata sono quasi coincidenti e le differenze non superano 1.43 km/h. I test statistici effettuati per le due guide mostrano gli stessi risultati.

A partire dalla sez600, fino alla fine del tratto, per il profilo di velocità ottenuto con la modalità tre schermi valgono le stesse considerazioni fatte nel capitolo precedente per il profilo simulato VR. Tuttavia, come nel Tratto 4, il profilo tre schermi mostra incrementi/riduzioni di velocità maggiori, quindi un comportamento maggiormente ondulato rispetto a quello ottenuto con il sistema di realtà virtuale. In prossimità delle curve il profilo tre schermi è caratterizzato da valori più simili al profilo reale e in rettilineo a valori più simili al profilo VR.

Il comportamento descritto è confermato anche dai test statistici: in curva le sezioni validate in modo assoluto sono maggiori per l'interfaccia tre schermi, invece in rettilineo entrambi i sistemi raggiungono la validità relativa.

In questo tratto i valori di deviazione standard misurate con le due interfacce sono abbastanza simili.

Tabella 24 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 6

Sez	Tratto 6 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi					Test statistici			
	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	27.25	6.96	28.68	6.82	1.43				
100	53.32	9.62	54.56	8.50	1.24				
200	66.14	11.64	65.48	10.56	-0.66				
300	71.89	12.65	71.12	11.32	-0.77				
400	76.55	14.07	75.50	12.44	-1.06				
500	79.48	14.93	78.17	13.38	-1.31				
600	78.49	13.39	80.81	14.26	2.32				
700	71.97	14.68	78.99	14.20	7.03				
800	71.37	17.90	78.56	16.22	7.19				
900	72.16	18.16	76.41	19.61	4.25				
1000	74.95	16.69	78.42	17.81	3.47				
1100	74.50	15.45	80.34	16.43	5.85				
1200	64.77	14.40	77.85	16.73	13.09				
1300	63.63	11.50	74.42	14.53	10.80				
1400	71.29	10.74	77.23	13.92	5.94				
1500	76.43	12.87	79.41	14.15	2.98				
1600	78.61	14.19	80.81	14.70	2.20				
1700	79.67	15.36	82.18	15.13	2.51				
1800	82.06	16.01	84.05	15.75	1.99				
1900	83.35	15.27	85.52	15.66	2.17				
2000	85.48	13.94	87.13	16.19	1.65				
2100	86.04	14.56	89.23	15.72	3.19				
2200	86.02	13.82	89.95	14.82	3.93				
2300	79.97	13.49	87.40	14.62	7.44				

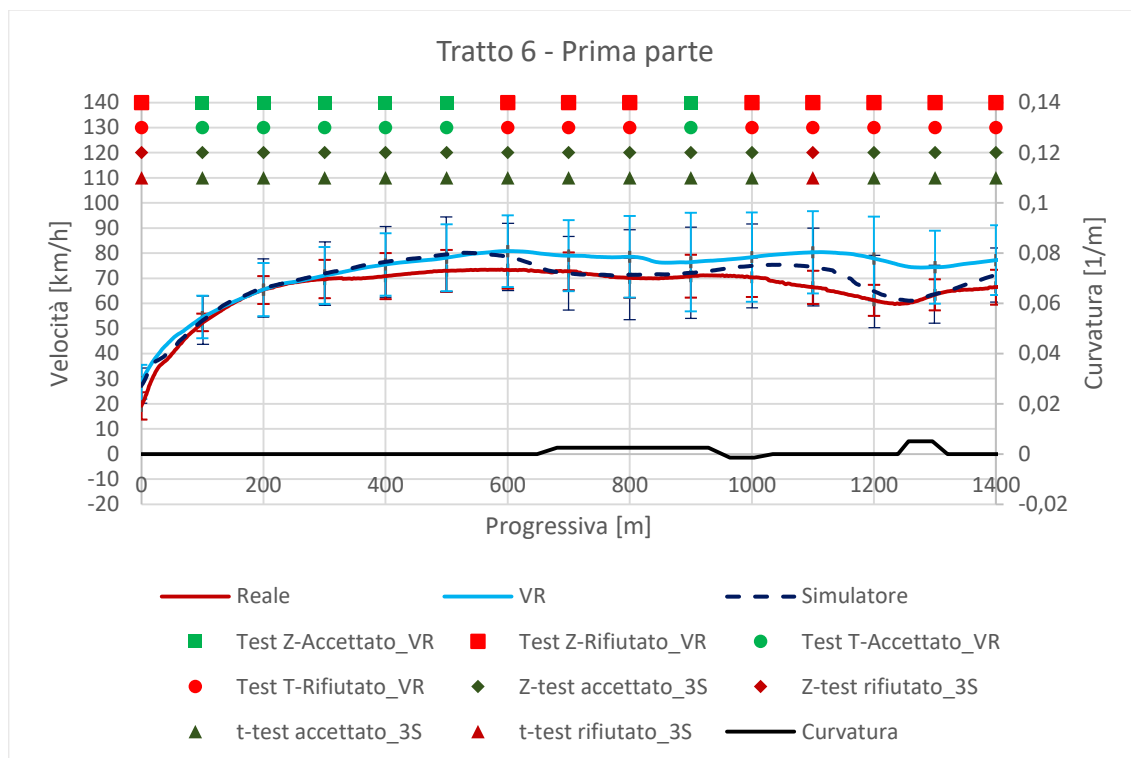


Figura 62 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la prima parte del Tratto 6

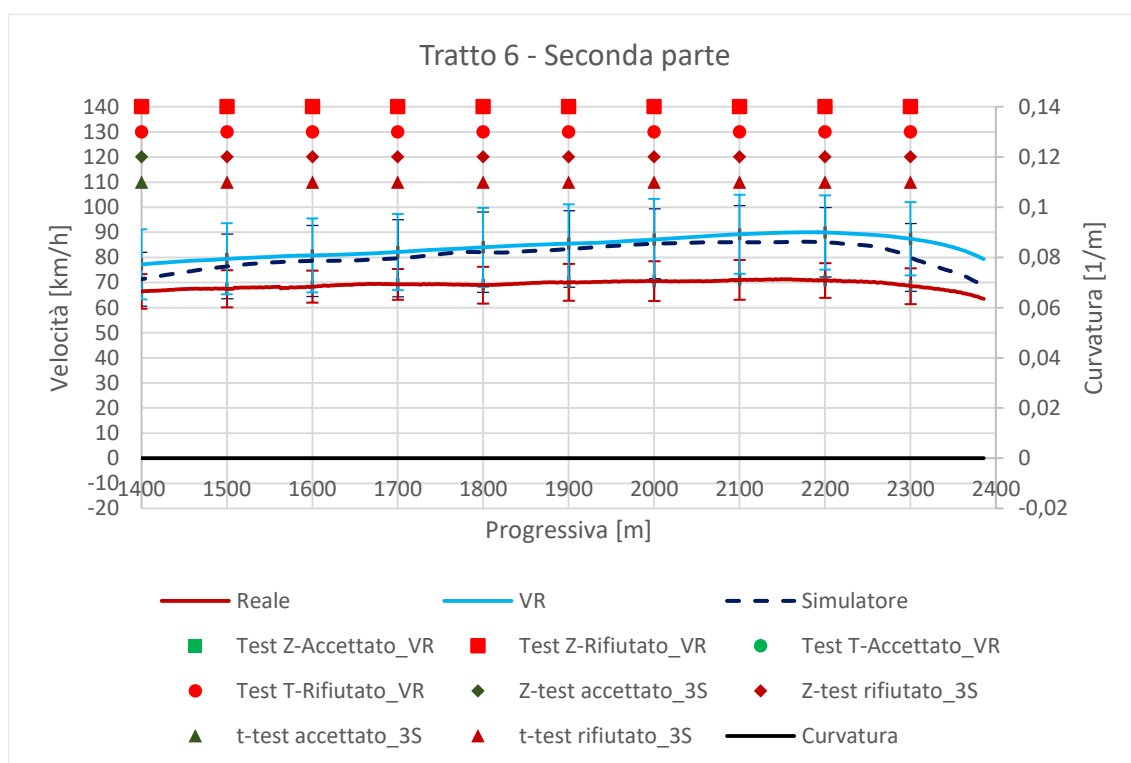


Figura 63 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la seconda parte del Tratto 6

Tratto 7

Esclusa la sezione di ingresso, influenzata dall'elevata velocità mantenuta alla fine del Tratto 6, in tutte le sezioni del Tratto 7 la differenza di velocità tra i due profili simulati non supera i 5 km/h. I due profili simulati mostrano lo stesso comportamento, tuttavia la modalità tre schermi raggiunge la validazione assoluta in un maggior numero di sezioni.

I valori di deviazione standard sono maggiori per la guida effettuata con il VR.

Tabella 25 - Test statistici, velocità medie e deviazioni standar delle guide simulate (VR e 3 schermi) per il Tratto 7

Tratto 7 - Confronto interfaccia VR e 3 schermi						Test statistici			
Sez	μ_{3s}	σ_{3s}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\Delta\mu$	Z_{VR}	Z_{3s}	t_{VR}	t_{3s}
0	32.86	5.50	37.92	6.17	5.06	■	◆	●	▲
100	59.53	6.63	57.76	7.27	-1.77	■	◆	●	▲
200	67.49	9.57	64.32	10.68	-3.16	■	◆	●	▲
300	69.32	10.25	68.99	11.98	-0.34	■	◆	●	▲
400	69.74	9.89	72.20	13.29	2.46	■	◆	●	▲
500	69.51	9.75	73.43	13.35	3.92	■	◆	●	▲
600	67.47	8.43	70.88	13.80	3.42	■	◆	●	▲
700	67.19	8.63	70.79	12.30	3.60	■	◆	●	▲
800	66.18	7.71	70.20	12.37	4.02	■	◆	●	▲
900	46.22	6.60	50.76	9.52	4.54	■	◆	●	▲
1000	60.22	7.21	61.19	7.55	0.97	■	◆	●	▲
1100	63.05	8.30	63.78	9.01	0.73	■	◆	●	▲
1200	52.43	8.65	54.27	9.21	1.85	■	◆	●	▲
1300	47.29	9.64	51.97	8.18	4.68	■	◆	●	▲

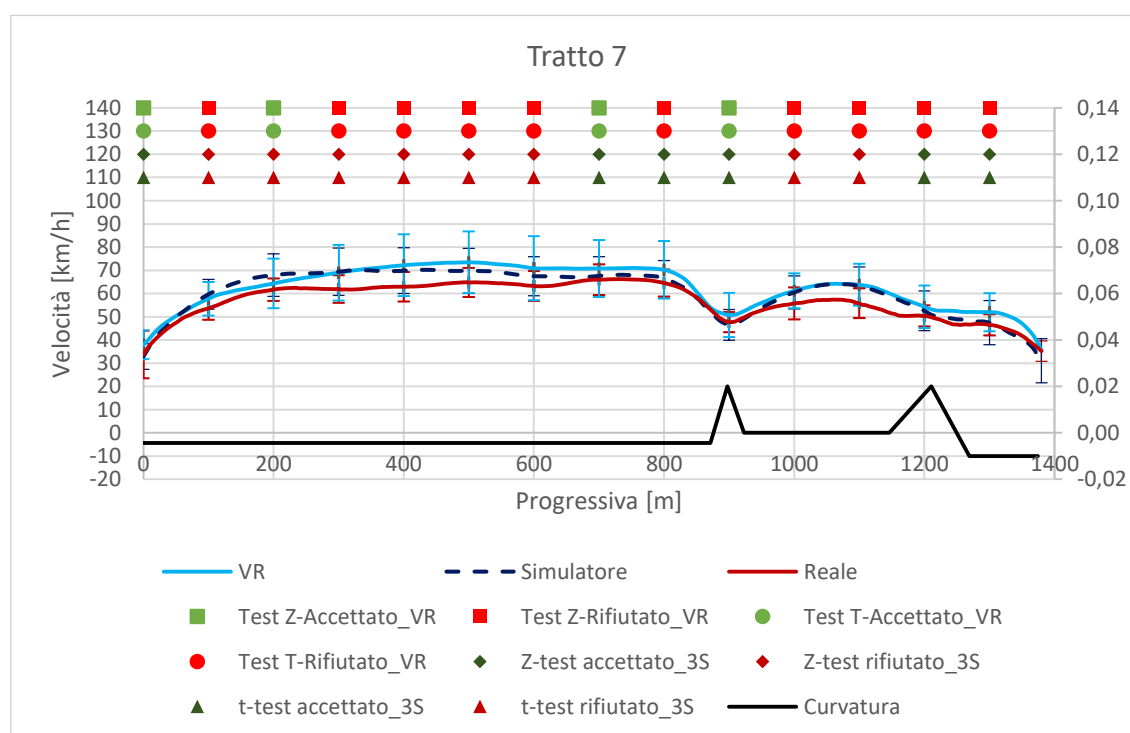


Figura 64 - Profili di velocità medi (reale, VR, 3 schermi) e test statistici per la parte del Tratto 7

In questo capitolo sono presenti le analisi statistiche e le analisi comparative effettuate per studiare il comportamento trasversale dei guidatori. La Figura 65 mostra un esempio di come, fissata la traiettoria di un guidatore, siano state calcolate le variabili: distanza di anticipazione, variazione di curvatura lungo gli elementi di transizione e curvatura media lungo le curve circolari. Per ogni variabile è presente una tabella (legenda qui di seguito) e i *box plot* che mostrano la distribuzione dei valori reali e simulati nei diversi punti di misura.

Confronto tra guide naturalistiche e guide al simulatore con VR:

- μ_{reale} = media della variabile considerata riferita alla guida naturalistica;
- σ_{reale} = deviazione standard della variabile considerata riferita alla guida naturalistica;
- μ_{VR} = media della variabile considerata riferita alla guida simulata con il VR;
- σ_{VR} = deviazione standard della variabile considerata riferita alla guida simulata con il VR;
- $P(Z \leq z)$ & $P(T \leq t) = p\text{-value}$ rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
- Z e t = statistica test, rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
- Z_{crit} e t_{crit} = valori critici di Z e t, rispettivamente dello Z-test e del t-test [-];
-  (Z-test) e  (t-test) = l'ipotesi nulla è accettata;
-  (Z-test) e  (t-test) = l'ipotesi nulla è respinta;

Confronto con la modalità tre schermi:

- μ_{3s} = media della variabile considerata riferita alla guida simulata con l'interfaccia tre schermi;
- σ_{3s} = deviazione standard della variabile considerata riferita alla guida simulata con l'interfaccia tre schermi;
- Z_{3s} e t_{3s} sono i risultati dei test statistici eseguiti confrontando le guide naturalistiche e quelle simulate con l'interfaccia tre schermi (risultati del precedente studio di validazione Bassani & Catani, 2018).  (Z-test) e  (t-test) se l'ipotesi nulla è accettata,  (Z-test) e  (t-test) se l'ipotesi nulla è respinta;

Tabella 26 – Variabili compute per studiare il comportamento trasversale

Distanza di anticipazione (d_a)	Variazione di curvatura (c_r)	Curvatura media (c_m)
$d_{A,Cx} = d_a$ per la curva x, Caso A; $d_{B,Cx} = d_a$ per la curva x, Caso B; $d_{B,C} = d_a$ per il punto di flesso, quindi Caso C;	$c_{rA,Cx} = c_r$ in ingresso alla curva x, Caso A. $c_{rB,Cx} = c_r$ in uscita dalla curva x, Caso B. $c_{rC,Cx} = c_r$ lungo la clotoide di flesso, Caso C;	$c_{m,Cx} = c_m$ per la curva x;
Caso A: il guidatore passa da un tratto in rettilo ad una curva circolare; Caso B: il guidatore passa da una curva circolare ad uno in rettilo; Caso C: il guidatore passa da una curva circolare ad un'altra caratterizzata da una curvatura con segno opposto		

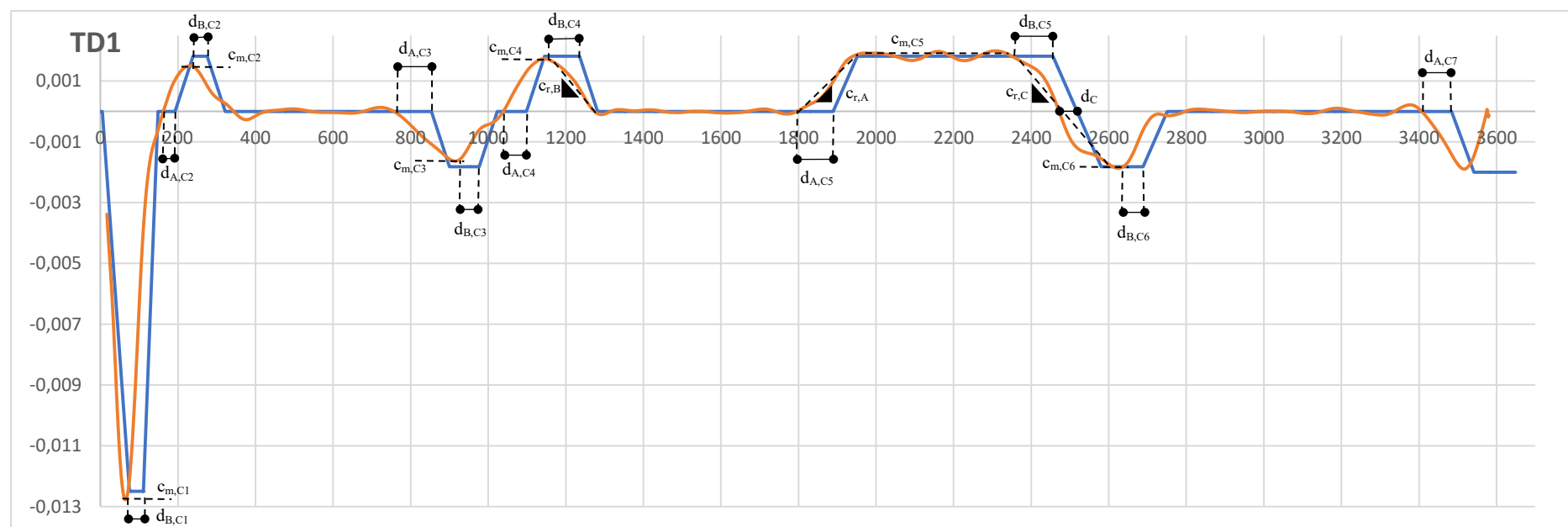


Figura 65 – Esempio di come sono state calcolate le variabili per studiare il comportamento trasversale

5.1 Distanza di anticipazione

Analizzando la differenza relativa tra le distanze medie reali e quelle ottenute al simulatore utilizzando il sistema di realtà virtuale, si evince che la distanza simulata risulta maggiore di quella reale, con un incremento che nel caso A varia dal 46% al 77%, nel caso B l'incremento varia tra il 39% e il 56%, e nel caso C l'incremento è del 67%. Considerando lo stesso caso i valori sono simili, per cui si ipotizza che le diverse caratteristiche delle curve di transizione non abbiano avuto un effetto significativo sulla distanza di anticipazione.

Sono presenti però alcune eccezioni in cui la distanza di anticipazione simulata è circa tre volte quella reale: in prossimità della curva C7 (curva che anticipa una rotatoria) e per il caso B della curva C5. Il comportamento del guidatore potrebbe essere stato influenzato dalla presenza dell'intersezione nel primo caso, e dalla presenza della clotoide di flesso nel secondo caso.

In tutti i punti di misura la differenza è risultata statisticamente significativa, pertanto non è stata ottenuta la validità assoluta. Tuttavia, la distanza di anticipazione media simulata si è rivelata sempre maggiore di quella reale, si può quindi assumere la validità relativa.

Confrontando le distanze di anticipazione misurate al simulatore con le due diverse interfacce, risulta che i valori medi registrati con il VR tendono ad essere maggiori nel caso A e inferiori nei casi B e C, tuttavia le differenze relative non superano il 20%. Anche la modalità tre schermi non è stata validata in modo assoluto.

Infine, si rileva che i dati registrati al simulatore sono caratterizzati da valori di deviazione standard minori rispetto a quelli misurati in ambiente reale.

