POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi numerico sperimentale del comfort di un quadriciclo elettrico



Relatori

Prof. Alessandro Vigliani Dott. Antonio Tota Dott. Angelo Vella Candidato

Luca Ferrero

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Indice	3
Sommario	5
Introduzione	6
1. Test su strada: analisi per il sistema HMI di bordo	7
1.1 Impostazione delle misure	8
1.2 Dati raccolti	8
1.3 Test su strada	9
1.4 Post processamento	.10
1.5 Conversione dei dati GPS in coordinate cartesiane	.10
1.6 Dati processati	.11
1.7 Test sul percorso 1	.12
1.7.1 Test 1	.12
1.7.2 Test 2	.12
1.8 Test sul percorso 2	.13
1.8.1 Test 1	.13
1.8.2 Test 2	.14
1.8.3 Test 3	.15
1.9 Risultati	.15
2 Misurazioni con sensore Kistler	.17
2.1 Impostazione delle misure	.17
2.2 Montaggio del sensore	.17
2.3 Configurazione e calibrazione del sensore	.19
2.3.1 Test centre	.19
2.3.2 Calibrazione del sensore	.26
2.3.3 Calibrazione angolo di assetto	.27
2.3.4 Calibrazione di rollio e beccheggio	.28
2.3.5 Configurazione del sensore	.29
2.4 Test su strada	.30
2.4.1 Calcolo nel POI: applicazioni generali	.30
2.4.2 Calcolo nel POI: applicazione nei test	.31
2.5 Post processamento	.35
2.5.1 Risultati dei test	.38
2.5.2 Test di accelerazioni e frenate (longitudinale).	.38
3 Analisi comfort numerico sperimentale	.48
3.1 Procedura dei test sperimentali	.48
3.2 Superficie asfaltata	.50
3.2.1 Test 10 km/h	.50
3.2.2 Test 20 Km/h	.51
3.2.3 Test 30 km/h	.51
3.2.4 Test 40 km/h	.51
3.2.5 Risultati dei test su asfalto	.52
3.3 Superficie ciottolata	.53
3.3.1 Test 10 km/h	.53
3.3.2 Test 20 km/h	.53
3.3.3 Test 30 km/h	.54
3.3.4 Test 40 km/h	.54
3.3.5 Risultati dei test sul ciottolato	.55

3.4 Parametrizzazione del Testrun	.56
3.4.1 Parametrizzazione: modello del veicolo	.56
3.4.2 Corpo vettura	.57
3.4.3 Sospensioni	.59
3.4.4 Panoramica sul powertrain	.61
3.4.5 Sensori	.62
3.4.6 Pneumatici	.63
3.5 Parametrizzazione: definizione dello scenario e della strada	.64
3.6 Parametrizzazione: manovra	.67
3.7 Parametrizzazione: driver	.68
3.8 Modello delle sospensioni	.69
3.8.1 Modello di veicolo	.70
3.8.2 Oscillazioni libere per lo studio della rigidezza delle molle	.70
3.8.3 Procedura dimensionamento rigidezze	.73
3.8.4 Oscillazioni forzate per lo studio dello smorzamento	.75
3.9 Simulazioni e post processamento	.79
3.9.1 Post processamento	.80
3.9.2 Grafici	.80
3.10 Superficie ciottolata	.82
3.10.1 Test 10 km/h	.83
3.10.2 Test 20 km/h	.84
3.10.3 Test 30 km/h	.85
3.10.4 Test 40 km/h	.86
3.10.5 Conclusioni test su ciottolato	.87
3.11 Superficie asfaltata	.88
3.11.1 Test 10 km/h	.88
3.11.2 Test 20 km/h	.89
3.11.3 Test 30 km/h	.90
3.11.4 Test 40 km/h	.90
3.11.5 Conclusioni test su asfalto	.92
3.12 Conclusioni e possibili sviluppi	.93
Referenze	.95

Sommario

La seguente attività di tesi si basa su un'analisi sperimentale e numerica di comfort su di un veicolo a trazione elettrica. Il veicolo in questione fa parte di un grande progetto europeo sulla mobilità elettrica all'interno delle città, con l'obiettivo di migliorare l'accettazione e l'approccio da parte degli utenti a questo metodo di trasporto alternativo. Il veicolo analizzato, omologato come quadriciclo leggero, è stato affidato al Dipartimento di Ricerca del Politecnico di Torino, per eseguire prove sperimentali che consentano di migliorare gli aspetti relativi alla dinamica di guida e al comfort di marcia, a vantaggio dell'accessibilità e della soddisfazione degli utenti nell'approcciarsi a questo tipo di mobilità. Il lavoro di tesi si sviluppa essenzialmente in tre parti. Nella prima parte, il lavoro è stato svolto in collaborazione con l'Università del Surrey nello sviluppo di una nuova funzione, da integrare nel sistema di bordo del veicolo, che suggerisca al conducente il percorso migliore da seguire, non solo per risparmiare tempo, ma soprattutto in ottica di efficientamento energetico, al fine di aumentare l'esperienza di guida e i benefici derivanti dall'adozione di guesta scelta di mobilità. Pertanto, sono stati condotti numerosi test su strada per raccogliere dati utili da implementare nel sistema. Nella seconda parte, è stato svolto un lavoro legato all'aspetto dinamico del veicolo. A tale scopo, è stato adottato un sensore di tipo ottico per eseguire prove su strada, al fine di valutare ed estrapolare dati utili riguardanti la dinamica del veicolo. I test sono stati eseguiti su strada, principalmente nei pressi del Politecnico di Torino. Nella terza parte, l'attività è proseguita e si è conclusa con la simulazione numerica. In questa fase è stata eseguita un'analisi relativa al comfort, comparando i dati sperimentali, raccolti durante un'attività esterna alla tesi, ma effettuata dal Politecnico di Torino, con dati numerici relativi a simulazioni ottenute attraverso un software commerciale, utilizzato per eseguire simulazioni di test dinamici. Il veicolo è stato quindi modellato, cercando di intervenire su alcuni parametri fondamentali che influenzano le caratteristiche di comfort, come le sospensioni e gli pneumatici, ricreando l'ambiente su cui erano state eseguite le prove su strada. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati confrontati con i valori sperimentali al fine di avere una serie di parametri dinamici caratteristici del veicolo in questione, utili per i successivi sviluppi del veicolo stesso.

Introduzione

STEVE è un progetto europeo che coinvolge numerosi partner, tra cui società industriali, istituzioni accademiche e pubbliche amministrazioni, in sette regioni del continente. L'obiettivo del progetto è migliorare l'integrazione dei veicoli elettrici nel sistema di trasporto urbano. A tale scopo, una flotta di veicoli è stata consegnata in quattro diverse città d'Europa, tra cui Torino e Venaria, per studiare i vantaggi e gli aspetti critici di un servizio di car sharing, a cui questo tipo di veicoli si rivolge, messo a disposizione dei professori, ricercatori, membri dell'amministrazione ed impiegati dei partner coinvolti nel progetto [1]. La flotta affidata alla città di Torino comprende sei quadricicli leggeri realizzati dal partner JAC, omologati secondo la legge italiana, che possono essere utilizzati in tutta l'area urbana ad eccezione di autostrade e tangenziali. Cinque di questi veicoli sono stati affidati al Politecnico di Torino, al fine di poter svolgere attività sperimentali e di ricerca. I test hanno lo scopo di raccogliere dati utili per migliorare l'approccio degli utenti a questo servizio di mobilità. L'attività del Politecnico comprende un'analisi del veicolo sia dal lato hardware, quindi relativo alla meccanica e alla dinamica del veicolo, sia dal lato software. Infatti, il Politecnico ha lavorato in collaborazione con VEM nello sviluppo del sistema HMI (Human Machine Interface) di bordo. Questo sistema rappresenta l'interfaccia uomo-macchina, che consente di migliorare l'esperienza con il veicolo, facilitando l'utente nella scelta del percorso migliore anche in termini di efficienza energetica; fornisce inoltre informazioni relative al noleggio dell'auto, consente la raccolta di dati relativi al comportamento del conducente e statistiche sul consumo di energia. L'attività di tesi descritta nei paragrafi seguenti è strutturata in base al lavoro svolto nel corso dei mesi sul veicolo STEVE, affidato al Dipartimento di Meccanica del Politecnico. Il primo capitolo si concentra sui test su strada eseguiti per raccogliere dati fondamentali da integrare nel sistema di bordo sopra descritto, al fine di implementare la funzione di ricerca del percorso migliore in termini di efficienza energetica. Questa attività è stata svolta in collaborazione con l'Università del Surrey, che ha richiesto l'esecuzione di test urbani seguendo specifiche indicazioni. Una volta raccolti attraverso il sistema di bordo, i dati sono stati elaborati e inviati. Il capitolo successivo tratta una serie di test sperimentali, eseguiti su strada, al fine di estrarre dati utili sulla dinamica del veicolo. A tale scopo, è stato specificamente utilizzato un sensore ottico di ultima generazione. L'attività si è concentrata sulla selezione dei dati fondamentali da estrapolare e analizzare in dettaglio. Infine, l'ultimo capitolo riguarda l'uso di un software commerciale, Carmaker, utilizzato per eseguire simulazioni virtuali di test dinamici sui veicoli. Carmaker è infatti un potente strumento che consente di replicare i test su strada in un ambiente di simulazione virtuale, con ottima precisione. L'analisi si è concentrata sulla modellazione di alcuni test eseguiti su strada dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico al fine di estrarre dati dinamici sul veicolo in ottica comfort, principalmente relativi a sospensioni e pneumatici. Per fare questo, è stato necessario modellare il veicolo e le superfici stradali all'interno di Carmaker, impostare i dettagli dei test da seguire e simularli fino a trovare valori ottimali, confrontando, tramite post processamento in ambiente Matlab, i risultati delle simulazioni e dei dati raccolti durante le prove su strada.

1. Test su strada: analisi per il sistema HMI di bordo

La seguente parte di attività ha comportato l'esecuzione di vari test su strada, per raccogliere dati utili dalla guida reale, al fine di implementare una nuova funzionalità all'interno del sistema di bordo del veicolo, sviluppato in collaborazione con VEM. Questa funzionalità cerca di fornire all'utente un approccio diverso, rivolto all'interesse per l'ambiente, nella scelta dei percorsi da seguire. Generalmente, le applicazioni di navigazione suggeriscono al conducente la modalità più veloce per raggiungere la destinazione o quella più breve o quella meno trafficata, magari a spese del consumo di energia e dell'inquinamento ambientale. L'applicazione all'interno dell'HIM cerca di combinare due aspetti alternativi al normale criterio di scelta del percorso: l'eco-routing e l'eco-driving [1]. La prima riguarda la pura navigazione, favorendo il percorso che unisce l'aspetto relativo all'efficienza energetica con la durata temporale. L'eco-driving, d'altra parte, si riferisce ai suggerimenti che vengono forniti all'utente, per aiutarlo a raggiungere, ad esempio, un profilo di velocità ottimale da mantenere lungo il percorso, con conseguenti risparmi energetici. Per perseguire questo obiettivo, sono necessari numerose acquisizioni di dati su strada, valutando i percorsi migliori in base a velocità, posizione, tempo e stato di carica della batteria del veicolo. L'attività è stata svolta in collaborazione con l'Università del Surrey, un altro partner del progetto STEVE, che ha dettato le linee guida da seguire per quanto riguarda le prove su strada. Innanzitutto, sono stati scelti due punti, un punto di partenza A e un punto di arrivo B vicino al Politecnico di Torino. Sono stati quindi selezionati due percorsi che collegassero i due punti. Ogni itinerario è stato percorso più volte, per identificare dei dati medi da confrontare e implementare all'interno del sistema. Nel dettaglio, è stato richiesto di percorrere almeno tre volte ogni percorso, di una lunghezza minima di 2,5 km, dal punto A al punto B e viceversa ad una velocità massima di 30-40 km/h, in un orario in cui il traffico fosse limitato.



Figura 1.1 – Quadriciclo elettrico Steve [2].

CAR MAKER	JAC					
HOMOLOGATION CLASS	L7e					
MEASURES						
Massa in ordine di marcia [kg]	650					
Ripartizione dei pesi assale	4.6:5.4					
anteriore/posteriore						
Lunghezza [mm]	2830					
Larghezza [mm]	1500					
Altezza [mm]	1565					
Passo [mm]	1815					
Larghezza carreggiata anteriore	1285					
[mm]						
Larghezza carreggiata posteriore	1330					
[mm]						
STEERING						
Raggio minimo di svolta [m]	4.1					
ENGINE AND TRANSMISSION						
Tipo di alimentazione	Elettrica					
Motore	Sincrono a magneti permanenti					
Potenza nominale [kW]	6.3					
Tensione [V]	72					
Capacità batteria [Ah]	140					
Cambio	Automatico					
Trazione	Posteriore					

Tabella 1.1 – Dati tecnici Steve.

1.1 Impostazione delle misure

Il sistema di acquisizione, l'HMI a bordo del veicolo, è in grado di raccogliere numerosi dati relativi al veicolo, quali velocità, tempo di viaggio, stato di carica della batteria, temperatura del cofano e posizione in tempo reale sulla base di un sistema GPS. I dati vengono acquisiti con una frequenza di circa 1 Hz. Le misurazioni su strada sono state molto semplici da eseguire. Una volta posizionato il veicolo nel punto iniziale della missione, è stato premuto un pulsante di avvio sull'HMI. Un cambio di colore dell'icona (da verde a rosso) dava indicazione che il sistema è stato avviato per registrare i dati. Una volta raggiunto il punto finale della missione, è stato necessario premere nuovamente il pulsante per terminare la registrazione. A quel punto, il sistema ha inviato i dati raccolti via e-mail in un formato accessibile quale il csv. Successivamente i dati sono stati elaborati nell'ambiente Matlab.

1.2 Dati raccolti

I dati che sono stati raccolti e analizzati, la cui nomenclatura riflette quella del sistema, sono i seguenti:

- UNIX_TIMESTAMP e UNIX_TIMESTAMP_MS: tempo di campionamento in secondi e millisecondi. La frequenza di acquisizione dovrebbe essere costante e uguale a 1 Hz, ma sono state osservate piccole fluttuazioni sia in eccesso che in difetto.
- GPS LAT: Latitudine misurata dal sistema GPS durante la missione.
- GPS LONG: Longitudine misurata dal sistema GPS durante la missione.
- SPEED: velocità del veicolo, valutata grazie al segnale GPS del sistema.
- SOC: stato di carica della batteria durante la missione.
- TEMEPERATURE: temperatura del cofano motore.
- RPM: velocità di rotazione del motore (rpm).

Una volta raccolti, questi dati sono stati elaborati e confrontati in Matlab.

1.3 Test su strada

Le prove su strada sono state eseguite nei giorni lavorativi, principalmente al mattino durante le ore non di punta, in modo da non incontrare congestioni dovute al traffico. Il punto di partenza (A) scelto per le prove si trova nei pressi della residenza EDISU, vicino al Politecnico, mentre il punto di arrivo (B), nel parcheggio della stazione di Porta Nuova. Sono stati scelti due percorsi diversi, ciascuno più lungo di 2,5 km, come richiesto.



Figura 1.3.1 – Percorso 1.



Figura 1.3.2 – Percorso 2.

Entrambi i percorsi sono simili in termini di traffico e layout stradale, con il primo più breve. Ogni itinerario è stato percorso più volte da A verso B e viceversa per avere una serie di dati che potessero essere confrontati. La velocità massima raggiunta durante le prove è stata di circa 35/40 km/h

1.4 Post processamento

I dati acquisiti da ciascun test sono disponibili in formato csv e sono stati post elaborati in Matlab. Innanzitutto, è stato necessario che i dati GPS venissero convertiti in coordinate cartesiane, al fine di poter tracciare sia i percorsi, che lo spazio coperto durante ogni test. Successivamente, ogni dato è stato diagrammato nel dominio del tempo in modo che i risultati di ciascun test potessero essere facilmente confrontati.

1.5 Conversione dei dati GPS in coordinate cartesiane

Il sistema di acquisizione fornisce la posizione del veicolo in termini di latitudine e longitudine. Queste coordinate non sono facilmente manipolabili e rappresentabili su un grafico. Quindi, è stata eseguita una conversione in coordinate cartesiane. Il sistema GPS considera la Terra come un ellissoide rotante, in cui l'asse di simmetria coincide con l'asse terrestre [3]. L'ellissoide ha le seguenti caratteristiche:

- Latitudine φ
- Semiasse maggiore: a = 6378137.00 m
- Semiasse minore: b = 6356752.314 m
- Eccentricità: $e = \frac{\sqrt{a^2 b^2}}{a} = 8.209504418 \cdot 10^{-2}$ (1.5.1)
- Raggio di curvature locale (considerato un punto fisso) $W = \sqrt{1 e^2 \sin^2 \phi}$ (1.5.2)

10/97

• Raggio di curvatura (muovendosi lungo il meridiano che attraversa il punto specificato): $M = a(1-e^2)$ (1.5.3)

$$M = \frac{W^2}{W^3} \tag{1.5.3}$$

Raggio di curvatura (muovendosi perpendicolarmente al meridiano che attraversa il punto specificato): $N = \frac{a}{W}$ (1.5.4)

Dal momento che entrambi i percorsi hanno $\phi \approx 45^{\circ}$ le grandezze di sopra assumono i seguenti risultati:

- W = 0.998325
- M = 6367381.657 m
- N = 6388838.448 m

Per convertire le coordinate GPS, deve essere identificato il piano tangente all'ellissoide nel primo punto della serie di dati sperimentali (t = 0). Nel piano viene assunto un sistema di riferimento cartesiano con assi x e y. Il punto di partenza ha coordinate cartesiane pari a (0,0). A partire da questo punto tutte le altre coordinate nel tempo possono essere ottenute nel modo seguente:

- $x(t) = (N + \overline{ALT}) \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot [LONG(t) LONG(0)]$ (1.5.5)
- $y(t) = (M + \overline{ALT}) \cdot [\varphi(t) \varphi(0)]$ (1.5.6)
- $\overline{ALT} = 239 m$

Dove, in prima approssimazione, \overline{ALT} corrisponde all'altitudine media ottenuta dalla serie di dati in esame.

1.6 Dati processati

Dopo la conversione delle coordinate GPS, è stato eseguito un post processamento in Matlab per diagrammare facilmente i risultati. Le variabili più significative considerate sono le seguenti:

- Velocità: è necessario un grafico della velocità del veicolo lungo la prova, per capire se il veicolo ha viaggiato a velocità costante o se il percorso è caratterizzato da frequenti accelerazioni e decelerazioni. Infatti, l'accelerazione e la decelerazione influiscono sul consumo di energia.
- RPM: il grafico della velocità di rotazione è utile a comprendere il range di maggiore utilizzo del motore.
- SOC: grafico fondamentale per tracciare l'andamento dello stato di carica della batteria durante il test e per analizzare la differenza tra i valori ad inizio e fine missione.
- Percorso: la traccia dell'itinerario percorso durante il test in coordinate cartesiane. Si divide nei percorsi di andata (da A verso B) e ritorno (da B verso A). Per ogni test il punto di inizio del percorso di ritorno è definito come il punto di minima distanza da un punto B fisso scelto sulla mappa.
- Distanza totale: cumulata dello spazio percorso nel tempo.

1.7 Test sul percorso 1

In questo paragrafo vengono mostrati i risultati dei test eseguiti sul percorso 1.

