

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale



## **Analisi del comportamento direzionale di un veicolo a partire da misure effettuate con smartphone**

**Relatori:**

Prof. Stefano MAURO

Prof. Stefano PASTORELLI

Prof. Enrico GALVAGNO

**Candidato:**  
Simone PELUSO

Luglio 2020



*Alla mia famiglia,  
unico porto sicuro*

# INDICE

Sommario.....	1
Abstract .....	3
1. Introduzione .....	5
1.1. Inertial Measurement Unit (IMU).....	7
1.2. Sensori della piattaforma inerziale e grandezze in gioco .....	8
1.2.1. Accelerometro .....	10
1.2.2. Giroscopio.....	12
1.2.3. GPS.....	14
1.2.4. Videocamera.....	17
1.3. Sistemi di riferimento .....	18
2. Struttura app.....	21
2.1. Passaggio dal sistema di riferimento smartphone a quello veicolo.....	23
2.1.1. Calibrazione .....	25
2.1.2. Parametri baricentro veicolo .....	26
2.2. Stima dell'angolo volante .....	30
2.2.1. Difetti del sistema .....	31
2.3. Stima dell'angolo di assetto.....	34
3. Modelli di veicolo .....	37
3.1. Modello cinematico .....	38
3.2. Modello monotraccia lineare .....	40
4. Test su pista .....	45
4.1. Analisi <i>Handling</i> .....	46
4.1.1. Steering pad.....	47
4.1.2. Ramp steer.....	48
4.1.3. Accelerazione ad angolo volante fisso .....	48
4.1.4. ISO lane change .....	49
4.1.5. Sweep sine manoeuvre.....	49
4.1.6. Colpo di sterzo.....	50
4.2. Circuito di Balocco.....	51
4.3. Manovre analizzate.....	54

4.4.	Caratteristiche veicolo .....	56
5.	Sincronizzazione dati .....	58
5.1.	Frequenza di ricampionamento .....	59
5.2.	Filtraggio segnale smartphone .....	62
5.3.	Ricerca frequenza di ricampionamento ottimale .....	63
5.3.1.	Fasatura segnali .....	64
5.4.	Ricampionamento e confronto .....	65
5.5.	Valutazione processo di ricerca della frequenza di ricampionamento ..	69
5.5.1.	Risultati prove di <i>steering pad</i> .....	70
5.5.2.	Risultati prove di <i>ramp steer</i> .....	71
5.5.3.	Risultati prove di <i>colpo di sterzo</i> .....	72
5.5.4.	Risultati prove di <i>sweep steer</i> .....	73
6.	Confronto analisi Handling .....	74
6.1.	Prove analizzate .....	75
6.2.	Ramp steer .....	76
6.2.1.	Traiettoria manovre .....	77
6.2.2.	Caratteristiche di sottosterzo .....	79
6.2.3.	Caratteristiche di assetto .....	83
6.2.4.	Coefficienti di sottosterzo e assetto .....	86
6.2.5.	Angoli di deriva .....	88
6.2.6.	Forze laterali .....	98
6.2.7.	Analisi confronto .....	105
6.3.	Colpo di sterzo .....	106
6.3.1.	Traiettoria manovre .....	107
6.3.2.	Andamento temporale accelerazione laterale .....	109
6.3.3.	Andamento temporale velocità di imbardata .....	110
6.3.4.	Andamento temporale angolo di sterzo .....	111
6.3.5.	Andamento temporale angolo di assetto .....	112
6.3.6.	Confronto <i>smart vs prof</i> .....	113
6.3.7.	Overshoot della risposta di imbardata .....	116
6.3.8.	Analisi confronto .....	119
6.4.	Sweep steer .....	120
6.4.1.	Risposta in frequenza $a_y/\delta$ .....	123

6.4.2.	Risposta in frequenza $\beta/\delta$ .....	126
6.4.3.	Risposta in frequenza $\psi'/\delta$ .....	129
6.4.4.	Analisi confronto .....	132
7.	Valutazione parametri extra .....	133
7.1.	Steering pad .....	134
7.2.	Ramp steer .....	136
7.3.	Colpo di sterzo .....	139
7.4.	Sweep steer .....	142
8.	Conclusioni e sviluppi futuri .....	147
9.	Bibliografia .....	149

# INDICE FIGURE

Figura 1.1 Una delle schermate principali dell'app .....	6
Figura 1.2 Schema di identificazione dei parametri .....	9
Figura 1.3 Definizione cinematica dell'angolo di assetto $\beta$ .....	10
Figura 1.4 Schema di identificazione delle accelerazioni di una massa .....	10
Figura 1.5 Classificazione accelerometri .....	12
Figura 1.6 Classificazione giroscopi .....	13
Figura 1.7 Sistema di trilaterazione alla base del posizionamento satellitare .....	15
Figura 1.8 Sistemi di riferimento veicolo .....	19
Figura 1.9 Sistema di riferimento smartphone .....	20
Figura 1.10 Posizione relativa dei sistemi di riferimento .....	20
Figura 2.1 Schema di funzionamento app .....	21
Figura 2.2 Sistema in esame.....	27
Figura 2.3 Schermata app per l'individuazione dei marker .....	31
Figura 2.4 Combinazione ottimale dei marker sul volante .....	33
Figura 2.5 Esempio montaggio smartphone sul finestrino lato guidatore.....	33
Figura 2.6 Schema del modello di veicolo monotraccia.....	34
Figura 2.7 Schema semplificato dell' algoritmo di stima dell'angolo di assetto ....	36
Figura 3.1 Modello monotraccia lineare o a bicicletta .....	40
Figura 4.1 Centro Sperimentale Balocco – Vista aerea.....	51
Figura 4.2 Centro Sperimentale Balocco - Mappa tracciati .....	53
Figura 5.1 Grafici ricampionamento misure smartphone .....	60
Figura 5.2 Ricampionamento segnali accelerazione laterale colpo di sterzo.....	66
Figura 5.3 Ricampionamento segnali velocità di imbardata colpo di sterzo.....	66
Figura 5.4 Ricampionamento segnali angolo di sterzo colpo di sterzo .....	66
Figura 5.5 Ricampionamento segnali accelerazione laterale ramp steer.....	67
Figura 5.6 Ricampionamento segnali velocità di imbardata ramp steer .....	67
Figura 5.7 Ricampionamento segnali angolo di sterzo ramp steer.....	67
Figura 5.8 Ricampionamento segnali accelerazione laterale sweep steer .....	68
Figura 5.9 Ricampionamento segnali velocità di imbardata sweep steer .....	68
Figura 5.10 Ricampionamento segnali angolo di sterzo sweep steer.....	68