Tabella 27 – Risultati relativi al calcolo della distanza di anticipazione

Caratteristiche curva di transizione			Confronto guide naturalistiche e guide al simulatore con VR													Confronto con 3 Schermi				
Caso	R	A	μ_{reale}	σ_{reale}	μ_{VR}	σ_{VR}	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{reale}}{\mu_{reale}}$	P(Z≤z)	Z	Z _{crit}	H ₀	P(T≤t)	t	t _{crit}	H ₀	μ_{3S}	σ_{3S}	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{3S}}{\mu_{3S}}$	Z _{3S}	t _{3S}
A	[m]	[m ²]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]									[m]	[m]	[%]		
C2	550	160	17.55	14.74	31.04	6.94	77%	0.013	2.49	1.96	■	0.019	2.49	2.04	●	25.85	6.58	20%	◆	●
C3	550	160	45.88	14.49	67.00	17.67	46%	0.000	5.57	1.96	■	0.000	5.40	2.01	●	75.13	23.61	-11%	◆	●
C4	550	160	39.88	16.74	64.78	7.02	62%	0.000	3.79	1.96	■	0.000	3.85	2.01	●	55.52	12.91	17%	◆	●
C5	550	185	41.41	23.33	66.55	16.16	61%	0.003	3.02	1.96	■	0.004	3.02	2.01	●	61.13	25.17	9%	◆	●
C7	500	170	21.20	11.84	61.94	18.62	192%	0.000	9.62	1.96	■	0.000	9.62	2.01	●	35.38	5.84	-9%	◆	●
B																				
C1	80	55	23.59	6.97	35.98	5.52	53%	0.000	6.87	1.96	■	0.000	6.94	2.01	●	36.36	5.91	-1%	◆	●
C2	550	160	25.01	15.16	36.50	11.50	46%	0.000	3.70	1.96	■	0.001	3.70	2.01	●	43.32	19.38	-16%	◆	●
C3	550	160	36.68	17.86	50.93	9.25	39%	0.000	4.70	1.96	■	0.000	4.76	2.01	●	56.47	15.64	-10%	◆	●
C4	550	160	35.71	19.70	54.82	15.28	54%	0.001	3.29	1.96	■	0.002	3.36	2.01	●	51.50	13.51	6%	◆	●
C5	550	185	19.51	24.38	59.89	23.01	207%	0.000	8.58	1.96	■	0.000	8.65	2.01	●	74.60	20.28	-20%	◆	●
C6	550	185	36.56	19.91	57.04	12.48	56%	0.000	6.38	1.96	■	0.000	6.48	2.01	●	65.25	15.34	-13%	◆	●
C																				
Flesso	550	185	19.21	11.56	32.11	5.80	67%	0.000	6.66	1.96	■	0.000	6.66	2.04	●	35.38	5.84	-9%	◆	●

Caso A

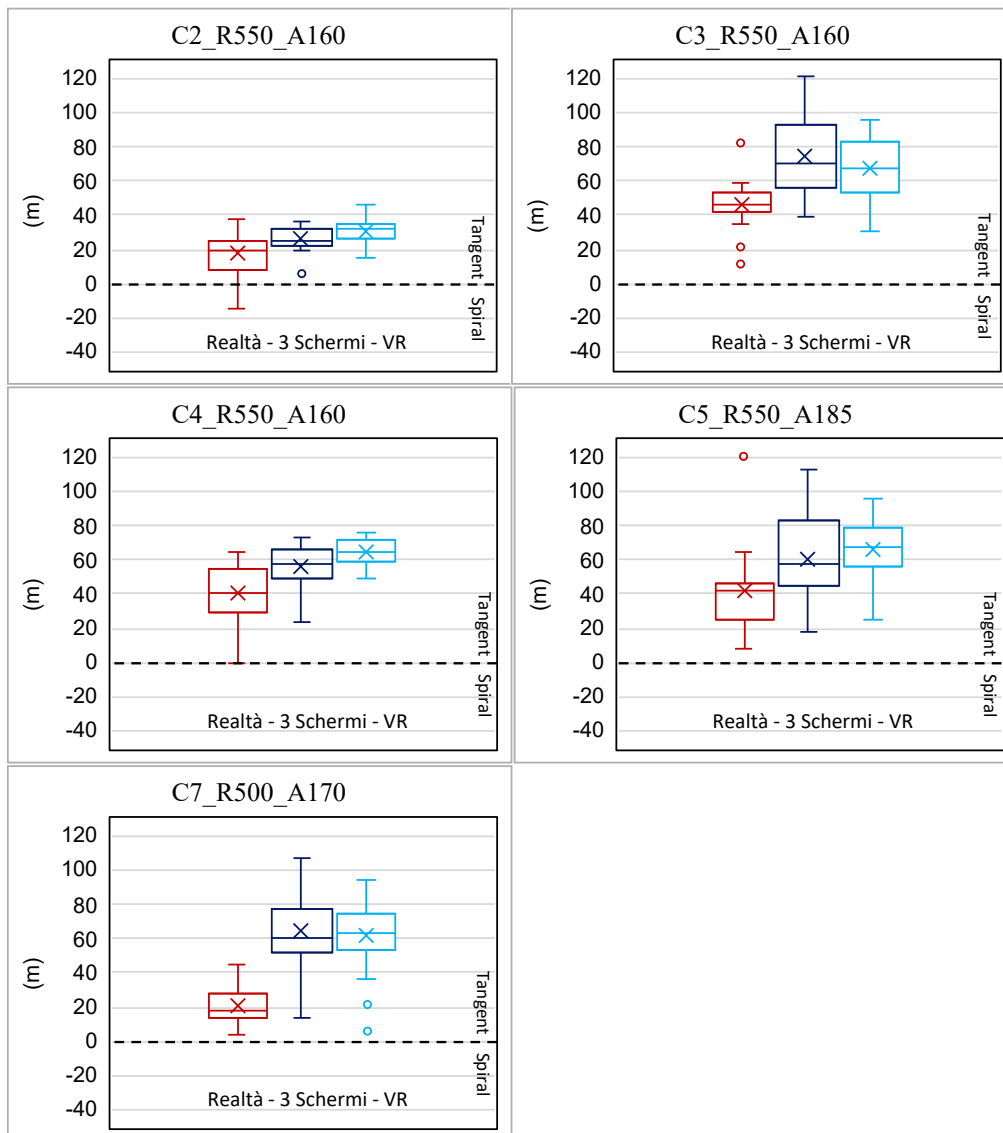


Figura 66 - Box plot delle distanze di anticipazione per il Caso A. La X indica la media della distribuzione. La linea nera tratteggiata identifica il punto finale del rettilo e il punto iniziale della curva di transizione.

Caso B

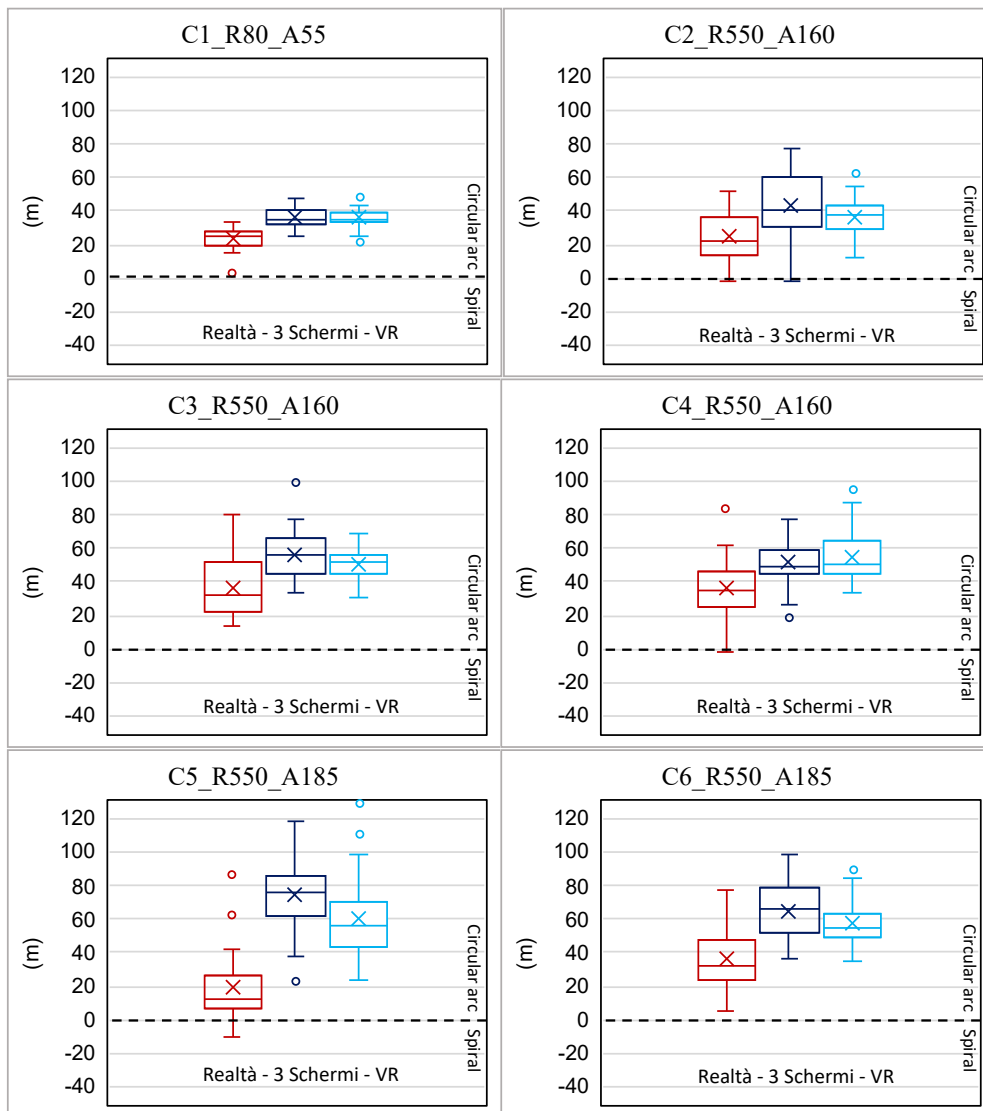


Figura 67 - Box plot delle distanze di anticipazione per il Caso B. La X indica la media della distribuzione. La linea nera tratteggiata identifica il punto finale del rettangolo e il punto iniziale della curva di transizione

Caso C

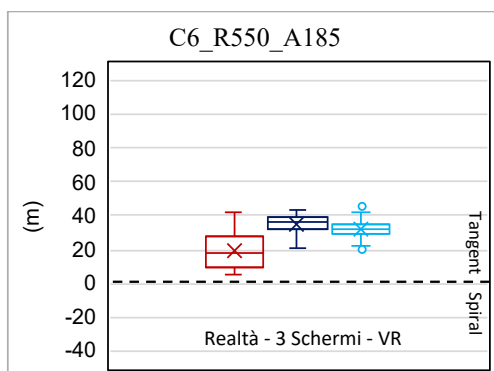


Figura 68 - Box plot delle distanze di anticipazione per il Caso B. La X indica la media della distribuzione. La linea nera tratteggiata identifica il punto di flesso (curvatura nulla).

5.2 Variazione di curvatura lungo le curve di transizione

La variazione di curvatura è stata misurata come la pendenza della curvatura dei guidatori lungo le curve di transizione.

Rispetto ai valori reali, quelli misurati con l'interfaccia VR si riducono di una quantità compresa tra il 25 e il 51% nel caso A, tra il 20 e il 31% nel caso B, e del 20% nel caso C. Tali differenze risultano statisticamente significative. Poiché la variazione di curvatura media registrata al simulatore è sempre inferiore alla variazione di curvatura adottata dai partecipanti nelle guide reali, ed è anche inferiore alla variazione di curvatura definita dall'asse stradale, allora si può assumere la validità relativa. La validazione assoluta viene raggiunta esclusivamente per la curva di transizione successiva alla curva C1 (Caso B).

La modalità tre schermi invece ha ottenuto la validità assoluta in 2 punti di misura (su 5) per il caso A e in tutti i punti di misura per caso B. Inoltre queste variazioni di curvatura, ad eccezione del caso C, sono risultate sempre maggiori di quelle ottenute utilizzando il dispositivo di realtà virtuale.

Infine, il sistema VR è caratterizzato da valori più piccoli di deviazione standard, rispetto a quelli registrati sia in ambiente reale, sia con la modalità di visione a 3 schermi.

Tabella 28 - Risultati relativi al calcolo della variazione di curvatura media lungo gli elementi di transizione

Caratteristiche curva di transizione			Confronto guide naturalistiche e guide al simulatore con VR														Confronto con 3 Schermi				
Caso	R	A	μ_{rif} (10 ⁻⁵)	μ_{reali} (10 ⁻⁵)	σ_{reale} (10 ⁻⁵)	μ_{VR} (10 ⁻⁵)	σ_{VR} (10 ⁻⁵)	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{reale}}{\mu_{reale}}$	P(Z≤z)	Z	Z _{crit}	H ₀	P(T≤t)	t	t _{crit}	H ₀	μ_{3S} (10 ⁻⁵)	σ_{3S} (10 ⁻⁵)	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{3S}}{\mu_{3S}}$	Z _{3s}	t _{3s}
A	[m]	[m ²]	[m ⁻²]	[m ⁻²]	[m ⁻²]	[m ⁻²]	[m ⁻²]	[%]									[m ⁻²]	[m ⁻²]	[%]		
C2	550	160	3.91	4.25	1.73	2.79	0.96	-34%	0.000	3.67	1.96	■	0.001	3.67	2.04	●	4.22	1.50	-34%	◆	▲
C3	550	160	3.91	2.59	1.20	1.72	0.53	-34%	0.003	3.01	1.96	■	0.007	3.00	2.07	●	1.77	0.59	-3%	◆	▲
C4	550	160	3.91	2.89	0.77	1.72	0.60	-41%	0.000	5.72	1.96	■	0.000	6.11	2.01	●	2.13	0.62	-19%	◆	▲
C5	550	185	2.92	2.04	0.79	1.53	0.34	-25%	0.007	2.69	1.96	■	0.013	2.69	2.07	●	1.78	0.59	-14%	◆	▲
C7	500	170	3.46	4.23	1.78	2.08	0.67	-51%	0.000	4.69	1.96	■	0.000	4.68	2.11	●	2.28	0.87	-9%	◆	▲
B																					
C1	80	55	33.06	17.30	3.92	16.49		-5%	0.375	0.89	1.96	■	0.381	0.89	2.03	●	17.77	3.39	-5%	◆	▲
C2	550	160	3.91	2.58	0.66	2.04	2.31	-21%	0.002	3.03	1.96	■	0.004	3.05	2.00	●	3.07	1.71	-34%	◆	▲
C3	550	160	3.91	2.60	1.02	1.79	0.64	-31%	0.001	3.19	1.96	■	0.004	3.19	2.06	●	2.41	1.02	-26%	◆	▲
C4	550	160	3.91	2.55	1.05	1.96	0.55	-23%	0.019	2.34	1.96	■	0.029	2.34	2.08	●	2.15	0.91	-9%	◆	▲
C6	550	185	2.92	2.15	0.69	1.72	0.40	-20%	0.014	2.45	1.96	■	0.024	2.45	2.09	●	2.49	1.09	-31%	◆	▲
C																					
Flesso	550	185	2.92	2.70	0.47	2.17	0.37	-20%	0.000	4.11	1.96	■	0.000	4.42	2.01	●	1.92	0.27	13%	◆	▲

Caso A

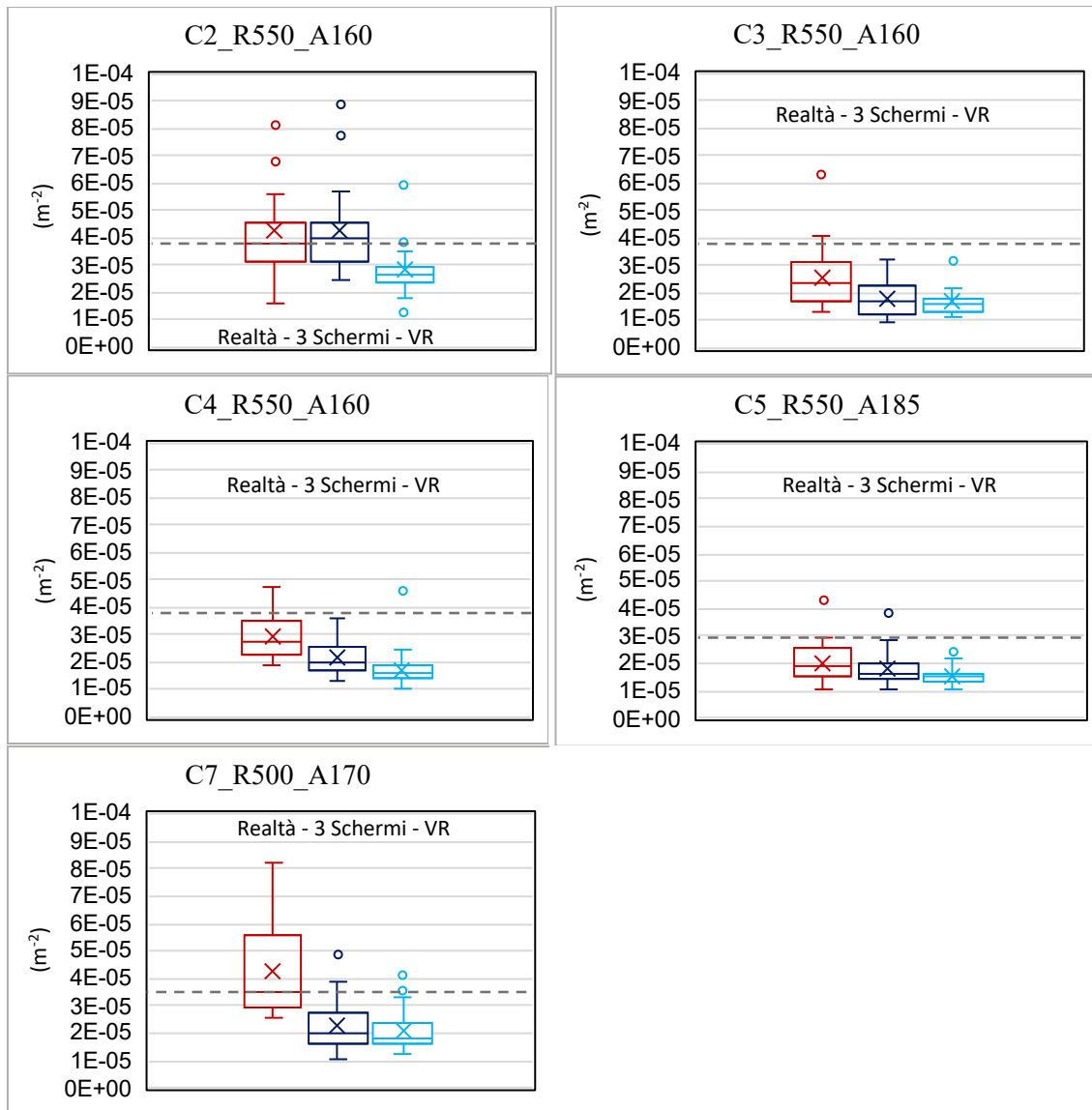


Figura 69 - Box plot dei tassi di curvatura lungo le curve di transizione per il Caso A. La X indica la media della distribuzione. La linea indica la variazione di curvatura dell'elemento di transizione (valore di riferimento).