1.7.1 Test 1

Durata test [s]	1506,03
Distanza totale percorsa [m]	4433,9
Velocità media [km/h]	10,78
Velocità massima [km/h]	38
SOC iniziale [%]	92
SOC finale [km/h]	88

Tabella 1.7.1.1 – Risultati principali Test 1.



Figura 1.7.1.1 – Grafici Test1 su percorso 1.

1.7.2 Test 2

Tabella 1.7.2.1 – Risultati principali Test 2.

Durata test [s]	1215,61
Distanza totale percorsa [m]	4536,45
Velocità media [km/h]	13,49
Velocità massima [km/h]	41
SOC iniziale [%]	76
SOC finale [km/h]	71



Figura 1.7.2.1 – Grafici Test2 percorso1.

1.8 Test sul percorso 2

In questo paragrafo vengono mostrati i risultati dei test eseguiti sul percorso 2.

1.8.1 Test 1

Durata test [s]	1439
Distanza totale percorsa [m]	6560,95
Velocità media [km/h]	16,59
Velocità massima [km/h]	37
SOC iniziale [%]	98
SOC finale [km/h]	92

Tabella 1.8.1.1 – Risultati principali Test 1.



Figura 1.8.1.1 – Grafici Test1 percorso 2.

1.8.2 Test 2

Tabella 1.8.2.1 – Risultati principali Test 2.

Durata test [s]	1706,36
Distanza totale percorsa [m]	6446,25
Velocità media [km/h]	13,69
Velocità massima [km/h]	32
SOC iniziale [%]	98
SOC finale [km/h]	92





Figura 1.8.2.1 – Grafici Test2 percorso 2.

Durata test [s]	1396,69
Distanza totale percorsa [m]	6471,47
Velocità media [km/h]	16,77
Velocità massima [km/h]	33
SOC iniziale [%]	87
SOC finale [km/h]	82

Tabella 1.8.3.1 – Risultati principali Test 3.



Figura 1.8.3.1 – Grafici Test3 percorso 2.

1.9 Risultati

Comparando i risultati di ciascun test, per entrambi i percorsi, è stato possibile trarre le seguenti conclusioni. Prima di tutto, la principale differenza tra i due percorsi risiede nella loro lunghezza. Il secondo percorso è leggermente più lungo e, come previsto, questo influenza lo stato di carica finale della batteria, risultando in una minore percentuale di energia rimanente rispetto al primo percorso. Peraltro, le differenze tra i diversi test sono molto limitate, solo il tempo impiegato ha subito delle variazioni legate essenzialmente alle condizioni di traffico. I risultati dimostrano quindi che le misure effettuate dal sistema di acquisizione mostrano una buona riproducibilità. Il profilo di velocità dei due percorsi è molto simile, caratterizzato da frequenti fasi di accelerazione, decelerazione e partenze e arresto, a causa del traffico e segnali semaforici. Tuttavia, è possibile osservare che approssimativamente a metà dei test 2 e 3 del secondo percorso c'è una piccola fase in cui la velocità è sostanzialmente costante intorno ai 30 km/h. Il profilo discendente dello stato di carica della batteria è simile per i due percorsi. Si caratterizza per una discesa a gradino. I valori medi risultanti da ogni percorso sono mostrati di seguito:

Distanza test 1 [m]	4433,9	Velocità media test 1 [km/h]	10,78	$\Delta\%$ SOC test 1	-4%
Distanza test 2	4536,45	Velocità media	13,49	$\Delta\%$ SOC test	-5%
[III]				2	
Distanza media	4479,70	Velocità media	11,99	$\Delta\%$ SOC	-4,45%
dei test [m]		dei test [km/h]		media dei	
				test	

Tabella 1.9.1 – Risultati medi percorso 1.

Tabella 1.9.2 – Risultati medi percorso 2.

Distanza test 1 [m]	6560,95	Velocità media test 1 [km/h]	16,59	Δ% SOC test 1	-6,00%
Distanza test 2 [m]	6446,25	Velocità media test 2 [km/h]	13,70	Δ% SOC test 2	-6,00%
Distanza test 3 [m]	6471,47	Velocità media test 3 [km/h]	16,77	Δ% SOC test 3	-5,00%
Distanza media dei test [m]	6490,34	Velocità media dei test [km/h]	15,56	∆% SOC media dei test	-5,69%

2 Misurazioni con sensore Kistler

Lo scopo della seguente attività è stato eseguire dei test su strada con il quadriciclo elettrico STEVE, utilizzando un sensore ottico Kistler per eseguire delle misurazioni. Il primo passo dell'analisi ha riguardato l'acquisizione di tutti i segnali che il sensore ottico può misurare. Per fare ciò, è stato necessario fare una calibrazione del sensore e dei segnali. Successivamente, sono stati condotti diversi test e i dati raccolti post elaborati al fine di scegliere quali segnali fossero più rilevanti per successivi test e quali non aggiungevano informazioni utili o erano interessati da alcuni errori.

2.1 Impostazione delle misure

Questo capitolo tratta la fase di montaggio del sensore e la sua calibrazione. Entrambi i passaggi sono molto importanti perché l'accuratezza delle misurazioni dipende fortemente da un'attenta fase di impostazione [4].

2.2 Montaggio del sensore

Il sensore utilizzato, un S-motion Type 2053A, è stato montato longitudinalmente sul lato destro del veicolo. Per prestazioni e precisione ottimali, la distanza di montaggio tra la parte inferiore del sensore e la superficie stradale deve essere compresa tra 350 mm +/- 100 mm [4]. Il sensore utilizzato ha un sistema di montaggio basato su supporti a ventosa. Dopo il suo montaggio, il sensore è stato collegato tramite un cavo alla centralina (ECU) e questa al PC tramite un cavo Ethernet. L'ECU è stata alimentata dalla batteria del veicolo attraverso una porta da 12V.



Figura 2.2.1 – Montaggio sensore sul veicolo STEVE.



Figura 2.2.2 – Montaggio sensore sul veicolo STEVE.

Technical data

Performance specifications		Type 2053A (standard)	Type 2055A (small)		
Speed 1)	km/h	±0,1 250			
Distance resolution	mm	≤	1		
Measurement accuracy ²⁾	%FSO	<±().2		
Angle	۰	±3	30		
Angle resolution	۰	<±0	.01		
Meas. accuracy angle 2)					
Typical	۰	<±(0,1		
Guaranteed	٥	<±(0,2		
Angular speed	°/s	±3	00		
Acceleration	g	±1	8		
Non-linearity	Ĭ				
Angle speed	%FSO	±0,	15		
Acceleration	%FSO	±0,	15		
Measurement frequency	Hz	50	00		
Working distance / range	mm	350 ±100			
Signal outputs		() () () () () () () () () ()			
Digital output 1 Vel	puises/m	1 1 000/TTL	n		
Digital output 2 Velx	pulses/m	1 1 000/TTL	n		
Digital output 3 Vely	Hz/km/h	2 200/TTL	no		
Digital output 4 angle	Hz/°	6 900/TTL	no		
Analog output 1, Vel 3	V	-10 10	no		
Analog output 2, Velx ³⁾	V	-10 10	no		
Analog output 3, Vely ³⁾	V	-10 10	no		
Analog output 4, angle 3)	V	-10 10	no		
Signal inputs					
Trigger		TTL	no		
Analog 1+2 (16 Bit)	V	-10 10	no		
Counter	kHz	0 100/TTL	no		
Interfaces		,			
CAN (Motorola/Intel)		2.0B	no		
USB (Full Speed)		2.	0		
Ethernet		ye	s		
DTI		Ve	S		

Figura 2.2.3 – Range tipici di misura del sensore [4].

		Туре 2053А	Туре 2055А
System specifications		(standard)	(small)
Power supply	V	10 .	. 28
Power consumption max. (at 12 V)	W	3	5
Temperature range			
Operation	°C	-25	50
Storage	°C	-40	85
Relative humidity (non conden-	%	5	. 80
sing)			
Degree of protection (cable mounted)			
Sensor head		IP	67
Electronics		IP	40
Dimensions (LxWxH)			
Sensor head	mm	118x	70x45
Electronics	mm	175x125x95	175x125x65
Weight			
Sensor head	grams	60	00
Electronics	grams	1 100	890
Shock	g	50 ha	lf-sine
	ms	(5
Vibration	g	1	0
	Hz	10	150
Illumination		halo	gen

Optional: calibrated up to 400 km/h

³ Determined on test sufface with distance >200 m ³ Persetting; in KiCenter, you can freely assign the analog outputs by activating the checkbox "Individual Output Enable"

Figura 2.2.4 – Altre specifiche del sensore [4].

2.3 Configurazione e calibrazione del sensore

I seguenti paragrafi riguardano la configurazione del sensore, i parametri dei test e la calibrazione dei principali segnali tramite il software Kicenter.

2.3.1 Test centre

Innanzitutto, è stato creato un file kcf che include tutte le impostazioni del sensore [5] e, nella sezione test centre, tutti i parametri dei test. Tutte le impostazioni mostrate di seguito sono correlate ai test eseguiti, di tipo generico, ma tutti i passaggi devono essere seguiti anche per test specifici. Ecco i passaggi principali:

• Adding signals: in questa fase tutti i segnali che possono essere misurati dal sensore sono stati aggiunti al file. Quindi, al termine della configurazione, questi segnali sono stati assegnati alla rispettiva porta del sensore. Di seguito è mostrato un elenco di tutti i segnali:



Type 2055A... (standard), 2053A... (small)

Correvit S-Motion DTI

Non-contact optical sensors

S-Motion sig	POI calculation applie In horizontal cordinate system -Motion signal description In body coordinate system]]
Signal name	Unit	Description	Direction	в	н	P
VelX	km/h	Longidudinal velocity. Generated from optical velocity and IMU signals	forward	x		x
VelY	km/h	Transverse velocity. Generated from optical velocity and IMU signals	left	x		x
Vel	km/h	Resulting velocity calculated from VelX and VelY	forward	x		x
Angle	٥	Angle between vehicle moving direction and vehicle X-axis Calculated from VeIX and VeIY	left	x		x
Distance	m	Accumulated distance calculated by integration of Vel	forward	x		x
Pitch	o	Angle between horizontal and body coordinate system Rotation around horizontal Y-axis	forward		x	0
Roll	٥	Angle between horizontal and body coordinate system Rotation around body X-axis	right		x	0
Timestamp		Processor cycle count. Increasing by 1 every 2 ms				
Radius	m	Path radius. Calculated from VelX and AngVelZ_body	-	x		x
AccX_hor	m/s²	Longitudinal acceleration. Influence of gravity eliminated	forward		x	-
AccY_hor	m/s²	Transverse acceleration. Influence of gravity eliminated	left		x	-
AccZ_hor	m/s²	Vertical acceleration	up		x	-
AccC_body	m/s²	Transverse acceleration calculated from VelX and AngVelZ_body Influence of gravity eliminated	left	×		x

X = yes - = no O = not relevant

This information corresponds to the current state of knowledge. Ristler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Ristler products is excluded.

Page 1/4

62018, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, Info@kistler.com, www.kistler.com Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

Figura 2.3.1.1 – Segnali [4].

POI calculation applic In horizontal cordinate system S-Motion signal description In body coordinate system			plies stem stem]	
Signal name	Unit	Description	Direction	в	н	P
AngVelX_hor	°/s	Angular velocity around X-axis	right		x	0
AngVelY_hor	°/s	Angular velocity around Y-axis. Pitch rate	forward		×	0
AngVelZ_hor	°/s	Angular velocity around Z-axis. Yaw rate	left		×	0
VelX_cor	km/h	Raw longitudinal velocity. Only optical (Correvit) measurement	forward	x		_
VelY_cor	km/h	Transverse velocity. Only optical (Correvit) measurement	left	x		-
Vel_cor	km/h	Resulting velocity calculated from VelX_cor and VelY_cor	-	x		-
Angle_cor	0	Angle between vehicle moving direction and vehicle X-axis Calculated from VelX_cor and VelY_cor	left	x		-
AccX_body	m/s²	Longitudinal acceleration	forward	x		-
AccY_body	m/s²	Transverse acceleration	left	x		-
AccZ_body	m/s²	Vertical acceleration	up	x		-
AngVelX_body	°/s	Angular velocity around X-axis. Roll rate	right	x		0
AngVelY_body	°/s	Angular velocity around Y-axis	forward	x		0
AngVelZ_body	°/s	Angular velocity around Z-axis	left	x		0
X = yes - = no O = not relevant				P	1ge i	2/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded. ©2018, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com Kistler & a registered trademark of Kistler Holding AG.

Figura 2.3.1.2 – Segnali [4].

S-Motion signal description

	Signal name	Description
	Latitude	GPS latitude position
	Longitude	GPS longitude position
	TimeOfWeek	GPS time (UCT)
	Track	Moving direction in GPS coordinate system. 0° = North; 90° = East; 180° = South; 270° = West
	Height	Height above sea level
	Anain1	Analog input 1
	Analn2	Analog input 2
	DigIn	Digital input
	SensorID	User-specific number that can be set in KiCenter on page "CAN Bus"
not included	Temperature	Temperature inside the sensor head
\sim	LampCurrent	Current consumption of halogen lamp
	FilterSetting	Number of samples used for averaging if filter is activated
	NumOfSat	Number of sattelites used for GPS

Figura 2.3.1.3 – Segnali [4].

S-Motion signal description

	Signal name	Description
	STST	0 – Sensor active 1 – Standstill. Sensor detects no movement
	FilterOffOn	0 – moving average filter is not activated 1 – moving average filter is activated
	LampCurrentControl	0 – current control of halogen lamp is not active 1 – current control of halogen lamp is active
	TemperatureOK	0 – temperature in sensor head is too high (lamp will switch off) 1 – temperature in sensor head is below 80°C
	HeadStatus	0 – sensor head is not connected 1 – sensor head is connected
	AngleSwitchedOff	0 – angle output active (Velocity is above the set limit) 1 – angle output is 0 (Velocity is below the set limit)
	Direction	Resulting direction – DirectionMotion*DirectionMounting
not included	SatFixed	0 – not enough satellites available for GPS position evaluation 1 – enough satellites available for GPS position
not meladed	AngVelCorrection	0 – no offset correction of AngVel signals 1 – standstill is detected and automatic offset correction is active
	DirectionMotion	0 – sign of velocity from "Motion Algorithm" is negative 1 – sign of velocity from "Motion Algorithm" is positive
	DirectionMounting	0 – mounting direction is set to "Reverse" 1 – mounting direction is set to "Normal"
	DirectionHeadasValid	0 – direction signal from sensor head is not detected as valid 1 – direction signal from sensor head is detected as valid
	DirectionHead	0 – direction from sensor head is negative 1 – direction from sensor head is positive

Figura 2.3.1.4 – Segnali [4].



Figura 2.3.1.5 – Procedura per aggiungere i segnali.

• Adding evaluations: i risultati delle misurazioni vengono analizzati dopo le prove ma è utile disporre di una prima serie di dati rilevanti, in termini di valori minimi, massimi o medi. Questi risultati vengono visualizzati sul display del PC alla fine del test.

		KiCenter [F:\LUCA_FERRERO_materiale\t	est_for_Surrey_2019-10-17\kistler_ST	'EVE\prova_1.k		- 0	\times
Device Center Test C	Center 1						0
Test Test Export Import	e Add Add Signal ▼ Evaluation	Add Add <th>Current Selection Test Test_1_STEVE Start Sequence Test (F5)</th> <th>Start Continu Sequence (F11) Sequence</th> <th>Le Manual Cancel (F12) Trigger (F5) (ESC) © State (F2) © Repeat (F3) © Discard (F3)</th> <th>3) Undo Redo !</th> <th>र्के Settings</th>	Current Selection Test Test_1_STEVE Start Sequence Test (F5)	Start Continu Sequence (F11) Sequence	Le Manual Cancel (F12) Trigger (F5) (ESC) © State (F2) © Repeat (F3) © Discard (F3)	3) Undo Redo !	र्के Settings
Export/Import		Test Planning		Test Execution		Display Layout	General
Tree ∰ 2↓	+ # ×	Uverview		2	earch	ble 🔻	•
→ Signals (36) √ Evaluations (12)		Name	Category	Туре	Signal		
Time_Stop		O Time_Stop	General	Stop	Time	_	
Vel_Avg		O Dist_Stop	General	Stop	Dist		l d
Vely_Max		Vel_Avg	General	Avg	Vel		
AccX_body_Max AccY_body_Max	2	VelY_Max	General	Max	VelY		
AccZ_body_Max	-	Uel_Max	General	Max	Vel		
Pitch_Max		AccX_body_Max	General	Max	AccX_body		
AngVelZ_body_Max		AccY_body_Max	General	Max	AccY_body		
	- 1	AccZ_body_Max	General	Max	AccZ_body		
Tests (1) Sequences (0)		Angle_Max	General	Max	Angle		
	sor (5546738)	O Pitch_Max	General	Max	Pitch		
		O Roll_Max	General	Max	Roll		
		AngVelZ_body_Max	General	Max	AngVelZ_body		-
	E	valuations					P

Figura 2.3.1.6 – Aggiunta valutazioni.

• Adding displays: durante il test è molto importante monitorare alcuni dati rilevanti, quindi è utile configurare un display che li mostri sullo schermo del PC. Lo stesso alla fine del test; un display è stato configurato per mostrare le valutazioni più significative.

	KiCenter [F:\LUCA_FERRERO_materiale\	test_for_Surrey_2019-10-17\kistler_STEVE\prov	ra_1.k		- 0	\times
Device Center Test Center	1					
Test Test Export Import	Add Add Add Add Add Add Add Fraction (F7) n ▼ Display Table Test ▼ Sequence ② Sensor Calibration (F8)	Current Selection Test Test_1_STEVE Start Start Sequence Test (F5) Sequence	rt Continue Manual e (F11) Sequence (F12) Trigger (F5)	Cancel © Save (F2) (ESC) © Repeat (F3) © Discard (F4)	Undo Redo	Settings
Export/Import	Test Planning	Те	st Execution		Display Layout	General
Iree - 0 × Image: Signals (36) -> Image: Signals (36) ->	Displays Overview Search Name Display1 Display_end	Table	Common Fix Display Elements	y 1 Display1		

Figura 2.3.1.7 – Aggiunta display.



Figura 2.3.1.8 – Display mostrato durante i test.



Figura 2.3.1.9 – Display mostrati alla fine del test.

• Adding tables: le tabelle sono state create alla fine, quando sono stati salvati i risultati del test. Le colonne includono tutti i segnali, mentre ogni riga include i rispettivi valori che vengono aggiornati con una frequenza di 20Hz (passo di 0,05 secondi).

KiCenter [F:\LUCA_FERRERO_mate	iale\test_for_Surrey_2019-10-17\kistler_STEVE\prova_1.k	- 🗆 ×
Device Center Test Center 1		0
Test Test Export Import Remove Remove Templates Signal ▼ Evaluation ▼ Display Table Templates Signal ▼ Evaluation ▼ Display Table Templates	Current Selection Image: Constraint of the selection Image: Conselection Image: Conselection	Undo Redo Settings
Export/Import Test Planning	Test Execution	Display Layout General
Tree → 3×	Table Table - Common	Â
Name Description Columns	Name Tab	
La Test 1 STEVE B Sequences (0) ■ Equipment -S-Motion Sensor (5546738) C Tab Table_test AngVelX_hor, AngVelY_ AngVelX_hor, AngVelY_ AngVelX_hor, AngVelY_	verx, very,	
Assignment TimeOfWeek, Track, H NumOfSat, STST, Filte	ght, Temperature, LampCurrent, JffOn Display Full Signal Name	
	Info Column Leading Signal	
	Digits Of Info Column 5	
Tables	- Columns Signal Reset LeadingStepsize ^{Extra} Min.MaxVirgDeci	maBigits

Figura 2.3.1.10 – Aggiunta tabelle.