<b>Figura 6.1 Traiettorie Test 03 - ramp steer</b> .....	<b>78</b>
<b>Figura 6.2 Traiettorie Test 08 - ramp steer</b> .....	<b>78</b>
<b>Figura 6.3 Caratteristica di sottosterzo ramp steer – prof</b> .....	<b>81</b>
<b>Figura 6.4 Caratteristica di sottosterzo ramp steer – smart</b> .....	<b>81</b>
<b>Figura 6.5 Confronto caratteristiche di sottosterzo Test 03</b> .....	<b>82</b>
<b>Figura 6.6 Caratteristica di assetto ramp steer – prof</b> .....	<b>84</b>
<b>Figura 6.7 Caratteristica di assetto ramp steer – smart</b> .....	<b>84</b>
<b>Figura 6.8 Confronto caratteristiche di assetto Test 03</b> .....	<b>85</b>
<b>Figura 6.9 Gradiente di sottosterzo in funzione di <math>a_y</math> ramp steer – prof</b> .....	<b>87</b>
<b>Figura 6.10 Gradiente di sottosterzo in funzione di <math>a_y</math> ramp steer – smart</b> .....	<b>87</b>
<b>Figura 6.11 Angolo di deriva anteriore in funzione del tempo – prof</b> .....	<b>89</b>
<b>Figura 6.12 Angolo di deriva anteriore in funzione del tempo – smart</b> .....	<b>89</b>
<b>Figura 6.13 Angolo di deriva posteriore in funzione del tempo – prof</b> .....	<b>90</b>
<b>Figura 6.14 Angolo di deriva posteriore in funzione del tempo – smart</b> .....	<b>90</b>
<b>Figura 6.15 Angolo di deriva anteriore in funzione di <math>a_y</math> – prof</b> .....	<b>91</b>
<b>Figura 6.16 Angolo di deriva anteriore in funzione di <math>a_y</math> – smart</b> .....	<b>91</b>
<b>Figura 6.17 Angolo di deriva posteriore in funzione di <math>a_y</math> – prof</b> .....	<b>92</b>
<b>Figura 6.18 Angolo di deriva posteriore in funzione di <math>a_y</math> – smart</b> .....	<b>92</b>
<b>Figura 6.19 Confronto angoli di deriva Test 03 – prof</b> .....	<b>93</b>
<b>Figura 6.20 Confronto angoli di deriva Test 03 – smart</b> .....	<b>93</b>
<b>Figura 6.21 Confronto angoli di deriva Test 08 – prof</b> .....	<b>94</b>
<b>Figura 6.22 Confronto angoli di deriva Test 08 – smart</b> .....	<b>94</b>
<b>Figura 6.23 Confronto angolo di deriva anteriore in funzione di <math>t</math> Test</b> .....	<b>95</b>
<b>Figura 6.24 Confronto angolo di deriva posteriore in funzione di <math>t</math> Test 03</b> .....	<b>96</b>
<b>Figura 6.25 Confronto angolo di deriva anteriore in funzione di <math>a_y</math> Test 03</b> .....	<b>96</b>
<b>Figura 6.26 Confronto angolo di deriva posteriore in funzione di <math>a_y</math> Test 03</b> .....	<b>97</b>
<b>Figura 6.27 Forza laterale anteriore – prof</b> .....	<b>99</b>
<b>Figura 6.28 Forza laterale anteriore – smart</b> .....	<b>99</b>
<b>Figura 6.29 Forza laterale posteriore – prof</b> .....	<b>100</b>
<b>Figura 6.30 Forza laterale posteriore – smart</b> .....	<b>100</b>
<b>Figura 6.31 Confronto forze laterali Test 03 – prof</b> .....	<b>101</b>
<b>Figura 6.32 Confronto forze laterali Test 03 – smart</b> .....	<b>101</b>
<b>Figura 6.33 Confronto forze laterali Test 08 – prof</b> .....	<b>102</b>

<b>Figure 6.34 Confronto forze laterali Test 08 – smart .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 6.35 Confronto forza laterale anteriore Test 03 .....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 6.36 Confronto forza laterale posteriore Test 03 .....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 6.37 Traiettoria Test 52 - colpo di sterzo.....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 6.38 Traiettoria Test 52 - colpo di sterzo.....</b>	<b>108</b>
<b>Figure 6.39 Confronto accelerazione laterale colpi di sterzo - prof .....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 6.40 Confronto accelerazione laterale colpi di sterzo - smart.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 6.41 Confronto velocità di imbardata colpi di sterzo - prof.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 6.42 Confronto velocità di imbardata colpi di sterzo - smart.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 6.43 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo - prof.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 6.44 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo - smart .....</b>	<b>111</b>
<b>Figura 6.45 Confronto angolo di assetto colpi di sterzo - prof.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 6.46 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo – smart.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 6.47 Confronto accelerazione laterale Test 52 .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 6.48 Confronto velocità di imbardata Test 52.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 6.49 Confronto angolo di sterzo Test 52 .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 6.50 Confronto angolo di assetto Test 52.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 6.51 Valutazione overshoot imbardata Test 52 - prof.....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 6.52 Valutazione overshoot imbardata Test 52 - smart .....</b>	<b>117</b>
<b>Figura 6.53 Valutazione overshoot imbardata Test 56 - prof.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 6.54 Valutazione overshoot imbardata Test 56 - smart .....</b>	<b>118</b>
<b>Figure 6.55 Andamento temporale angolo volante Test 08.....</b>	<b>121</b>
<b>Figure 6.56 Andamento temporale angolo volante Test 23 .....</b>	<b>121</b>
<b>Figure 6.57 Andamento temporale angolo volante Test 28.....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 6.58 Risposta in frequenza <math>a_y/\delta</math> sweep steer - prof.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 6.59 Fase <math>a_y/\delta</math> sweep steer - prof.....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 6.60 Risposta in frequenza <math>a_y/\delta</math> sweep steer - smart.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 6.61 Fase <math>a_y/\delta</math> sweep steer – smart.....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 6.62 Coerenza risposta in frequenza <math>a_y/\delta</math> sweep steer .....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 6.63 Risposta in frequenza <math>\beta/\delta</math> sweep steer - prof.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 6.64 Fase <math>\beta/\delta</math> sweep steer - prof.....</b>	<b>126</b>
<b>Figura 6.65 Risposta in frequenza <math>\beta/\delta</math> sweep steer - smart.....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 6.66 Fase <math>\beta/\delta</math> sweep steer – smart .....</b>	<b>127</b>

Figura 6.67 Coerenza risposta in frequenza $\beta/\delta$ sweep steer .....	128
Figura 6.68 Risposta in frequenza $\psi'/\delta$ sweep steer - prof.....	129
Figura 6.69 Fase $\psi'/\delta$ sweep steer - prof.....	129
Figura 6.70 Risposta in frequenza $\psi'/\delta$ sweep steer - smart.....	130
Figura 6.71 Fase $\psi'/\delta$ sweep steer - smart .....	130
Figura 6.72 Coerenza risposta in frequenza $\psi'/\delta$ sweep steer .....	131
Figure 7.1 Coppia erogata dal motore in funzione di t (steering pad) .....	134
Figure 7.2 Posizione pedale acceleratore in funzione di t (steering pad) .....	134
Figure 7.3 Coppia volante in funzione di t (steering pad) .....	135
Figure 7.4 Coppia volante in funzione di $a_y$ (steering pad) .....	135
Figure 7.5 Coppia erogata dal motore in funzione di t (ramp steer).....	136
Figure 7.6 Posizione pedale acceleratore in funzione di t (ramp steer).....	136
Figure 7.7 Coppia volante in funzione di t (ramp steer).....	137
Figure 7.8 Coppia volante in funzione di $a_y$ (ramp steer).....	137
Figure 7.9 Coppia volante in funzione dell'angolo di sterzo (ramp steer) .....	138
Figure 7.10 Coppia erogata dal motore in funzione di t (colpo di sterzo).....	139
Figure 7.11 Posizione pedale acceleratore in funzione di t (colpo di sterzo) .....	139
Figure 7.12 Coppia volante in funzione di t (colpo di sterzo) .....	140
Figure 7.13 Coppia volante in funzione di $a_y$ (colpo di sterzo).....	140
Figure 7.14 Coppia volante in funzione dell'angolo di sterzo (colpo di sterzo) ..	141
Figure 7.15 Coppia erogata dal motore in funzione di t (sweep steer).....	142
Figure 7.16 Posizione pedale acceleratore in funzione di t (sweep steer).....	142
Figure 7.17 Coppia volante in funzione di t (sweep steer).....	143
Figure 7.18 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 08 (sweep steer) .	144
Figure 7.19 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 23 (sweep steer) .	145
Figure 7.20 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 28 (sweep steer) .	146