Caso B

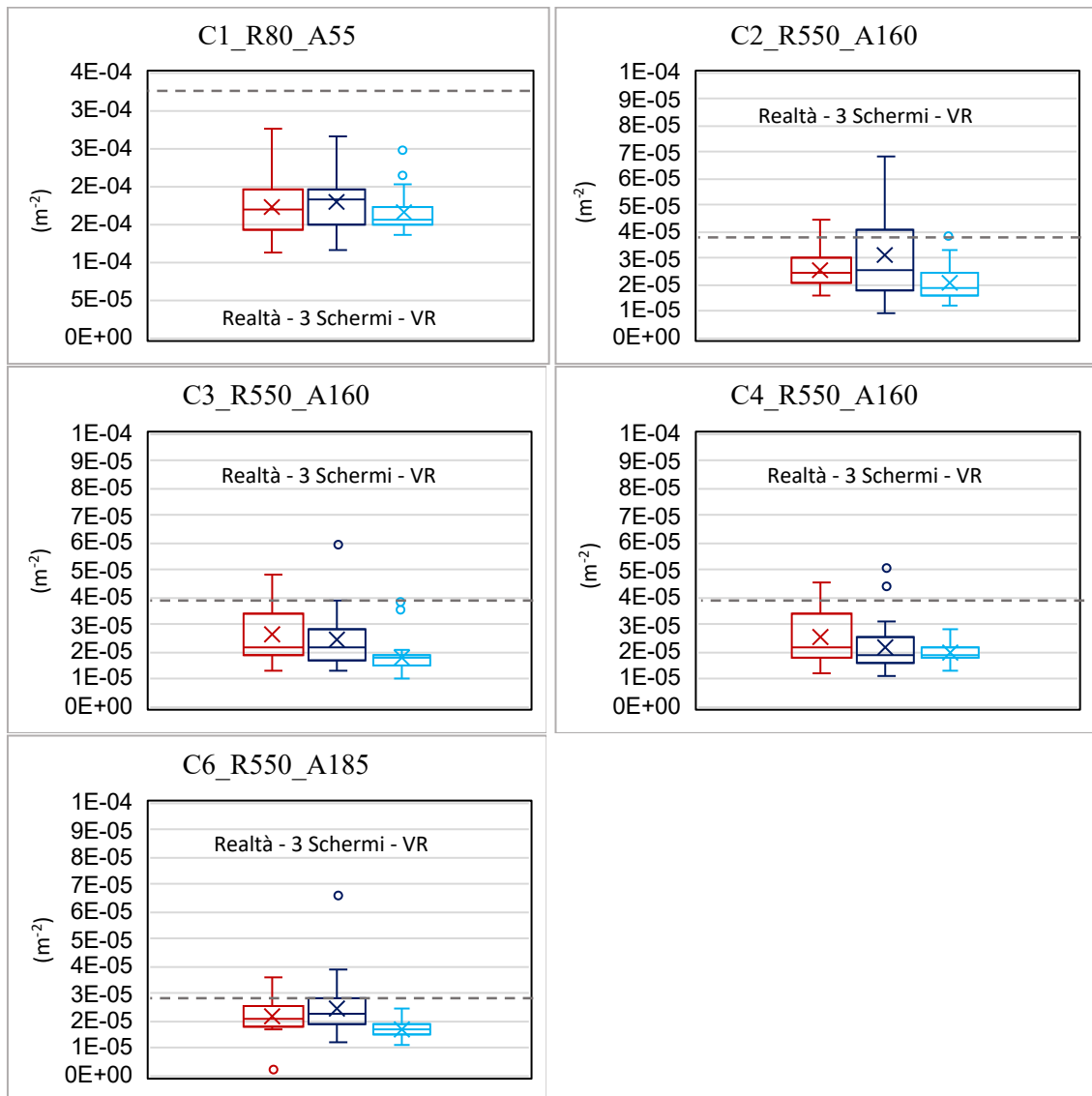


Figura 70 - Box plot dei tassi di curvatura lungo le curve di transizione per il Caso B. La X indica la media della distribuzione. La linea indica la variazione di curvatura dell'elemento di transizione (valore di riferimento).

Caso C

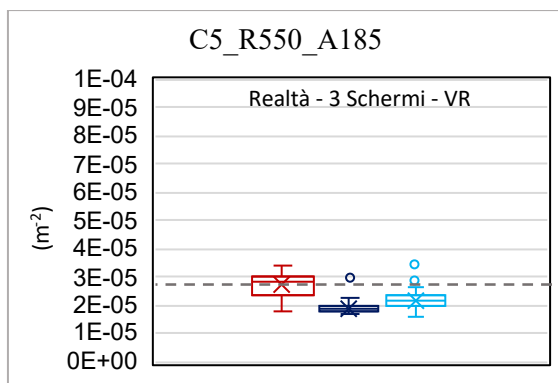


Figura 71 - Box plot dei tassi di curvatura lungo le curve di transizione per il Caso C. La X indica la media della distribuzione. La linea indica la variazione di curvatura dell'elemento di transizione (valore di riferimento).

5.3 Curvatura media lungo le curve circolari

Dalla Figura 72 e dalla Figura 73 in si nota che i valori di curvatura media ottenuti con il dispositivo VR si discostano dai valori di riferimento (definiti dal tracciato) di una minor quantità rispetto ai dati registrati in campo reale.

Valutando invece la differenza relativa tra la curvatura simulata e quella reale, si nota che per le curve con raggio pari a 550 m tale differenza varia tra il 2 e il 6%, invece per la curva C1 (con raggio $R=80$ m) la differenza è pari al 19%. Inoltre, in tutte le curve, le deviazioni standard relative al sistema VR sono inferiori rispetto a quelle reali.

I test statistici mostrano che per le curve C2, C3, C4 e C6 stata ottenuta la validità assoluta. Nelle restanti curve, C1 e C5, la curvatura media registrata al simulatore è sempre maggiore di quella misurata in ambiente reale, si può affermare quindi la validità relativa del dispositivo di realtà virtuale.

Il sistema tre schermi, invece, è caratterizzato da valori di curvatura inferiori rispetto a quelli reali, con un'unica eccezione riguardante la curva C5. Tuttavia, i risultati dei test statistici sono uguali a quelli ottenuti con il sistema VR.

Tabella 29 - Risultati relativi al calcolo della curvatura media adottata dai guidatori lungo gli archi di curva

Confronto guide naturalistiche e guide al simulatore con VR															Confronto con 3 Schermi			
	μ_{rif} (10 ⁻²)	μ_{reali} (10 ⁻²)	σ_{reale} (10 ⁻²)	μ_{VR} (10 ⁻²)	σ_{VR} (10 ⁻²)	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{reale}}{\mu_{reale}}$	P(Z≤z)	Z	Z _{crit}	H ₀	P(T≤t)	t	t _{crit}	H ₀	μ_{3S} (10 ⁻²)	σ_{3S} (10 ⁻²)	$\frac{\mu_{VR} - \mu_{3S}}{\mu_{3S}}$	H ₀
	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[%]									[m ⁻¹]	[m ⁻¹]	[%]	
C1	1.25	1.0329	0.0633	1.2298	0.0448	19%	0.000	12.84	1.96		0.000	12.84	2.03		0.9577	0.0578	28%	
C2	0.1818	0.1505	0.0356	0.1596	0.0164	6%	0.250	1.15	1.96		0.260	1.15	2.05		0.1596	0.0221	12%	
C3	0.1818	0.1753	0.0195	0.1781	0.0138	2%	0.585	0.55	1.96		0.589	0.55	2.05		0.1634	0.0185	9%	
C4	0.1818	0.1778	0.0230	0.1859	0.0150	5%	0.169	1.38	1.96		0.180	1.38	2.05		0.1666	0.0090	12%	
C5	0.1818	0.1798	0.0048	0.1833	0.0034	2%	0.021	2.31	1.96		0.001	3.56	2.01		0.1821	0.0014	1%	
C6	0.1818	0.2037	0.0281	0.1918	0.0131	-6%	0.097	1.66	1.96		0.113	1.66	2.09		0.1934	0.0151	-1%	

Curve destrorse

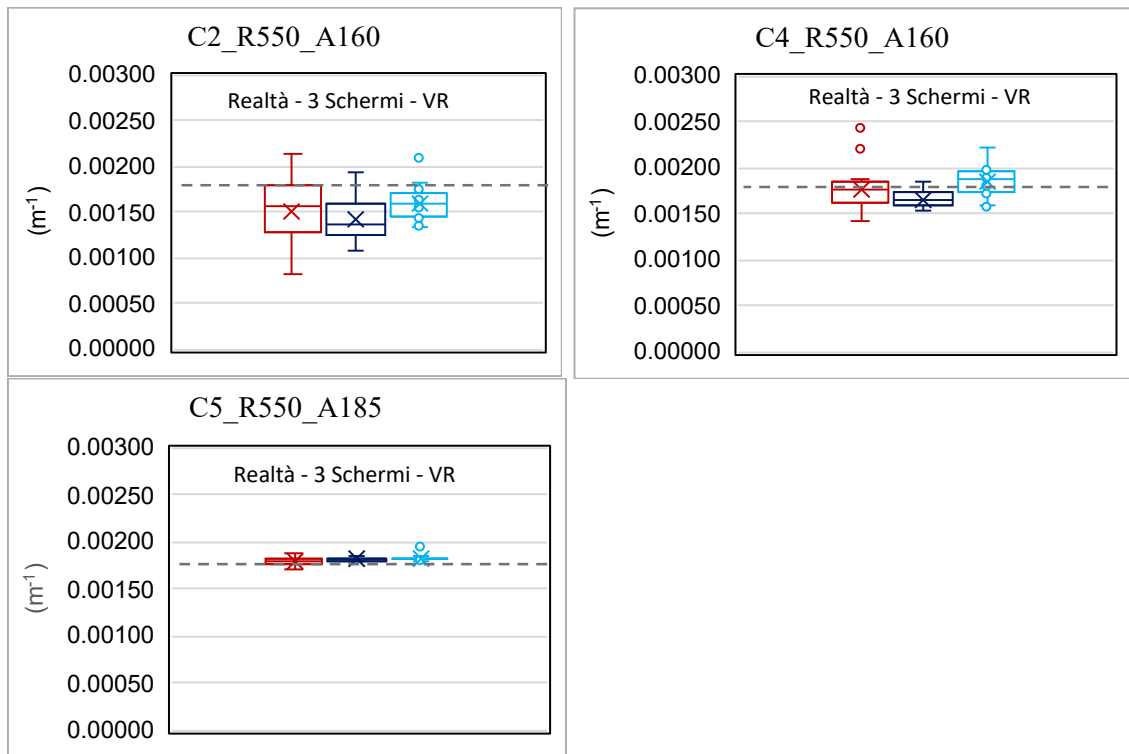


Figura 72- Box plot della curvatura adottata lungo le curve destrorse. La X indica la media della distribuzione. La linea nera tratteggiata indica la curvatura della curva circolare del tracciato (valore di riferimento).

Curve sinistrorse

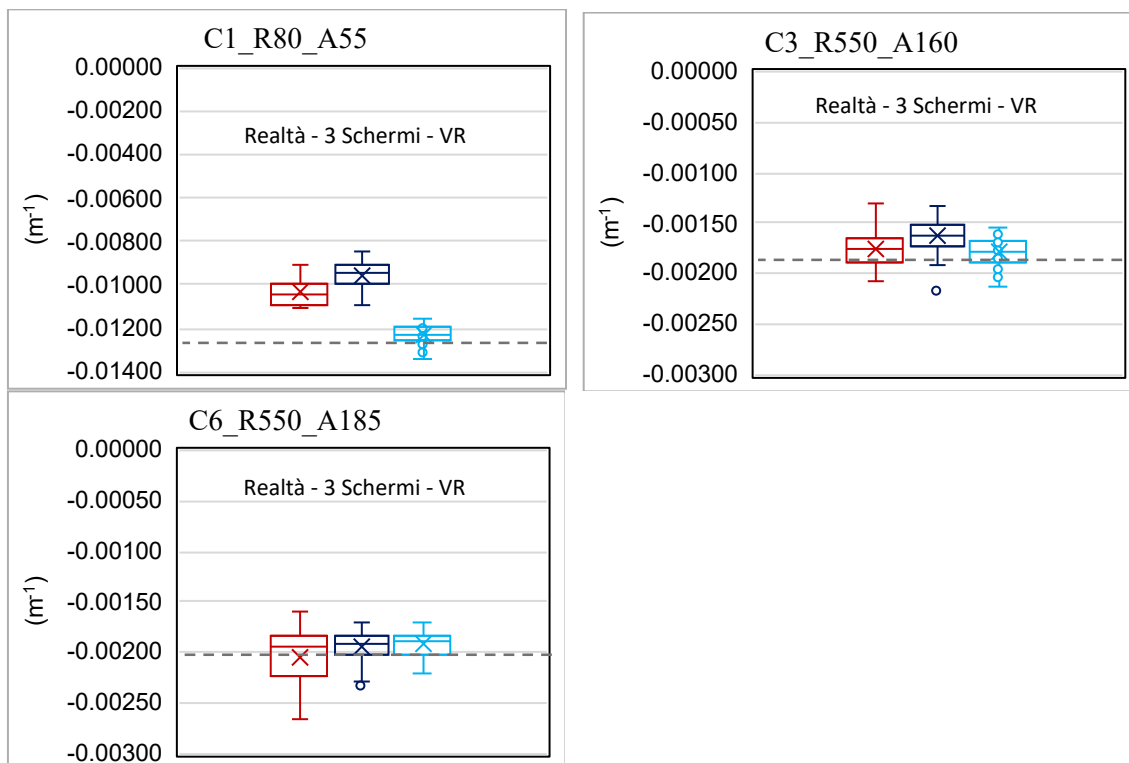


Figura 73 - Box plot della curvatura adottata lungo le curve sinistrorse. La X indica la media della distribuzione. La linea nera tratteggiata indica la curvatura della curva circolare del tracciato (valore di riferimento).

La validazione del dispositivo di realtà virtuale relativa al comportamento longitudinale è stata analizzata in 127 sezioni. La Tabella 30 riporta i risultati dei test statistici. La validazione assoluta è stata ottenuta nel 29% dei casi. Nelle sezioni restanti, invece, è stata valutata la differenza tra la velocità media ottenuta al simulatore e in ambiente reale.

Tabella 30 – Risultati dei test statistici lungo tutto il circuito

Risultati test statistici	#sezioni	[%]
Validazione assoluta	37	29%
Ipotesi nulla rifiutata	90	71%
$V_{VR} > V_{reale}$	86	68%
$V_{VR} < V_{reale}$	4	3%

La validità assoluta è stata raggiunta principalmente lungo il Tratto 0 e durante la fase di accelerazione all'inizio di ogni tratto. Nel primo caso si nota un comportamento dei guidatori maggiormente prudente rispetto a quello adottato lungo tutto il circuito (dove le differenze di velocità media tra ambiente reale simulato aumentano); la causa potrebbe non essere legata alla geometria del tracciato: infatti il Tratto 7, che in parte percorre le stesse progressive del Tratto 0, è caratterizzato da velocità maggiori e sezioni non validate in modo assoluto. Taheri (2017) riscontrò un comportamento simile in alcuni dei guidatori che presero parte al suo esperimento: durante la fase iniziale i partecipanti avrebbero guidato più lentamente per adattarsi meglio all'ambiente virtuale poi, sentendosi maggiormente confidenti con il simulatore e con il veicolo virtuale, gli stessi adottarono velocità maggiori. Per quanto riguarda la fase di accelerazione, le sezioni iniziali dei tratti 1, 2, 3, 6 e 7 sono validate in modo assoluto; si nota anche un comportamento omogeneo dei guidatori con valori di deviazione standard minori rispetto a quelli caratterizzanti le zone centrali dei singoli tratti.

Le differenze di velocità nei due ambienti diventano significative dopo aver raggiunto la velocità di crociera, il 68% delle sezioni (86 delle 127 sezioni) non è validato in modo assoluto e presenta una velocità simulata maggiore di quella reale. In particolare, elementi lunghi, caratterizzati da una geometria costante, inducono i conducenti ad aumentare la propria velocità, sia in campo reale sia in ambito simulato, ma le velocità raggiunte nell'ambiente virtuale sono via via più elevate.

Risultati simili sono stati riscontrati anche negli esperimenti di Bella (2008), Ahlström (2012), Llopis-Castelló (2016), Taheri (2017) e Bassani et al. (2018). Questo comportamento può essere spiegato considerando che:

- l'utente non percepisce una risposta sensoriale omogenea. La percezione della velocità dipende dal rumore del motore e dalle immagini trasmesse dal dispositivo VR, ma il guidatore non percepisce l'accelerazione sul corpo (Bittner, 2002);
- l'esperienza virtuale è caratterizzata da una percezione del rischio minore rispetto a quella provata durante la guida reale. Secondo Fuller (2005) il conducente (anche inconsapevolmente) confronta le proprie capacità di guida e la percezione del rischio; quando quest'ultima supera le capacità di guida allora il conducente riduce la velocità. Durante la guida virtuale il rischio percepito dal guidatore è quasi nullo, per tale motivo egli adotta velocità più elevate rispetto a quelle reali;
- l'elevato senso di confidenza con il simulatore e i tratti monotoni, i quali generano un senso di noia in chi guida, inducono il partecipante ad aumentare la propria velocità (Taheri, 2017). In particolare, l'elevato senso di confidenza viene riscontrato dalle risposte ai questionari, alle domande *“Durante la guida nell'ambiente virtuale si è sentito a suo agio?”* e *“Durante la guida nell'ambiente virtuale si è sentito in grado di controllare la situazione e le proprie azioni?”*, rispettivamente l'88% e il 94% dei *test driver* hanno dichiarato “abbastanza/molto”.

Törnros (1998) ha evidenziato anche la tendenza degli individui a guidare con velocità superiori rispetto alla realtà nel caso in cui questi non dispongano del tachimetro. È possibile riscontrare lo stesso comportamento anche nel presente esperimento: molti partecipanti, causa la dimensione ridotta dei caratteri, hanno lamentato il fatto di non riuscire a leggere nitidamente il cruscotto. Considerando anche le risposte ai questionari, il 42% dei guidatori ha dichiarato di non aver preso il tachimetro come riferimento per valutare la velocità durante la guida.

Inoltre, la differenza di velocità simulata e velocità reale è sempre positiva, contrariamente ai risultati ottenuti da Bittner (2002) e Godley (2002) per cui tale differenza avrebbe dovuto essere negativa in corrispondenza di curve caratterizzate da piccolo raggio o curvatura minore di zero.

I risultati hanno anche rilevato quattro sezioni che presentano una differenza di velocità negativa, queste sono le prime due sezioni del Tratto 0 e del Tratto 1. L'adattamento all'ambiente virtuale ipotizzato da Taheri (2017), e il grado di difficoltà della curva che anticipa il Tratto 1 nell'ambiente virtuale, inducono i guidatori ad adottare una velocità inferiore a quella utilizzata in campo reale. Per questi motivi e, data la numerosità limitata, le 4 sezioni sono state trascurate nello studio di validazione.

In conclusione, poiché è stata riscontrata la similitudine dei profili simulati con quelli reali, con questi ultimi caratterizzati da velocità sempre inferiori (con differenze di velocità statisticamente significative), si può affermare la validità relativa del dispositivo VR per quanto riguarda il comportamento longitudinale.

Dal confronto tra le guide simulate, si osserva che la modalità tre schermi aveva raggiunto la validità assoluta nel 56% dei casi: non solo lungo il Tratto 0 e in la fase di accelerazione (come per il sistema VR), ma anche lungo le curve con lunghezza inferiore a 100 m e nelle sezioni finali dei tratti. In generale il profilo di velocità medio della modalità tre schermi si dispone tra il profilo del sistema VR e il profilo reale. Si nota anche che le differenze tra i due profili simulati diminuiscono in corrispondenza di elementi lunghi con geometria costante; invece, in corrispondenza di cambi di curvatura ed elementi non eccessivamente lunghi (come nei tratti 4 e 6), il profilo della modalità tre schermi è caratterizzato da velocità più simili a quelle reali. La tendenza ad avvicinarsi a un profilo piuttosto che a un altro, in funzione della geometria stradale, porta l'interfaccia a tre schermi a raggiungere la validità assoluta in un maggior numero di sezioni, ma presenta anche un profilo di velocità meno stabile rispetto al profilo reale e a quello ottenuto con il sistema VR. Questi ultimi hanno un andamento più simile tra loro, nonostante le differenze di velocità siano maggiori.

Valutando la dispersione dei dati, entrambi i sistemi simulati mostrano deviazioni standard maggiori di quelle reali. Diversi valori di deviazione standard possono essere legati al diverso impatto che l'esperienza virtuale ha su singoli individui e che pertanto mostrano comportamenti meno omogeni. Inoltre, confrontando le deviazioni standard delle due guide simulate si osserva che nel 73% delle sezioni il VR mostra una deviazione standard maggiore; il restante 27% riguarda principalmente le sezioni poste all'inizio o alla fine dei tratti.

Si discutono anche i risultati relativi al comportamento trasversale.

I test statistici effettuati per valutare la distanza di anticipazione non hanno riscontrato la validità assoluta in nessun punto di misura, tuttavia le distanze misurate con il sistema VR sono sempre maggiori delle distanze registrate in campo reale, si può quindi assumere la validità relativa. Come affermato in precedenza da Catani & Bassani (2018), all'interno dell'ambiente virtuale le distanze egocentriche sono sottostimate rispetto alle distanze percepite sul campo, inoltre è possibile che velocità più elevate registrate in ambiente simulato abbiano indotto i partecipanti a iniziare la manovra di sterzata con maggior anticipo.