• Adding test: le impostazioni più importanti del test sono la frequenza di campionamento (200Hz in questo caso), l'avvio e l'arresto del trigger per il test e i display mostrati durante e alla fine del test.

K DDD:	KiCenter [F:\LUCA	_FERRERO_materiale\test_for	r_Surrey_2019-10-17\kistler_STI	EVE\prova_1.k		- 0 ×
Device Center Test Center	1					
Test Test Export Import Remove Remove Signal V Evaluat	o Contraction Con	Quick View (F6) Currer Offset Calibration (F7) Test Sensor Calibration (F8) Seque	Test_1_STEVE Start resc Test (F5)	Start Continue Sequence (F11) Sequence (F12)	Manual Cancel © Save (F2) Generat (F3) © Sepeat (F3) © Discard (F4)	Undo Redo Settings
Export/Import	Test Planning			Test Execution		Display Layout General
Tree 🔫 🖛 🗙	Sampling Rate		200	Hz		
⊞ 4⊩ Signals (36)	- Start Trigger : (Time >= 0 [s])					
⊕√ Evaluations (12) ⊕■ Displays (2)		All group 🔻 🗟 Time	▼ >=	• 0	[s]	
Tables (1)	AND 🔻	All grour 🔻	▼ >	•		_
Test_1_STEVE	AND	All grour V	▼ >	•		
Equipment - S-Motion Sensor (5546738)	- Stop Trigger : (Time <= 60 [s])					
		All grour 🔻 · Time	▼ <=	▼ 60	[s]	
	AND 🔻	All grour V	▼ >=	•		
	AND	All grour V	▼ >=	•		
	- Displays					
	Start Display		Display1 -			
	Run Display		Display1 -			
T	End Display		Display end 🔻			-
	534					

Figura 2.3.1.11 – Aggiunta parametri del test.

• Signals assignment: tutti i segnali precedentemente aggiunti sono stati assegnati alla rispettiva porta del sensore.

2.3.2 Calibrazione del sensore

La calibrazione del sensore consiste nel determinare l'offset di tre segnali importanti:

- Angle: offset dell'angolo di assetto.
- Roll: rollio.
- Pitch: beccheggio.

2.3.3 Calibrazione angolo di assetto

Dopo l'installazione, il sensore mostra normalmente una piccola torsione attorno al sistema di coordinate del veicolo. Quando viene eseguita la calibrazione, questo offset dell'angolo viene determinato e salvato nella pagina di configurazione del sensore. Questo offset angolare è molto importante perché serve a correggere il calcolo della velocità longitudinale e trasversale [5]. La calibrazione è stata eseguita su una strada in piano ed è iniziata premendo il pulsante "Start angle calibration" e si è arrestata automaticamente una volta raggiunta la distanza di calibrazione definita in 200 m. La misurazione dell'angolo è iniziata solo quando è stata raggiunta una velocità costante. Il risultato della calibrazione viene generato dal valore medio di tre ripetizioni eseguite. Se il risultato è accettabile, il valore viene trasferito al sensore facendo clic sul pulsante "Salva nel sensore".



Figura 2.3.3.1 – Procedura per fissare i parametri di calibrazione dell'angolo di assetto.

K DDD:		KiCenter [F:\LUCA_FERRE	RO_materiale\test_for_Su	rrey_2019-10-17\kistler_STEVE	\prova_1.k	-	٥	×
Device Center Test Cente	r							
Save To Refresh Parameter Param Device From Device Import Expo	leter Remove ort Device All ← Serial ←	Serial Devices Net Devices Net Devices Output Calibra	ce Create Firmware tion CAN DB Update					
Database Operations	Connec	tion	Tools					
Device Tree	Sensor Selection	Calibration Settings	Online Results	Calibration Results				*
⊟ © S-Motion Sensor (5546738) - ই Measurement Display	Calibration Dista	ance[m]	Distance[m]-		Time[s]			
-≅ Sensor Configuration -≅ Digital Output -≅ Analog Output ≅ CAN Pure		0.0		0.0	0.0			
-골 CAN Bus -골 Input Channel Settings - 골 Device Calibration	Min Angle[°]		Angle[°]		Max Angle[°]			
		N/A		0.0	N/A			
	Trigger Remaining							
	Start A	ngle Calibration 2		Abort				
	« Previous					Next »		-
	config							

Figura 2.3.3.2 – Pagina online mostrata per controllare lo stato della calibrazione.

K DDD:		KiCenter [F:\LUCA_FERRERO_materiale\test_f	or_Surrey_2019-10-17\kistler_STEV	E\prova_1.k	_	٥	×
Device Center Test Center							
Save To Device rom Device Import Expo	eter Remove rt Device All Serial	Vet Devices Test Device Create Firmwa Output Calibration CAN DB Updat	e				
Database Operations	Connectio	on Tools					
Device Tree ▼ 0 × ■ B - Motion Sensor (5546738) ■ ■ Measurement Display ■ ■ Sensor Configuration 1 ■ Digital Output ■ ■ Analog Output ■ ■ C AN Bus ■ ■ Input Channel Settings ■ ■ Device Calibration ■	Correvit Sensor Configur - Calibration Setting Distance Calibration Fa Angle Offset + Filter Settings + Sensor Settings + Calculation to POI + Network Settings	S-Motion (554	6738) 	2			

Figura 2.3.3.3 – Salvataggio offset dell'angolo.

2.3.4 Calibrazione di rollio e beccheggio

La calibrazione di beccheggio e rollio è stata eseguita su una strada più piana possibile e scarsamente inclinata lateralmente. Quando i due valori dell'angolo di inclinazione e di rollio visualizzati erano prossimi a 0 °, sono stati salvati nella pagina "Sensor configuration" facendo clic su "Adjust offset".

K DDB:	KiCenter	F:\LUCA_FERRERO_materiale\test_fo	or_Surrey_2019-10-17\kistler_STEVE\prova_1.k	- 0	×
Device Center Test Center					0
Save To Refresh Parameter Parameter Device From Device Import Export	r Remove Devices All Serial Serial Devices	Test Device Create Firmware Output Calibration CAN DB Update	e		
Database Operations	Connection	Tools			
Device Tree	Sensor Configuration				1
B S-Motion Sensor (5546738) Beasurement Display Sensor Configuration	+ Calibration Setting				
⇒ Digital Output	+ Filter Settings				_
-≊ Analog Output	- Sensor Settings				
-≊ CAN Bus -≊ Input Channel Settings	Angle Deactivation Velocity		< 1.00 km/h		
Device Calibration	Standstill Threshold Enable				
	Standstill Threshold Value		< 0.50 km/h		
	Pitch Offset		-2.46 *		
	Roll Offset		3.38 *		
			Adjust Offset Reset Offset		
	Stand Still Angular Velocities		Span:± 3.0 °/s		
	Mounting Direction		Normal		
			Reverse 🔘		
	+ Calculation to POI				
	+ Network Settings				

Figura 2.3.4.1 – Salvare gli offset di beccheggio e rollio.

2.3.5 Configurazione del sensore

Nella pagina "sensor configuration" è possibile impostare varie opzioni per l'uso del sensore. In questo caso, l'unica opzione impostata si riferisce all'offset dell'angolo di assetto, beccheggio e rollio (precedentemente calibrati) e calcolo nel POI che consente di calcolare i segnali in un punto di misurazione virtuale (POI). Le distanze x e y tra il punto di misurazione e il baricentro vengono inserite in millimetri [5]. Alcuni dei test sono stati eseguiti con il calcolo del POI e la sua determinazione verrà discussa più avanti.

K DDD:	KiCenter	F:\LUCA_FERRERO_materiale\test_for	Surrey_2019-10-17\kistler_STEVE\prova_1.k —	ð	\times
Device Center Test Center					0
Save To Refresh Parameter Parameter Device From Device Import Export	er Remove Device All Serial Serial	Test Device Create Firmware Output Calibration CAN DB Update			
Database Operations	Connection	Tools			
Device Tree ■ ■ ● ■ 5-Motion Sensor (5546738) ● ■ 5-Motion Sensor (5546738) ● ■ 5-Sensor Configuration ● ■ 5-Bensor Configuration ● 10-Bensor Configuration ● 2-Bensor Charles Settings ● 2-Bensor Charles Settings	Sensor Configuration + Calibration Setting + Filter Settings + Sensor Settings - Calculation to POI				- -
	Calculation to POI enable				
	Dimension				
	Dimension x		310 mm		
	Dimension y		-1538 mm		
					-

Figura 2.3.5.1 – Pagina di configurazione del sensore.

2.4 Test su strada

In questa attività sono stati effettuati cinque diversi test su strada nei pressi del Politecnico di Torino:

- 1. Prove di accelerazione e frenata.
- 2. Sinusoidal steer test
- 3. Classico percorso misto in condizioni di traffico, con rettilinei e curve.
- 4. Steering pad percorso in senso orario.
- 5. Steering pad percorso in senso antiorario.

Gli ultimi tre test sono stati effettuati con il calcolo nel POI. Il test è iniziato premendo il pulsante "Start test" sul Kicenter ed è terminato premendo il pulsante F5 (trigger manuale). Il test, se accettabile, è stato salvato e tutti i parametri misurati raccolti in un file tab. Successivamente, questi dati sono stati post-elaborati.



Figura 2.4.1 – pulsanti per iniziare e terminare il test.

2.4.1 Calcolo nel POI: applicazioni generali

Il sensore consente di calcolare i segnali in un punto di misurazione virtuale (POI). Il calcolo viene applicato ai seguenti segnali:

- Vel
- Vel_x
- Vel_v
- Angle
- Dist
- Radius
- Il sensore applica le seguenti formule per il calcolo di Vel_x e Vel_y nel POI [5]:

 $(\operatorname{Vel}_{x})_{\operatorname{POI}} = (\operatorname{Vel}_{x})_{\operatorname{sensor}} + (\operatorname{AngVel}_{z})_{\operatorname{body}} \cdot \operatorname{dimension} y$

(2.4.1.1)

$$(\operatorname{Vel}_{y})_{\operatorname{POI}} = (\operatorname{Vel}_{y})_{\operatorname{sensor}} - (\operatorname{AngVel}_{z})_{\operatorname{body}} \cdot \operatorname{dimension} x$$
 (2.4.1.2)

Dove: $(Vel_x)_{sensor} e (Vel_y)_{sensor}$ sono le velocità calcolate originariamente dal sensore, $(AngVel_z)_{body}$ è la velocità di imbardata nel sistema di coordinate solidale al corpo vettura, le dimensioni y e x si riferiscono alle distanze corrette tra il punto di misurazione virtuale e, rispettivamente, l'asse y e l'asse x del sensore. Uno schema nel Kicenter mostra la posizione di montaggio [5].

Gli altri segnali sono ricavati da Vel_x e Vel_y. Questa funzione è molto utile perché consente di calcolare i segnali nel baricentro del veicolo, che è il POI selezionato nei seguenti test. Il limite di questo calcolo è dovuto all'influenza di $(AngVel_z)_{body}$, che causa maggiore rumore dei segnali calcolati.



Figura 2.4.1.1 – Dimensioni da inserire nel Kicenter per calcolo nel POI [5].

2.4.2 Calcolo nel POI: applicazione nei test

Nella seguente attività, il calcolo del POI è stato applicato alle ultime tre prove. Come precedentemente riportato, il centro di gravità è il punto di misurazione virtuale selezionato. Qui sono riportate le misure in base alla posizione di montaggio del sensore e alla posizione del baricentro del veicolo.



Figura 2.4.2.1 – Posizione del centro di gravità (viste laterali e frontali).



Figura 2.4.2.2 – Posizione centro di gravità (vista dall'alto).

Dove γ si riferisce all'angolo tra la direzione longitudinale e la direzione del vettore \overrightarrow{sG} , mentre ψ si riferisce all'angolo di imbardata.

FIXED TECHNICAL DATA			
Passo [m]	W	1.815	
Percentuale massa asse anteriore [%]	m _f	0.46	
Percentuale massa asse posteriore [%]	m _r	0.54	
Semipasso posteriore [m]	$b = L \cdot m_f$	0.8349	
Semipasso anteriore [m]	$a = L \cdot m_r$	0.9801	
Carreggiata anteriore [m]	T _f	1.285	
Larghezza ruota [m]	L _w	0.13	

Tabella 2.4.2.1 – Dati tecnici.

Tabella 2.4.2.2 – Dati di montaggio.

Distanza tra mozzo ruota e sensore [m]	Ws
Distanza longitudinale tra il sensore ed il centro di gravità [m]	$sG_x = -(a-ws)$
Distanza tra corpo e sensore [m]	sb
Distanza laterale tra sensore e centro di gravità [m]	$sG_{x} = \frac{T_{f}}{2} + \frac{L_{w}}{2} + sb$

Secondo la posizione di montaggio, $sG_x e sG_y$ sono i valori da inserire in kicenter (rispettivamente y e x) per calcolare i segnali nel centro di gravità. Nei test eseguiti i dati di montaggio sono i seguenti.

MOUNTING DATA		
Distanza tra mozzo ruota e sensore [m]	Ws	0.67
Distanza longitudinale tra sensore e centro di gravità [m]	$sG_x = -(a-ws)$	-0.3101
Distanza tra corpo e sensore [m]	Sb	0.1
Distanza laterale tra sensore e centro di gravità [m]	$sG_x = \frac{T_f}{2} + \frac{L_w}{2} + sb$	0.8075

Tabella 2.4.2.3 – Dati relative alla posizione di montaggio durante i test.

I primi due test sono stati eseguiti senza calcolo del POI, quindi i segnali si riferiscono al sistema di riferimento del sensore. Per avere misure nel centro di gravità, è stato effettuato un calcolo manuale dei valori usando le teorie della meccanica del corpo rigido. Queste regole sono state applicate anche per calcolare le accelerazioni nel centro di gravità per ciascun test, poiché il calcolo del POI non si applica alle accelerazioni.

Calcolo velocità:



Figura 2.4.2.3 - Componenti della velocità.

$$\vec{V}_S = \vec{V}_G + \vec{V}_{(S/G)} \tag{2.4.2.1}$$

$$\begin{cases} V_{S_{\chi}} \\ V_{S_{y}} \end{cases} = \begin{cases} V_{G_{\chi}} \\ V_{G_{y}} \end{cases} + \begin{cases} \dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \sin \gamma \\ \dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$
 (2.4.2.2)

$$\begin{cases} V_{G_{\chi}} \\ V_{G_{y}} \end{cases} = \begin{cases} V_{S_{\chi}} \\ V_{S_{y}} \end{cases} - \begin{cases} \dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \sin \gamma \\ \dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$
(2.4.2.3)

$$V_G = \sqrt{(V_{G_X})^2 + (V_{G_Y})^2}$$
(2.4.2.4)

Dove:

• \vec{V}_{S} : Velocità misurata dal sensore.

- \vec{V}_G : Velocità nel centro di gravità.
- $\vec{V}_{(S/G)}$: Velocità di s attorno a G.
- V_{S_r} : Componente longitudinale di \vec{V}_S .
- V_{S_V} : Componente laterale di \vec{V}_S .
- $V_{G_{\chi}}$: Componente longitudinale di \vec{V}_{G} .
- V_{G_V} : Componente laterale di \vec{V}_G .
- $\dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \sin \gamma$: Componente longitudinale di $\vec{V}_{(S/G)}$.
- $\dot{\psi} \cdot \overline{Gs} \cdot \cos \gamma$: Componente laterale di $\vec{V}_{(S/G)}$.

Calcolo accelerazioni:



Figura 2.4.2.4 - Componenti accelerazione.

 $\vec{a}_S = \vec{a}_G + \vec{a}_{(S/G)} \tag{2.4.2.5}$

 $a_{(S/G)_n} = \dot{\psi}^2 \cdot \overline{sG} \tag{2.4.2.6}$

$$a_{(S/G)_t} = \ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \tag{2.4.2.7}$$

$$\begin{cases} a_{S_{\chi}} \\ a_{S_{Y}} \end{cases} = \begin{cases} a_{G_{\chi}} \\ a_{G_{y}} \end{cases} + \begin{cases} -\dot{\psi}^{2} \cdot \overline{sG} \cdot \cos\gamma \\ \dot{\psi}^{2} \cdot \overline{sG} \cdot \sin\gamma \end{cases} + \begin{cases} \ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \sin\gamma \\ \ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \cos\gamma \end{cases}$$
(2.4.2.8)

$$\begin{cases} a_{G_{\chi}} \\ a_{G_{\gamma}} \end{cases} = \begin{cases} a_{S_{\chi}} \\ a_{S_{Y}} \end{cases} + \begin{cases} \dot{\psi}^{2} \cdot \overline{sG} \cdot \cos \gamma \\ -\dot{\psi}^{2} \cdot \overline{sG} \cdot \sin \gamma \end{cases} - \begin{cases} \ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \sin \gamma \\ \ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \cos \gamma \end{cases}$$
(2.4.2.9)

Dove:

- \vec{a}_{S} : Accelerazione misurata dal sensore.
- \vec{a}_G : Accelerazione nel centro di gravità.
- $\vec{a}_{(S/G)}$: Accelerazione di s attorno a G. È divisa in due componenti, normale e tangenziale.

- $a_{(S/G)_n}$: Componente normale di $\vec{a}_{(S/G)}$
- $a_{(S/G)_t}$: Componente tangenziale di $\vec{a}_{(S/G)}$
- $a_{S_{\gamma}}$: Componente longitudinale di \vec{a}_p
- a_{S_V} : Componente laterale di \vec{a}_p
- $a_{G_{\chi}}$: Componente longitudinale di \vec{a}_{G}
- a_{G_V} : Componente laterale di \vec{a}_G
- $\dot{\psi}^2 \cdot \overline{sG} \cdot \cos \gamma$: Componente longitudinale di $a_{(S/G)_n}$
- $\dot{\psi}^2 \cdot \overline{sG} \cdot \sin \gamma$: Componente laterale di $a_{(S/G)_n}$
- $\ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \sin \gamma$: Componente longitudinale di $a_{(S/G)_t}$
- $\ddot{\psi} \cdot \overline{sG} \cdot \cos \gamma$: Componente laterale di $a_{(S/G)_t}$

2.5 Post processamento

I dati sono stati post elaborati in Matlab. Ecco un elenco dei principali segnali analizzati:

- $(\operatorname{Vel}_{x})_{\operatorname{cor}}, (\operatorname{Vel}_{y})_{\operatorname{cor}}, (\operatorname{Vel})_{\operatorname{cor}};$
- (Angle)_{cor};
- Vel_x, Vel_y, Vel;
- Angle (β)

I segnali indicati con cor (Correvit) differiscono dagli altri perché sono solo il risultato di una misurazione ottica del sensore [4]. Un raggio ottico emesso dal sensore viene riflesso dalla strada. La misurazione della velocità longitudinale e laterale è ottenuta dalla distanza e dall'incidenza del raggio riflesso, opportunamente derivati nel tempo. Gli altri segnali sono generati dalla misura ottica e corretti nel sensore da un sistema IMU che è un'unità di misura inerziale che calcola i valori di velocità dall'integrale dei valori di accelerazione. I segnali ottici e corretti sono stati confrontati per verificare se la correzione effettuata dal sensore fornisse valori più accurati. Sia il segnale Angle che (Angle)_{cor} sono calcolati da Vel_x and Vel_y ((Vel_x)_{cor} e (Vel_y)_{cor} per (Angle)_{cor}). Questo valore può anche essere facilmente calcolato dall'equazione 2.5.1:

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Vel}_{y}}{\operatorname{Vel}_{x}}\right) \tag{2.5.1}$$

Gli angoli sono stati calcolati manualmente da questa equazione e quindi confrontati con quelli calcolati dal sensore per verificare se il sensore eseguisse solo questo calcolo o apportasse altre correzioni. La direzione positiva dell'angolo d'assetto è indicata nella figura seguente:



Figura 2.5.1 – Direzione positiva dell'angolo di assetto [4].