# INDICE TABELLE

<b>Tabella 4.1 Riepilogo manovre analizzate .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabella 4.2 Dati veicolo: generale.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabella 4.3 Dati veicolo: sterzo .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabella 4.4 Dati veicolo: sospensioni.....</b>	<b>56</b>
<b>Tabella 4.5 Dati veicolo: motore .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabella 4.6 Dati veicolo: trazione e cambio .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabella 4.7 Dati veicolo: pneumatici .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabella 4.8 Dati veicolo: distribuzione pesi .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabella 5.1 Frequenze di campionamento reali .....</b>	<b>59</b>
<b>Tabella 5.2 Frequenze di ricampionamento prove di steering pad .....</b>	<b>70</b>
<b>Tabella 5.3 Filtro Butterworth prove di steering pad.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabella 5.4 Frequenze di ricampionamento prove di ramp steer.....</b>	<b>71</b>
<b>Tabella 5.5 Filtro Butterworth prove di ramp steer .....</b>	<b>71</b>
<b>Tabella 5.6 Frequenze di ricampionamento prove di colpo di sterzo .....</b>	<b>72</b>
<b>Tabella 5.7 Filtro Butterworth prove di colpo di sterzo.....</b>	<b>72</b>
<b>Tabella 5.8 Frequenze di ricampionamento prove di sweep steer.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabella 5.9 Filtro Butterworth prove di sweep steer .....</b>	<b>73</b>
<b>Tabella 6.1 Caratteristiche nominali prove analizzate.....</b>	<b>75</b>
<b>Tabella 6.3 Sintesi parametri di analisi manovre ramp steer .....</b>	<b>86</b>
<b>Tabella 6.4 Sintesi parametri di analisi manovre colpo di sterzo .....</b>	<b>119</b>
<b>Tabella 6.5 Ampiezza nominale angolo volante prove di sweep steer.....</b>	<b>120</b>
<b>Tabella 6.6 Input risposte in frequenza sweep steer .....</b>	<b>122</b>

# Sommario

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito dell'analisi del comportamento direzionale di un veicolo attraverso l'utilizzo di una piattaforma inerziale composta da sensori autonomi, non collegati al CAN bus della vettura.

Lo scopo principale è quello di ottenere una stima dei parametri di sintesi della dinamica del veicolo sfruttando i sensori presenti all'interno di un comune smartphone, in cui è stato implementato un opportuno algoritmo (tramite la creazione di un'app) precedentemente sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Politecnico di Torino.

I risultati ottenuti sono poi stati confrontati e valutati sulla base della stessa analisi effettuata utilizzando una strumentazione sensoristica professionale, parallelamente installata a bordo del veicolo di prova durante alcune sessioni di test in pista.

Nei primi capitoli verranno illustrate la struttura dell'app, le caratteristiche dei sensori presenti sullo smartphone e il modello monotraccia lineare alla base dell'algoritmo implementato.

Successivamente, verranno descritte le manovre standard realizzate durante le sessioni di test in pista sul circuito di Balocco (VC), insieme alle caratteristiche del veicolo e della strumentazione sensoristica professionali utilizzati.

Si passerà poi alla sincronizzazione dei segnali provenienti dallo smartphone e dalla strumentazione sensoristica professionale, punto di partenza per l'analisi e il confronto tra le due analisi sul comportamento direzionale del veicolo.

Infine, verranno spiegate le relative conclusioni tratte sulla validità del sistema sperimentale studiato e i possibili sviluppi futuri.

# Abstract

The present work is related to the analysis of the directional behavior of a vehicle with an acquisition system completely external to the vehicle.

The main purpose is to obtain an estimate of the summary parameters of the vehicle dynamics using the sensors present in a common smartphone, in which an appropriate algorithm (through the creation of an app) previously developed at the Department of Mechanical Engineering of the Politecnico di Torino.

Then, the results were compared with the same analysis performed using a professional sensor equipment, installed on board the vehicle during all test sessions on track.

The first chapters will illustrate the structure of the app, the characteristics of the smartphone sensors and the linear single-track model underlying the implemented algorithm.

Then, the standard maneuvers carried out during the track test sessions at Balocco circuit will be described, together with the characteristics of the vehicle and the professional sensor equipment used.

It has proceeded with the synchronization of the signals coming from smartphone and professional sensor equipment, before starting the analysis and comparison between both vehicle handling analyzes.

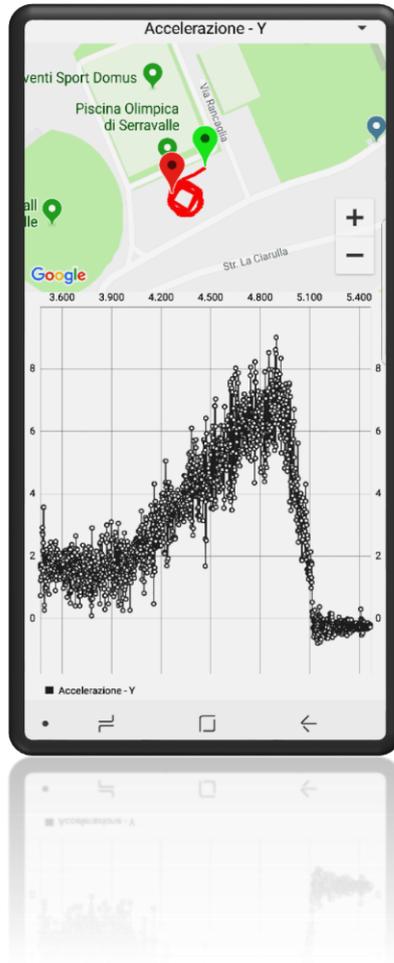
In the end, it explains the relative conclusions drawn on the validity of the experimental system studied and possible future developments.

# 1. Introduzione

Negli ultimi anni la tecnologia relativa alla sensoristica applicata al veicolo è andata incontro a notevoli sviluppi. In particolare, le piattaforme inerziali (IMU) composte da vari sensori con differenti funzionalità, hanno subito un'evoluzione molto rapida, permettendo una stima affidabile dei parametri che descrivono il comportamento direzionale di un veicolo.

La conoscenza e l'analisi di tali grandezze ha permesso di conseguire importanti miglioramenti delle prestazioni sia nell'ambito della sicurezza sia in quello dell'*handling* del veicolo. La maggior parte dei sistemi di controllo della stabilità del veicolo che intervengono in condizioni di aderenza precaria o durante un imprevisto sono stati sviluppati e perfezionati proprio grazie all'incremento delle performance delle piattaforme inerziali e dei sensori (sia a livello hardware che software) di cui viene equipaggiato un veicolo stradale. Allo stesso modo, è stato possibile migliorare l'utilizzo degli organi meccanici della vettura (differenziale, trazione integrale dinamica, erogazione del motore) per diversi fini imposti dall'utilizzatore (sicurezza, sportivo, economico...).