Le distanze medie misurate con le due diverse interfacce sono abbastanza simili, si discostano al massimo del 20% e in 8 casi su 12 la distanza misurata con il VR è minore di quella misurata con la modalità tre schermi. La visione stereoscopica fornita dal visore ottico migliora, anche se di poco, il senso di profondità rispetto all'immagine bidimensionale trasmessa sugli schermi LCD.

La velocità di rotazione del volante, misurata con la variazione della curvatura, è validata in maniera assoluta solo in corrispondenza della curva C1. In tutti gli altri punti di misura la pendenza media associata alla variazione di curvatura è inferiore a quella misurata in ambiente reale e alla variazione di riferimento (definita dalla curva di transizione), quindi anche in questo caso il sistema di realtà virtuale risulta validato in modo relativo. I guidatori tendono a variare meno velocemente la propria curvatura in modo da compensare l'errore commesso anticipando la manovra di sterzata.

Considerando i dati del precedente studio di validazione, l'interfaccia tre schermi raggiunge la validità assoluta in più punti di misura rispetto al sistema di realtà virtuale, precisamente lungo due (dei cinque) elementi di transizione nel caso A, e lungo tutti gli elementi di transizione del caso B.

Infine, è stata calcolata la curvatura media del guidatore lungo le curve circolari. La validità assoluta è stata raggiunta per curve con raggio pari a 550 m e lunghezza inferiore a 110 m, indipendentemente dal segno della curvatura. Le curve C1 e C5 non sono validate in modo assoluto, tuttavia quest'ultima, lunga oltre 500 m, presenta una differenza relativa dell'1% dalla curvatura media reale. I valori registrati con il dispositivo di realtà virtuale si discostano di una minor quantità dai valori di riferimento

(definiti dalla curvatura del tracciato), se confrontati con i valori analoghi misurati sul campo. Inoltre, il valore assoluto della curvatura media simulata è maggiore del valore registrato sul campo, l'unica eccezione è rappresentata dalla curva C6, la quale viene anticipata da una clotoide di flesso.

I valori assoluti di curvatura media calcolati con la modalità di visione a tre schermi, invece, sono inferiori ai valori reali. Tuttavia i test statistici mostrano gli stessi risultati.

In conclusione, anche per il comportamento trasversale, è lecito assumere la validità relativa del dispositivo di realtà virtuale.

Il principale obiettivo della tesi ha riguardato la validazione del dispositivo di realtà virtuale (*virtual reality*, VR) HTC VIVE, recentemente installato sul simulatore di guida del DIATI (Politecnico di Torino). In questo studio si è valutato il comportamento di alcuni guidatori al simulatore e lo si è confrontato con quello adottato da altri nella guida reale. Tale confronto è stato eseguito attraverso la misura di quei fattori in grado di caratterizzare il comportamento longitudinale (su tutta la velocità) e quello trasversale tanto nelle osservazioni naturalistiche su strada quanto negli esperimenti al simulatore. Il confronto è stato condotto riproducendo in ambiente simulato il medesimo tracciato stradale considerato nelle osservazioni naturalistiche (guida reale).

Le due guide sono state svolte da due gruppi di *test driver*. La guida simulata ha coinvolto solo partecipanti che fossero alla prima esperienza con il dispositivo di VR; alcuni di loro avevano già preso parte al precedente studio di validazione eseguendo la guida sul circuito reale. Dato l'ampio intervallo di tempo intercorso tra le osservazioni naturalistiche e l'esperimento al simulatore (oltre due anni), le due esperienze possono ritenersi ragionevolmente indipendenti (l'una non ha condizionato gli stessi guidatori coinvolti anche nell'altra).

I partecipanti hanno guidato su un circuito lungo 16 km di strada extraurbana a due corsie, suddiviso in 7 tratti con caratteristiche geometriche diverse, attorno la Palazzina di Caccia di Stupinigi. L'esperimento è stato condotto considerando per tutti i veicoli la sola condizione di flusso libero.

Nello studio del comportamento longitudinale sono stati estratti i dati di velocità in sezioni distanti 100 m lungo i diversi tratti del circuito per un totale di 127 sezioni. L'analisi statistica volta al confronto tra i dati nei due ambienti, svolta attraverso il t-test e lo z-test, ha evidenziato una validità assoluta in 37 dei 127 casi analizzati. I dati restituiti dal simulatore sono del tutto confrontabili con quelli osservati nella realtà principalmente nella fase di accelerazione all'inizio di ogni tratto. Nelle restanti sezioni, percorse a velocità costante o in decelerazione, la media determinata nella guida simulata è risultata maggiore di quella reale. In questi casi, tutti i test hanno rilevato una differenza delle medie statisticamente significativa. Tale differenza aumenta in corrispondenza di

elementi stradali estesi e poco impegnativi (lunghe rettili, curve di grande raggio), caratterizzati quindi da una curvatura piccola o nulla.

In precedenza, anche per l'interfaccia a tre schermi si era rilevata una velocità simulata più elevata di quella reale, tuttavia di poco inferiore a quella ottenuta con il VR. Il precedente esperimento è stato caratterizzato da un maggior numero di sezioni validate in modo assoluto, presenti non solo durante la fase di accelerazione, ma anche in quella di decelerazione e nelle curve con lunghezza inferiore a 100 m. Tuttavia, il profilo di velocità ottenuto con la visione su tre schermi risulta più ondulato rispetto al profilo reale e a quello della visione con il dispositivo di VR. Questi ultimi hanno un andamento più simile tra loro, nonostante le differenze di velocità siano maggiori.

Per quanto riguarda il comportamento trasversale, è da mettere in evidenza che sia al simulatore sia nelle guide reali i guidatori tendono ad anticipare la manovra di sterzata, ossia ruotano il volante ben prima dell'inizio della curva di transizione. Per compensare gli effetti derivanti da tale anticipazione, gli stessi variano meno velocemente lo sterzo rispetto a quanto sia necessario per seguire la stessa curvatura del tracciato. I risultati ottenuti al simulatore hanno evidenziato l'impiego da parte dei guidatori coinvolti al simulatore di una distanza di anticipazione media sempre maggiore di quella misurata in ambiente reale.

I valori medi del tasso di variazione della curvatura sono risultati inferiori sia a quelli reali e sia a quelli di progetto (definiti dagli elementi di transizione). In entrambi i casi i test statistici hanno evidenziato differenze significative in tutti i punti di misura. I risultati registrati con il dispositivo VR sono simili a quelli ottenuti con l'interfaccia visiva a tre schermi, eccezion fatta per la media dei tassi di variazione di curvatura misurati in uscita dalle curve: in questi casi il sistema di visione a tre schermi era stata ottenuta la validità assoluta con la guida naturalistica.

Per quanto riguarda i valori di curvatura media lungo le curve, i test statistici hanno mostrato, sia per il sistema a tre schermi sia per il dispositivo VR, gli stessi risultati: tutte le curve ad ampio raggio ($R=550$ m) e lunghezza inferiore a 110 m sono state validate in modo assoluto. La validità assoluta, invece, non è stata dimostrata per la curva C1, caratterizzata da piccoli valori di raggio e lunghezza ($R=80$ m, $L=35.84$ m), e per la curva C5 ad ampio raggio ($R=550$ m) e lunga oltre 500 m, in questo caso la differenza relativa

tra il valore medio simulato e quello reale è solo dell'1%. Tuttavia, le guide simulate si sono rivelate molto differenti tra loro: con il dispositivo di realtà virtuale, in 5 curve su 6, la curvatura media assoluta è risultata superiore di quella reale e più vicina ai valori di riferimento definiti dalla curvatura del tracciato; i valori che furono misurati con l'interfaccia a tre schermi risultarono inferiori a quelli reali.

In conclusione, è possibile considerare per il dispositivo di visione in VR il raggiungimento di una validità relativa per quanto concerne i comportamenti longitudinale e trasversale. Il sistema di VR può essere utilizzato come strumento di ricerca a patto di considerare che gli stessi guidatori in una condizione di guida reale:

- tendono a guidare più lentamente;
- riducono la distanza di anticipazione;
- ruotano più velocemente il volante per cambiare curvatura;
- adottano la stessa curvatura media lungo le curve ad ampio raggio;
- adottano una curvatura media minore per le curve a piccolo raggio.

La validità del dispositivo VR è supportata anche dalle risposte dei questionari. I partecipanti hanno giudicato positivamente l'esperienza di guida, mettendo in evidenza la capacità del dispositivo di rappresentare l'ambiente virtuale in modo realistico e di stimolare l'utente come se quest'ultimo stesse affrontando realmente una guida su strada. È stato quindi rilevato un buon livello di presenza.

Tuttavia, i risultati hanno dimostrato che il dispositivo VR non è in grado di avvicinare la simulazione alla realtà più di quanto sia in grado di fare il sistema di visione con schermi LCD, nonostante il sistema VR offra un'esperienza di guida maggiormente immersiva e coinvolgente. Inoltre, l'interfaccia di visione a tre schermi al momento è l'unica che può essere utilizzata per studiare comportamenti di guida che comprendano l'uso degli specchietti retrovisori, come nella manovra di sorpasso, di cambio corsia, e di immissione.

In compenso, il dispositivo VR sostituisce il precedente sistema di visualizzazione in tutte le manovre che necessitano di un campo visivo più ampio o inducono il guidatore a ruotare la testa. Ad esempio, è possibile caratterizzare meglio il comportamento degli utenti che affrontano curve strette o che si avvicinano a intersezioni lineari e circolari; la visualizzazione a 360° consente ai partecipanti di verificare la presenza di veicoli in

direzione laterale, e potrebbe aumentare la distanza di visibilità disponibile rispetto a quella che sarebbe misurata con l'interfaccia grafica a tre schermi.

In futuro l'esperienza di guida potrebbe essere resa maggiormente realistica introducendo alcuni accorgimenti, come l'immagine sugli specchietti retrovisori. Inoltre, è plausibile che l'adozione di una piattaforma dinamica combinata ad attuatori di vibrazione del sedile potrebbero comportare un miglioramento della percezione della velocità, soprattutto in fase di frenatura. È anche auspicabile che futuri aggiornamenti del software possano introdurre elementi virtuali del corpo, quali mani e piedi, nelle azioni sui comandi di guida (sterzo, leva del cambio, pedali).

Bibliografia

- Ahlström, C., Bolling, A., Sörensen, G., Eriksson, O., & Andersson, A. (2012). *Validating speed and road surface realism in VTI driving simulator III*. Statens väg-och transportforskningsinstitut.
- Allen, R.W., Mitchell, D.G., Stein, A.C. and Hogue, I.R (1991). Validation Of Real-Time Man-In-The-Loop Simulation. VTI Report. No 372A, Part 4, pp.18-31.
- Alm, H. (1996). Driving simulators as research tools: a validation study based on the VTI driving simulator.
- AVSimulation [Online] Available at: <https://www.avsimulation.fr> [Consultato nel 2019].
- Bassani, M., Catani, L., Ignazzi, A., & Piras, M. (2018). Validation of a fixed-base driving simulator to assess behavioural effects of road geometrics.
- Bassani, M., & Catani, L. (2018). Anticipatory distance, curvature, and curvature change rate in compound curve negotiation: a comparison between real and simulated driving.
- Balk, S. A., Bertola, M. A., & Inman, V. W. (2013). Simulator sickness questionnaire: Twenty years later.
- Bella, F. (2008). Driving simulator for speed research on two-lane rural roads. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3), 1078-1087.
- Benson AJ (1999). Spatial disorientation: General aspects. In Ernsting J, Nicholson AN, Rainford DJ (Eds), *Aviation Medicine*. Oxford, UK; Butterworth Heinemann
- Bittner Jr, A. C., Simsek, O., Levison, W. H., & Campbell, J. L. (2002). On-road versus simulator data in driver model development driver performance model experience. *Transportation research record*, 1803(1), 38-44.
- Blaauw, G. J. (1982). Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study. *Human Factors*, 24(4), 473-486.
- Blana, E., & Golias, J. (2002). Differences between vehicle lateral displacement on the road and in a fixed-base simulator. *Human factors*, 44(2), 303-313.

Brown, J. L. (1975). Visual elements in flight simulation. Report of Working Group 34. Washington, DC: Committee on Vision, Assembly of Behavioral and Social Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences.

Cina, A., 2014. *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System) per la Geomatica*. Torino: Celid.

CognitiveFun, 2019. *cognitive fun!*. [Online] Available at: <http://cognitivefun.net/> [Consultato nel 2019].

de Dios Ortuzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.

Dobie, T., McBride, D., Dobie, J. T., & May, J. (2001). The effects of age and sex on susceptibility to motion sickness. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 72(1), 13-20.

Duh HB, Parker DE, Philips JO, Furness TA (2004). "Conflicting" motion cues to the visual and vestibular self-motion systems around 0.06 Hz evoke simulator sickness. *Hum Factors*; 46(1):142-53

Ente Ospedaliero Cantonale [EOC]. (2007). *Manuale di Cure Palliative - Sintomi - Nausea e Vomito*. Available at: <https://www.eoc.ch/dms/site-eoc/documenti/pallclick/sintomi/I2DCURPAL2D01720NAUSEA20E20VOMITO.pdf>

Espie, S., Gauriat, P., & Duraz, M. (2005). Driving Simulators Validation. In *Driver Simulation Conference*.

Flexman, R. E., & Stark, E. A. (1987). Training simulators. *Handbook of human factors*, 1, 1012-1037.

Frank, L. H., Casali, J. G., & Wierwille, W. W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors*, 41(1), 492-496.

Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident analysis & prevention*, 37(3), 461-472.

Graybiel, A. (1968). Structural elements in the concept of motion sickness. ISO 690

Garretto, M (2002). *STATISTICA – Lezioni ed esercizi. Università di Torino. Dipartimento di Matematica 'Federigo Enriques'.*

Gikas, V., and J. Stratakos. (2012). A Novel Geodetic Engineering Method for Accurate and Automated Road/Railway Centerline Geometry Extraction Based on the Bearing Diagram and Fractal Behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 13(1): 115–126.

Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2002). Driving simulator validation for speed research. *Accident analysis & prevention*, 34(5), 589-600.

Harms, L. (1993). Driving performance on a real road and in a driving simulator: results of a validation study. *Vision in Vehicles IV, Glasgow*.

Hooi-Siang, K., Jalil, M. K. A., & Kee-Quen, L. (2017). Virtual reality for low-cost automotive driving simulator in vehicle engineering research. *Jurnal Teknologi*, 79(7).

Hoskins, A. H., & El-Gindy, M. (2006). Technical report: Literature survey on driving simulator validation studies. *International journal of heavy vehicle systems*, 13(3), 241-252.

Ignazzi, A., 2017. Validazione cinematica di un simulatore di guida con rilievi di velocità trasversali e longitudinali. *Politecnico di Torino: Tesi di Laurea Magistrale*.

Ihemedu-Steinke, Q. C., Sirim, D., Erbach, R., Halady, P., & Meixner, G. (2015). Development and evaluation of a virtual reality driving simulator. *Mensch und Computer 2015–Workshopband*.

Kaptein, N. A., Theeuwes, J., & Van Der Horst, R. (1996). Driving simulator validity: Some considerations. *Transportation research record*, 1550(1), 30-36.

Kim, H. K., Park, J., Choi, Y., & Choe, M. (2018). Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied ergonomics*, 69, 66-73.

Klee, H., Bauer, C., Radwan, E., & Al-Deek, H. (1999). Preliminary validation of driving simulator based on forward speed. *Transportation Research Record*, 1689(1), 33-39.

- Kennedy, R. S., Lilienthal, M. G., Berbaum, K. S., Baltzley, D. R., & McCauley, M. E. (1989). Simulator sickness in US Navy flight simulators. *Aviation, space, and environmental medicine*, 60(1), 10-16.
- 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.
- Kennedy, R. S., Drexler, J., & Kennedy, R. C. (2010). Research in visually induced motion sickness. *Applied ergonomics*, 41(4), 494-503.
- Kolasinski, E. M. (1995). *Simulator Sickness in Virtual Environments* (No. ARI-TR-1027). Army Research Inst for the Behavioral and Social Sciences Alexandria Va.
- Fowlkes, J. E., Kennedy, R. S., & Lilienthal, M. G. (1987, September). Postural disequilibrium following training flights. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* (Vol. 31, No. 5, pp. 488-491). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Frank, L. H., Casali, J. G., & Wierwille, W. W. (1988). Effects of visual display and motion system delays on operator performance and uneasiness in a driving simulator. *Human Factors*, 41(1), 492-496.
- Leonard Jr, J. J., & Wierwille, W. W. (1975, October). Human performance validation of simulators: theory and experimental verification. In *Proceedings of the Human Factors Society annual meeting* (Vol. 19, No. 4, pp. 446-456). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- Llopis-Castelló, D., Camacho-Torregrosa, F. J., Marín-Morales, J., Pérez-Zuriaga, A. M., García, A., & Dols, J. F. (2016). Validation of a low-cost driving simulator based on continuous speed profiles. *Transportation research record*, 2602(1), 104-114.
- McCormick, E. J. (1970). *Human factors engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Mullen, N., Charlton, J., Devlin, A., & Bedard, M. (2011). Simulator validity: Behaviors observed on the simulator and on the road. In *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology* (pp. 1-18). CRC Press.

Mudd, S. (1968). Assessment of the fidelity of dynamic flight simulators. *Human Factors*. 351-358.

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (MIT), 2019. Online] Available at: <http://www.mit.gov.it> [Consultato nel 2019].

Oosterveld, W. J. (1995). Motion sickness. *Journal of travel medicine*, 2(3), 182-185.

Raviglione, A., 2016. Validazione cinematica di un simulatore di guida: Metodologia e primi risultati. *Politecnico di Torino: Tesi di Laurea Magistrale*.

Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Motion sickness*. Academic press.

Shechtman, O., Classen, S., Awadzi, K., & Mann, W. (2009). Comparison of driving errors between on-the-road and simulated driving assessment: a validation study. *Traffic injury prevention*, 10(4), 379-385.

Slater, M., & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): Speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(6), 603-616.

Slater, M. (1999). Measuring presence: A response to the Witmer and Singer presence questionnaire. *Presence*, 8(5), 560-565.

Taheri, S. M., Matsushita, K., & Sasaki, M. (2017). Development of a driving simulator with analyzing driver's characteristics based on a virtual reality head mounted display. *Journal of Transportation Technologies*, 7(03), 351.

Taheri, S. M., Matsushita, K., & Sasaki, M. (2017). Virtual reality driving simulation for measuring driver behavior and characteristics. *Journal of transportation technologies*, 7(02), 123.

Tcha-Tokey, K., Loup-Escande, E., Christmann, O., Canac, G., Farin, F., & Richir, S. (2015, October). Towards a user experience in immersive virtual environment model: a review. In *Proceedings of the 27th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (p. 26). ACM.

Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and validation of a questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments.

Törnros, J. (1998). Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel—a validation study. *Accident Analysis & Prevention*, 30(4), 497-503.

Triggs, T. J. (1996). Some critical human factors issues and challenges in simulation and training. *Simtect 96 Proceedings*, 21-26.

VIVE [Online] Available at: www.vive.com/eu/ [Consultato nel 2019].

Wade, M. G., & Hammond, C. (1998). Simulation Validation: Evaluating Driver Performance in Simulation and the Real World.

Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence*, 7(3), 225-240.