- Pitch •
- Roll
- •
- $(\operatorname{AngVel}_{y})_{hor}, (\operatorname{AngVel}_{x})_{hor}, (\operatorname{AngVel}_{z})_{hor}$ $(\operatorname{AngVel}_{y})_{body}, (\operatorname{AngVel}_{x})_{body}, (\operatorname{AngVel}_{z})_{body}$
- Radius •

Pitch e Roll sono la rotazione attorno all'asse y orizzontale (beccheggio) e la rotazione attorno all'asse x (rollio) solidale al corpo vettura. La differenza tra i due sistemi di coordinate è che quella del corpo è parte integrante della carrozzeria. In questo caso, se l'auto percorre una strada inclinata, l'asse z e y rimangono normali al corpo vettura. (AngVel_v), (AngVel_x), (AngVel_z) sono le velocità angolari degli angoli di Pitch, Roll e Yaw. "hor" si riferisce al sistema di coordinate orizzontali, mentre "body" a quello solidale al corpo vettura. Yaw si riferisce all'angolo di imbardata che è la rotazione attorno all'asse verticale z. Le velocità angolari sono state confrontate per i due sistemi di coordinate, per verificare se ci fosse una differenza significativa. Il segnale Radius si riferisce al raggio del percorso ed è calcolato dalla velocità longitudinale e dalla velocità di imbardata.



Figura 2.5.2 – Direzione positiva angolo di rollio [4].



Figura 2.5.3 – Direzione positiva dell'angolo di beccheggio [4].

- $(Acc_x)_{hor}, (Accl_y)_{hor}, (Acc_z)_{hor}$
- $(Acc_{x})_{body}, (Acc_{y})_{body}, (Acc_{z})_{body}$
- (Acc_C)_{body}
- Acc_x, Acc_y e Acc_z sono le accelerazioni longitudinali, laterali e verticali, calcolate per entrambi i due sistemi di coordinate. $(Acc_C)_{body}$ è l'accelerazione laterale calcolata dalla velocità longitudinale e dalla velocità di imbardata. Viene confrontata con i valori della Acc_y.





X-axis: forward direction of the car Y-axis: perpendicular to the X-axis, left direction of the car Z-axis: perpendicular to the X-axis, up direction of the car





Horizontal coordinate system

X-axis: the body X-axis projected to the horizontal plane Y-axis: the body Y-axis projected to the horizontal plane Z-axis: vertical up direction parallel to the gravity axis

Figura 2.5.5 – Sistema di coordinate orizzontale [4].

2.5.1 Risultati dei test

In questo paragrafo viene mostrato il risultato di uno dei test eseguiti. Infatti, ogni test è diverso dall'altro, ma lo scopo del paragrafo è selezionare quale segnale è utile per i prossimi test e quale non aggiunge informazioni utili o è influenzato da rumore o errori. A tal fine, è sufficiente analizzare un test, poiché per gli altri è possibile trarre le stesse conclusioni. Inoltre, è utile ottenere alcuni parametri dinamici del veicolo. Per fare ciò, il primo passo è stato confrontare il segnale ottico con quello corretto dal sensore, per verificare quale fosse più preciso e meno influenzato dal rumore e confrontare le misure nei sistemi di riferimento orizzontale e del corpo, con lo stesso scopo. Una volta valutati i segnali più significativi, il passaggio successivo è stato filtrare quei segnali che erano maggiormente interessati dal rumore.

Infatti, i segnali sono influenzati da alcuni rumori che disturbano il trend generale del segnale con picchi irregolari. Ad esempio, se l'auto è passata su una buca sulla superficie stradale, il sensore registra un valore di picco di accelerazione laterale, velocità e angolo di assetto, anche se l'auto procede su una linea retta. Pertanto, è stato necessario utilizzare un filtro che taglia le frequenze più alte a cui appartiene il rumore. È stato utilizzato un filtro butter. È il tipo più semplice di filtro passa basso. Questo tipo di filtro passa segnali con una frequenza inferiore a una frequenza di taglio selezionata e attenua i segnali con frequenze più alte di quella di taglio. Ogni tipo di segnale richiede una frequenza di taglio diversa, mentre l'ordine del filtro è fissato su 10. L'ordine del filtro è il ritardo del segnale di uscita rispetto a quello originale. Il valore impostato rappresenta il miglior compromesso, senza scostarsi dall'andamento del segnale originale.

- Le velocità
- Accelerazioni
- Velocità angolari
- Angolo di slittamento laterale

Dopo la procedura di filtraggio, la velocità e l'accelerazione misurata nella posizione del sensore vengono riportate nel centro di gravità e confrontate.

2.5.2 Test di accelerazioni e frenate (longitudinale).

In questo primo test sono state eseguite alcune accelerazioni e frenate. Come mostrato nella figura 2.5.2.1, la velocità longitudinale è la principale influenza sulla velocità assoluta, poiché quella laterale è vicina allo zero a causa del test in rettilineo. Per lo stesso motivo, anche l'angolo di assetto (figura 2.5.2.4) è vicino a zero gradi. Il diagramma del raggio (2.5.2.2) mostra una tendenza irregolare, con valori di picco elevati. Ciò è dovuto al suo calcolo. Il sensore tenta di calcolarlo istante per istante dalla velocità longitudinale e dalla velocità di imbardata, ma in questo caso il percorso è dritto, quindi il raggio è vicino all'infinito (il diagramma mostra i valori massimi misurabili). Nella tabella 2.5.2.1 sono mostrate le caratteristiche del test in termini di durata e distanza percorsa. Nella tabella 2.5.2.2 sono mostrati i valori di minimo, massimo e medio dei segnali grezzi acquisiti, mentre nella tabella 2.5.2.3 il confronto tra segnali grezzi e filtrati e nella tabella 2.5.2.4 il confronto tra i segnali misurati dal sensore e quelli riportati nel centro di gravità.

Tabella 2.5.2.1 – Durata test e distanza percorsa.

ACCELERATION BRAKING TEST	
Durata [s]	37.30
Distanza percorsa [m]	231.45

Max Radius [m]	655.35	Min Radius [m]	16.48	Average Radius [m]	306.16
		VELOCITY SIGNA	LS [km/h]		•
Max Vel _x	33.62	Min Vel _x	7.04	Average Vel _x	22.32
$Max (Vel_x)_{cor}$	35.00	$Min(Vel_x)_{cor}$	5.98	Average $(Vel_x)_{cor}$	22.36
Max Vel _y	0.34	Min Vel _y	-0.63	Average Vel _y	-0.08
$Max (Vel_y)_{cor}$	2.70	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Vel}_{y}\right)_{\operatorname{cor}}$	-2.49	Average $(\operatorname{Vel}_{y})_{cor}$	-0.03
Max Vel	33.62	Min Vel	7.04	Average Vel	22.32
Max (Vel) _{cor}	35.00	Min (Vel) _{cor}	5.98	Average (Vel) _{cor}	22.38
		ANGLE SIGNA	LS [°]		
Max Angle	1.42	Min Angle	-1.16	Average Angle	-0.16
Max (Angle) _{cor}	12.67	Min (Angle) _{cor}	-6.98	Average (Angle) _{cor}	-0.01
Max Pitch	1.71	Min Pitch	-1.38	Average Pitch	-0.19
Max Roll	2.42	Min Roll	-0.71	Average Roll	0.38
	Al	NGULAR VELOCITY	SIGNALS	[°/s]	
$Max (AngVel_x)_{hor}$	12.57	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{AngVel}_{x}\right)_{\operatorname{hor}}$	-9.94	Average $(\text{AngVel}_x)_{\text{hor}}$	-0.05
$Max (AngVel_x)_{body}$	12.62	$Min(AngVel_x)_{body}$	-9.83	Average $(\text{AngVel}_x)_{body}$	-0.04
$Max (AngVel_y)_{hor}$	11.76	$\operatorname{Min}(\operatorname{AngVel}_{y})_{\operatorname{hor}}$	-8.76	Average $(\text{AngVel}_y)_{\text{hor}}$	-0.02
$Max (AngVel_y)_{body}$	11.82	$Min(AngVel_y)_{body}$	-9.00	Average $(AngVel_y)_{body}$	-0.01
$Max (AngVel_z)_{hor}$	13.98	$Min (AngVel_z)_{hor}$	-24.88	Average $(AngVel_z)_{hor}$	0.18
$Max (AngVel_z)_{body}$	14.41	$Min(AngVel_z)_{body}$	-25.01	Average $(\text{AngVel}_z)_{body}$	0.18
	A	ACCELERATION SIGN	NALS [m]	/s ²]	_
$Max (Acc_x)_{hor}$	5.02	$Min(Acc_x)_{hor}$	-6.06	Average $(Acc_x)_{hor}$	0.05
$Max (Acc_x)_{body}$	5.46	$Min(Acc_x)_{body}$	-5.69	Average $(Acc_x)_{body}$	0.49
$Max (Acc_y)_{hor}$	6.41	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Acc}_{y}\right)_{\operatorname{hor}}$	-9.00	Average $(Acc_y)_{hor}$	-0.08
$Max(Acc_y)_{body}$	6.84	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Acc}_{y}\right)_{body}$	-7.98	Average $(Acc_y)_{body}$	0.56
$Max(Acc_{C})_{body}$	2.10	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Acc}_{\mathcal{C}}\right)_{body}$	-3.11	Average $(Acc_C)_{body}$	0.01
$Max (Acc_z)_{hor}$	16.80	$Min(Acc_z)_{hor}$	5.56	Average $(Acc_z)_{hor}$	9.70
$Max (Acc_z)_{body}$	17.26	$Min(Acc_z)_{body}$	5.35	Average $(Acc_z)_{body}$	9.67
	ANGUL	AR ACCELERATION	SIGNAL	8 [rad/s ²]	
Max $(AngAcc_z)_{hodv}$	0.11	$Min(AngAcc_z)_{hodv}$	-0.11	Average $(AngAcc_z)_{hodv}$	0.00

Tabella 2.5.2.2 – Risultati generali.

		FILTERED VELOCITY	[km/h]		
Max Vel _x	33.62	Min Vel _x	7.04	Average Vel _x	22.32
Max filtered Vel _x	33.23	Min filtered Vel _x	7.11	Average filtered Vel _x	22.32
Max Vel _y	0.34	Min Vel _y	-0.63	Average Vel _y	-0.08
Max filtered Vel _y	0.18	Min filtered Vel _y	-0.36	Average filtered Vel _y	-0.08
Max Vel	33.62	Min Vel	7.04	Average Vel	22.32
Max filtered Vel	33.19	Min filtered Vel	7.1	Average filtered Vel	22.32
	FIL	ΓERED ANGULAR VEL	OCITY [°/s]	
Max Roll Rate	12.62	Min Roll Rate	-9.83	Average Roll Rate	-0.04
Max filtered Roll Rate	4.24	Min filtered Roll Rate	-3.76	Average	-0.04
				filtered_Roll_Rate	
Max Pitch Rate	11.82	Min Pitch Rate	-9.00	Average Pitch Rate	-0.01
Max	3.20	Min filtered_Pitch_Rate	-3.26	Average	-0.01
filtered_Pitch_Rate				filtered_Pitch_Rate	
Max Yaw Rate	14.41	Min Yaw Rate	-25.01	Average Yaw Rate	0.18
Max filtered Yaw Rate	3.58	Min filtered Yaw Rate	-3.63	Average	0.18
				filtered_Yaw_Rate	
	FII	LTERED ACCELERATI	ON [<i>m/s</i>	²]	
$Max (Acc_x)_{body}$	5.46	$Min(Acc_x)_{body}$	-5.69	Average $(Acc_x)_{body}$	0.49
Max filtered	2.79	Min filtered $(Acc_x)_{hody}$	-3.34	Average filtered	0.49
$(Acc_x)_{body}$		bouy		$(Acc_x)_{body}$	
$\operatorname{Max}\left(\operatorname{Acc}_{y}\right)_{body}$	6.84	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Acc}_{y}\right)_{body}$	-7.98	Average $(Acc_y)_{body}$	0.56
Max filtered	2.95	Min filtered	-1.78	Average filtered	0.56
$(Acc_y)_{body}$		$(Acc_y)_{body}$		$(Acc_y)_{body}$	
$Max (Acc_z)_{body}$	17.26	$Min(Acc_z)_{body}$	5.35	Average $(Acc_z)_{body}$	9.67
Max filtered	0.69	Min filtered	-0.60	Average filtered	-0.13
$(Acc_z)_{body}$		$(Acc_z)_{body}$		$(Acc_z)_{body}$	
		FILTERED ANGLE	[°]		
Max Angle	1.42	Min Angle	-1.16	Average Angle	-0.16
Max filtered Angle	1.42	Min filtered Angle	-0.71	Average filtered	-0.16
				Angle	

Tabella 2 5 2 3 – Co	omnarazione tra	a seonali misurati	dal sensore e filtrati
1 a 0 0 1 a 2.5.2.5 - 0 0	omparazione na	a segnan misuran	ual sensore e mitati.

Tabella 2.5.2.4 – Comparazione tra segnali misurati nella posizione del sensore e nel centro di gravità.

COMPARISON BET	WEEN V	VELOCITY [km/h] MEA	SURED	IN THE SENSOR POSIT	ION
	AN	ND IN THE CENTRE OF	F GRAV	ITY	
$Max (Vel_x)_{sensor}$	33.23	$Min(Vel_x)_{sensor}$	7.11	Average $(Vel_x)_{sensor}$	22.32
$Max(Vel_x)_G$	33.21	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Vel}_{\mathbf{x}}\right)_{G}$	7.01	Average $(\operatorname{Vel}_{x})_{G}$	22.31
$Max (Vel_y)_{sensor}$	0.18	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Vel}_{y}\right)_{sensor}$	-0.36	Average $(\operatorname{Vel}_y)_{sensor}$	-0.08
$Max (Vel_y)_G$	0.14	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Vel}_{y}\right)_{G}$	-0.38	Average $(\operatorname{Vel}_y)_G$	-0.09
Max Vel _{sensor}	33.19	Min Vel _{sensor}	7.10	Average Vel _{sensor}	22.32
Max Vel _G	33.21	$Min Vel_{G}$	7.01	Average Vel _G	22.31

COMPARISON B	ETWEI POSITIO	EN ACCELERATION [m ON AND IN THE CENT	n/h] ME. RE OF (ASURED IN THE SENSO GRAVITY	R
Max (Acc _x) _{sensor}	2.79	Min (Acc _x) _{sensor}	-3.34	Average $(Acc_x)_{sensor}$	0.49
$Max (Acc_x)_G$	2.84	$Min(Acc_x)_G$	-3.41	Average $(Acc_x)_G$	0.50
$Max (Acc_y)_{sensor}$	2.95	$Min(Acc_y)_{sensor}$	-1.78	Average $(Acc_y)_{sensor}$	0.56
$Max (Acc_y)_{G}$	2.97	$\operatorname{Min}\left(\operatorname{Acc}_{y}\right)_{G}$	-1.76	Average $(Acc_y)_G$	0.56
COMPARISON BETW	'EEN SI	DE SLIP ANGLE [°] MI	EASURE	ED IN THE SENSOR POSI	ITION
	AN	ND IN THE CENTRE OF	F GRAV	ITY	
Max (Angle) _{sensor}	1.42	Min (Angle) _{sensor}	-0.71	Average (Angle) _{sensor}	-0.16
Max (Angle) _G	1.14	Min (Angle) _G	-0.74	Average (Angle) _G	-0.17



Figura 2.5.2.1 – Grafici di velocità e angolo di assetto.

Il confronto tra il segnale ottico (valori cor) e corretto dal sensore della velocità e dell'angolo di assetto, mostra che solo le misurazioni ottiche hanno un andamento irregolare, caratterizzato da valori di picco elevati, mentre l'andamento del segnale corretto è più regolare, con valori più realistici. Di conseguenza, nei prossimi test è possibile assegnare al sensore solo segnali corretti.



Figura 2.5.2.2 - Grafici degli angoli e delle velocità angolari.



Figura 2.5.2.3 – Grafici delle accelerazioni.

Gli angoli di rollio, beccheggio (incluse le loro derivate nel tempo) e velocità di imbardata mostrati in figura 2.5.2.2 hanno l'andamento previsto. I due sistemi di coordinate, orizzontale e del corpo, danno risultati molto simili, come mostrato nella figura 2.5.2.2 e nella figura 2.5.2.3. Ciò è probabilmente dovuto ai test, effettuati principalmente su una superficie piana. L'unica differenza evidente nella figura 2.5.2.3 è che i valori del sistema solidale al corpo sono mediamente più alti di quello orizzontale. L'accelerazione trasversale $(Acc_c)_{body}$ calcolato dalla velocità longitudinale e dalla velocità di imbardata, sottostima il valore risultante, come mostrato nella stessa figura, in cui vi è un confronto con l'accelerazione trasversale calcolata dagli accelerometri.



Figura 2.5.2.4 – Grafico di comparazione tra angolo d'assetto calcolato dal sensore e tramite arcotangente.

Il calcolo del sensore dell'angolo di assetto si basa sull'equazione con l'arcotangente, poiché i valori sono sostanzialmente gli stessi.



Figura 2.5.2.5 – Grafico dell'angolo di assetto filtrato.



Figura 2.5.2.6 – Grafici della velocità filtrata.



Figura 2.5.2.7 – Grafici della velocità angolare filtrata.



Figura 2.5.2.8 - Grafici dell'accelerazione filtrata.



Figura 2.5.2.9 – Grafico velocità di imbardata filtrata.



Figura 2.5.2.10 – Grafico accelerazione angolare filtrata.

Dalla figura 2.5.2.5 alla figura 2.5.2.10 è mostrato il confronto tra i segnali grezzi e filtrati. Come previsto, il segnale filtrato segue la tendenza originale, ma è più regolare perché vengono tagliati i picchi dovuti al rumore.



Figure 2.5.2.11 – Grafici confronto velocità misurata dal sensore e calcolata nel centro di gravità.



Figura 2.5.2.12 – Grafici confronto accelerazione misurata dal sensore e calcolata nel centro di gravità.



Figura 2.5.2.13 – Grafici confronto dell'angolo di assetto misurato dal sensore e calcolato nel centro di gravità.