Parallelamente, ha subito un deciso sviluppo anche tutta la tecnologia relativa agli smartphone, inclusa la sua sensoristica. Alla luce di ciò, è stato quindi possibile sviluppare una applicazione che trasformasse lo smartphone in una vera e propria piattaforma inerziale *low-cost* indipendente dalla rete CAN bus del veicolo.



**Figura 1.1** Una delle schermate principali dell'app

## **1.1. Inertial Measurement Unit (IMU)**

Con sistema di navigazione inerziale (INS – Inertial Navigation System) si indica l'insieme delle tecniche in grado di raccogliere ed elaborare i dati misurati da uno o più sensori inerziali, calcolando alcuni o tutti gli stati della navigazione del mezzo su cui tali sensori sono montati.

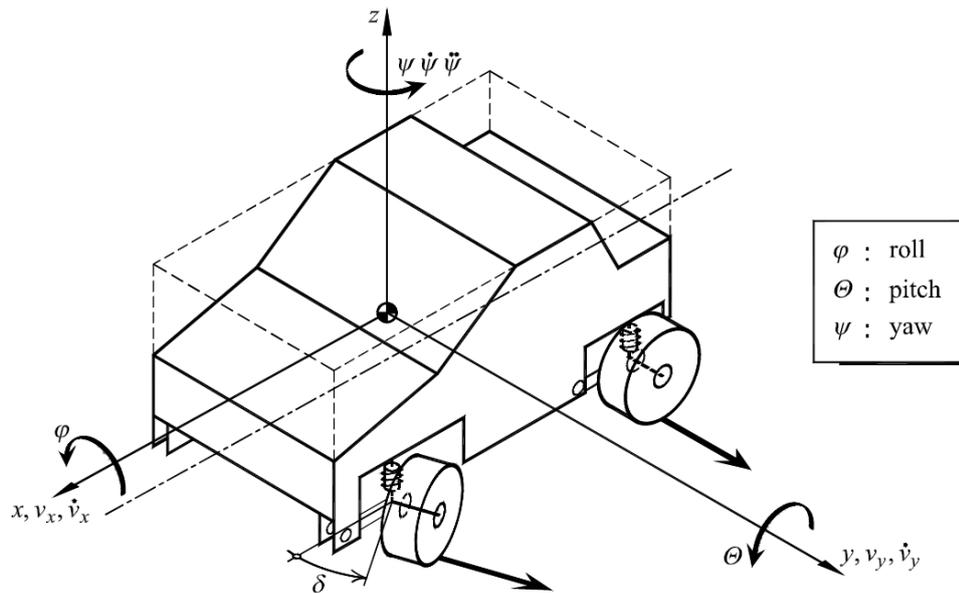
Un sensore inerziale è uno strumento in grado di misurare grandezze fisiche (generalmente, accelerazioni e velocità angolari, ma anche campi magnetici) rispetto ad un sistema di riferimento inerziale, in modo indipendente da altri sensori e senza la necessità di riferimenti esterni o dispositivi di radiocomunicazione. Un insieme di sensori inerziali racchiusi in un'unica piattaforma viene detta unità di misura inerziale (IMU – Inertial Measurement Unit).

Generalmente la configurazione di sensori inerziali contenuta all'interno di una IMU, progettata per scopi di navigazione o rilevazione dinamica, è costituita da una terna di giroscopi e una di accelerometri, mentre nel nostro caso sono stati aggiunti un sensore GPS (per la rilevazione di coordinate spaziali e velocità assoluta) e una fotocamera per la misurazione dell'angolo volante.

## 1.2. Sensori della piattaforma inerziale e grandezze in gioco

Per valutare la dinamica del veicolo, l'applicazione fa uso dei seguenti sensori presenti in ogni smartphone di ultima generazione:

- Giroscopio, che rileva:
  - $\dot{\psi}$ : velocità di imbardata;
  - $\dot{\phi}$ : velocità di rollio;
  - $\dot{\theta}$ : velocità di beccheggio;
- Accelerometro, che misura:
  - $a_x$ : accelerazione longitudinale;
  - $a_y$ : accelerazione laterale;
  - $a_z$ : accelerazione verticale;
- GPS, che misura:
  - Coordinate spaziali;
  - $V$ : Velocità assoluta;
- Videocamera:
  - $\delta_v$ : angolo volante.



**Figura 1.2 Schema di identificazione dei parametri**

Attraverso le misure dei parametri precedentemente evidenziati è possibile stimare l'angolo di assetto  $\beta$ , ossia l'angolo tra la direzione longitudinale della vettura ( $x$ ) e la direzione della velocità assoluta  $V$  in corrispondenza del baricentro del veicolo stesso. L'angolo di assetto è una grandezza di particolare importanza perché fornisce informazioni sulla stabilità del veicolo durante la sterzata, ma la sua misurazione diretta richiede l'utilizzo di strumenti dispendiosi non presenti nella dotazione standard.

In tal senso, quindi, la stima dell'angolo di assetto tramite una piattaforma inerziale rappresenta una valida soluzione alternativa per trarre importanti indicazioni sulla stabilità di un veicolo.

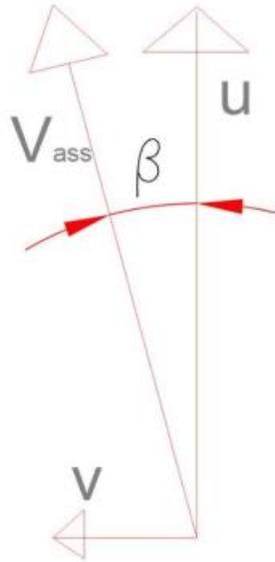


Figura 1.3 Definizione cinematica dell'angolo di assetto  $\beta$

### 1.2.1. Accelerometro

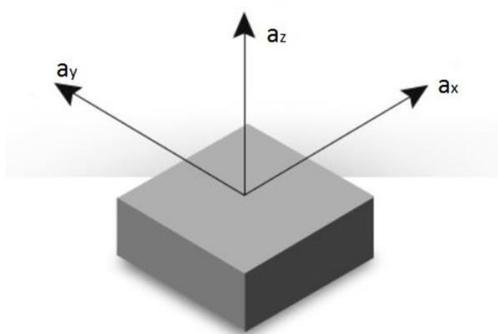


Figura 1.4 Schema di identificazione delle accelerazioni di una massa

Un accelerometro è uno strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione. Con il moltiplicarsi delle applicazioni, sono accresciute anche le tipologie di questi strumenti, ognuno con caratteristiche funzionali e costruttive differenti. Nella maggior

parte degli accelerometri, il principio è il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad

un'accelerazione. La massa viene di solito sospesa grazie ad un apparato elastico, mentre un sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo, tale struttura rappresenta il sistema inerziale per l'accelerometro ma non per il sistema di navigazione e/o controllo del movimento.

In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile.

Di seguito è riportata una classificazione degli accelerometri in base al principio di funzionamento:

- Accelerometri estensimetrici;
- Accelerometri piezoresistivi;
- Accelerometri LVDT;
- Accelerometri capacitivi;
- Accelerometri piezoelettrici;
- Accelerometri laser;
- Gravitometri;
- Accelerometri MEMS.