ALLEGATO 1

Symptoms in SSQ.			Cluster		
	Tradotto	Originale	N	O	D
1	Generale disagio	General discomfort	X	X	
2	Fatica	Fatigue		X	
3	Mal di testa	Headache		X	
4	Bruciore agli occhi	Eyestrain		X	
5	Difficoltà di messa a fuoco	Difficulty focusing		X	X
6	Incremento di salivazione	Increased salivation	X		
7	Incremento di sudorazione	Sweating	X		
8	Nausea	Nausea	X		X
9	Difficoltà di concentrazione	Difficulty concentrating	X	X	
10	Intontimento	Fullness of head			X
11	Visione offuscata	Blurred vision		X	X
12	Capogiro (occhi aperti)	Dizzy (eyes open)			X
13	Capogiro (occhi chiusi)	Dizzy (eyes closed)			X
14	Vertigini	Vertigo			X
15	Sensibilità di stomaco	Stomach awareness	X		
16	Disturbi digestivi	Burping	X		
	Totale	Total	[1]	[2]	[3]

I totali [1], [2], [3] sono calcolati come la somma dei valori attribuiti a ciascun sintomo indicato con la X. I punteggi parziali e il TS sono calcolati moltiplicando i totali per dei coefficienti, in particolare:

$$[N] \rightarrow \text{Nausea} = [1] * 9.54$$

$$[O] \rightarrow \text{Oculomotor} = [2] * 7.58$$

$$[D] \rightarrow \text{Disorientation} = [3] * 13.92$$

$$[TS] \rightarrow \text{Total Score (TS)} = ([1] + [2] + [3]) * 3.74$$

ALLEGATO 2

Symptoms in SSQ.			Cluster	
	Tradotto	Originale	O	D
1	Generale disagio	General discomfort	X	
2	Fatica	Fatigue	X	
4	Bruciore agli occhi	Eyestrain	X	
5	Difficoltà di messa a fuoco	Difficulty focusing		X
3	Mal di testa	Headache		X
10	Intontimento	Fullness of head		X
11	Visione offuscata	Blurred vision		X
13	Capogiro (occhi chiusi)	Dizzy (eyes closed)		X
14	Vertigini	Vertigo		X
	Totale	Total	[I]	[II]

Quindi i 16 sintomi nel SSQ sono stati ridotti a 9 nel VRSQ. Inoltre, come nello studio di Balk, ogni sintomo è stato collocato all'interno di un solo cluster. I totali [I] e [II] sono calcolati come la somma dei valori attribuiti a ciascun sintomo indicato con la X. I punteggi parziali e il TS del VRSQ sono calcolati come segue:

$$[O] \rightarrow \text{Oculomotor} = \frac{[I]}{12} * 100$$

$$[D] \rightarrow \text{Disorientation} = \frac{[II]}{15} * 100$$

$$[TS] \rightarrow \text{Total score} = \frac{[O]+[D]}{2}$$

ALLEGATO 3

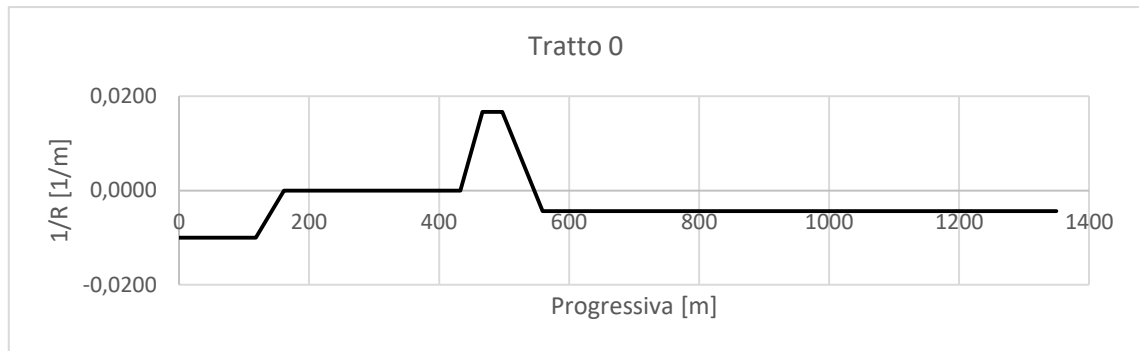


Diagramma delle curvature del Tratto 0 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$

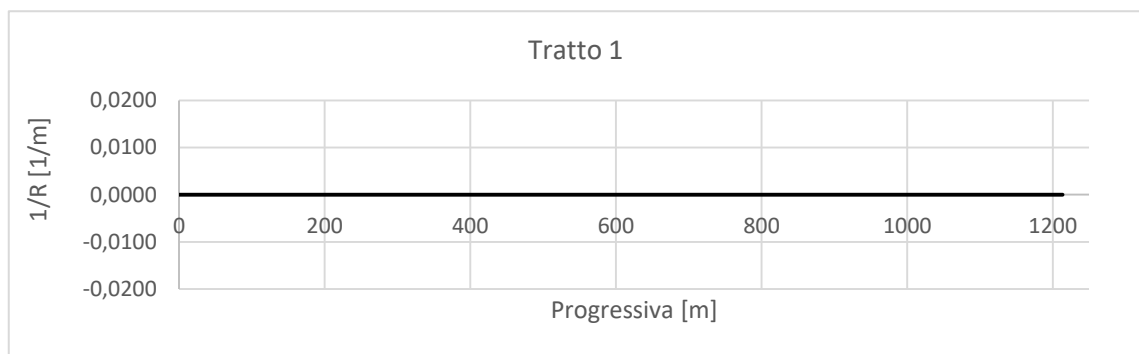


Diagramma delle curvature del Tratto 1 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=70\text{ km/h}$

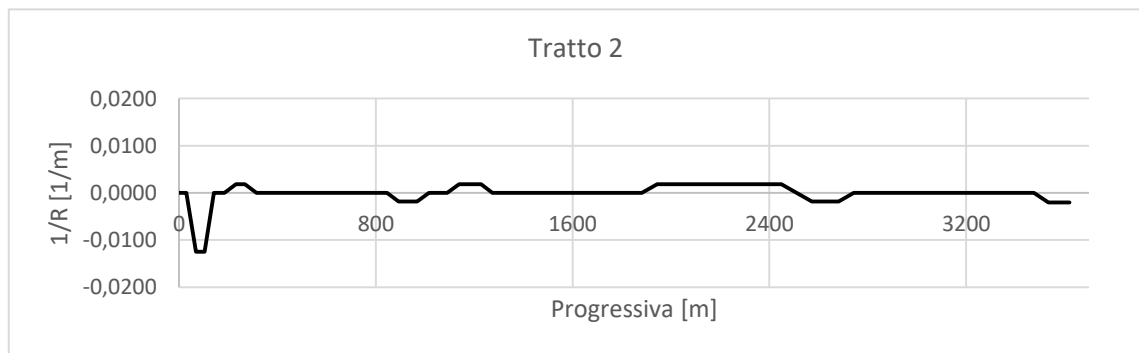


Diagramma delle curvature del Tratto 2 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$ - $L_{banchina}=1.5\text{ m}$

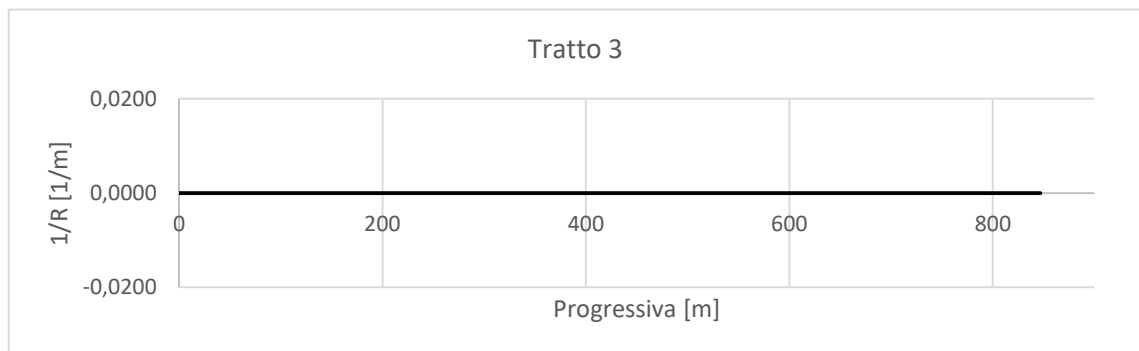


Diagramma delle curvature del Tratto 3 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$

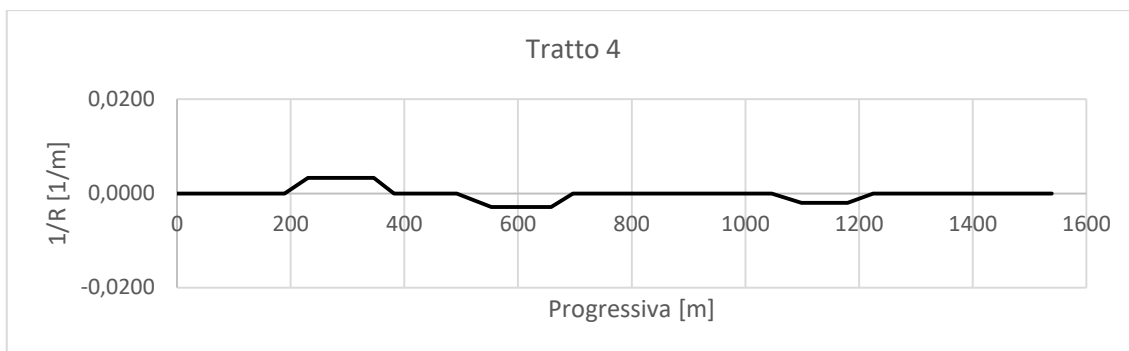


Diagramma delle curvature del Tratto 4 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$

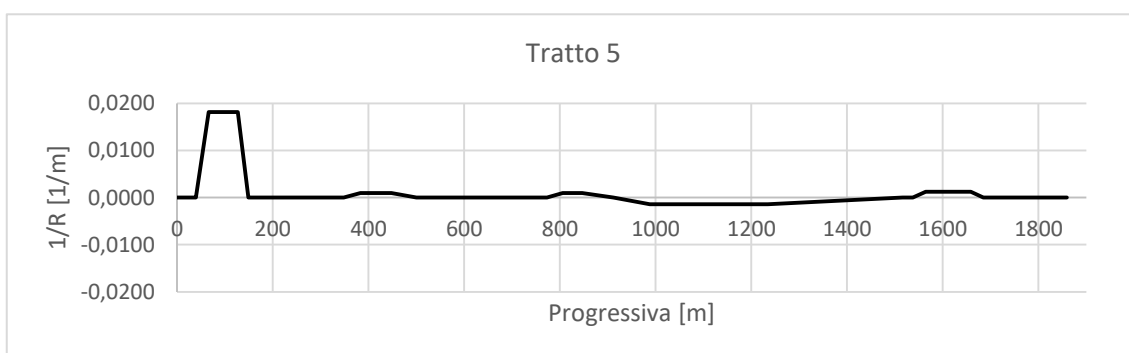


Diagramma delle curvature del Tratto 5 - $L_{carreggiata}=5\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$

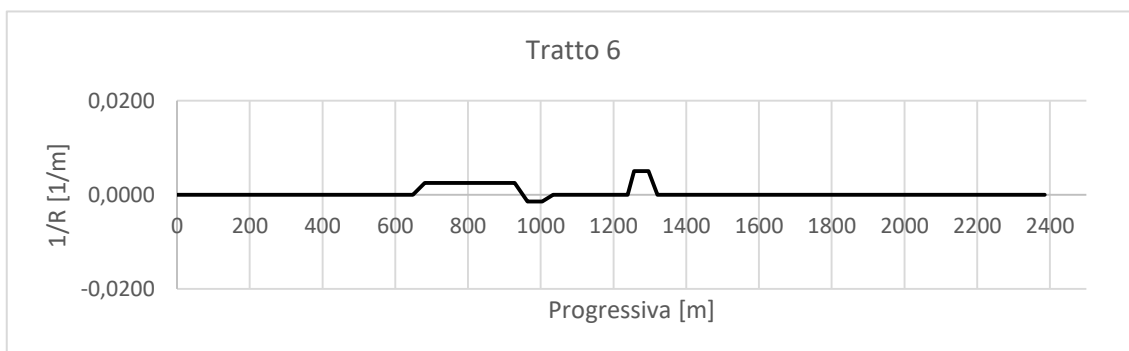


Diagramma delle curvature del Tratto 6 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=70\text{ km/h}$

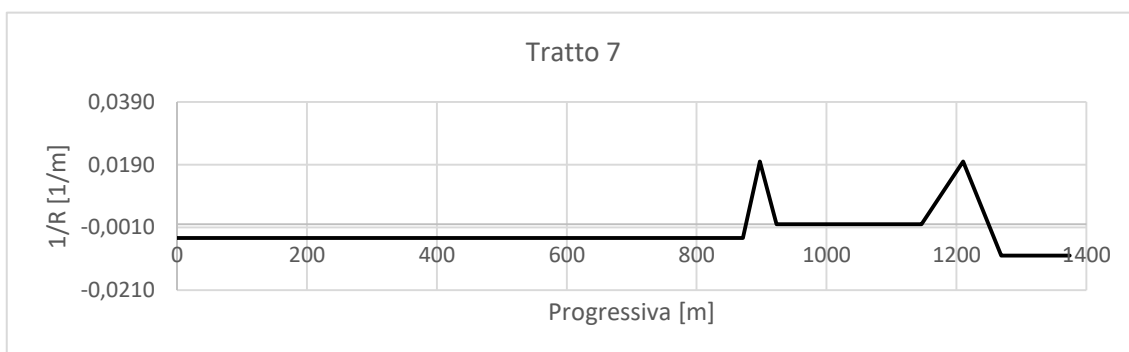


Diagramma delle curvature del Tratto 7 - $L_{carreggiata}=7\text{ m}$ - $V_{limite}=50\text{ km/h}$

ALLEGATO 4

QUESTIONARIO PER ATTIVITA' DI RICERCA CON L'USO DEL SIMULATORE DI GUIDA

QUESTIONARIO PRE-GUIDA

Nome e Cognome #TD.....

Giorno

Ora

È attualmente in buona salute?

☐ SI

☐ NO

Se no, di cosa soffre?

.....

Ha assunto medicinali nelle precedenti 24h?

☐ SI

☐ NO

Se si, quali? (è sufficiente la categoria)

.....

È affetto da malattie croniche (asma, diabete, ansia, allergia...)?

☐ SI

☐ NO

Se si, quali?

.....

Quanto tempo fa ha consumato l'ultimo pasto?oreminuti

Come definirebbe il pasto consumato?

☐ Leggero

☐ Ordinario

☐ Abbondante

Ha assunto bevande alcoliche nelle 2 ore precedenti la guida?

☐ SI

☐ NO

Ha assunto bevande eccitanti (caffè, energy drink) nelle 2 ore precedenti la guida?

☐ SI

☐ NO

Utilizza dispositivi per la correzione visiva?

☐ SI

☐ NO

Attualmente li indossa?

☐ SI

☐ NO

Data

Firma

.....

.....

ALLEGATO 5

QUESTIONARIO PER ATTIVITA' DI RICERCA CON L'USO DEL SIMULATORE DI GUIDA

QUESTIONARIO DI POST-SIMULAZIONE – SESSIONE DI GUIDA

Nome e Cognome #TD.....

Sensazioni. Durante la guida nell'ambiente virtuale si è sentito:

- | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| - a suo agio | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - in grado di controllare la situazione e le proprie azioni | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - pieno di energia | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - nervoso | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - con la mente che vagava | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |

Sarebbe disposto a guidare ancora per almeno un'ora

- | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| ☐ No | ☐ < 30 min | ☐ <45 min | ☐ SI |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|

Conseguenze dell'esperienza. Indicare se in questo momento o durante la guida al simulatore ha percepito uno o più dei seguenti sintomi:

- | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| - Generale disagio | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Fatica | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Mal di testa | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Bruciore agli occhi | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Incremento di salivazione | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Incremento di sudorazione | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Nausea | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Difficoltà di concentrazione | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Intontimento | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Visione offuscata | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Capogiro | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Vertigini | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Sensibilità di stomaco | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |
| - Disturbi digestivi | ☐ per nulla | ☐ lieve | ☐ moderato | ☐ intenso |

Altro

.....

Immersione

Esprima un giudizio sulla veridicità dello scenario stradale:

- | | | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| - Qualità dell'immagine | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Corrispondenza alla realtà | | | | |
| o Ambiente esterno alla strada (edifici, panorama, vegetazione) | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| o Margini stradali | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| o Sede stradale | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| o Segnaletica orizzontale | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| o Segnaletica verticale | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| o Presenza di altri veicoli | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |

Esprima un giudizio sull'interazione con i dispositivi audio-visivi e meccanici:

- | | | | | |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| - Riproduzione del campo visivo | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Percezione degli specchietti | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Veridicità degli effetti sonori | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Veridicità della strumentazione di bordo | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Risposta del volante | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Risposta del cambio | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Percezione dell'acceleratore | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |
| - Percezione del freno | ☐ Pessimo | ☐ Sufficiente. | ☐ Buono | ☐ Ottimo |

Di quali elementi/strumenti si è servito per valutare la velocità di marcia?

- | | |
|--|--|
| ☐ Contachilometri | ☐ Vegetazione e oggetti a lato della strada |
| ☐ Rumore del motore | ☐ Non ho prestato attenzione alla velocità |
| ☐ Altro: | |

Tecnologia usata

- | | | | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|--|--|
| - Ha familiarità con l'uso di software di guida (es. videogiochi) | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - Ha trovato il visore ottico molto ingombrante da usare? | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - Crede che il visore renda l'esperienza di guida più interessante? | ☐ per nulla | ☐ poco | ☐ abbastanza | ☐ molto |
| - Quale strumentazione preferisce per la guida simulata? | ☐ nessuna | ☐ 3 schermi | ☐ visore ottico | ☐ ho provato solo uno dei due |
| | | | | quale?..... |

Presenza: è lo stato di coscienza legato al “senso di trovarsi lì”, è il senso psicologico di trovarsi nell’ambiente virtuale. Risponda ai seguenti quesiti:

- Si è sentito fisicamente inserito nell’ambiente virtuale?
☐ per nulla ☐ poco ☐ abbastanza ☐ molto
- Si è sentito stimolato dall’ambiente virtuale?
☐ per nulla ☐ poco ☐ abbastanza ☐ molto
- Durante la guida, si è sentito coinvolto come se fosse dentro l’ambiente virtuale e non stesse guardando uno schermo o utilizzando le componenti del simulatore?
☐ per nulla ☐ poco ☐ abbastanza ☐ molto
- Durante la guida, si è sentito coinvolto al punto tale da non sapere cosa stesse accadendo attorno a sé?
☐ per nulla ☐ poco ☐ abbastanza ☐ molto
- Durante la guida, si è sentito coinvolto dall’ambiente virtuale al punto da perdere la cognizione del tempo?
☐ per nulla ☐ poco ☐ abbastanza ☐ molto
- Quanto pensa sia durata la guida?

Da quali elementi è stato condizionato il suo comportamento alla guida (velocità e posizione nella corsia)?

- ☐ Presenza della segnaletica orizzontale ☐ Altro
- ☐ Presenza degli altri veicoli
- ☐ Presenza di elementi sulla banchina
- ☐ Dimensione dell’abitacolo

Sulla base della precedente domanda, le è rimasta impressa una situazione in particolare?