I segnali misurati dal sensore e calcolati nel centro di gravità mostrano la stessa tendenza, ma ovviamente differiscono in valore assoluto a causa dell'influenza dell'angolo di imbardata e delle sue derivate. In questo specifico caso le differenze sono minime perché il test è stato eseguito su un percorso rettilineo, quindi l'influenza dell'angolo di imbardata è limitata. Nella figura 2.5.2.14 è mostrato il confronto tra alcuni segnali misurati nella posizione del sensore e nel centro di gravità per lo steering pad test. In questo caso l'influenza dell'angolo di imbardata è più rilevante e i segnali hanno lo stesso andamento ma differiscono per i valori assoluti.



Figura 2.5.2.14 – Grafici confronto velocità misurata dal sensore e calcolata nel baricentro per lo steering pad test.

3 Analisi comfort numerico sperimentale

Lo scopo di questa attività è stato riprodurre alcuni test eseguiti su diverse superfici stradali con particolare attenzione al comfort di marcia del veicolo, simularli e confrontare i risultati numerici con quelli sperimentali al fine di estrarre alcuni dati del veicolo, relativi ai parametri che maggiormente hanno influenza sul comfort di guida, come le sospensioni e gli pneumatici. Il software commerciale CarMaker, di IPG, viene utilizzato per le simulazioni. Questo report segue gli stessi passaggi necessari per definire una simulazione testrun in Carmaker, che consiste nella parametrizzazione dei seguenti elementi [6]:

- Veicolo
- Strada
- Manovra
- Driver e suo comportamento

Dopodiché, sono state eseguite le simulazioni e i risultati post elaborati, per verificare se il modello di veicolo avesse analogie con il veicolo reale e quindi poter usufruire dei parametri dinamici del modello stesso. Carmaker, al fine di riprodurre una prestazione di guida reale, ha bisogno della definizione di un Testrun. È uno scenario che raccoglie tutte le informazioni necessarie per parametrizzare il "virtual vehicle environment", ovvero l'ambiente virtuale di lavoro, e avviare una simulazione [6]. L'ambiente del veicolo virtuale è costituito da veicolo virtuale, strada virtuale e conducente virtuale. Il veicolo virtuale è una rappresentazione modellata al computer di un veicolo con un comportamento che corrisponde a quello della sua controparte nel mondo reale, poiché contiene tutte le parti di un'automobile. Questo modello è parametrizzato con dati che si riferiscono direttamente al veicolo da studiare. Una strada virtuale è una rappresentazione digitalizzata di una strada che può essere generata utilizzando l'editor del software o utilizzando i dati digitalizzati di una strada esistente. Un driver virtuale è un driver anch'esso modellizato, il cui compito è seguire la manovra specificata nell'interfaccia del software, che simula le azioni di un driver reale. Questi moduli sono il requisito minimo per poter simulare il Testrun. I seguenti paragrafi trattano la parametrizzazione dei Testrun necessari per l'analisi effettuata in questa attività. In seguito, vengono discussi i modelli utilizzati per verificare che l'insieme dei parametri relativi alle sospensioni siano coerenti. Infine, il post processamento dei risultati e le relative conclusioni.

3.1 Procedura dei test sperimentali

I dati sperimentali sono stati forniti grazie a una serie di test di comfort, eseguiti sul veicolo STEVE in un'attività esterna alla tesi, condotti dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino [7]. I test sono stati eseguiti con particolare attenzione al comfort, rilevando i valori di accelerazione in tre diversi punti del veicolo, secondo gli standard ISO 2631 e ISO 5349, ovvero sedile, pavimento e sterzo. Poiché il sedile ha la caratteristica di un filtro, i dati presi in considerazione sono quelli raccolti sul pavimento del veicolo in quanto consentono, attraverso un'analisi della frequenza dei segnali, di valutare il comfort percepito dal corpo umano. Le vibrazioni raggiungono i passeggeri attraverso l'interfaccia tra l'essere umano e il veicolo. Le prove sono state eseguite guidando lungo un tratto rettilineo su due diverse superfici stradali a velocità diversa. Il veicolo era dotato di un accelerometro triassiale posizionato il più vicino possibile all'interfaccia con il corpo umano, sul pianale lato conducente [7]. Il sensore Kistler, utilizzato nel capitolo precedente durante l'attività di tesi, è stato invece utilizzato per monitorare le componenti della velocità, in particolare per verificare che quella longitudinale fosse il più costante possibile e quella laterale il più vicina allo zero. Avere una velocità costante è un requisito fondamentale per poter eseguire un'analisi di frequenza con buoni risultati dei segnali accelerometrici. I segnali di tutti i sensori sono stati acquisiti in modo sincrono attraverso un sistema Siemens LMS SCADAS Mobile [7].

Le prove sono state condotte con due persone a bordo, un conducente e un passeggero che ha monitorato le acquisizioni, su due diverse superfici urbane: una sezione asfaltata (Percorso A) e una sezione di pavé o ciottoli (Percorso B). La velocità considerata durante la prova si riferisce a quella letta sul tachimetro del veicolo. Nel post processamento dei dati, è stata considerata la velocità longitudinale corretta. Il segnale principale analizzato in post processamento è stata l'accelerazione verticale (nel sistema di coordinate solidale al corpo del veicolo), poiché influenza maggiormente la percezione del comfort, e la velocità del veicolo, che dovrebbe essere il più costante possibile al fine di effettuare un'analisi di frequenza dell'accelerazione verticale. Per ciascuna superficie i test sono stati eseguiti a otto diverse velocità (da 5 km/h a 40 km/h con l'incremento di 5 km/h), ma nel confronto tra la simulazione sperimentale e numerica sono state considerate solo le velocità di 10, 20, 30 e 40 km/h. I dati sono stati post elaborati in Matlab e nel paragrafo seguente sono riportati i risultati ottenuti in ciascun test:



Figura 3.1.1 - Percorso A.



Figura 3.1.2 - Percorso B.

3.2 Superficie asfaltata

3.2.1 Test 10 km/h



Figura 3.2.1.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità in dominio tempo.

3.2.2 Test 20 Km/h



Figura 3.2.2.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.



3.2.3 Test 30 km/h

Figura 3.2.3.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.

3.2.4 Test 40 km/h



Figura 3.2.4.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.



3.2.5 Risultati dei test su asfalto

Figura 3.2.5.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.

Per ogni test, è possibile notare che il picco dell' ampiezza è sempre tra 0 e 10 Hz, in particolare nell'intervallo tra 2 e 6 Hz. L'andamento del segnale è lo stesso per ogni velocità, escluso quello a 20 km/h che non mostra un picco marcato come negli altri casi. In tutti i casi dopo il picco di risonanza l'ampiezza del segnale decresce verso le alte frequenze. Aumentando la velocità l'andamento è lo stesso ma, come mostrato nella figura 3.2.5.1, è leggermente traslato verso valori di ampiezza più

elevati. Questa tendenza si nota soprattutto fino a 30 Hz, dopodichè, escluso il test a 40 km/h che rimane su valori più alti, il segnale è molto simile in amipiezza. Il picco più alto viene raggiunto nella prova a 30 km/h. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che le prove sono state condotte su strade molto simili ma non perfettamente uguali, per cui la superifcie asfaltata può presentare piccole variazioni, da cui deriva la possibilità che il picco ad una velocità intermedia sia superiore di quello a velocità più alta. La velocità presenta variazioni minime, quindi l'analisi della frequenza non è influenzata dalle variazioni di velocità.

3.3 Superficie ciottolata



3.3.1 Test 10 km/h

Figura 3.3.1.1 - Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo..

3.3.2 Test 20 km/h



Figura 3.3.2.1 - Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.



3.3.3 Test 30 km/h

Figura 3.3.3.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.

3.3.4 Test 40 km/h



Figura 3.3.4.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.



3.3.5 Risultati dei test sul ciottolato

Figura 3.3.5.1 – Grafico dell'accelerazione verticale nel dominio frequenza e velocità nel dominio tempo.

Sulla superficie ciottolata, il segnale è caratterizzato da picchi tra 0 e 20 Hz. L'ampiezza del segnale è maggiore aumentando la velocità, come mostrato nella figura 3.3.5.1. A frequenze più alte, sopra i 40 Hz l'ampiezza è maggiore rispetto alla superficie dell'asfalto, a causa dell'irregolarità della superficie stessa. Come per la superficie asfaltata, la velocità presenta variazioni minime.

3.4 Parametrizzazione del Testrun

In questo capitolo viene descritto nel dettaglio ogni passaggio necessario a generare la simulazione testrun specifica per questa attività.

3.4.1 Parametrizzazione: modello del veicolo

Il veicolo modellato in Carmaker è un quadriciclo elettrico. Il software fornisce una libreria che comprende modelli di vetture reali, appartenenti a diverse classi, già parametrizzate. Il veicolo di questa attività non è contenuto nella libreria, ma il software ha uno strumento che consente di generare un set di dati del veicolo basato su una serie di informazioni generali dell'auto. Ciò è utile nel caso in cui l'utente non abbia accesso a informazioni dettagliate sul veicolo reale previsto per la simulazione. Il generatore consente di specificare la classe del veicolo e i suoi parametri noti. Il resto delle informazioni viene definito dal generatore stesso, basato su dati comuni per la classe specificata e su calcoli effettuati tramite modelli matematici implementati nel software.

Il generatore consente di inserire i dati mostrati nella figura 3.4.1.1 e nella figura 3.4.1.2. Il veicolo da modellare in Carmaker ha le seguenti specifiche tecniche note:

CLASS	Small car
MEASURES	
Massa in ordine di marcia [kg]	650
Ripartizione delle masse tra l'assale	4.6:5.4
anteriore/posteriore	
Lunghezza [mm]	2830
Larghezza [mm]	1500
Altezza [mm]	1565
Passo [mm]	1815
Larghezza carreggiata anteriore	1285
[mm]	
Larghezza carreggiata posteriore	1330
[mm]	
STEERING	
Raggio minimo di svolta [m]	4.1
ENGINE AND TRANSMISSION	
Motore	Sincrono a magneti permanenti
Potenza nominale [kW]	6.3
Tensione [V]	72
Capacità batteria [Ah]	140
Cambio	Automatico
Trazione	Posteriore

Tabella 3.4.1.1 – Specifiche tecniche del veicolo reale.

Alcuni dati non sono noti e sono approssimati in base alle informazioni ottenute da veicoli simili a quello in questione [8], [9].

Tabella	3.4.1.2 -	Dati ottenuti.
---------	-----------	----------------

Sbalzo posteriore [mm]	507.5
Velocità di rotazione alla	1680
Potenza nominale [rpm]	
Coppia max. [Nm]	50
Misura pneumatici	145/70 R13

Tutti i dati elencati sono stati inseriti nel generatore di Carmaker come mostrato nella figura 3.4.1.1, mentre quelli non menzionati vengono generati dal software in base alla classe del veicolo.

asic Settings Advanced S	ettings		
Generate			
Vehicle Data Set	Small.car		
Vehicle Graphics	Small.tcl		
Vehicle Class	- Vehicle Parameters		
Small Car	Unloaded weight	650.0	kg
Compact Car	Vehicle length	2830.0	mm
Medium Car	Vehicle width	1500.0	mm
C Luxury Car	Vehicle height	1565.0	mm
O Delivery Van	Wheel base	1815.0	mm
C Compact SUV	Track width front	1285.0	mm
C Full Size SUV	Track width rear	1330.0	mm
	Rear overhang	507.5	mm
Tire			

Figura 3.4.1.1 – Impostazioni di base.

Una volta generato il modello del veicolo, Carmaker offre la possibilità di parametrizzare ulteriormente l'auto in ogni singolo componente. I paragrafi seguenti trattano i parametri principali su cui si è lavorato ai fini dell'attività e che sono stati modificati rispetto al modello generato da Carmaker. Infatti, alcuni dei dati tecnici richiedono una profonda conoscenza del veicolo reale.

3.4.2 Corpo vettura

Questa sezione si riferisce al corpo del veicolo. Carmaker consente di scegliere se considerare il veicolo come un corpo rigido o flessibile, e in questo caso il corpo è diviso in due masse collegate da

un giunto rotante con rigidità parametrizzabile. La flessibilità del corpo richiede valori molto precisi di rigidità del veicolo, poiché ha un'alta influenza sui risultati [6]. Ai fini di questa attività è stato sufficiente il modello rigido. Questa sezione consente all'utente di impostare la posizione del baricentro, l'inerzia di massa, la massa sospesa e non sospesa. Poiché le uniche informazioni sul veicolo reale erano la ripartizione dei pesi sugli assali, è stato possibile ottenere la posizione del baricentro del corpo. La sua posizione si riferisce al sistema di coordinate del veicolo mostrato nella figura 3.4.2.2. Il punto blu si riferisce all'origine del sistema di riferimento del veicolo, mentre i punti rossi si riferiscono alla posizione del baricentro della massa sospesa e non sospesa. Gli altri parametri sono stati generati dal software in base ai dati precedentemente impostati nel generatore del veicolo.

		INERZIE_OR	IGINALI_SP	KING_OPT				
nicle Data Set							File 🔻	Cl
cle Body Bodies	Engine Mount	Suspensi	ons Steer	ing Tires E	Brake Power	rain Aerod	ynamics Se	nsors
nicle Body: 👱 Rigio Rigid Vehicle Body —	1							
Override internally	computed vel	hicle body p	roportioning]				
	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	lxx [kgm²]	lyy [kgm²]	Izz [kgm²] 上	·
ehicle Body	1.34	0.0	0.53	551.5	172.66	297.11	300.93	
/ehicle Body B	2.43	0.0	0.6	650.5	235.0	750.0	800.0	
oint A - B	1.434	0.0	0.658					
				Market Market Market				
Stiffness Iode: 🛓 Character	istic Value Rotat	ion X (Torsic	on)	Rotation Y (B	ending)	loint Body	A - Brothy B	
Stiffness Jode: 👱 Character Stiffness [Nm/deg]	istic Value Rotati	ion X (Torsic	on)	Rotation Y (B	ending)	Joint Body	A - Body B	
Stiffness Iode: 煮 Character Stiffness [Nm/deg]	istic Value Rotat 6916 [deg	ion X (Torsic i.8 e Torqu] [Nm	on) e 1	Rotation Y (B 15512.0 Angle To [deg]	ending) orque	Joint Body Bod	A - Body B	
Stiffness Jode: 👱 Character Stiffness [Nm/deg]	istic Value Rotati 6916 [deg 0	ion X (Torsic .8 ie Torqu .0 0	on) e 1	Rotation Y (B 15512.0 Angle Tr [deg] 0.0	ending) orque	Joint Body Bod	A - Body B	
Stiffness Iode: 🛓 Character Stiffness [Nm/deg]	istic Value Rotati 6916 Angli [deg 0	ion X (Torsic .8 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	on) e 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Rotation Y (B 15512.0 Angle To [deg] 0.0 0.5 7 1.0 15	ending) orque	Joint Body Bod	A - Body B y A Rotation X	
Stiffness Iode: 🛓 Character Stiffness [Nm/deg]	istic Value Rotati 6916 Angle [deg 0. 0. 1.	ion X (Torsic .8 P Torqui .0 .5 2500. .0 5000.	on) e 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Rotation Y (B 15512.0 Angle Tr [deg] 0.0 0.5 7 1.0 15	ending) orque [Nm] 0.0 7500.0 5000.0	Joint Body	A - Body B y A Rotation X Rotation Y	Y
Stiffness Node: 🛓 Character Stiffness [Nm/deg] Amplification [-]	istic Value Rotati 6916 Angle [deg 0. 0. 1.	ion X (Torsic .8 ie Torqu 1) [Nm .0 0 .5 2500. .0 5000.	on) e 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Rotation Y (B 15512.0 Angle Tr [deg] 0.0 0.5 7 1.0 15 1.0	ending) orque [Nm] 0.0 7500.0 5000.0 •	Joint Body Bod	A - Body B y A Rotation X Rotation Y	Y
Stiffness Iode: 🔬 Character Stiffness [Nm/deg] umplification [-] Damping	istic Value Rotati 6916 Angl [deg 0 0 1	ion X (Torsic .8 Torqu .0 .0 .0 .0 .0	on) e 1 0 0 0 0 0 0 0 0	Rotation Y (B 15512.0 Angle [deg] 0.0 0.5 7 1.0 15 1.0	ending) orque [Nm] 0.0 7500.0 5000.0 •	Joint Body Bod	A - Body B y A Rotation X Rotation Y y B	Y
Stiffness Iode: 🔬 Character Stiffness [Nm/deg] Stiffness [Nm/deg] Stiffness [Nm/deg] Stiffness [Nms/deg]	istic Value Rotat 6916 Angle [deg 0 0 1 1 345.8	ion X (Torsic .8 Torqu .0 .0 .5 .2500. .0 .0 .0 .0 .0	on) e 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Rotation Y (B 15512.0 Angle Tr [deg] 0.0 0.5 7 1.0 1.0 1.0 775.59	ending) orque [Nm] 0.0 7500.0 5000.0 •	Joint Body Bod	A - Body B y A Rotation X Rotation Y y B x X Y	Ŷ

Figura 3.4.2.1 – Corpo vettura.

ehicle Body Bodie	es Engine Mo	ount Suspe	nsions Ste	ering Tires	Brake Powe	ertrain Aero	odynamics	Senso	rs
Body	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	lxx [kgm²]	lyy [kgm²]	lzz [kgm²]	Þ	
Wheel Carrier FL	2.322	0.639	0.243	5.033	0.031	0.031	0.031	_	^
Wheel Carrier FR	2.322	-0.639	0.243	5.033	0.031	0.031	0.031		
Wheel Carrier RL	0.507	0.659	0.243	12.458	0.062	0.062	0.062		
Wheel Carrier RR	0.507	-0.659	0.243	12.458	0.062	0.062	0.062		
Wheel FL	2.322	0.639	0.243	16.771	0.275	0.551	0.275		
Wheel FR	2.322	-0.639	0.243	16.771	0.275	0.551	0.275		
Wheel RL	0.507	0.659	0.243	14.99	0.267	0.533	0.267		
Wheel PP	0.507	0.650	0.242	44.00	0.007	0 5 2 2	0.067		
Number of Trim Lo	ads:	•0.039 0 . €	0.243	14.99	0.267	0.555	Mot	unting	-1
Number of Trim Lo	ads:	0.039 0.€	z.[m]	14.99	0.267	0.555	Mot	unting	-
Number of Trim Los Position Origin Fr1	x [m]	0.033 0.€ y [m]	z [m]	14.99	0.267	0.555	Mot	unting	~
Number of Trim Los Position Origin Fr1 Aero Marker	x [m]	v [m] 0.0	z [m] 0.0 0.658	z	0.267	0.555	Mor	unting	-
Number of Trim Lo: Position Origin Fr1 Aero Marker Hitch	x [m] 2.83 -0.1	y [m] 0.0 0.0 0.0 0.0	z[m] 0.0 0.658 0.4	z	0.267	0.555	Mor	unting	-
Number of Trim Lo: Position Origin Fr1 Aero Marker Hitch Jack FL	x [m] 0.00 2.83 -0.1 1.958	y [m] 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.639	z[m] 0.0 0.658 0.4 0.243	z	0.267	0.555	Mo	unting	~
Number of Trim Los Position Origin Fr1 Aero Marker Hitch Jack FL Jack FR	x [m] 2.83 -0.1 1.958 1.958	v (m) v (m) 0.0 0.0 0.0 0.639 -0.639	z[m] 0.0 0.658 0.4 0.243 0.243		0.267	0.555	Mot	unting	~
Number of Trim Los Position Origin Fr1 Aero Marker Hitch Jack FL Jack FR Jack RL	x [m] 2.83 -0.1 1.958 1.958 0.872	v [m] 0.0 0.0 0.0 0.0 0.639 -0.639 0.659	z [m] 0.0 0.658 0.4 0.243 0.243 0.243	Z Fri Y	0.267		Mot	unting	-

Figura 3.4.2.2 – Sistema di coordinate del veicolo in Carmaker.