In campo *automotive*, per quanto concerne l'impiego in una piattaforma inerziale, è prevalentemente utilizzata la tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical System).

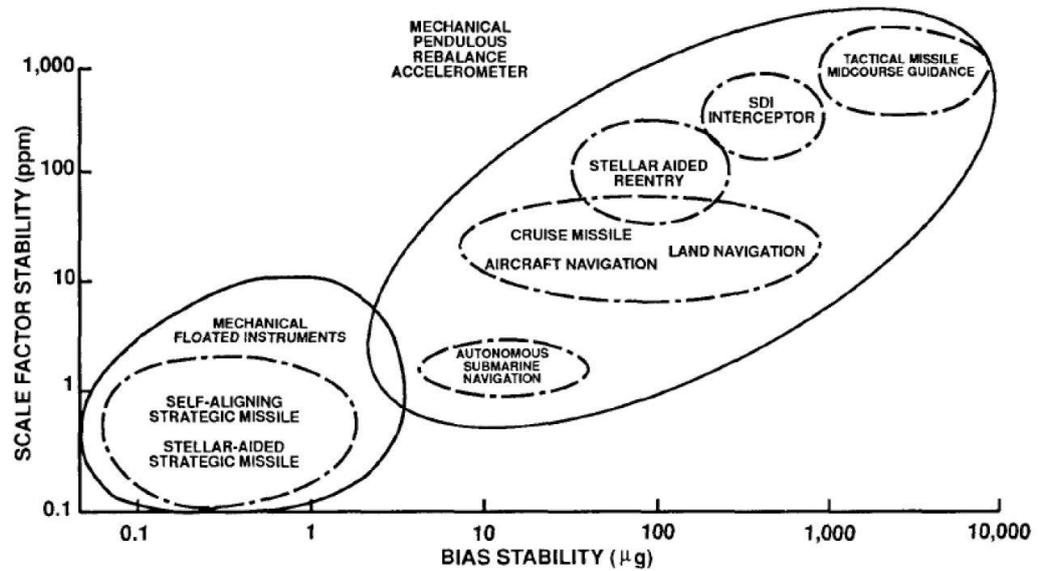


Figura 1.5 Classificazione accelerometri

## 1.2.2. Giroscopio

Il giroscopio è un dispositivo utilizzato per rilevare la velocità angolare di un corpo in uno spazio inerziale. Esistono diversi principi fisici che possono essere alla base del funzionamento di questi strumenti di misurazione e che ne danno una prima classificazione:

- Giroscopi meccanici;
- Giroscopi laser;
- Giroscopi ottici;
- Giroscopi MEMS.

Come per gli accelerometri, negli ultimi anni i giroscopi micro elettromeccanici hanno raggiunto un'ampia diffusione e vengono prevalentemente utilizzati nelle applicazioni di interfaccia uomo-macchina, nei sistemi di navigazione portatili, nella stabilizzazione delle immagini (fotocamere, videocamere, cellulari) e nelle console di gioco.

I limiti legati al loro utilizzo nell'ambito della localizzazione sono gli errori cumulativi nel tempo dovuti a: sensibilità a variazioni di temperatura, disallineamento di montaggio, usura e rumore.

Per questi motivi, non è opportuno utilizzare direttamente il segnale per ricavarne (per integrazione) gli angoli nel tempo, ma conviene elaborarli con degli algoritmi di filtraggio.

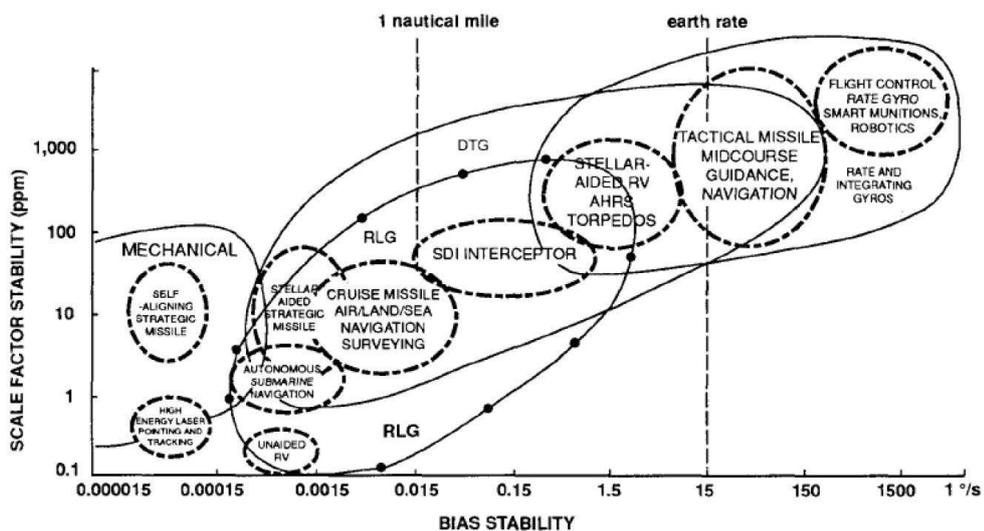


Figura 1.6 Classificazione giroscopi

### **1.2.3. GPS**

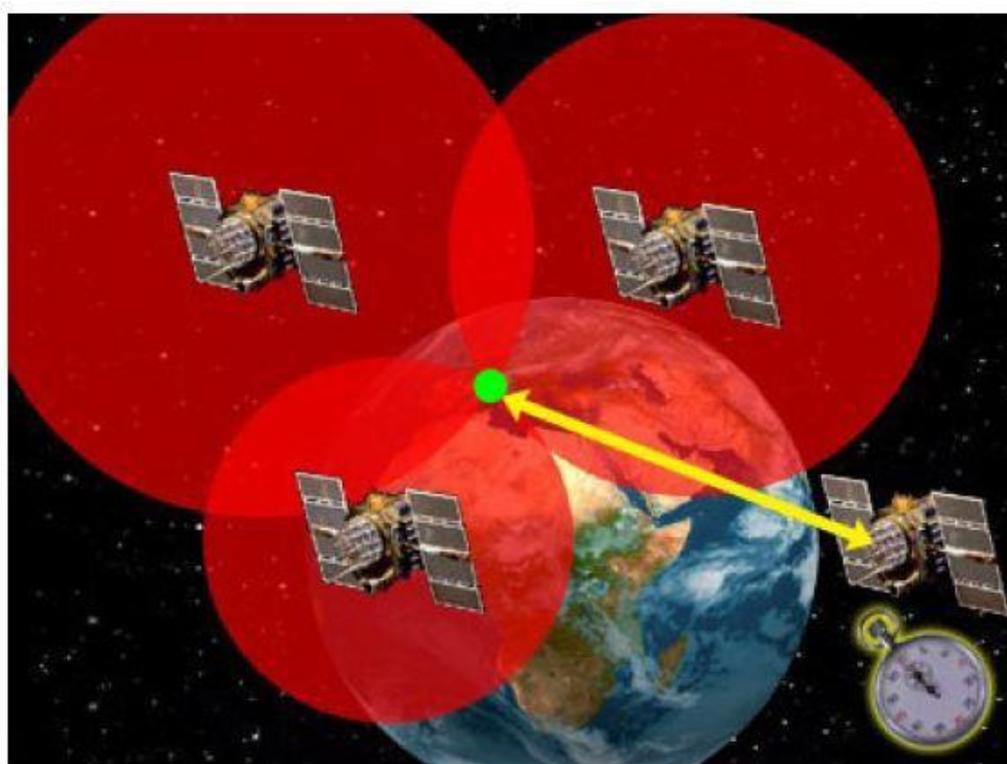
Il sistema GNSS (Global Navigation Satellite System) più conosciuto è indubbiamente il NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System), che rappresenta la pietra miliare del posizionamento satellitare. Dal 1984, accanto al servizio di posizionamento di precisione PPS (Precise Positioning Service) destinato alle sole applicazioni militari, tale sistema è stato per la prima volta reso disponibile anche all'utenza civile.