☐ SI ☐ NO

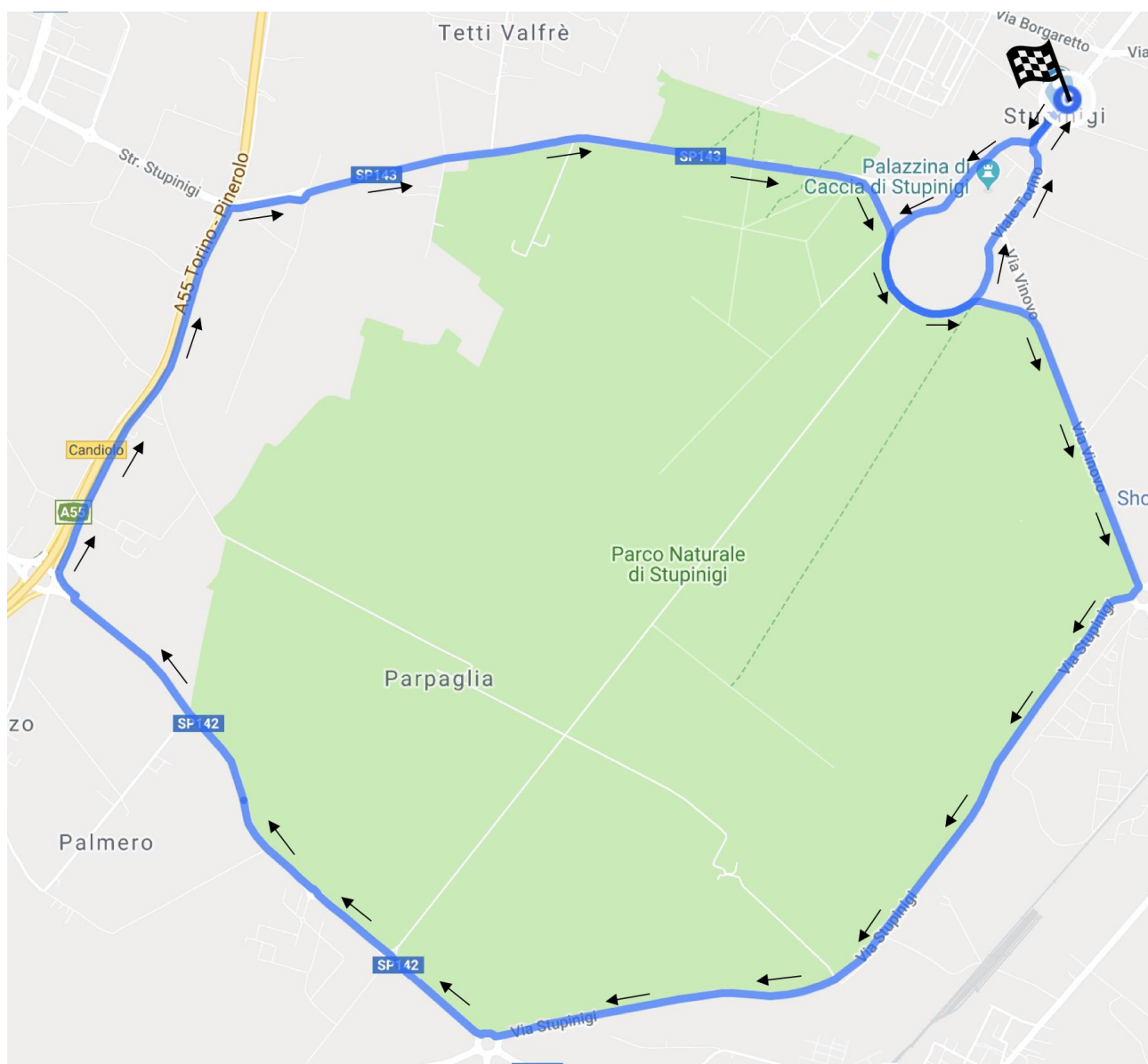
Se SI, ne fornisca una breve descrizione e indichi il punto sulla mappa con una [X].

.....

In alcune situazioni ha provato particolare difficoltà a controllare il veicolo? ☐ SI ☐ NO

Se SI, ne fornisca una breve descrizione indichi il punto sulla mappa con un [O].

.....



Ha altro da segnalare e/o consigli per le esperienze di ricerca future?

.....

.....

.....

.....

In relazione all'esperienza avuta, parteciperebbe ad altri esperimenti di simulazione?

☐ NO

☐ Solo con: 3 schermi/Visore ottico

☐ SI, con entrambi

Data

Firma

.....

.....

ALLEGATO 6

Script Matlab[®] utilizzato per il processo di “separazione”

```
clc;
clear all;
close all;

load II_Input_separazione_TD_01_VR.txt;

VET=II_Input_separazione_TD_01_VR(:,:);%definisce una matrice con tutte
le righe e le colonne del file

[p1,p2]=size(VET);%definisce valore variabili p1 e p2

p3=round(p1/4);%definisce p3
tempo0=VET(p3,1);%definisce variabile tempo0
p4=round(3*p1/4);
tempo7=VET(p4,1);

dist_in0=zeros(1,2); %crea una matrice (1x2) di due colonne (distanza-
tempo) per ogni inizio-fine tratto
dist_end0=zeros(1,2);
dist_in1=zeros(1,2);
dist_end1=zeros(1,2);
dist_in2=zeros(1,2);
dist_end2=zeros(1,2);
dist_in3=zeros(1,2);
dist_end3=zeros(1,2);
dist_in4=zeros(1,2);
dist_end4=zeros(1,2);
dist_in5=zeros(1,2);
dist_end5=zeros(1,2);
dist_in6=zeros(1,2);
dist_end6=zeros(1,2);
dist_in7t=zeros(1,2);
dist_end7t=zeros(1,2);

for a=1:p1 %scorri il file caricato, calcola distanza e i valori sono x
e y di inizio e fine tratto
    dist_in1(a,1)=sqrt((VET(a,3) + 493.156)^2+(VET(a,4)- 1152.751)^2);
    dist_in1(a,2)=VET(a,1);
    dist_end1(a,1)=sqrt((VET(a,3) + 72.904)^2+(VET(a,4)- 14.012)^2);
    dist_end1(a,2)=VET(a,1);
    dist_in2(a,1)=sqrt((VET(a,3) + 114.338)^2+(VET(a,4)+ 48.929)^2);
    dist_in2(a,2)=VET(a,1);
    dist_end2(a,1)=sqrt((VET(a,3) +2885.361)^2+(VET(a,4)+1911.187)^2);
    dist_end2(a,2)=VET(a,1);
    dist_in3(a,1)=sqrt((VET(a,3) +2987.358)^2+(VET(a,4)+1889.318)^2);
    dist_in3(a,2)=VET(a,1);
    dist_end3(a,1)=sqrt((VET(a,3) +3616.043)^2+(VET(a,4)+1322.782)^2);
    dist_end3(a,2)=VET(a,1);
    dist_in4(a,1)=sqrt((VET(a,3) +3733.041)^2+(VET(a,4)+1216.729)^2);
    dist_in4(a,2)=VET(a,1);
    dist_end4(a,1)=sqrt((VET(a,3) +4648.770)^2+(VET(a,4)+22.912)^2);
    dist_end4(a,2)=VET(a,1);
    dist_in5(a,1)=sqrt((VET(a,3) +4701.736)^2+(VET(a,4)- 44.433)^2);
    dist_in5(a,2)=VET(a,1);
```

```

        dist_end5(a,1)=sqrt((VET(a,3) +4000.950)^2+(VET(a,4)- 1686.474)^2);
        dist_end5(a,2)=VET(a,1);
        dist_in6(a,1)=sqrt((VET(a,3) +3723.319)^2+(VET(a,4)-1756.991)^2);
        dist_in6(a,2)=VET(a,1);
        dist_end6(a,1)=sqrt((VET(a,3)          +          1373.883)^2+(VET(a,4)-
1803.791)^2);
        dist_end6(a,2)=VET(a,1);
        dist_in7t(a,1)=sqrt((VET(a,3) +1120.768)^2+(VET(a,4)-1527.226)^2);
        dist_in7t(a,2)=VET(a,1);
        dist_end7t(a,1)=sqrt((VET(a,3)          +          490.983)^2+(VET(a,4)-
1894.669)^2);
        dist_end7t(a,2)=VET(a,1);
    end

a=1;

for a=1:p3 %scorri il file caricato
    dist_in0(a,1)=sqrt((VET(a,3) + 540.517)^2+(VET(a,4)- 1931.523)^2);
    %calcola per ogni punto la distanza dalle coordinate note che delimitano
    i diversi tratti
    dist_in0(a,2)=VET(a,1); %salva il tempo corrispondente
    dist_end0(a,1)=sqrt((VET(a,3) + 784.942)^2+(VET(a,4)- 1232.511)^2);
    dist_end0(a,2)=VET(a,1);
end

p5=p1-p4;
dist_in7=zeros(1,2);
dist_end7=zeros(1,2);

for a=1:p5
    dist_in7(a,1)=dist_in7t(p4,1);
    dist_in7(a,2)=dist_in7t(p4,2);
    dist_end7(a,1)=dist_end7t(p4,1);
    dist_end7(a,2)=dist_end7t(p4,2);
    p4=p4+1;
end

dist_in0_ord=sortrows(dist_in0,1); %ordina in modo crescente il vettore
in funzione della distanza
dist_end0_ord=sortrows(dist_end0,1);
dist_in1_ord=sortrows(dist_in1,1);
dist_end1_ord=sortrows(dist_end1,1);
dist_in2_ord=sortrows(dist_in2,1);
dist_end2_ord=sortrows(dist_end2,1);
dist_in3_ord=sortrows(dist_in3,1);
dist_end3_ord=sortrows(dist_end3,1);
dist_in4_ord=sortrows(dist_in4,1);
dist_end4_ord=sortrows(dist_end4,1);
dist_in5_ord=sortrows(dist_in5,1);
dist_end5_ord=sortrows(dist_end5,1);
dist_in6_ord=sortrows(dist_in6,1);
dist_end6_ord=sortrows(dist_end6,1);
dist_in7_ord=sortrows(dist_in7,1);
dist_end7_ord=sortrows(dist_end7,1);

tempo_in0=dist_in0_ord(1,2); %salva il tempo di inizio-fine tratto
corrispondente alla distanza minore (prima riga)
tempo_end0=dist_end0_ord(1,2);
tempo_in1=dist_in1_ord(1,2);
tempo_end1=dist_end1_ord(1,2);

```

```

tempo_in2=dist_in2_ord(1,2);
tempo_end2=dist_end2_ord(1,2);
tempo_in3=dist_in3_ord(1,2);
tempo_end3=dist_end3_ord(1,2);
tempo_in4=dist_in4_ord(1,2);
tempo_end4=dist_end4_ord(1,2);
tempo_in5=dist_in5_ord(1,2);
tempo_end5=dist_end5_ord(1,2);
tempo_in6=dist_in6_ord(1,2);
tempo_end6=dist_end6_ord(1,2);
tempo_in7=dist_in7_ord(1,2);
tempo_end7=dist_end7_ord(1,2);

Tratto0=zeros(1,7); %crea una matrice per ogni tratto
Tratto1=zeros(1,7);
Tratto2=zeros(1,7);
Tratto3=zeros(1,7);
Tratto4=zeros(1,7);
Tratto5=zeros(1,7);
Tratto6=zeros(1,7);
Tratto7=zeros(1,7);
i=1; %inizializzazione dei diversi contatori
j=1;
k=1;
l=1;
m=1;
n=1;
o=1;
q=1;

for a=1:p1 %inizia a scorrere il file caricato
    if VET(a,1)>=tempo_in0 && VET(a,1)<=tempo_end0 %se il tempo È
        compreso fra il tempo minimo e max che delimita il tratto,
            Tratto0(o,1)=VET(a,1); %allora salva la riga
            Tratto0(o,2)=VET(a,2);
            Tratto0(o,3)=VET(a,3);
            Tratto0(o,4)=VET(a,4);
            Tratto0(o,5)=VET(a,5);
            Tratto0(o,6)=VET(a,6);
            Tratto0(o,7)=VET(a,7);
            o=o+1;
        elseif VET(a,1)>=tempo_in1 && VET(a,1)<=tempo_end1
            Tratto1(i,1)=VET(a,1);
            Tratto1(i,2)=VET(a,2);
            Tratto1(i,3)=VET(a,3);
            Tratto1(i,4)=VET(a,4);
            Tratto1(i,5)=VET(a,5);
            Tratto1(i,6)=VET(a,6);
            Tratto1(i,7)=VET(a,7);
            i=i+1;
        elseif VET(a,1)>=tempo_in2 && VET(a,1)<=tempo_end2
            Tratto2(j,1)=VET(a,1);
            Tratto2(j,2)=VET(a,2);
            Tratto2(j,3)=VET(a,3);
            Tratto2(j,4)=VET(a,4);
            Tratto2(j,5)=VET(a,5);
            Tratto2(j,6)=VET(a,6);
            Tratto2(j,7)=VET(a,7);
            j=j+1;
        elseif VET(a,1)>=tempo_in3 && VET(a,1)<=tempo_end3
            Tratto3(k,1)=VET(a,1);

```

```

        Tratto3(k,2)=VET(a,2);
        Tratto3(k,3)=VET(a,3);
        Tratto3(k,4)=VET(a,4);
        Tratto3(k,5)=VET(a,5);
        Tratto3(k,6)=VET(a,6);
        Tratto3(k,7)=VET(a,7);
        k=k+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in4 && VET(a,1)<=tempo_end4
        Tratto4(l,1)=VET(a,1);
        Tratto4(l,2)=VET(a,2);
        Tratto4(l,3)=VET(a,3);
        Tratto4(l,4)=VET(a,4);
        Tratto4(l,5)=VET(a,5);
        Tratto4(l,6)=VET(a,6);
        Tratto4(l,7)=VET(a,7);
        l=l+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in5 && VET(a,1)<=tempo_end5
        Tratto5(m,1)=VET(a,1);
        Tratto5(m,2)=VET(a,2);
        Tratto5(m,3)=VET(a,3);
        Tratto5(m,4)=VET(a,4);
        Tratto5(m,5)=VET(a,5);
        Tratto5(m,6)=VET(a,6);
        Tratto5(m,7)=VET(a,7);
        m=m+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in6 && VET(a,1)<=tempo_end6
        Tratto6(n,1)=VET(a,1);
        Tratto6(n,2)=VET(a,2);
        Tratto6(n,3)=VET(a,3);
        Tratto6(n,4)=VET(a,4);
        Tratto6(n,5)=VET(a,5);
        Tratto6(n,6)=VET(a,6);
        Tratto6(n,7)=VET(a,7);
        n=n+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in7 && VET(a,1)<=tempo_end7
        Tratto7(q,1)=VET(a,1);
        Tratto7(q,2)=VET(a,2);
        Tratto7(q,3)=VET(a,3);
        Tratto7(q,4)=VET(a,4);
        Tratto7(q,5)=VET(a,5);
        Tratto7(q,6)=VET(a,6);
        Tratto7(q,7)=VET(a,7);
        q=q+1;
    end
end

save('IV_TD_01_VR_Tratto0.txt','Tratto0','-ASCII','-double'); %esporta i
file creati
save('IV_TD_01_VR_Tratto1.txt','Tratto1','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto2.txt','Tratto2','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto3.txt','Tratto3','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto4.txt','Tratto4','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto5.txt','Tratto5','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto6.txt','Tratto6','-ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto7.txt','Tratto7','-ASCII','-double');

%parte aggiunta dopo per i file _nodistanza

Tratto0_nodistanza=zeros(1,6); %crea una matrice per ogni tratto
Tratto1_nodistanza=zeros(1,6);

```

```

Tratto2_nodistanza=zeros(1,6);
Tratto3_nodistanza=zeros(1,6);
Tratto4_nodistanza=zeros(1,6);
Tratto5_nodistanza=zeros(1,6);
Tratto6_nodistanza=zeros(1,6);
Tratto7_nodistanza=zeros(1,6);
i=1; %inizializzazione dei diversi contatori
j=1;
k=1;
l=1;
m=1;
n=1;
o=1;
q=1;

for a=1:pl %inizia a scorrere il file caricato
    if VET(a,1)>=tempo_in0 && VET(a,1)<=tempo_end0 %se il tempo È
compreso fra il tempo minimo e max che delimita il tratto,
        Tratto0_nodistanza(o,1)=VET(a,1); %allora salva la riga
        Tratto0_nodistanza(o,2)=VET(a,2);
        Tratto0_nodistanza(o,3)=VET(a,3);
        Tratto0_nodistanza(o,4)=VET(a,4);
        Tratto0_nodistanza(o,5)=VET(a,5);
        Tratto0_nodistanza(o,6)=VET(a,6);
        o=o+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in1 && VET(a,1)<=tempo_end1
        Tratto1_nodistanza(i,1)=VET(a,1);
        Tratto1_nodistanza(i,2)=VET(a,2);
        Tratto1_nodistanza(i,3)=VET(a,3);
        Tratto1_nodistanza(i,4)=VET(a,4);
        Tratto1_nodistanza(i,5)=VET(a,5);
        Tratto1_nodistanza(i,6)=VET(a,6);
        i=i+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in2 && VET(a,1)<=tempo_end2
        Tratto2_nodistanza(j,1)=VET(a,1);
        Tratto2_nodistanza(j,2)=VET(a,2);
        Tratto2_nodistanza(j,3)=VET(a,3);
        Tratto2_nodistanza(j,4)=VET(a,4);
        Tratto2_nodistanza(j,5)=VET(a,5);
        Tratto2_nodistanza(j,6)=VET(a,6);
        j=j+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in3 && VET(a,1)<=tempo_end3
        Tratto3_nodistanza(k,1)=VET(a,1);
        Tratto3_nodistanza(k,2)=VET(a,2);
        Tratto3_nodistanza(k,3)=VET(a,3);
        Tratto3_nodistanza(k,4)=VET(a,4);
        Tratto3_nodistanza(k,5)=VET(a,5);
        Tratto3_nodistanza(k,6)=VET(a,6);
        k=k+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in4 && VET(a,1)<=tempo_end4
        Tratto4_nodistanza(l,1)=VET(a,1);
        Tratto4_nodistanza(l,2)=VET(a,2);
        Tratto4_nodistanza(l,3)=VET(a,3);
        Tratto4_nodistanza(l,4)=VET(a,4);
        Tratto4_nodistanza(l,5)=VET(a,5);
        Tratto4_nodistanza(l,6)=VET(a,6);
        l=l+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in5 && VET(a,1)<=tempo_end5
        Tratto5_nodistanza(m,1)=VET(a,1);
        Tratto5_nodistanza(m,2)=VET(a,2);
        Tratto5_nodistanza(m,3)=VET(a,3);

```

```

        Tratto5_nodistanza(m,4)=VET(a,4);
        Tratto5_nodistanza(m,5)=VET(a,5);
        Tratto5_nodistanza(m,6)=VET(a,6);
        m=m+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in6 && VET(a,1)<=tempo_end6
        Tratto6_nodistanza(n,1)=VET(a,1);
        Tratto6_nodistanza(n,2)=VET(a,2);
        Tratto6_nodistanza(n,3)=VET(a,3);
        Tratto6_nodistanza(n,4)=VET(a,4);
        Tratto6_nodistanza(n,5)=VET(a,5);
        Tratto6_nodistanza(n,6)=VET(a,6);
        n=n+1;
    elseif VET(a,1)>=tempo_in7 && VET(a,1)<=tempo_end7
        Tratto7_nodistanza(q,1)=VET(a,1);
        Tratto7_nodistanza(q,2)=VET(a,2);
        Tratto7_nodistanza(q,3)=VET(a,3);
        Tratto7_nodistanza(q,4)=VET(a,4);
        Tratto7_nodistanza(q,5)=VET(a,5);
        Tratto7_nodistanza(q,6)=VET(a,6);
        q=q+1;
    end
end

save('IV_TD_01_VR_Tratto0_nodistanza.txt','Tratto0_nodistanza','-
ASCII','-double'); %esporta i file creati
save('IV_TD_01_VR_Tratto1_nodistanza.txt','Tratto1_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto2_nodistanza.txt','Tratto2_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto3_nodistanza.txt','Tratto3_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto4_nodistanza.txt','Tratto4_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto5_nodistanza.txt','Tratto5_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto6_nodistanza.txt','Tratto6_nodistanza','-
ASCII','-double');
save('IV_TD_01_VR_Tratto7_nodistanza.txt','Tratto7_nodistanza','-
ASCII','-double');

%vettore di coordinate ridotte
coordinate_ridotte=zeros(1,2);

[h1,h2]=size(Tratto2_nodistanza);%definisce valore variabili p1 e p2

for a=1:h1
    coordinate_ridotte(a,1)=Tratto2_nodistanza(a,5)-387800;
    coordinate_ridotte(a,2)=Tratto2_nodistanza(a,6)-4979760;
end

save('I_TD_01_VR_coord_ridotte.txt','coordinate_ridotte','-ASCII','-
double'); %esporta i file creati