3.4.3 Sospensioni

La sospensione è uno degli elementi del veicolo che influisce maggiormente sul comfort di guida [10]. Per questo motivo, questa attività si è concentrata su due parametri principali che contribuiscono a riprodurre la reale risposta di comfort del veicolo:

- Rigidezza molle
- Smorzamento ammortizzatori

Carmaker consente di definire per ciascun assale (le caratteristiche del singolo elemento sono le stesse per entrambi i lati del veicolo) la rigidità della molla, sia con un semplice coefficiente (modalità Valore caratteristico), se la forza della molla è una funzione lineare della variazione di lunghezza della molla, o in una tabella (modalità Look-Up Table 1D) altrimenti [6]. Allo stesso modo per gli ammortizzatori, se il coefficiente di smorzamento è una funzione lineare della velocità. Le caratteristiche dell'ammortizzatore sono divise in due domini: push (compressione) e pull (estensione); è possibile definire valori di smorzamento diversi anche per ciascun dominio. Il generatore del software crea un set completo di parametri basato su valori comuni per la classe di auto specificata e sulle informazioni impostate. Questo insieme di parametri è stato molto utile per l'attività, poiché questi dati sono stati un riferimento per confrontare le simulazioni coi dati sperimentali ed è stato verificato se i valori fossero equiparabili. In questo modo è stato possibile avere qualche informazione aggiuntiva sui possibili valori di rigidezza e smorzamento del veicolo reale, pur con qualche limite legato ai dettagli dei risultati descritti nei paragrafi successivi.



Figura 3.4.3.1 – Parametri molle.



Figura 3.4.3.2 – Parametri ammortizzatori.

3.4.4 Panoramica sul powertrain

Carmaker include diverse configurazioni di powertrain per simulare non solo veicoli convenzionali alimentati da un motore a combustione interna, ma anche veicoli ibridi ed elettrici come quello analizzato. Lo schema del gruppo propulsore di STEVE consiste in un motore elettrico da 6,3 kW (posto nella parte anteriore del veicolo), alimentato da una batteria a 72 V, che aziona l'asse posteriore attraverso un unico rapporto di riduzione. Il motore non funziona come generatore e quindi non esegue frenate rigenerative.



Figura 3.4.4.1 – Schema del Powertrain.

3.4.5 Sensori

Durante le prove sperimentali, come discusso nel paragrafo 3.1, il sensore ha misurato l'accelerazione verticale sul pavimento del veicolo. Lo scopo dell'attività è stato confrontare i risultati delle simulazioni con quelli sperimentali al fine di ottenere alcuni parametri dinamici del veicolo. Pertanto, le simulazioni devono essere più simili possibile ai test reali in quanto ad impostazione. Carmaker consente l'uso di diversi tipi di sensore. Per un'analisi dinamica del veicolo, il software fornisce un sensore inerziale. Può essere posizionato ovunque sul veicolo per misurare ad esempio l'accelerazione [6]. Quindi, è stato posizionato approssimativamente nello stesso punto del test sperimentale.



Figura 3.4.5.1 - Posizionamento sensore inerziale.

3.4.6 Pneumatici

Carmaker supporta diversi modelli di pneumatici da utilizzare. Quando un veicolo è modellato dal generatore, viene fornito con un set preimpostato di pneumatici. L'utente ne specifica soltanto le misure. Carmaker offre la possibilità di modificare il modello e i parametri degli pneumatici, ma alcuni di questi modelli richiedono un set completo di dati come le caratteristiche di forza longitudinale rispetto allo scorrimento longitudinale, di forza laterale rispetto all'angolo di deriva, la coppia di auto allineamento rispetto all'angolo di deriva o, nel caso del Pacejka Magic Formula, l'insieme di dati empirici necessari per definire il modello. Pertanto, se le informazioni richieste non sono disponibili, Carmaker dispone di uno strumento in grado di generare un set di dati di pneumatici per il veicolo specifico. L'algoritmo si basa sull'approccio del modello di Pacejka e su caratteristiche degli pneumatici definite dall'European Standard Tyre and Rim Technical Organization (in breve ETRTO). Sulla base dell'input dell'utente e dei riferimenti dell'ETRTO, i parametri costruttivi sono determinati analiticamente. Le curve che definiscono la forza dello pneumatico e le caratteristiche di coppia sono generate con l'aiuto delle Pacejka Magic Formula [6]. Il generatore richiede solo pochi parametri di input:

- Tipo di veicolo su cui montare lo pneumatico.
- Misure dello pneumatico.
- Pressione di gonfiaggio.
- Coefficiente di attrito.
- Coefficiente di rigidezza, che è un parametro per scalare la rigidezza di tutte le caratteristiche dello pneumatico (Fx, Fy, Mz).

Gli pneumatici, insieme alle sospensioni, sono uno degli elementi più rilevanti che possono influenzare il comfort di guida.

La pressione degli pneumatici e la rigidità verticale influiscono in modo particolare sul comfort [11]. Poiché le informazioni specifiche sulle caratteristiche degli pneumatici non erano note, in questa attività è stato utilizzato il generatore di Carmaker. Richiede solo informazioni di base sullo pneumatico, come le misure e la pressione di gonfiaggio. Le dimensioni degli pneumatici scelte per l'auto di prova sono tipiche per questa classe di veicoli, così come per la pressione di gonfiaggio che si basa sui valori comuni per i quadricicli leggeri [9]. I parametri degli pneumatici sono riportati nella tabella 3.4.6.1.

Misura	145/70 R13
Pressione gonfiaggio [bar]	1.6
Rigidezza verticale [N/m]	290117

T 1 11	A 4 C 1	a 1.	
l'abella	3.4.6.1	– Scelta	pneumatici.
1 40 0114	2.1.0.1		pinecalitacien

🛚 CarMaker - Tire Data Set: Examples/RT_145_70R13_p1.60_ORIGINALSTIFFNE 🛛 🗌 🛛 🗙				
Tire Data Set Rea	Time Tire File Close			
General Parameters Model Parameters	Scaling Factors Additional Parameters			
Standstill Model Longitudinal force [-] Lateral force [-] Velocity limit [m/s] Relaxation Length Longitudinal force [m] Lateral force [m] Aligning torque [m]	Minematics and Load Force Friction coefficient [-] Kinematic tire radius [m] 0.257602 Nominal tire radius [m] 0.2665 Vertical/radial stiffness [N/m] 290117 Vertical/radial damping [Ns/m] 3001.4			
Rolling Resistance Kind: Torque by Load Factor rolling resistance [-] 0.0 	Inclination Angle Influence Side force offset [N/deg] 0.0 Aligning torque offset [Nm/deg] 0.0 Side slip angle offset [-] 0.0 Turn Slip / Parking Torque Parking torque max. [Nm] 0.0 Torque stiffness [Nm²] 0.0 Torque decline on side slip [-] 0.0			

Figura 3.4.6.1 - Parametri modello pneumatico.

3.5 Parametrizzazione: definizione dello scenario e della strada

Carmaker consente di parametrizzare la strada e costruire reti stradali per la simulazione di veicoli e della guida. Consente di creare la strada utilizzando l'interfaccia software o di importare una rete stradale digitale da Google Earth nel formato kml [6]. Dal momento che sono stati eseguiti alcuni test reali su strada, si è cercato di andare a riprodurre gli stessi percorsi importandoli in Carmaker in formato kml utilizzando Google Earth. Il limite di un percorso definito su Google Earth è che, quando viene esportato, non include il profilo di elevazione. È stato utilizzato uno strumento [12] che consente di aggiungere il profilo altimetrico a un file kml, basato su un'immagine satellitare. Sono stati scelti gli stessi percorsi discussi nel paragrafo 3.1. Il percorso A è caratterizzato da una superficie

stradale più liscia, sostanzialmente asfaltata, mentre il percorso B è irregolare a causa della superficie della pavimentazione ciottolata.



Figura 3.5.1 - Percorso A.



Figura 3.5.2 - Percorso B.

La strada digitale è caratterizzata da un'alta precisione in termini di coordinate geografiche, ma è stato notato che le superfici, in particolare quella asfaltata, non sono una riproduzione molto accurata perché alcune delle normali irregolarità presenti sulla strada reale, come tombini, buche e incrinature, non sono riconosciute. Per questo motivo è stato utilizzato l'editor di Carmaker per riprodurre la strada reale, poiché consente di aggiungere alcune superfici digitali in formato crg che riescono in parte a riprodurre le irregolarità che normalmente influiscono sul comfort di guida del veicolo. Pertanto, per la simulazione, la geometria della strada è stata importata da Google Earth e il profilo altimetrico è stato aggiunto utilizzando lo strumento discusso in precedenza. Poiché la superficie della strada digitale non riproduce esattamente l'eccitazione della strada reale, è stato utilizzato l'editor di Carmaker per aggiungere il profilo digitale in formato crg che è più preciso, soprattutto nei confronti del ciottolato. L'editor offre la possibilità di aggiungere ad esempio una superficie con ciottoli e scanalature sulla superficie asfaltata. Questi due elementi sono stati utilizzati e applicati sulla strada per riprodurre una superficie simile ai due percorsi reali.



Figura 3.5.3 – Visualizzazione dettagliata del ciottolato.



Figura 3.5.4 - scanalature sull'asfalto.

3.6 Parametrizzazione: manovra

In questa sezione viene definita la manovra che il conducente virtuale deve seguire. La manovra specificata cerca di replicare quella eseguita nel test su strada. Consiste nel percorrere la stessa strada a velocità costante e diversa per ogni test. La manovra inizia con il veicolo già alla velocità impostata nelle prove reali e continua fino alla fine del percorso stradale. I movimenti del veicolo durante la simulazione sono completamente controllati da IPGDriver, un guidatore virtuale che mostra un comportamento simile a un essere umano.

🕶 CarMaker - Maneuver	- 🗆 X
Maneuver	Close
No Start Dur Long Lat Label/Description ==== Global Settings / Preparation ==== 0 0.027.5146 19 1 27.5 ==== END ====	Specification of Maneuver Step Label Description End Condition Duration (time/dist) 27.5146 s m
	Longitudinal Dynamics ▲ IPGDriver Speed [km/h] 18.685 ▲ IPGDriver Track Offset [m] 0 ▲ Manual Gear Shifting ▲ Manumatic (optional, overrides global driver parameter)
	Driver Parameter Driver Parameter
•	Minimaneuver Commands
🎦 New 🔄 Copy 🔂 Paste 🔀 Delete 🚔 Import	×

Figura 3.6.1 – Definizione manovra.

3.7 Parametrizzazione: driver

IPGDriver è un conducente virtuale che segue un percorso su una determinata strada. Consente di aggiungere le azioni di controllo di un guidatore umano alla simulazione del veicolo. Queste azioni includono sterzo, frenata, posizione dell'acceleratore, cambio marcia e frizione. CarMaker include due versioni di IPGDriver: Driver parametrizzato dall'utente e Driver da corsa [6]. Il primo modello può eseguire un adattamento del conducente per conoscere automaticamente i limiti del veicolo eseguendo una sequenza prestabilita di manovre. Oltre al driver parametrizzato dall'utente, il Racing Driver consente di ottimizzare i tempi sul giro in funzione della velocità e di eseguire una procedura di adattamento del conducente per trovare automaticamente questi limiti. Le simulazioni di questa attività richiedono solo una velocità bassa e costante, quindi il driver parametrizzato dall'utente è adeguato a tale scopo.



Figura 3.7.1 – Parametri IPGDriver.

3.8 Modello delle sospensioni

Questo paragrafo si concentra sul metodo seguito per verificare se i parametri impostati per le sospensioni, gli elementi che influenzano maggiormente il comfort di marcia del veicolo, sono coerenti con i risultati di modelli teorici usati in fase di progettazione. A causa delle irregolarità del fondo stradale, un veicolo è dotato di sospensioni, il cui scopo è duplice: isolare i passeggeri dalle vibrazioni per un buon comfort e mantenere gli pneumatici a contatto con la strada per un buon handling [10]. La gamma di frequenza considerata nello studio della dinamica del veicolo va da 0.25 a 20-30 Hz. Le frequenze superiori a 20-30 Hz sono associate al rumore, mentre quelle inferiori a 0.25 Hz provengono dalla normale pendenza della strada.

All'interno di questa gamma c'è un sottocampo in cui il contributo delle sospensioni è considerevole piuttosto che le gomme. In effetti, al di sotto dei 3 Hz, gli pneumatici potrebbero essere considerati elementi rigidi e non contribuiscono all'assorbimento delle vibrazioni. Pertanto, l'intervallo di frequenza di interesse per la sospensione è compreso tra 0.25 e 3 Hz [10]. Al fine di migliorare il comfort di guida, se la geometria delle sospensioni è già definita, l'attenzione è rivolta alla rigidezza della molla e allo smorzamento degli ammortizzatori. La variabile più legata al comfort è l'accelerazione verticale della massa sospesa. Infatti, gli organi interni dell'essere umano sono soggetti

a forze inerziali proporzionali all'accelerazione verticale [10]. Il modello utilizzato per calcolare la rigidità e lo smorzamento richiede alcune semplificazioni. Inizialmente, le forze elastiche della molla e le forze di smorzamento sono considerate lineari con lo spostamento e la velocità. Allo stesso modo, la forza verticale dello pneumatico è considerata lineare con il suo schiacciamento.

3.8.1 Modello di veicolo

Il modello del veicolo è un sistema vibrazionale lineare piano, composto da tre corpi rigidi: una massa sospesa m_s con momento di inerzia di beccheggio pari a J_y e due masse non sospese m_{n1} , m_{n2} che rappresentano le masse non sospese dei due assali. Il sistema ha quattro gradi di libertà: due per la massa sospesa e uno per ciascun assale, risultanti dal movimento verticale imposto dalla strada. $z_s(t)$ rappresenta il movimento verticale del baricentro del corpo e $\theta(t)$ la rotazione del corpo attorno all'asse di beccheggio (y).



Figura 3.8.1.1 – Modello di veicolo a quattro gradi di libertà per lo studio delle oscillazioni [9].

3.8.2 Oscillazioni libere per lo studio della rigidezza delle molle

Lo studio delle oscillazioni libere consente di valutare i modi di vibrare del veicolo quando non è soggetto alla forzante trasmessa dalla strada [10]. Un esempio potrebbe essere rappresentato dagli istanti successivi l'attraversamento di una buca sulla strada. Le sospensioni comprendono molle e ammortizzatori. Questi ultimi elementi smorzano l'oscillazione libera, principalmente le alte frequenze. Per questo motivo, non è necessario studiare tutti e quattro i gradi di libertà del sistema. Infatti, il grado associato al movimento degli assali è frenato dagli ammortizzatori. Gli pneumatici possono anche essere considerati rigidi in direzione radiale perché la loro rigidità è ampiamente superiore alla rigidità della molla. Quindi, il modello risultante è un sistema a due gradi di libertà associato al movimento verticale e alla rotazione della massa sospesa. Il vantaggio di questa semplificazione è che le equazioni del moto sono più semplici ed è possibile studiare il sistema con smorzamento proporzionale. Questa caratteristica consente di esprimere la matrice di smorzamento come una combinazione lineare delle matrici di massa e rigidezza. Il vantaggio dello smorzamento

proporzionale è che i modi di vibrazione per il sistema smorzato e non smorzato sono identici. Ciò significa che la forma dei due modi è la stessa e gli autovettori risultanti sono identici, mentre la pulsazione propria del sistema smorzato è leggermente inferiore a causa del coefficiente di smorzamento (la differenza è inferiore al 10%) [10].



Figura 3.8.2.1 – Modello a due gradi di libertà per lo studio delle oscillazioni libere [9].

Le equazioni del moto per il sistema a 2 g.d.l sono:

$$M\ddot{w} + C\dot{w} + Kw = 0 \tag{3.8.2.1}$$

$$\mathbf{w} = (\mathbf{z}_{\mathrm{s}}, \boldsymbol{\theta}) \tag{3.8.2.2}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{\rm s} & 0\\ 0 & J_{\rm y} \end{bmatrix}$$
(3.8.2.3)

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & c_1 a_1 - c_2 a_2 \\ c_1 a_1 - c_2 a_2 & c_1 a_1^2 + c_2 a_2^2 \end{bmatrix}$$
(3.8.2.4)

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & k_1 a_1 - k_2 a_2 \\ k_1 a_1 - k_2 a_2 & k_1 a_1^2 + k_2 a_2^2 \end{bmatrix}$$
(3.8.2.5)

Ciascun modo di vibrare è una rotazione della massa sospesa attorno a un punto fisso, il centro di moto. I due modi sono rotazioni, ma uno solitamente si colloca all'esterno degli assali, viene percepito come un moto traslatorio e per questo viene chiamato modo di scuotimento, mentre il secondo si trova generalmente tra i due assali, è più rotatorio e viene definito modo di beccheggio.



Figura 3.8.2.2 - Modi di vibrare con centro di moto P a distanza d dal centro di gravità [9].

$$x = (d, 1) \tag{3.8.2.6}$$

Per la convenzione di figura 3.8.2.1, se d è positivo, il centro di moto è dietro il C.G, come mostrato nella figura 3.8.2.2, mentre se d è negativo si trova davanti al C.G.

Pertanto, il criterio per la definizione della rigidezza consiste nel fissare criteri per le frequenze naturali e i modi di vibrare. Questi sono noti come criteri di Olley, da uno dei fondatori della moderna dinamica dei veicoli. Queste linee guida sono considerate regole valide anche per le auto moderne [10], [13], [14]:

- Le due frequenze naturali associate a scuotimento e beccheggio devono essere comprese tra 1 e 1.5 Hz.
- Il centro di beccheggio deve essere posizionato vicino al sedile anteriore.
- Le frequenze di beccheggio e scuotimento devono essere simili tra loro: la frequenza di scuotimento dovrebbe essere inferiore a 1.2 volte la frequenza di beccheggio.
- Le sospensioni anteriori dovrebbero avere una rigidezza inferiore del 30% rispetto alle sospensioni posteriori.

Le frequenze di scuotimento e beccheggio dovrebbero rientrare in tale intervallo perché confortevoli per l'essere umano. Il centro di moto di beccheggio deve essere posizionato vicino al sedile anteriore per creare una zona confortevole per i passeggeri, poiché vengono a trovarsi sopra il centro di moto. L'importanza di avere una frequenza naturale inferiore per la sospensione anteriore è razionalizzata dall'osservazione che lo scuotimento del veicolo è meno fastidioso come moto rispetto al beccheggio [13], [14]. Qualsiasi input su strada raggiunge prima la sospensione anteriore e poi, dopo un certo tempo, quella posteriore. Poiché gli input dalla strada sull'auto prima incidono sulle ruote anteriori, il rapporto più alto tra la frequenza posteriore e anteriore tenderà a indurre lo scuotimento. Se si considera un veicolo che incontra un dosso sulla strada, il ritardo, ad una velocità V, tra gli input della strada sulla ruota anteriore e posteriore, dato il passo L, sarà [13], [14]:

$$t = \frac{L}{V} \tag{3.8.2.7}$$

Le oscillazioni nella parte anteriore e posteriore della vettura per un input di questo tipo sono illustrate nella Figura 3.8.2.3. Si noti che subito dopo che le ruote posteriori hanno superato il dosso, il veicolo si trova nella peggiore condizione di beccheggio, indicata dai punti A e B nella figura. Il punto A corrisponde all'estremità anteriore dell'auto che si trova in una posizione massima verso l'alto, mentre
l'estremità posteriore (punto B) sta appena iniziando a muoversi. Pertanto, l'auto sta beccheggiando abbastanza pesantemente.