I satelliti compiono due orbite complete in un giorno siderale (sono quindi non-geostazionari) e sono in grado di fornire, 24 ore su 24, la posizione planimetrica ed altimetrica di un qualunque punto della superficie del pianeta, sia immobile sia in movimento. Il tracciamento dei satelliti comprende tutte quelle operazioni atte a determinare i parametri dell'orbita. A ciò provvedono quattro stazioni principali, dette di tracciamento, e un centro di calcolo. Ogni volta che ciascun satellite nel suo moto orbitale sorvola le stazioni di tracciamento, esse ne registrano i dati doppler che vengono avviati al centro di calcolo e qui valorizzati per la determinazione dei parametri orbitali.

I parametri orbitali di ciascun satellite, determinati presso il centro di calcolo, sono riuniti in un messaggio inoltrato al satellite interessato mediante una delle stazioni di soccorrimento. Il satellite registra i parametri ricevuti nella sua memoria e li re-irradia agli utenti.

Il principio di funzionamento del ricevitore GPS si basa su un metodo di posizionamento sferico, che consiste nel misurare il tempo impiegato da

un segnale radio a percorrere la distanza satellite-ricevitore. Conoscendo il tempo impiegato dal segnale per giungere al ricevitore e l'esatta posizione di almeno tre satelliti per avere una posizione bidimensionale, e quattro per avere una posizione tridimensionale, è possibile determinare la posizione nello spazio del ricevitore stesso. Tale procedimento, chiamato *trilaterazione*, utilizza solo informazioni di distanza ed è simile alla triangolazione, dal quale tuttavia si differenzia per il fatto di fare a meno di informazioni riguardanti gli angoli.



**Figura 1.7 Sistema di trilaterazione alla base del posizionamento satellitare (il quarto satellite viene impiegato per risolvere l'incognita legata all'asincronismo temporale satellite-ricevitore)**

La costellazione di satelliti GPS al momento attuale è, oltre che la più diffusa per applicazioni mass-market, anche l'unica pienamente operativa su scala globale. Attualmente è costituita da 32 satelliti, disposti su sei

piani orbitali, ciascuno dei quali è inclinato di  $55^\circ$  rispetto al piano equatoriale. Tutti i satelliti operativi trasmettono sulle stesse tre bande di frequenza, denominate rispettivamente L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) ed L5 (1176.45 MHz).

L'identificazione del segnale in ricezione avviene per mezzo della tecnica CDMA (Code Division Multiple Access), in cui la componente di segnale trasmessa dal ricevitore viene moltiplicata per un codice opportuno. Poiché la maggior parte della ricerca scientifica sul posizionamento satellitare è ancora indirizzata al sistema GPS, ne consegue che il sistema GPS può garantire una maggiore affidabilità, oltre ad un maggior controllo sulla stessa. Per tale motivo, questo sistema di fatto costituisce lo standard per il posizionamento satellitare, a punto tale che alcuni autori impiegano ancora oggi il termine GPS per indicare in termini generali il posizionamento satellitare.

L'orientamento tramite segnale GPS ha il grande vantaggio di fornire un riferimento di posizione assoluto. Gli svantaggi che però ne precludono l'utilizzo in ambienti chiusi sono diversi:

- incertezza della posizione (legata al numero di satelliti visibili e all'angolazione);
- ricezione bassa o assente in ambienti chiusi;
- tempi di start-up;
- riflessione dei segnali sugli edifici;
- impossibilità di rilevare rotazioni in modo assoluto.

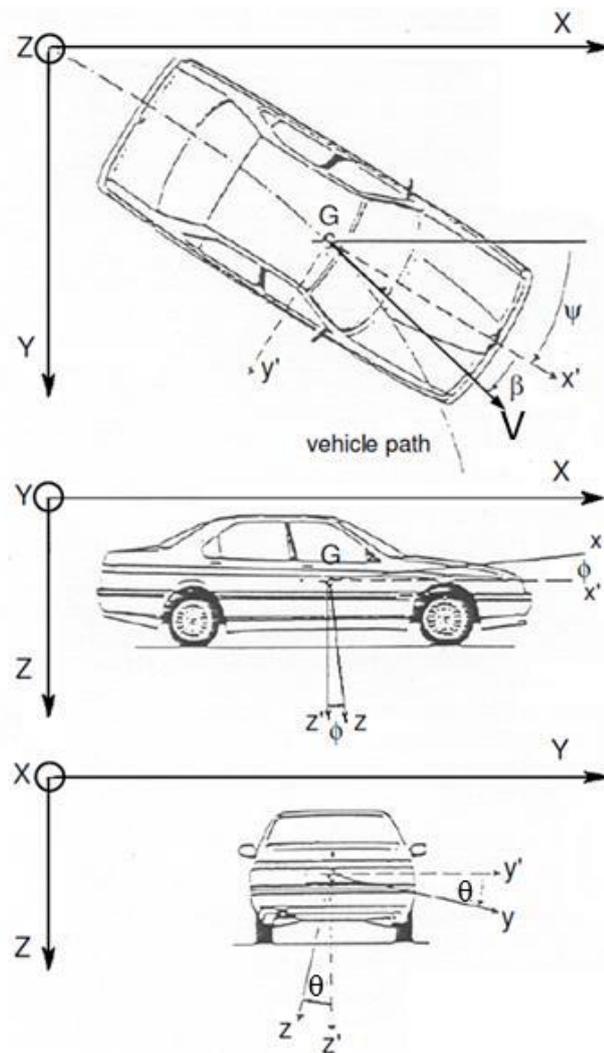
## **1.2.4. Videocamera**

Sempre più spesso la tecnologia ha permesso di implementare le videocamere per rilevazione di grandezze (riconoscimento di variabili o riconoscimento di oggetti). Il loro utilizzo, accoppiato con una piattaforma inerziale, può essere ad esempio molto utile per quanto concerne la sfera videoludica, in cui l'interazione del videogiocatore è sempre più fitta e completa con la console di gioco. Anche grazie allo sviluppo in quest'ambito, si è riusciti a sfruttare tale know-how per portarlo ad utilizzi in campo *automotive*.

## 1.3. Sistemi di riferimento

Per definire in modo più completo il concetto di angolo di assetto è necessario descrivere in dettaglio i sistemi di riferimento su cui è definito:

- **Assoluto X-Y-Z:** sistema di riferimento fisso solidale al terreno;
- **Body x-y-z:** con origine nel baricentro del veicolo, e assi rivolti in direzione longitudinale laterale e verticale della cassa sospesa del veicolo. È un sistema fisso rispetto alla cassa sospesa del veicolo;
- **Veicolo ausiliario x'-y'-z':** come il sistema di riferimento body ha origine nel baricentro, è quindi un sistema di riferimento mobile, tuttavia l'asse  $z'$  viene sempre mantenuto con direzione perpendicolare al terreno. Questo sistema è utile per definire gli angoli di rollio  $\vartheta$ , beccheggio  $\phi$  e imbardata  $\psi$ , come rappresentato in figura.