```


ALLEGATO 7

Script Matlab® utilizzato per il processo di “assegnazione”

```
clc;
clear all;
close all;

load IV_TD_33_VR_Trttl_nodistanza.txt;
load V_POS1_ENp.txt;
TRA=IV_TD_33_VR_Trttl_nodistanza(:, :);
POS=V_POS1_ENp(:, :);
[t1,t2]=size(TRA);
[p1,p2]=size(POS);

for a=1:p1 %si inizia a scorrere il vettore POS
    t=1;
    pts_in_square=zeros(1,6); %variabile che contiene i punti che
    rientrano nella finestra d'indagine
    for b=1:t1 %si inizia a scorrere il vettore TRA
        deltaE=(POS(a,1)-TRA(b,5)); %valuto la differenza in deltaE tra
        i due punti
        deltaN=(POS(a,2)-TRA(b,6)); %valuto la differenza in deltaN tra
        i due punti
        if abs(deltaE)<5 && abs(deltaN)<5
            pts_in_square(t,1)=TRA(b,5); %salvo la coordinata X del
            punto in traiettoria
            pts_in_square(t,2)=TRA(b,6); %salvo la coordinata Y del
            punto in traiettoria
            pts_in_square(t,3)=sqrt((TRA(b,5)-
            POS(a,1))^2+(TRA(b,6)-POS(a,2))^2); %calcolo la distanza tra il punto
            su TRA e il punto in POS
            pts_in_square(t,4)=TRA(b,2); %salvo la velocit# del
            punto in traiettoria
            t=t+1;
        end
    end
    [pts1,pts2]=size(pts_in_square); %estraggo le dimensioni della
    variabile pts_in_square
    if pts1==1 %se nessun punto È rientrato nella finestra di
    ricerca...
        PTS(a,1)=NaN; %salvo una riga di NaN (coordinata x)
        PTS(a,2)=NaN; %salvo una riga di NaN (coordinata y)
        PTS(a,3)=NaN; %salvo una riga di NaN (distanza)
        PTS(a,4)=NaN; %salvo una riga di NaN (velocit#)
    else %altrimenti...
        pts_ord=sortrows(pts_in_square,3); %ordino in ordine crescente
        tutta la matrice pts_in_square in funzione della distanza collocata
        nella colonna 3
        PTS(a,1)= pts_ord(1,1); %salvo le coordinate del punto pi~
        vicino nel vettore PTS
        PTS(a,2)= pts_ord(1,2);
        PTS(a,3)= pts_ord(1,4); %salvo la velocit# del punto pi~ vicino
        nel vettore PTS
    end
    clear pts_in_square
end

save('VII_TD_33_Trttl_ass_VR.txt','PTS','-ASCII','-double'); %esporta i
file creati
```

ALLEGATO 8

Script Matlab® utilizzato per il processo di “normalizzazione”

```
clc;
clear all;
close all;

load IV_TD_33_VR_Tratt0.txt;
load III_POS_0.txt;

TRA=IV_TD_33_VR_Tratt0(:,:);
POS=III_POS_0(:,:);

[t1,t2]=size(TRA);
[p1,p2]=size(POS);

dist_POS=POS(end,2)-POS(1,2); %calcolo distanza traiettoria di
referimento
PTS=zeros(1,3);
PTS(1,1)=TRA(1,1);
PTS(1,2)=0;
PTS(1,3)=TRA(1,2);

dist_TRA=TRA(end,7)-TRA(1,7);
k=dist_POS/dist_TRA; %coefficiente di normalizzazione

for a=2:t1
    PTS(a,1)=TRA(a,1);
    PTS(a,2)=k*(TRA(a,7)-TRA(1,7)); %calcolo distanza normalizzata
    PTS(a,3)=TRA(a,2);
end

save('VI_TD_33_norm_Tratt0_VR.txt','PTS','-ASCII','-double'); %esporta i
file creati
```

ALLEGATO 9

Script Matlab[®] utilizzato per assegnare il valore di progressiva ai punti delle diverse traiettorie

```
function [PTS] = closest_point(TRA,ASSE,w)
%Questa funzione calcola, per ogni punto del vettore "TRA" (traiettoria),
% il punto pi~ vicino nel vettore "ASSE" (asse).
% SINTASSI
% [PTS] = closest_point(TRA,ASSE,w)
%
% INPUT:
% TRA = matrice (N x 2) con N righe ( a seconda del numero di punti ) e
% 2 colonne (x,y)
% ASSE = matrice (M x 3) con M righe ( a seconda del numero di punti )
% e 3
% colonne (x,y,p) dove p È la progressiva
% w = ampiezza della finestra di ricerca (intesa come massimo deltaE
% oppure deltaN dal punto considerato in TRA)
%
% OUTPUT:
% PTS = matrice (N x 2) con N righe ( a seconda del numero di punti di
% TRA ) e 3 colonne (x,y,d)
%
% NOTE:
% 1) Per ogni punto del vettore TRA la ricerca viene effettuata
% all'interno di un quadrato di ricerca di dimensioni definite
% dall'utente
% nella variabile "w"
% 2) La dimensione del vettore risultato sar# identica a quella del
% vettore TRA
% 3) Se per l'elemento p-esimo del vettore TRA non viene individuato
% nessun punto della traiettoria nella finestra, verr# generata una riga
% di NaN nella posizione p (quella corrispondente)

close all
clc

TRA = load('I_TD_33_VR_coord_ridotte.txt');
ASSE = load('II_ASSE_sim_VR.txt');
w=10;

[p1,p2]=size(TRA); %estraggo le dimensioni della variabile TRA
[t1,t2]=size(ASSE); %estraggo le dimensioni della variabile ASSE

for a=1:p1 %si inizia a scorrere il vettore TRA
    t=1;
    pts_in_square=zeros(1,6); %variabile che contiene i punti che
    rientrano nella finestra d'indagine
    for b=1:t1 %si inizia a scorrere il vettore ASSE
        deltaE=(TRA(a,1)-ASSE(b,1)); %valuto la differenza in deltaE tra
        i due punti
        deltaN=(TRA(a,2)-ASSE(b,2)); %valuto la differenza in deltaN tra
        i due punti
        if abs(deltaE)<w
            if abs(deltaN)<w
```

```

        pts_in_square(t,1)=ASSE(b,1);    %salvo la coordinata X
del punto in asse
        pts_in_square(t,2)=ASSE(b,2);    %salvo la coordinata Y
del punto in asse
        pts_in_square(t,3)=sqrt((ASSE(b,1)-
TRA(a,1))^2+(ASSE(b,2)-TRA(a,2))^2); %calcolo la distanza tra il punto
su ASSE e il punto in TRA
        pts_in_square(t,4)=ASSE(b,3);    %salvo la progressiva del
punto considerato
        pts_in_square(t,5)=TRA(a,1);    %salvo la coordinata X del
punto in traiettoria
        pts_in_square(t,6)=TRA(a,2);    %salvo la coordinata Y del
punto in traiettoria
        t=t+1;
    end
end
end
[pts1,pts2]=size(pts_in_square);    %estraggo le dimensioni della
variabile pts_in_square
if pts1==1    %se nessun punto È rientrato nella finestra di
ricerca...
    PTS(a,1)=NaN; %salvo una riga di NaN (coordinata x)
    PTS(a,2)=NaN; %salvo una riga di NaN (coordinata y)
else %altrimenti...
    pts_ord=sortrows(pts_in_square,3); %ordino in ordine crescente
tutta la matrice pts_in_square in funzione della distanza collocata
nella colonna 3
    PTS(a,1)= pts_ord(1,4);    %salvo la progressiva del punto
    PTS(a,2)= pts_ord(1,5);    %salvo la coordinata X del punto in
traiettoria
    PTS(a,3)= pts_ord(1,6);    %salvo la coordinata Y del punto in
traiettoria
end

clear pts_in_square

end

save('IV_PTS_sim_td_33_VR.txt', 'PTS', '-ascii');

```

ALLEGATO 10

Sensazioni

<i>Durante la guida si è sentito...</i>	Per nulla	Poco	Abbastanza	Molto
a suo agio	0%	12%	73%	15%
in grado di controllare la situazione e le proprie azioni	0%	6%	76%	18%
pieno di energia	0%	27%	58%	15%
nervoso	39%	55%	3%	3%
con la mente che vagava	58%	39%	3%	0%

Immersione

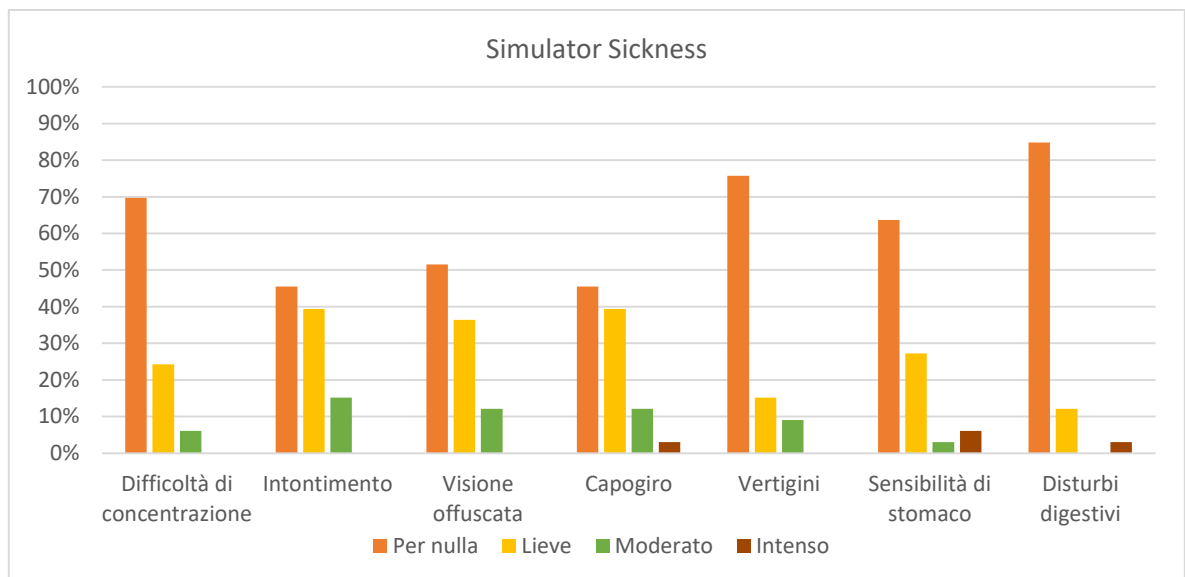
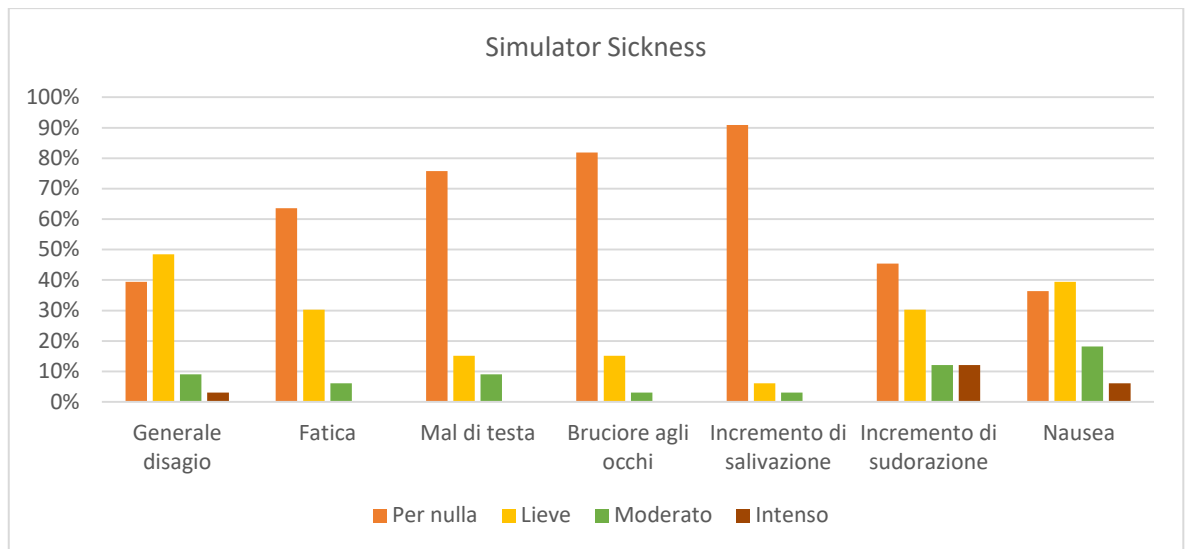
<i>Scenario</i>	Pessimo	Sufficiente	Buono	Ottimo
Qualità dell'immagine	9%	64%	27%	0%
Ambiente esterno alla strada	0%	24%	73%	3%
Margini stradali	0%	18%	42%	39%
Sede stradale	0%	6%	42%	52%
Segnaletica orizzontale	0%	12%	42%	45%
Segnaletica verticale	0%	27%	48%	24%
Presenza di altri veicoli	0%	6%	55%	39%
<i>Dispositivi</i>				
Riproduzione del campo visivo	3%	3%	58%	36%
Percezione degli specchietti	58%	18%	24%	0%
Veridicità degli effetti sonori	0%	21%	48%	30%
Veridicità della strumentazione di bordo	12%	30%	45%	12%
Risposta del volante	0%	18%	45%	36%
Risposta del cambio	3%	30%	36%	30%
Percezione dell'acceleratore	9%	24%	42%	24%
Percezione del freno	36%	52%	12%	0%

Conseguenze dell'esperienza (*simulator sickness*)

TD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Generale disagio	1	0	1	1	0	1	0	2	0	1
Fatica	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Mal di testa	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Bruciore agli occhi	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Incremento di salivazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Incremento di sudorazione	1	1	1	0	0	1	0	1	0	2
Nausea	0	1	1	3	0	1	0	2	0	2
Difficoltà di concentrazione	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0
Intontimento	0	0	0	1	0	1	0	2	0	1
Visione offuscata	0	0	1	1	0	1	0	2	0	0
Capogiro	0	0	1	1	0	1	0	2	0	1
Vertigini	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Sensibilità di stomaco	1	0	0	1	0	0	0	2	0	1
Disturbi digestivi	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

TD	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Generale disagio	0	2	0	0	1	1	0	0	1	0
Fatica	0	1	0	0	2	0	0	1	1	0
Mal di testa	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Bruciore agli occhi	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Incremento di salivazione	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Incremento di sudorazione	1	1	0	0	0	2	0	0	3	1
Nausea	0	2	0	0	1	2	1	1	1	2
Difficoltà di concentrazione	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
Intontimento	1	1	0	0	2	0	0	1	1	2
Visione offuscata	1	0	1	1	2	0	0	1	0	0
Capogiro	1	2	1	0	0	2	0	1	0	0
Vertigini	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1
Sensibilità di stomaco	0	0	1	0	1	1	1	0	0	3
Disturbi digestivi	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3

TD	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Generale disagio	1	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1	3	0
Fatica	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	2	0
Mal di testa	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0
Bruciore agli occhi	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Incremento di salivazione	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1	0
Incremento di sudorazione	0	0	0	1	3	0	3	2	0	2	1	3	0
Nausea	1	0	0	0	2	1	1	0	0	1	1	3	1
Difficoltà di concentrazione	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0
Intontimento	1	0	0	1	2	0	1	1	1	0	1	2	0
Visione offuscata	2	0	0	1	1	0	0	2	0	1	1	1	0
Capogiro	1	0	1	1	3	0	1	1	1	0	0	2	0
Vertigini	0	0	0	1	1	0	0	0	2	0	0	2	0
Sensibilità di stomaco	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
Disturbi digestivi	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0



ALLEGATO 11

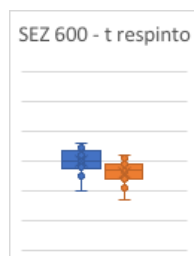
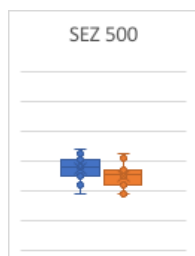
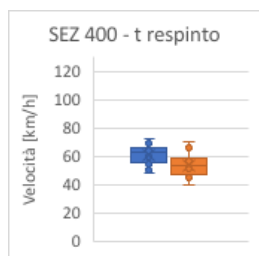
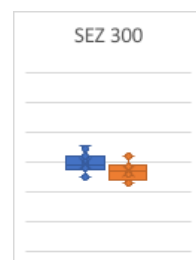
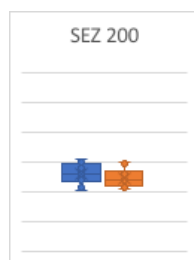
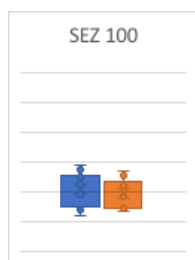
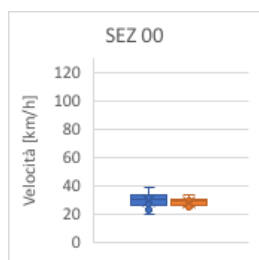
Tratto 0

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

	LS		HS		F - Test			t - Test		
Sez	μ	σ	μ	σ	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	29.84	21.77	28.75	7.65	2.85	2.43	R	0.83	2.05	A
100	41.73	113.94	38.98	80.66	1.41	2.43	A	0.79	2.04	A
200	52.20	44.68	48.73	33.49	1.33	2.43	A	1.58	2.04	A
300	58.88	41.97	54.37	41.93	1.00	2.43	A	1.99	2.04	A
400	61.23	49.02	53.65	65.57	1.34	2.33	A	2.88	2.04	R
500	54.87	58.80	49.85	61.99	1.05	2.33	A	1.85	2.04	A
600	59.94	69.60	52.36	68.13	1.02	2.43	A	2.61	2.04	R
700	61.20	82.23	52.66	90.96	1.11	2.33	A	2.63	2.04	R
800	62.66	75.38	57.90	46.63	1.62	2.43	A	1.72	2.04	A
900	64.48	120.14	60.09	67.50	1.78	2.43	A	1.28	2.04	A
1000	65.52	140.41	60.82	80.98	1.73	2.43	A	1.26	2.04	A
1100	67.42	154.96	61.69	70.37	2.20	2.43	A	1.52	2.04	A
1200	67.81	149.74	62.38	80.18	1.87	2.43	A	1.43	2.04	A
1300	60.96	137.08	54.87	91.29	1.50	2.43	A	1.61	2.04	A

■ LS = gruppo Low Sickness

■ HS = gruppo High Sickness





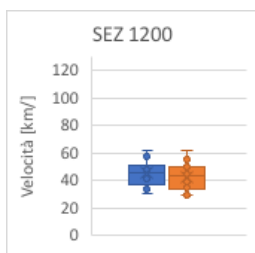
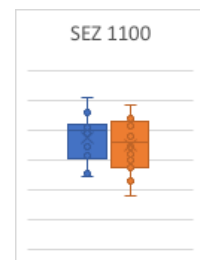
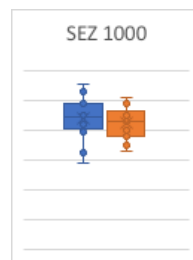
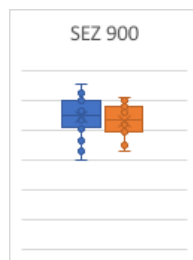
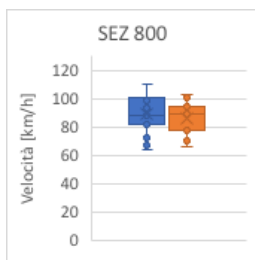
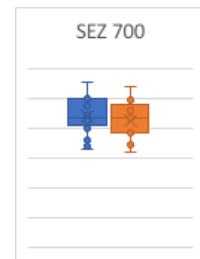
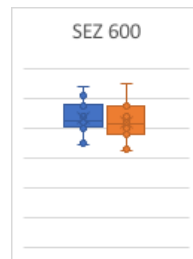
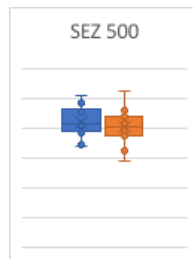
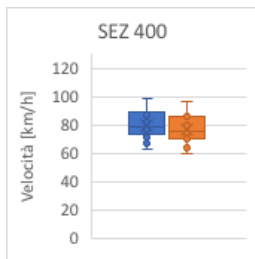
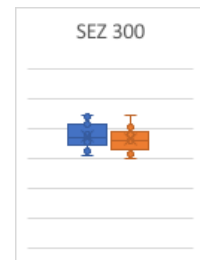
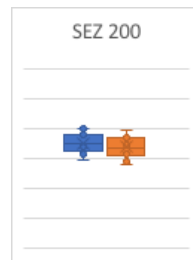
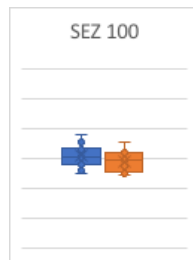
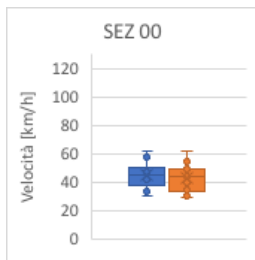
Tratto 1