Figura 3.8.2.3 – Oscillazioni del veicolo sopra un dosso [11].

Con una frequenza posteriore più elevata, dopo circa una oscillazione e mezza delle sospensioni posteriori, entrambe le estremità dell'auto si muovono in fase. Quindi, il corpo ora scuote solo su e giù fino a quando il moto è quasi completamente smorzato.

3.8.3 Procedura dimensionamento rigidezze

Lo scopo del paragrafo è verificare se la rigidezza dei due assali identificata per il modello di veicolo in Carmaker, corrisponda ai criteri di Olley. Il veicolo ha geometrie di sospensione già definite, così come per dimensioni e masse. Le caratteristiche principali da considerare sono:

- m_s: Massa sospesa. •
- m_{s1}: Massa assale anteriore. ٠
- m_{s2}: Massa assale posteriore. •
- J_v: Momento di inerzia di beccheggio. •
- a₁: Distanza dall'assale anteriore al C.G. •
- a2: Distanza dall'assale posteriore al C.G.
- K_1 : Rigidezza assale anteriore. •
- (3.8.3.1)
- K_2 : Rigidezza assale posteriore. $W_f = \frac{m_{tot} \cdot a_2 \cdot g}{\frac{L}{L}}$: Carico verticale assale anteriore. $W_r = \frac{m_{tot} \cdot a_1 \cdot g}{\frac{L}{L}}$: Carico verticale assale posteriore.

•
$$f_f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_f \cdot g}{W_f}}$$
: Frequenza naturale sospensione anteriore. (3.8.3.3)

•
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_r \cdot g}{W_r}}$$
: Frequenza naturale sospensione posteriore. (3.8.3.4)

•
$$\rho = \frac{J_y}{m_s \cdot a_1 a_2}$$
: Indice dinamico. (3.8.3.5)

•
$$\eta = \frac{K_1 \cdot a_1 \cdot a_2}{m_s \cdot a_1 \cdot a_2}$$
: Distribuzione rigidezze. (3.8.3.6)

L'indice dinamico fornisce una misura di quanto la massa del veicolo sia distribuita in relazione alla posizione degli assali [10]. La distribuzione di massa e la posizione degli assali non possono essere

(3.8.3.2)

cambiate solo per la calibrazione della sospensione, poiché dipendono da diversi fattori. Inoltre, i parametri del veicolo in questo caso sono già definiti, quindi l'indice dinamico è considerato come un dato fisso. Il parametro η caratterizza la distribuzione della rigidezza del sistema. Per le moderne autovetture europee, sia ρ che η sono minori dell'unità, di solito vicino al valore di 0.9. La classe del veicolo esanimato e le sue dimensioni, con passo lungo e sbalzo anteriore e posteriore corto, determinano un indice dinamico di 0.67, mentre l'indice η varia con la variazione della rigidezza. La condizione di $\rho \in \eta$ più piccoli dell'unità è molto importante. Se l'indice dinamico e η sono più piccoli dell'unità, il centro di moto di beccheggio si trova tra il C.G e l'assale anteriore, secondo Olley, e la frequenza di scuotimento è leggermente più piccola del beccheggio [10]. ρ < 1 implica che la frequenza di scuotimento è inferiore al beccheggio, mentre $\eta < 1$ posiziona il centro di beccheggio davanti al C.G. Quindi, una condizione da rispettare in caso di variazione della rigidezza degli assali è quella di mantenere l'indice η inferiore all'unità (ρ è fissato). In caso $\rho > 1$ e $\eta < 1$ ci sarebbe uno scambio di posizione tra il centro di moto di beccheggio e scuotimento, con il primo dietro il C.G. La procedura per risolvere le equazioni del moto e ottenere le frequenze e modi di vibrare è stata impostata in Matlab per accelerare la fase di calcolo. La soluzione delle equazioni del moto ha fornito i risultati mostrati nella tabella 3.8.3.1.

<i>m</i> _{s1} [Kg]	255.4
m_{s2} [Kg]	296.1
a_1 [m]	0.9801
<i>a</i> ₂ [m]	0.8349
K_1 [N/m]	20698
$K_2 [N/m]$	26116
$J_y [\text{Kg} \cdot m^2]$	297.11
ρ	0.66
η	0.93
x_{bounce} [m]	8.54
x_{pitch} [m]	-0.06
f_{bounce} [Hz]	1.46
f_{pitch} [Hz]	1.8
W_f [N]	2933.2
W_r [N]	3443.3
f_f [Hz]	1.32
f _r [Hz]	1.37

Tabella 3.8.3.1 – Valori delle rigidezze.

Dove x_{bounce} e x_{pitch} rappresentano la posizione del centro di moto di scuotimento e beccheggio, secondo il modello del veicolo in figura 3.8.2.2. W_f e W_r si riferiscono al carico verticale dell'assale anteriore e posteriore, mentre f_f e f_r le frequenze naturali degli assali anteriore e posteriore. La frequenza del moto di scuotimento appartiene al range definito da Olley, mentre quella di

La frequenza del filoto di scuotimento appartiene al fange definito da Ofley, mentre quena di beccheggio è leggermente più alta, ma questi valori vengono calcolati senza considerare l'effetto di smorzamento che contribuisce a ridurre la frequenza fino ad un massimo del 10% [10]. Inoltre, il centro di moto di beccheggio si trova davanti al C.G e quello di scuotimento dietro l'asse posteriore, che è la migliore configurazione per la posizione dei due centri di moto. Poiché il baricentro è vicino ai sedili, la posizione del centro del beccheggio è vicina alla posizione ottimale. Il rapporto tra frequenza di beccheggio e frequenza di scuotimento è di circa 0,23. Significa che la frequenza di scuotimento è inferiore del 23% rispetto a quella di beccheggio, un valore molto vicino al limite del

20% fissato da Olley. Infine, la rigidezza anteriore è inferiore del 26% rispetto a quella posteriore. L'attività di simulazione è discussa nel paragrafo 3.9.

3.8.4 Oscillazioni forzate per lo studio dello smorzamento

Lo studio delle oscillazioni forzate consente di valutare il comportamento del veicolo che percorre una strada con asperità che si susseguono periodicamente, provocando una forza che, sotto ipotesi di linearità, potrebbe essere considerata armonica [10]. In questo caso, il modello del veicolo utilizzato è un quarter car model. È un modello molto semplificato ma è molto utile per definire i valori di smorzamento. È composto da una massa sospesa m_s , somma della massa sospesa dei due assali e una massa non sospesa, somma delle rispettive masse dei due assali. Un modello è mostrato nella figura 3.8.4.1. Questo sistema ha solo due gradi di libertà: l'oscillazione verticale del corpo e della massa non sospesa. Infatti, per questo modello, la rigidezza verticale dello pneumatico viene aggiunta alla rigidezza dell'assale.



Figura 3.8.4.1 - Quarter car model [9].

Le equazioni del moto sono le seguenti:

$$m_s \cdot \ddot{z} = -c(\dot{z} - \dot{y}) - k(z - y) \tag{3.8.4.1}$$

$$m_n \cdot \ddot{y} = -c(\dot{y} - \dot{z}) - k(y - z) - p(y - h)$$
(3.8.4.2)

Dove

h(t) = HcosΩt
h: eccitazione armonica.
H: ampiezza dell'eccitazione armonica.
Ω: pulsazione.
p: rigidezza verticale pneumatico.

Le soluzioni dettagliate non sono discusse. È importante sottolineare che l'oscillazione libera diventa trascurabile dopo alcuni istanti. Quindi, l'interesse è diretto alla condizione di regime che, nel caso del sistema lineare, ha la caratteristica di avere la stessa pulsazione della forzante [14]. L'integrale particolare ha la seguente formulazione:

$$z(t) = Z\cos(\Omega t + \varphi) \tag{3.8.4.3}$$

$$y(t) = Y\cos(\Omega t + \psi) \tag{3.8.4.4}$$

Dove $\varphi \in \psi$ rappresentano gli angoli di fase. Le soluzioni di regime di interesse sono i rapporti di ampiezza:

 $\frac{Z}{H}$: rapporto tra l'ampiezza di oscillazione della massa sospesa e della forzante.

 $\frac{Y}{H}$: rapporto tra l'ampiezza di oscillazione della massa non sospesa e della forzante.

Lo scopo del paragrafo è stato trovare un criterio per definire il coefficiente di smorzamento c per un buon comfort di marcia attraverso un quarter car model. Come già discusso nei paragrafi precedenti, il dato da considerare per l'analisi del comfort sono l'accelerazione verticale $\omega^2 \cdot Z$ della massa sospesa. Il comfort è l'obiettivo principale, ma anche l'handling deve essere considerato per una buona guida del veicolo. L'handling è influenzato dalla forza di reazione verticale al suolo, il cui rapporto di ampiezza è $\frac{N}{p \cdot H}$. Per l'accelerazione verticale ci sono due casi estremi. Il primo in cui il coefficiente di smorzamento è uguale a zero (ad esempio quando gli ammortizzatori sono scarichi). In questo caso esistono due modi di vibrare, una relativa alla massa sospesa a bassa frequenza e l'altra alla massa non sospesa ad alta frequenza. Alle frequenze naturali c'è una risonanza infinita, una condizione da evitare. Il secondo caso si riferisce al coefficiente di smorzamento c infinito (ad esempio quando gli ammortizzatori sono bloccati). In questa condizione esiste solo un modo di vibrare poiché la sospensione è bloccata. La Figura 3.8.4.2 mostra un esempio empirico [10]. Le curve relative a c = 0 e c uguale ad infinito si intersecano in tre punti. In un caso reale ci sarà sempre il coefficiente c tra 0 e infinito e la curva interseca i tre punti. Questa procedura è valida non solo per $\frac{Z}{H}$, ma anche per $\frac{Y}{H}$ e $\frac{N}{p \cdot H}$. Osservando la figura 3.8.4.2, la migliore condizione è avere un coefficiente di smorzamento uguale a infinito quando la pulsazione è compresa tra zero e il punto A e tra B e C, mentre zero negli altri casi. Tuttavia, questo è impossibile da fare. Pertanto, è necessario un compromesso per il coefficiente c, in modo da avere un'accelerazione verticale del corpo bassa nell'intero intervallo di pulsazioni. Come mostrato nella figura 3.8.4.2, un compromesso ottimale è avere la curva di accelerazione con una tangente orizzontale nel punto A. Quindi, il valore c ottimale è:

$$c_{ott} = \sqrt{\frac{m_s \cdot k}{2}} \sqrt{\frac{p + 2k}{p}}$$
(3.8.4.5)



Figura 3.8.4.2 – Andamento dell'accelerazione verticale del corpo del veicolo (il veicolo di esempio ha le seguenti caratteristiche: m_s =1000 kg, m_n =100 kg, k = 70 kN/m, p = 560 kN/m) [9].

Poiché la rigidezza degli pneumatici è molto più elevata di quella delle sospensioni, se considerati rigidi, il sistema ad un grado di libertà ha un coefficiente di smorzamento critico $c_{cr} = 2\sqrt{m_s \cdot k}$ e il fattore di smorzamento $\xi = \frac{c_{ott}}{c_{cr}}$. Per un buon comfort di guida, il fattore ξ dovrebbe essere tra 0.3 e 0.35 [10].

Poiché nel paragrafo precedente è stata calcolata la rigidezza ottimale, è possibile definire un primo valore approssimativo per il coefficiente di smorzamento. Il valore risultante dal calcolo è valido per l'intero veicolo. Il valore per ogni ammortizzatore viene definito dopo le simulazioni e confrontando i risultati con il test sperimentale. Quindi è stato verificato se questi valori fossero simili a quello che si otterrebbe seguendo il criterio del c_{ott} . Innanzitutto, per avere un valore di confronto adeguato a ogni ammortizzatore, è stato adottato il metodo di smorzamento proporzionale, piuttosto che semplicemente dividere il c_{ott} in quattro coefficienti identici. La procedura è mostrata nella tabella 3.8.4.1. Consiste in un coefficiente proporzionale β tra il coefficiente di smorzamento ottimale e i valori di rigidezza trovati nello studio dei paragrafi precedenti. Quindi il coefficiente di smorzamento di ciascun assale è il risultato del prodotto tra β e il rispettivo valore di rigidezza dell'assale. Nel dimensionamento sia della molla che degli ammortizzatori è stato considerato un comportamento lineare delle forze elastiche e di smorzamento. Nel caso reale ci sono diverse cause di non linearità che potrebbero influenzare il comportamento della sospensione. Per un veicolo, la forza elastica può essere considerata con un'ottima approssimazione lineare con lo schiacciamento, mentre il coefficiente di smorzamento in compressione è molto più basso del coefficiente in estensione e questo genera non linearità [10]. Quando un veicolo passa su un cordolo, la ruota deve seguirne il profilo senza opposizione, quindi l'ammortizzatore in compressione deve essere meno smorzato. Al contrario, quando il veicolo attraversa una buca sulla strada, la ruota deve tornare rapidamente in posizione e per questo motivo l'ammortizzatore deve essere più smorzato. Il coefficiente di smorzamento in estensione può anche essere doppio o triplo del coefficiente in compressione [10]. I valori mostrati nella tabella 3.8.4.1 si riferiscono ai valori finali. Il valore medio tra compressione ed estensione di ciascun assale, sommato, fornisce un valore totale inferiore del 16% rispetto all'ottimale calcolato dal quarter car model.

c_{ott} [Ns/m]	3464
c_{cr} [Ns/m]	9473
ξ	0.36
$\beta = \frac{c_{ott}}{k}$	0.085
$c_1 = k_1 \cdot \frac{c_{ott}}{k} \left[\text{Ns/m} \right]$	1533
$c_2 = k_2 \cdot \frac{c_{ott}}{k} [\text{Ns/m}]$	1930
C_{1wheel} [Ns/m]	766.5
c _{2wheel} [Ns/m]	965
c _{1wheel push} [Ns/m]	380.59
$c_{1wheel pull}$ [Ns/m]	1044.3
C _{1mean} [Ns/m]	712.4
C _{2wheel push} [Ns/m]	466.12
C _{2wheel pull} [Ns/m]	1092.2
c _{2mean} [Ns/m]	780
c_{tot} [Ns/m]	2984.8
ξ	0.31

Tabella 3.8.4.1 – Coefficienti di smorzamento risultanti dai valori di rigidezza.

Come precedentemente riportato, la scelta del coefficiente di smorzamento dovrebbe considerare il comfort di guida, ma anche le prestazioni di handling. Nella figura 3.8.4.3 è mostrato l'andamento della forza verticale rispetto alla pulsazione usando lo stesso coefficiente di smorzamento dell'analisi di comfort nella figura 3.8.4.2. È possibile notare che la curva del c_{ott} non è la migliore per l'handling, poiché l'ampiezza è maggiore per la pulsazione appartenente al secondo modo di vibrare. Infatti, per una buona maneggevolezza, la forza verticale dovrebbe rimanere vicino al valore costante della forza peso e non essere influenzata dalle oscillazioni indotte dalla ruvidità della strada [10].

Per un handling ottimale, il coefficiente di smorzamento dovrebbe essere 2 volte lo smorzamento ottimale, a spese però del comfort di guida. Pertanto, è necessario un valore di compromesso. Il coefficiente di smorzamento ottimale non dipende dalla massa non sospesa. Questo è importante, ad esempio, se le gomme vengono cambiate. Tuttavia, la massa non sospesa influenza l'accelerazione verticale del sistema. Come mostrato nella figura 3.8.4.4, masse non sospese più piccole portano ad un'accelerazione verticale più uniforme, come desiderato per un comfort ottimale.



Figura 3.8.4.3 – Andamento reazione verticale al terreno [9].



Figure 3.8.4.4 – Andamento dell'accelerazione verticale del corpo vettura variando la massa non sospesa [10].

3.9 Simulazioni e post processamento

Una volta parametrizzati tutti i moduli del TestRun, è possibile riprodurre le simulazioni e raccogliere i risultati. Carmaker consente di guardare un'animazione dell'avanzamento della simulazione tramite IPGMovie. Al termine della simulazione, i risultati vengono salvati e post elaborati. Poiché Carmaker offre la possibilità di esportare i risultati della simulazione in Matlab, i dati vengono post processati al suo interno.



Figura 3.9.1 – Simulazione Online in IPGMovie.

3.9.1 Post processamento

I dati raccolti durante le simulazioni sono stati post elaborati in Matlab per tracciare e confrontare i risultati delle simulazioni con quelli sperimentali. Carmaker, prima di salvare i risultati delle simulazioni, consente di scegliere il tipo di dati che possono essere post elaborati. L'elenco delle quantità accessibili all'utente contiene tutti i tipi di variabili relative alla dinamica del veicolo [15], quali velocità, accelerazioni, forze, ecc. Ai fini dell'attività sono stati scelti i dati indicati nella tabella 3.9.1.1. La variabile più importante studiata è l'accelerazione verticale misurata dal sensore inerziale sul pavimento del veicolo nel dominio della frequenza perché, come già accennato, l'accelerazione verticale influisce principalmente sul comfort. Gli organi interni dei passeggeri sono soggetti a forze inerziali direttamente proporzionali all'ampiezza dell'accelerazione verticale, mentre i loro spostamenti relativi sono influenzati dalle frequenze di eccitazione [10].

Tabella 3.9.1.1 – Dati analizzati	[15].
-----------------------------------	-------

CARMAKER NAMING	MEANING
Sensor_Inertial_IN00_Acc_B_z [m/s ²]	Accelerazione verticale del corpo misurata
	dal sensore inerziale.
Sensor_Inertial_IN00_Vel_B_x	Velocità longitudinale del corpo misurata dal
	sensore inerziale.

3.9.2 Grafici

In questo paragrafo viene mostrato il confronto tra i risultati dei test sperimentali e le simulazioni. Ogni test si riferisce alla diversa velocità con cui è stato eseguito. Il titolo indica la velocità letta sul tachimetro del veicolo durante la prova su strada, anche se le simulazioni in Carmaker e i risultati sperimentali si riferiscono alla velocità reale misurata dal sensore. Per ogni prova è tracciata una figura. Essa mostra l'accelerazione verticale nel dominio della frequenza. I dati sperimentali sono stati acquisiti nel tempo, quindi è stata necessaria una conversione dal dominio del tempo a quello della frequenza [16]. Nel passaggio dal dominio del tempo al dominio della frequenza è stata utilizzata la trasformata di Fourier. La trasformata di Fourier (3.9.2.2) consente a qualsiasi funzione non periodica di essere interpretata come una funzione periodica con periodo T_0 tendente all'infinito [16]. Il punto di partenza risiede nella serie di Fourier (3.9.2.1) che consente di approssimare una funzione periodica mediante una somma di armoniche:

$$F_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} f(t) e^{-ik\Omega_0 t} dt$$
(3.9.2.1)

$$F(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\Omega t}dt$$
(3.9.2.2)

con Ω_0 la pulsazione.