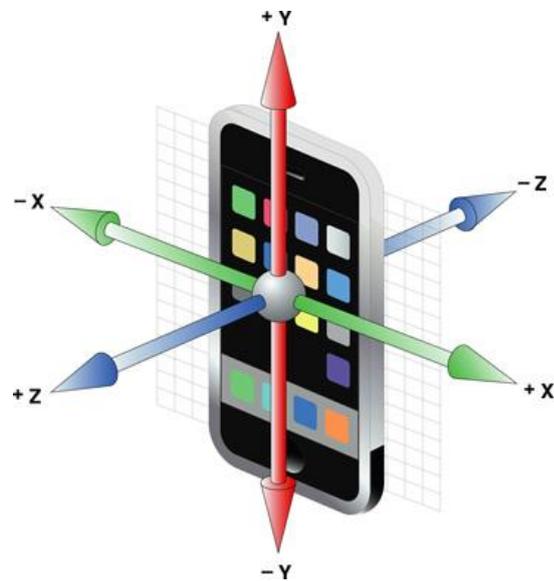


**Figura 1.8 Sistemi di riferimento veicolo**

È importante sottolineare che il vettore velocità assoluta  $V$  rappresenta la velocità del centro di massa del veicolo ed è tangente alla traiettoria del veicolo stesso. Di conseguenza, l'angolo di assetto  $\beta$  rappresenta l'angolo fra la direzione del moto e la direzione longitudinale del veicolo.

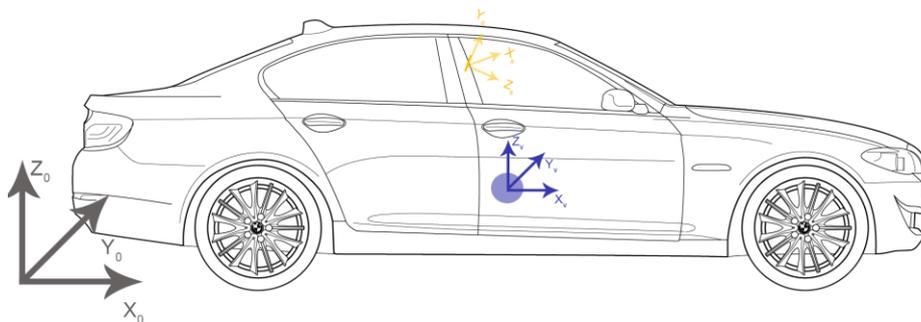
Ai sistemi di riferimento citati precedentemente andrà aggiunto quello relativo allo smartphone, al quale tutti i suoi sensori fanno riferimento.

Accelerometro e giroscopio avranno una componente per ogni asse, mentre telecamera e GPS restituiranno esclusivamente valori scalari.



**Figura 1.9 Sistema di riferimento smartphone**

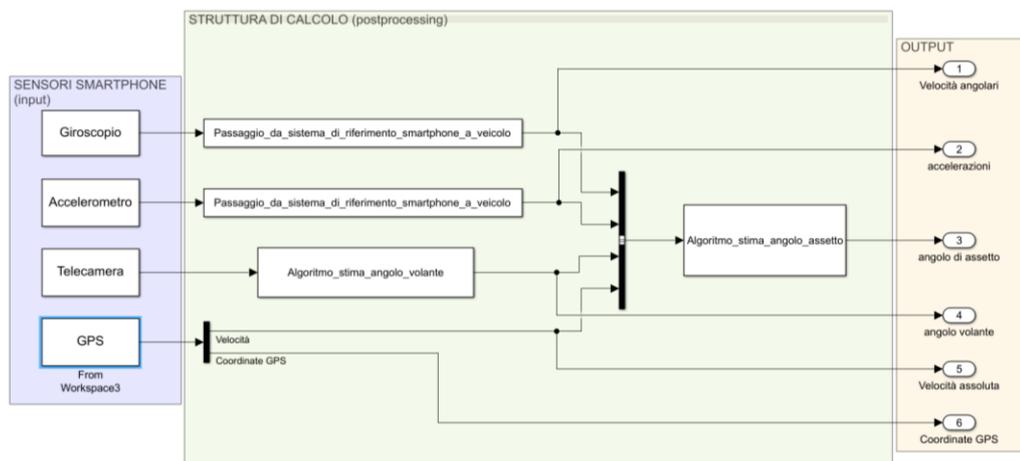
Lo smartphone viene fissato all'interno del veicolo tramite un apposito supporto. Si ha quindi che il sistema di riferimento smartphone è fisso rispetto alla massa sospesa del veicolo come il sistema di riferimento body, con origine e orientazione diverse.



**Figura 1.10 Posizione relativa dei sistemi di riferimento**

## 2.Struttura app

Lo schema funzionale dell'applicazione rappresentato in Figura 2.1 spiega in maniera sintetica il suo funzionamento allo stato attuale. Il blocco a sinistra racchiude gli input del sistema, ovvero ai segnali provenienti dai sensori dello smartphone; il blocco centrale raggruppa gli algoritmi che elaborano tali segnali in ingresso; a destra invece, sono indicate le informazioni di output del sistema.



**Figura 2.1 Schema di funzionamento app**

È importante sottolineare che attualmente il processo di calcolo si compie solo in *post-processing*: i risultati di output sono infatti visibili solo a misurazione conclusa dopo l'elaborazione dei dati. Tuttavia, tra gli sviluppi futuri dell'applicazione è previsto il passaggio al real-time, in modo tale da permettere la visualizzazione degli andamenti delle grandezze su schermo in tempo reale.

L'applicazione fa uso di tre algoritmi di calcolo principali:

- Passaggio dal sistema di riferimento dello smartphone a quello del veicolo;
- Algoritmo di stima dell'angolo volante;
- Algoritmo di stima dell'angolo di assetto.

## 2.1. Passaggio dal sistema di riferimento smartphone a quello veicolo

Le rilevazioni effettuate dallo smartphone sono ottenute rispetto al proprio sistema di riferimento. Per alcune delle misure in output è quindi necessario effettuare un cambio di tale sistema per poter poi consentire di essere utilizzate dall'algoritmo di calcolo dell'angolo di assetto, che opera attraverso il sistema di riferimento del veicolo.

Il GPS, invece, si basa già sul sistema di riferimento assoluto terrestre: di conseguenza, i segnali delle coordinate spaziali e della velocità assoluta (restituito come semplice scalare) non hanno bisogno di essere convertiti. Anche per quanto riguarda la videocamera non è necessario un cambio di sistema di riferimento, in quanto già compreso nell'algoritmo di riconoscimento dell'angolo volante.

In sintesi, i segnali che necessitano di essere convertite sono quelli provenienti dal giroscopio e dall'accelerometro, che restituiscono una componente in ognuno dei tre assi del sistema di riferimento proprio dello smartphone.