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

	LS		HS		F - Test			t - Test		
Sez	μ	σ	μ	σ	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	45.23	111.34	41.24	38.61	2.88	2.43	R	1.35	2.05	A
100	61.47	55.79	58.31	47.10	1.18	2.43	A	1.26	2.04	A
200	70.06	39.56	67.55	48.96	1.24	2.33	A	1.08	2.04	A
300	75.46	63.20	73.45	63.77	1.01	2.33	A	0.72	2.04	A
400	80.08	89.83	77.03	95.29	1.06	2.33	A	0.91	2.04	A
500	84.47	100.95	80.70	137.15	1.36	2.33	A	1.00	2.04	A
600	87.12	117.96	83.57	154.10	1.31	2.33	A	0.88	2.04	A
700	88.47	152.47	85.24	160.69	1.05	2.33	A	0.74	2.04	A
800	88.86	166.46	86.07	139.36	1.19	2.43	A	0.64	2.04	A
900	89.02	183.24	86.36	133.60	1.37	2.43	A	0.60	2.04	A
1000	87.61	203.70	84.89	127.66	1.60	2.43	A	0.60	2.04	A
1100	74.58	223.65	70.17	299.59	1.34	2.33	A	0.79	2.04	A
1200	45.38	79.16	42.48	92.68	1.17	2.33	A	0.90	2.04	A

■ LS = gruppo *Low Sickness*

■ HS = gruppo *High Sickness*



Tratto 2

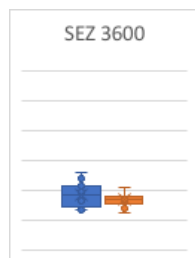
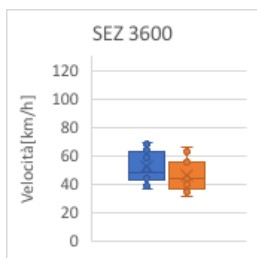
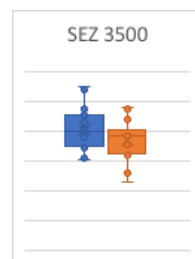
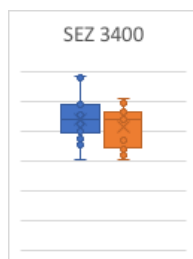
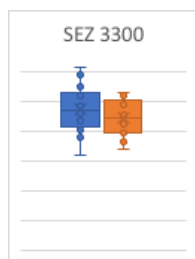
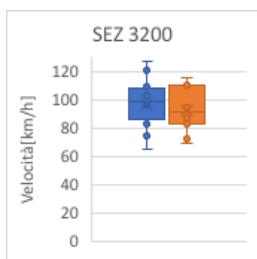
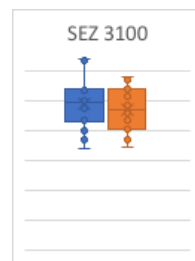
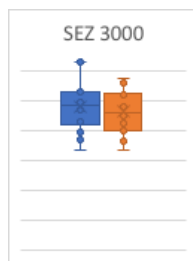
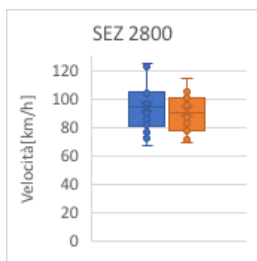
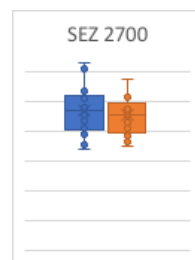
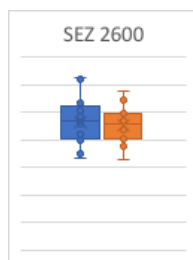
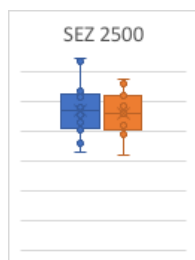
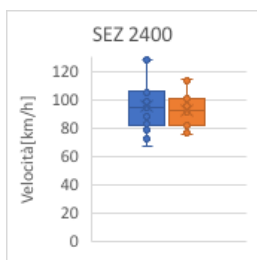
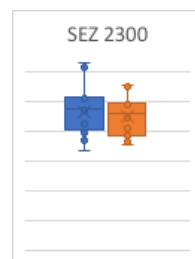
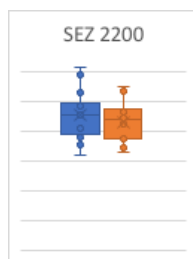
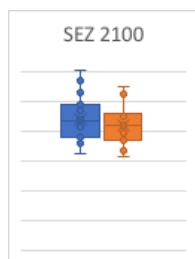
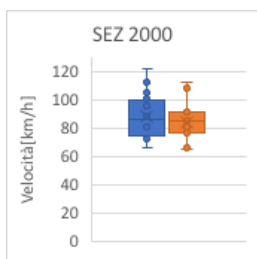
LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

	LS		HS		F - Test			t - Test		
Sez	μ	σ	μ	σ	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	31.76	26.35	31.32	24.21	1.09	2.43	A	0.25	2.04	A
100	52.75	37.51	51.45	43.10	1.15	2.33	A	0.59	2.04	A
200	66.24	53.48	63.21	75.46	1.41	2.33	A	1.09	2.04	A
300	66.24	53.48	63.21	75.46	1.41	2.33	A	1.09	2.04	A
400	80.07	128.65	75.78	116.13	1.11	2.43	A	1.11	2.04	A
500	85.16	128.50	80.04	118.14	1.09	2.43	A	1.31	2.04	A
600	88.29	145.11	83.27	151.79	1.05	2.33	A	1.18	2.04	A
700	88.29	145.11	83.27	151.79	1.05	2.33	A	1.18	2.04	A
800	88.22	179.77	83.45	149.03	1.21	2.43	A	1.06	2.04	A
900	87.84	176.45	83.87	131.15	1.35	2.43	A	0.91	2.04	A
1000	88.21	191.63	85.23	136.67	1.40	2.43	A	0.66	2.04	A
1100	88.92	194.75	85.55	152.67	1.28	2.43	A	0.73	2.04	A
1200	89.70	213.92	86.22	177.23	1.21	2.43	A	0.71	2.04	A
1300	90.84	217.46	87.75	208.90	1.04	2.43	A	0.61	2.04	A
1400	92.24	212.30	89.04	250.39	1.18	2.33	A	0.60	2.04	A
1500	93.14	222.01	89.44	237.98	1.07	2.33	A	0.70	2.04	A
1600	94.16	237.29	89.96	241.60	1.02	2.33	A	0.78	2.04	A
1700	94.10	239.77	89.19	260.84	1.09	2.33	A	0.89	2.04	A
1800	94.10	239.77	89.19	260.84	1.09	2.33	A	0.89	2.04	A
1900	91.15	216.12	86.86	205.25	1.05	2.43	A	0.84	2.04	A
2000	88.28	231.46	84.12	184.50	1.25	2.43	A	0.82	2.04	A
2100	88.45	232.44	84.15	174.08	1.34	2.43	A	0.86	2.04	A
2200	90.75	241.32	86.47	172.54	1.40	2.43	A	0.84	2.04	A
2300	93.48	250.69	89.83	170.00	1.47	2.43	A	0.71	2.04	A
2400	93.48	250.69	89.83	170.00	1.47	2.43	A	0.71	2.04	A
2500	94.11	292.51	92.08	190.36	1.54	2.43	A	0.37	2.04	A
2600	93.12	272.26	90.55	171.92	1.58	2.43	A	0.49	2.04	A
2700	93.65	262.14	90.64	164.02	1.60	2.43	A	0.58	2.04	A
2800	94.23	254.66	91.14	185.13	1.38	2.43	A	0.59	2.04	A
2900	94.90	258.96	91.39	202.00	1.28	2.43	A	0.66	2.04	A
3000	96.34	261.64	92.65	211.14	1.24	2.43	A	0.68	2.04	A
3100	97.68	267.17	93.81	215.43	1.24	2.43	A	0.71	2.04	A
3200	96.74	247.05	92.62	212.71	1.16	2.43	A	0.78	2.04	A
3300	94.78	227.41	88.65	158.81	1.43	2.43	A	1.25	2.04	A
3400	94.78	227.41	88.65	158.81	1.43	2.43	A	1.25	2.04	A
3500	81.34	213.81	73.68	205.22	1.04	2.43	A	1.51	2.04	A
3600	52.44	133.35	46.04	119.00	1.12	2.43	A	1.62	2.04	A

■ LS = gruppo *Low Sickness*

■ HS = gruppo *High Sickness*





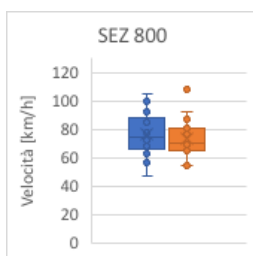
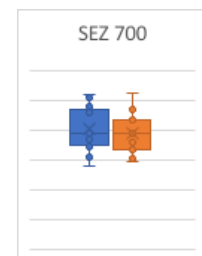
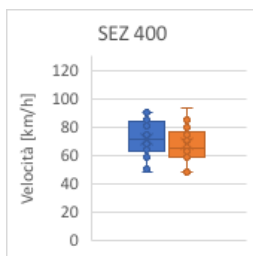
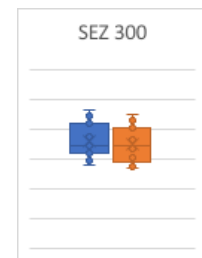
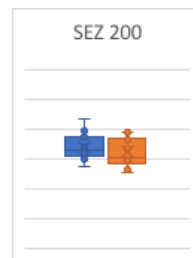
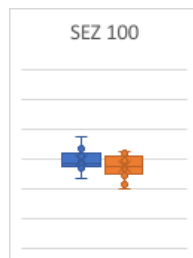
Tratto 3

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

	LS		HS		F - Test			t - Test		
SEZ	Media	Varianza	Media	Varianza	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	38.70	19.88	36.19	34.74	1.75	2.33	A	1.39	2.04	A
100	52.75	37.51	51.45	43.10	1.15	2.33	A	0.59	2.04	A
200	68.12	67.31	64.92	84.73	1.26	2.33	A	1.06	2.04	A
300	72.21	123.42	69.74	133.23	1.08	2.33	A	0.63	2.04	A
400	71.56	167.18	67.65	161.56	1.03	2.43	A	0.87	2.04	A
500	74.16	224.81	68.90	193.64	1.16	2.43	A	1.04	2.04	A
600	78.38	218.31	75.32	144.07	1.52	2.43	A	0.64	2.04	A
700	80.65	195.97	77.73	156.41	1.25	2.43	A	0.63	2.04	A
800	88.22	179.77	83.45	149.03	1.21	2.43	A	1.06	2.04	A

■ LS = gruppo *Low Sickness*

■ HS = gruppo *High Sickness*



Tratto 4

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

	LS		HS		F - Test			t - Test		
Sez	Media	Varianza	Media	Varianza	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	61.03	115.25	56.74	149.76	1.30	2.33	A	1.07	2.04	A
100	69.45	111.82	66.62	117.25	1.05	2.33	A	0.76	2.04	A
200	72.58	140.49	69.30	106.80	1.32	2.43	A	0.84	2.04	A
300	76.67	149.26	73.34	111.91	1.33	2.43	A	0.83	2.04	A
400	78.69	185.49	74.62	126.29	1.47	2.43	A	0.92	2.04	A
500	81.31	190.12	77.44	134.20	1.42	2.43	A	0.86	2.04	A
600	83.21	194.45	79.53	123.82	1.57	2.43	A	0.82	2.04	A
700	84.55	224.99	80.90	129.77	1.73	2.43	A	0.77	2.04	A
800	86.58	211.41	81.77	125.70	1.68	2.43	A	1.05	2.04	A
900	86.33	237.09	82.30	138.82	1.71	2.43	A	0.83	2.04	A
1000	87.23	229.59	83.01	161.22	1.42	2.43	A	0.86	2.04	A
1100	86.65	220.83	81.90	161.95	1.36	2.43	A	0.97	2.04	A
1200	86.62	184.85	82.09	149.71	1.23	2.43	A	1.00	2.04	A
1300	84.23	169.43	79.96	141.45	1.20	2.43	A	0.98	2.04	A
1400	80.07	147.06	74.28	129.64	1.13	2.43	A	1.40	2.04	A
1500	68.15	142.47	63.79	105.62	1.35	2.43	A	1.11	2.04	A

■ LS = gruppo Low Sickness

■ HS = gruppo High Sickness





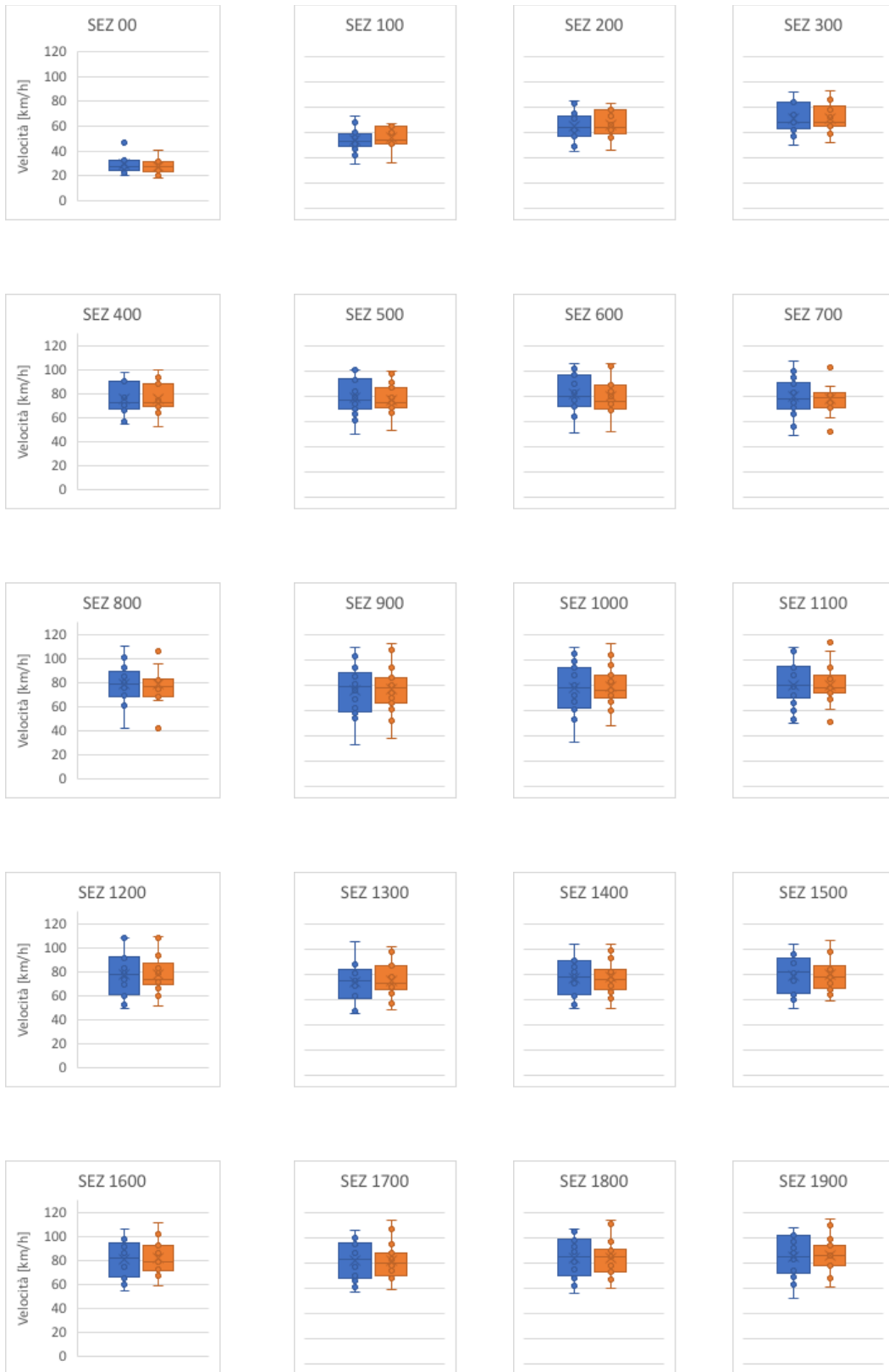
Tratto 6

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev. standard velocità [km/h]

SEZ	LS		HS		F - Test			t - Test		
	Media	Varianza	Media	Varianza	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	29.30	53.25	27.93	40.50	1.31	2.43	A	0.57	2.04	A
100	53.79	80.05	55.49	66.10	1.21	2.43	A	-0.57	2.04	A
200	64.85	121.98	66.24	105.52	1.16	2.43	A	-0.37	2.04	A
300	71.11	139.79	71.13	123.08	1.14	2.43	A	0.00	2.04	A
400	75.71	165.46	75.24	152.87	1.08	2.43	A	0.11	2.04	A
500	78.86	210.18	77.35	152.43	1.38	2.43	A	0.32	2.04	A
600	81.79	218.83	79.63	196.12	1.12	2.43	A	0.43	2.04	A
700	79.50	230.39	78.38	180.29	1.28	2.43	A	0.22	2.04	A
800	78.80	275.00	78.28	267.10	1.03	2.43	A	0.09	2.04	A
900	76.28	411.90	76.58	379.06	1.09	2.43	A	-0.04	2.04	A
1000	77.88	373.73	79.07	270.04	1.38	2.43	A	-0.19	2.04	A
1100	80.31	294.99	80.38	258.53	1.14	2.43	A	-0.01	2.04	A
1200	77.68	315.76	78.06	255.97	1.23	2.43	A	-0.06	2.04	A
1300	73.62	235.97	75.39	193.93	1.22	2.43	A	-0.34	2.04	A
1400	76.98	207.62	77.54	190.91	1.09	2.43	A	-0.11	2.04	A
1500	78.96	225.60	79.96	183.19	1.23	2.43	A	-0.20	2.04	A
1600	80.28	245.34	81.45	194.97	1.26	2.43	A	-0.22	2.04	A
1700	82.23	252.07	82.12	217.35	1.16	2.43	A	0.02	2.04	A
1800	83.87	278.07	84.26	229.13	1.21	2.43	A	-0.07	2.04	A
1900	85.07	285.03	86.07	213.56	1.33	2.43	A	-0.18	2.04	A
2000	86.72	286.20	87.64	250.81	1.14	2.43	A	-0.16	2.04	A
2100	88.66	259.08	89.90	249.16	1.04	2.43	A	-0.22	2.04	A
2200	89.70	248.78	90.25	199.80	1.25	2.43	A	-0.10	2.04	A
2300	87.69	258.12	87.05	174.78	1.48	2.43	A	0.12	2.04	A

■ LS = gruppo *Low Sickness*

■ HS = gruppo *High Sickness*





Tratto 7

LS - gruppo Low Sickness - HS = Gruppo High Sickness - μ = velocità media [km/h] - σ = dev.standard velocità [km/h]

SEZ	LS		HS		F - Test			t - Test		
	Media	Varianza	Media	Varianza	F	F _{critico una coda}	H ₀	Stat t	t _{critico due code}	H ₀
0	37.74	36.78	38.13	42.25	1.15	2.33	A	-0.18	2.04	A
100	57.80	46.45	57.72	64.37	1.39	2.33	A	0.03	2.04	A
200	64.13	112.62	64.55	123.92	1.10	2.33	A	-0.11	2.04	A
300	68.08	157.19	70.08	134.87	1.17	2.43	A	-0.47	2.04	A
400	71.26	203.15	73.32	154.42	1.32	2.43	A	-0.44	2.04	A
500	72.08	213.00	75.05	143.55	1.48	2.43	A	-0.63	2.04	A
600	70.78	203.07	71.00	188.77	1.08	2.43	A	-0.05	2.04	A
700	70.75	169.58	70.84	139.72	1.21	2.43	A	-0.02	2.04	A
800	69.89	186.28	70.58	123.18	1.51	2.43	A	-0.16	2.04	A
900	51.49	89.96	49.89	96.40	1.07	2.33	A	0.48	2.04	A
1000	61.15	45.50	61.24	74.90	1.65	2.33	A	-0.04	2.04	A
1100	63.86	78.52	63.69	90.24	1.15	2.33	A	0.05	2.04	A
1200	55.20	83.54	53.16	90.04	1.08	2.33	A	0.63	2.04	A
1300	52.19	54.92	51.70	86.16	1.57	2.33	A	0.17	2.04	A

■ LS = gruppo *Low Sickness*

■ HS = gruppo *High Sickness*