Il passaggio dal dominio del tempo al dominio della frequenza consiste nella capacità di evidenziare quante e quali armoniche la funzione contiene e quali ampiezze di oscillazione possiede. In pratica, la trasformazione divide la funzione in molte armoniche a frequenze diverse, indicando il loro contenuto di frequenza, chiamato spettro.

Nel caso in esame, non è stato operato su una funzione ma su segnali campionati a una certa frequenza di campionamento f_s . La frequenza di campionamento dei test sperimentali era pari a 4096 Hz. Carmaker consente di estrarre i dati con una frequenza di campionamento compresa tra un minimo di 1 Hz e un massimo di 1000 Hz. La scelta della frequenza è stata fatta seguendo il teorema di Shannon [16], secondo il quale la f_s deve essere almeno il doppio della frequenza massima del segnale. Ciò consente di non perdere informazioni sui segnali fino alla massima frequenza. Poiché l'interesse era nell'intervallo di frequenze compreso tra 0 e 100 Hz, è stata impostata una frequenza di campionamento di 200 Hz in Carmaker. L'applicazione diretta della trasformata di Fourier richiede funzioni f (t) estese da $-\infty$ a $+\infty$. Ciò non è possibile in quanto si è sempre operato per un tempo limitato e, come nel caso in questione, non su una funzione ma su una serie finita di campioni disponibili $f_k = f(k\Delta t)$, con Δt periodo di campionamento and k = 0, ..., N-1 [16]. Dove N indica il numero di punti disponibili. Per questi motivi, non avendo un dominio infinito, non è possibile usare la trasformata di Fourier e quindi è necessaria la serie. Questa presuppone che la sequenza di punti f_k è periodica di N. A questo punto, il valore generico t diventa $k\Delta t$, f(t) diventa f_k , il periodo T_0 diventa N Δt , la pulsazione Ω_0 diventa $2\pi/N\Delta t$, dt diventa Δt . Alla fine si ottiene:

$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}}$$
(3.9.2.3)

che è l'espressione della trasformata discreta di Fourier (DFT) che consente di calcolare il contenuto di frequenza di un insieme di campioni di una funzione dipendente dal tempo. I coefficienti F_k forniscono il contenuto di frequenza. La risoluzione della frequenza, ovvero la distanza che separa sull'asse della frequenza il valore F_k dal successivo, è uguale a $\Delta f_0 = \Omega_0/2\pi$ $2 = f_s/N$ [16]. DFT richiede un tempo di calcolo proporzionale a N^2 . Nel1965, Cooley e Tukey presentarono un algoritmo più veloce per l'implementazione del DFT, che ha richiesto un tempo di calcolo proporzionale a $\frac{N}{2} \log_2 N$. Nacque la Fast Fourier Transfor (FFT). L'unico limite dell'algoritmo è la necessità di operare su un numero di punti N che sia una potenza intera di 2. Poiché questo non è sempre soddisfatto, viene eseguita un'operazione di zero padding, che consiste nell'inserimento, alla fine della serie di punti, di una sequenza di zeri per ottenere una potenza di 2 [16]. Il limite della trasformata di Fourier è che si basa sul calcolo dei coefficienti della serie di Fourier. Di conseguenza è implicito che i segnali siano periodici. Ove non è così, la fft fornisce dei valori plausibili ma errati [16]. Andando ad alterare la periodicità si introduce una variazione della funzione, soprattutto sulla rappresentazione in frequenza del segnale in quanto si dà origine ad un contenuto in frequenza più ampio di quanto non si abbia in realtà. Questo errore prende il nome di leakage [16]. Per limitarne l'effetto, prima del

calcolo della fft, si va incontro ad una operazione di finestratura. La serie di campioni viene moltiplicata per una finestra allo scopo di limitare l'eventuale discontinuità della storia temporale introducendo una periodicità laddove non sia presente. Il tutto senza andare a modificare troppo il contenuto in frequenza del segnale. Per limitare il leakage è necessario utilizzare finestre che, per imporre la periodicità al segnale, lo modificano riducendone l'ampiezza nei suoi tratti iniziale e finale. Ciò implica che vengano trascurate parte delle informazioni che contengono i campioni iniziali e finali di ogni realizzazione. Per evitare questa perdita non si fa coincidere il campione iniziale della realizzazione con quello finale della precedente, ma si trasla all'indietro nel tempo l'inizio della nuova realizzazione [16]. Il tempo per il quale due realizzazioni successive si sovrappongono è detto overlap [16], spesso definito come percentuale della durata T del segnale acquisito. Una volta definito l'overlap su ciascuna finestra viene eseguita la fft e infine viene effettuata una media per ottenere il segnale finale in dominio frequenza. Questa procedura è stata implementata in Matlab attraverso l'uso di una funzione. Questa richiede come dati di input il segnale originale in dominio tempo, il vettore tempo, la risoluzione (non è nient'altro che l'inverso della durata t di ciascuna finestra in cui viene suddivisa la storia temporale completa T), l'overlap, il tipo di media da effettuare alla fine, lineare od energetica e se effettuare una fft o una psd (power spctral density) del segnale. In output vengono forniti il segnale in frequenza e il vettore delle frequenze. Qui di seguito, in tabella 3.9.2.1, vengono riportati I parametri utilizzati per la conversione dei segnali accelerometrici in dominio frequenza utilizzando la suddetta funzione:

Tabella 3.9.2.1 - Parametri funzione fft

Risoluzione [Hz]	0.5
Overlap	0.9
Media	Energetica
Trasformazione	FFT

A titolo informativo viene riportato il codice utilizzato per richiamare la funzione in Matlab.

[a_f,f,~,~] = FastFourierTransform(a_t,t,0.5,0.9,2,'FFT');

Dove:

a_f: segnale in output (in frequenza).
f: dominio in frequenza.
a_t: segnale in input (nel tempo).
t: vettore tempo.
0.5 indica la risoluzione.
0.9 indica l'Overlap.
2 indica che la media è energetica.
FFT il tipo di trasformazione adottato.

La funzione quindi opera come descritto, suddividendo il segnale in finestre di risoluzione pari a 0.5 Hz, sovrapposte secondo l'overlap specificato. Ciascuna finestra viene filtrata e su ciascuna viene applicata la fft. Infine, viene effettuata la media delle fft e restituito il segnale in output.

Una volta terminata la conversione, è stato possibile tracciare i risultati. Per ogni test viene mostrato il diagramma del confronto tra l'ampiezza della simulazione sperimentale e numerica.

3.10 Superficie ciottolata

3.10.1 Test 10 km/h



Figura 3.10.1.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il test eseguito a 10 km / h è quello che mostra la deviazione più significativa tra i valori sperimentali e numerici. Nella figura 3.10.1.1 è possibile notare che il picco di risonanza del test sperimentale è a circa 6 Hz, mentre quello numerico è spostato su frequenze più basse, intorno a 1.5-2 Hz. Dopo il picco, sia il caso sperimentale che il numerico mostrano un andamento discendente, con il segnale numerico che resta su valori di ampiezza più bassi, soprattutto tra i 20 e 50 Hz.



Figura 3.10.1.2 – Confronto tra velocità longitudinale risultante dall' acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

La figura 3.10.1.2 mostra il confronto della velocità tra test sperimentale e numerico. È possibile notare che i valori medi sono sostanzialmente gli stessi e che le oscillazioni attorno alla media sono molto limitate, in particolare nel caso sperimentale.



3.10.2 Test 20 km/h

Figura 3.10.2.1– Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Nel test a 20 km/h il picco di ampiezza sia della simulazione sperimentale che numerica è esattamente a 2 Hz e le ampiezze sono molto vicine. Dopo il picco il segnale numerico mostra un profilo discendente fino ai 10 Hz quando ricompare un picco intorno ai 13 Hz. Dopodiché il profilo si stabilizza fino ai 100 Hz. Il segnale sperimentale, dopo il primo picco ha un andamento discendente, ma rimane stabile fino ai 20 Hz su valori di ampiezze maggior rispetto al caso sperimentale e prossimi al picco di risonanza. Come nel caso numerico, successivamente il profilo si stabilizza, ma su valori di ampiezza maggiore.



Figura 3.10.2.2 – Confronto tra velocità longitudinale risultante dall' acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Nella figura 3.10.2.2 è possibile notare che anche in questo caso, sperimentale e numerico hanno sostanzialmente gli stessi valori di velocità, con poca oscillazione attorno al valore medio.



3.10.3 Test 30 km/h

Figura 3.10.3.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il test a 30 km/h replica i risultati del precedente. La simulazione sperimentale e numerica mostra un picco di ampiezza intorno a 2,5 e 3 Hz con sostanzialmente lo stesso valore. Come nel precedente

test il profilo numerico decresce e intorno ai 18 Hz mostra un secondo picco di ampiezza inferiore. Dopodiché sia il profilo numerico che sperimentale si stabilizzano, con l'ampiezza del profilo sperimentale maggiore del numerico.



3.10.4 Test 40 km/h

Figura 3.10.4.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Anche il test a 40 km/h ha un andamento molto simile ai precedenti, con il primo picco tra 3 e 3.5 Hz, uguale in ampiezza. Fino agli 8 Hz i due profili sono molto simili. Oltre, il profilo numerico decresce come nei precedenti test, mostrando un picco verso i 23-24 Hz. In seguito, entrambi i profili si stabilizzano. L'ampiezza del test numerico è sempre minore ma la differenza rispetto ai test precedenti è meno marcata.



Figura 3.10.4.2 - Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica in dominio tempo a 40 km/h.



3.10.5 Conclusioni test su ciottolato

Figura 3.10.5.1 – Confronto a velocità crescente tra l'ampiezza risultante dai test sperimentali e dalle simulazioni numeriche.

È possibile trarre alcune conclusioni generali dei test effettuati sulla superficie ciottolata. Per quanto riguarda la figura dell'ampiezza, è possibile notare che i risultati della simulazione si adattano bene al trend sperimentale nell'intervallo tra 0 e 5 Hz in cui vi è un primo picco. Dopo il primo picco, l'andamento del segnale numerico decresce, mentre quello sperimentale rimane generalmente più alto fino a 20 Hz. Negli ultimi due test il profilo numerico si adatta a quello sperimentale nell'intervallo

tra 20 e 30 Hz, mentre nei primi due rimane generalmente spostato su valori più bassi fino a 100 Hz. Dopo i 30 Hz, la simulazione numerica è traslata verso valori più bassi di ampiezza. Ciò è probabilmente dovuto alla strada digitale, che non è la perfetta riproduzione della controparte reale e quindi non ha le stesse frequenze di eccitazione, in particolare sopra i 30 Hz (mentre in basso è molto vicino a quella reale), oltre a possibili differenze nei valori relativi a rigidezza e smorzamento delle sospensioni. Come discusso nel paragrafo 3.8, la gamma di frequenza considerata nello studio della dinamica del veicolo va da 0.25 a 20-30 Hz. Le frequenze superiori a 20-30 Hz sono associate al rumore, mentre quelle inferiori a 0.25 Hz provengono dalla normale pendenza della strada. All'interno di questo intervallo le frequenze di interesse per la sospensione sono comprese tra 0.25 e 3 Hz. È stato verificato che, variando la rigidezza e lo smorzamento delle sospensioni del veicolo, si ha variazione solo sul primo picco di ampiezza che si trova esattamente nell'intervallo di interesse per le sospensioni. La diversa tendenza alle frequenze più alte è dovuta quindi principalmente al limite della riproduzione del fondo stradale. Quindi, il modello del veicolo potrebbe essere considerato con una buona approssimazione vicino alla controparte reale. L'aumento della velocità ha lo stesso effetto sull'accelerazione di cui al paragrafo 3.2.5. Nella figura 3.10.5.1 è possibile notare che i valori di ampiezza sono maggiori all'aumentare della velocità. Inoltre, il trend dell'ampiezza alla velocità di 10 e 20 km/h non mostra un picco più alto a basse frequenze e una tendenza discendente a frequenze più alte, ma è più regolare. È possibile inoltre notare che al crescere della velocità il picco si sposta verso frequenze più alte, anche se rimangono sempre nel range tra 0 e 5 Hz.

3.11 Superficie asfaltata



3.11.1 Test 10 km/h

Figura 3.11.1.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il test sperimentale mostra un picco di ampiezza intorno a 5 Hz. La simulazione numerica mostra un picco ma a frequenza più bassa, circa 4 Hz e inferiore in valore assoluto. Dai 5 Hz il trend sperimentale e numerico scendono a un valore approssimativamente costante, con l'ampiezza numerica che è inferiore.



Figura 3.11.1.2 – Confronto tra velocità longitudinale risultante dall' acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il profilo di velocità della simulazione sperimentale e numerica è sostanzialmente lo stesso, con la velocità costante durante il test.





Figura 3.11.2.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il test a 20 km/h mostra un picco che, sia per il test sperimentale che numerico, si estende tra i 2 e gli 8 Hz, con quello numerico di ampiezza inferiore in valore assoluto. L'andamento diventa decrescente dopo gli 8 Hz per poi stabilizzarsi.



3.11.3 Test 30 km/h

Figura 3.11.3.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Il test a 30 km/h evidenzia un andamento del caso numerico simile ai precedenti, con un picco intorno ai 9.5 Hz. Dai 13 Hz l'ampiezza discende fino a stabilizzarsi. Il test sperimentale mostra invece un picco intorno ai 4.5 Hz di ampiezza elevate, probabilmente dovuto alle differenze descritte nel paragrafo 3.2.5. Dopodiché anch'esso decresce e si stabilizza. A differenza dei test precedenti l'ampiezza dopo i 20 Hz dei due test risulta molto simile.

3.11.4 Test 40 km/h



Figura 3.11.4.1 – Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica.

Anche il test a 40 km/h mostra un andamento del test sperimentale più ripetibile. Infatti, si evidenzia un picco intorno ai 12.5 Hz e successivamente andamento decrescente fino ad un valore stabile alle alte frequenze. Il test sperimentale invece mostra un picco intorno ai 6 Hz per poi decrescere e stabilizzarsi. In questo caso l'ampiezza alle alte frequenze torna ad essere leggermente più alta del caso numerico.



Figura 3.11.4.2 - Confronto tra l'accelerazione verticale risultante dall'acquisizione sperimentale e dalla simulazione numerica in dominio tempo a 40 km/h.

3.11.5 Conclusioni test su asfalto



Figura 3.11.5.1 - Confronto a velocità crescente tra l'ampiezza risultante dai test sperimentali e dalle simulazioni numeriche.

Come discusso nel paragrafo 3.2.5, la prova su superficie asfaltata è meno riproducibile a causa di piccole differenze sulle strade asfaltate su cui sono stati condotti i test. Ad esempio, il picco di ampiezza a 30 km/h è molto più alto degli altri casi. La simulazione numerica è più riproducibile. Generalmente ha un andamento simile a quello sperimentale ma con ampiezze traslate su valori inferiori. Così come alle alte frequenze. In figura 3.11.5.1 è possibile notare come l'andamento della prova sperimentale sia più costante. All'aumentare della velocità il picco si sposta verso frequenze più alte e su valori di ampiezza maggiore. I test sperimentali mostrano un andamento simile, ma con i picchi che invece sono più casuali. Per esempio, l'ampiezza del picco a 30 km/h è decisamente maggiore di quello a 40 km/h oppure quello a 10 km/h che è maggiore di quello a 20 km/h e spostato su frequenze più alte. Dopo i 20 Hz invece il profilo risulta più costante, con stesso andamento e ampiezze crescenti al crescere della velocità. Quindi in conclusione la superficie asfaltata è quella che mostra maggiori criticità nel confronto numerico sperimentale.

Infine, in figura 3.11.5.1 viene mostrato un confronto tra segnale numerico su asfalto e su ciottolato, per il test a 20 km/h. Idem per la figura 3.11.5.2 ma a 40 km/h. Dal confronto è possibile notare come il picco del segnale su ciottolato sia decisamente maggiore di quello su asfalto e spostato verso frequenze leggermente più basse. Alle frequenze superiori a 30/40 Hz entrambi i segnali si stabilizzano su valori di ampiezza molto bassi e simili in modulo, a dimostrazione che quelle frequenze appartengono al rumore dovuto alla strada.



Figura 3.11.5.2 – Confronto asfalto ciottolato risultati numerici test a 20 km/h.



Figura 3.11.5.3 - Confronto asfalto ciottolato risultati numerici test a 40 km/h.

3.12 Conclusioni e possibili sviluppi

Si possono trarre alcune conclusioni generali su questo capitolo finale. Carmaker è un software eccellente per eseguire simulazioni nel valutare la dinamica del veicolo. In questa attività è stata analizzata principalmente la dinamica verticale al fine di concentrarsi sul comfort di marcia del veicolo. La teoria e i criteri adottati sono molto utili per gettare le basi e verificare la coerenza dei parametri impostati per le sospensioni e gli pneumatici con il comportamento reale del veicolo. Il testrun offre una buona rappresentazione della risposta del veicolo su ciascuna superficie analizzata, in particolare sulla superficie ciottolata. Il limite risiede principalmente nel modello di strada digitale

che non presenta un profilo stradale perfettamente uguale a quello reale. Per quanto riguarda il veicolo, anche se il modello virtuale non è esattamente la controparte di quello reale, a causa della mancanza di informazioni e di semplificazioni, riproduce bene il comportamento di questa classe di veicoli dal momento che i risultati numerici sono simili a quelli sperimentali, pur con qualche differenza descritta nei paragrafi precedenti. Pertanto, i parametri di sospensione possono essere utilizzati come riferimento per future simulazioni. Per aumentare la precisione dei risultati, è sicuramente necessario disporre di una riproduzione maggiormente dettagliata del profilo stradale, in modo da avere eccitazioni uguali a quelle reali. In questo modo le variazioni tra numerico e sperimentale sarebbero dovute solo al modello del veicolo e sarebbe più semplice andare a trovare valori più precisi di rigidezze e smorzamenti.

Referenze

- [1] <u>http://www.steve-project.eu/index.php/en/resources/deliverables</u>
- [2] <u>http://www.steve-project.eu/index.php/en/</u>
- [3] <u>https://www.sbai.uniroma1.it/sites/default/files/Mugello_Descrizione%20Analisi%20Dati.pdf</u>
- [4] Kistler S-Motion-DTI-002-860e-03.19 manuals
- [5] KiCenter_002-609e-09.18 manual
- [6] Carmaker User's guide
- [7] https://saemobilus.sae.org/content/2020-01-1086
- [8] <u>https://www.aixam-mega.it/it/e-city/premium#fiche-technique</u>
- [9] https://www.aixam.com/ressources/pages/sav/aixam-user-manual.pdf
- [10] Massimo Guiggiani, Dinamica del veicolo.
- [11] Wuwei Chen, Hansong Xiao, Qidong Wang, Linfeng Zhao, Maofei Zhu, *Integrated vehicle dynamics and control.*
- [12] https://www.gpsvisualizer.com/
- [13] Thomas D. Gillespie, Fundamentals of vehicle dynamics.
- [14] http://164.100.133.129:81/econtent/Uploads/VDHS-
- 9%20Bounce%20and%20Pitch%20Motions.pdf
- [15] Carmaker Reference manual
- [16] A.Fasana-S.Marchesiello, Meccanica delle vibrazioni