Dalla meccanica razionale si ha che dato un vettore in un sistema di riferimento  $xyz$ , questo può essere scritto in un altro sistema di riferimento  $XYZ$  secondo la seguente relazione:

$$r_{SR2} = A_{21} r_{SR1} \quad (2.1)$$

Con:

- $r_{SR1} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}$ : vettore scritto nel primo sistema di riferimento;
- $r_{SR2} = \begin{bmatrix} r_X \\ r_Y \\ r_Z \end{bmatrix}$ : vettore scritto nel secondo sistema di riferimento;
- $A_{21} = \begin{bmatrix} c_{xX} & c_{xY} & c_{xZ} \\ c_{yX} & c_{yY} & c_{yZ} \\ c_{zX} & c_{zY} & c_{zZ} \end{bmatrix}$ : matrice dei coseni direttori (o di rotazione);
- $c_{ij}$ : coseno dell'angolo compreso fra l'asse  $i$  del primo sistema di riferimento e l'asse  $j$  del secondo sistema di riferimento.

Per passare quindi da un sistema di riferimento ad un altro è sufficiente conoscere come i due sistemi sono orientati rispettivamente nello spazio, calcolando gli angoli compresi fra gli assi dei due sistemi.

Considerando il sistema di riferimento dello smartphone e il sistema di riferimento del veicolo, si ha che la matrice dei coseni direttori tra un sistema e l'altro varia a seconda delle accelerazioni in gioco, in quanto l'orientamento fra un sistema e l'altro non è fisso per via degli angoli di rollio e beccheggio. Essendo lo smartphone fissato all'interno della vettura, sarà solidale alla massa sospesa del veicolo: ciò significa che il suo sistema di riferimento rimarrà fisso rispetto al sistema di riferimento *body*, anch'esso solidale alla massa sospesa, ma non rispetto al sistema di riferimento del veicolo.

Essendo, però, gli angoli di rollio e beccheggio molto piccoli, è possibile assumere con buona approssimazione che il sistema di riferimento *body* sia coincidente con il sistema di riferimento del veicolo, e quindi che la

matrice dei coseni direttori rimanga costante per tutta la *run*. In altri termini, per passare da un sistema di riferimento all'altro sarà sufficiente calcolare l'orientazione dello smartphone rispetto alla massa sospesa.

$$r_v \cong r_b = A_{sb} r_s \quad (2.2)$$

### 2.1.1. Calibrazione

Nonostante la matrice dei coseni direttori sia costante per tutta la manovra, non è possibile definirla a monte in quanto essa dipende dalla posizione in cui lo smartphone viene fissato all'interno della vettura. Per determinare la posizione del sensore all'interno del veicolo, prima della misurazione vera e propria, l'applicazione prevede una fase di *inizializzazione* in cui l'applicazione si calibra per convertire le misure nel sistema di riferimento del veicolo su cui è utilizzata. Questa fase è composta da due momenti:

- **Mantenimento della vettura immobile:** in questo stadio l'app riconosce l'orientazione dell'asse  $Z$  del veicolo, che coincide esattamente con la direzione dell'accelerazione totale. A vettura in equilibrio, infatti, l'unica accelerazione presente è quella di gravità.
- **Accelerazione della vettura in un tratto rettilineo:** in questo stadio viene determinata l'orientazione dell'asse  $X$  veicolo, che coincide con la direzione dell'accelerazione totale a meno

dell'accelerazione di gravità, e di conseguenza (per completamento della terna destrorsa) dell'asse  $Y$ .

In questo modo è possibile estrapolare, con un apposito algoritmo, la *matrice di rotazione* relativa all'orientamento dello smartphone rispetto al sistema di riferimento del veicolo.

## **2.1.2. Parametri baricentro veicolo**

Nella dinamica del veicolo, i parametri di particolare interesse sono tutti riferiti al baricentro. Nonostante le misure delle varie grandezze siano state trasposte nel sistema di riferimento del veicolo, esse sono comunque riferite allo smartphone, che è stato fissato al veicolo in un punto diverso dal baricentro. È quindi necessario considerare opportune relazioni per passare dalle misure proprie dello smartphone a quelle del baricentro.

### **2.1.2.1. Velocità angolare**

La velocità angolare di un corpo rigido è la stessa in ogni suo punto. Essa, infatti, non è riferita ad un solo punto ma a tutto il corpo rigido nel suo insieme. Si avrà, quindi, che le velocità angolari calcolate dallo smartphone nel punto di fissaggio, idealmente sono le stesse di quelle che si potrebbero calcolare nel baricentro. Una volta trasposte nel sistema di

riferimento del veicolo, le misure del giroscopio non necessitano di ulteriori calcoli.

### 2.1.2.2. Accelerazione

Una diversa condizione riguarda le accelerazioni, in quanto in un corpo rigido dipendono dal punto in cui sono calcolate.

Considerando il sistema rappresentato in *Figura 2.2*:

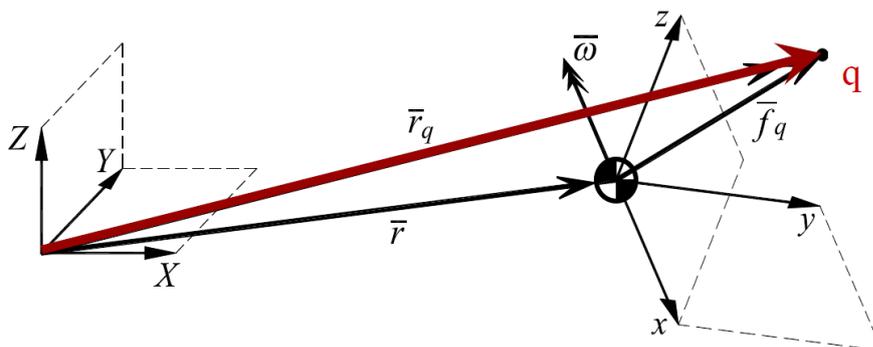


Figura 2.2 Sistema in esame

Con:

- $XYZ$ : sistema di riferimento assoluto;
- $xyz$ : sistema di riferimento *body*;
- $\vec{f}_q$ : vettore posizione smartphone rispetto al sistema di riferimento *body*;
- $q$ : posizione smartphone;
- $\vec{\omega}$ : velocità angolare della massa sospesa.

Poiché la posizione dello smartphone  $q$  è vincolata alla massa sospesa del veicolo, il vettore  $\bar{f}_q$  è costante, si ha che:

$$\bar{a}_q = \bar{a}_G + \underbrace{\dot{\bar{\omega}} \times \bar{f}_q + \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{f}_q)}_{\bar{a}} \quad (2.3)$$

Di conseguenza, date le accelerazioni del punto  $q$  (quelle dello smartphone), sottraendo ad esse il termine  $\bar{a}$  (che nasce perché il corpo rigido *massa sospesa del veicolo* non ha un semplice moto di traslazione ma è caratterizzato anche da una velocità di rotazione  $\bar{\omega}$ ) si otterranno le accelerazioni del baricentro.

Riferendo tutto al sistema di riferimento *body* e sviluppando i dovuti calcoli, si ottiene che:

$$\begin{bmatrix} a_{xq} \\ a_{yq} \\ a_{zq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{xG} \\ a_{yG} \\ a_{zG} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{\varphi} z_q - (\dot{\varphi}^2 + \dot{\psi}^2) x_q - \ddot{\psi} y_q + \dot{\psi} \dot{\theta} z_q + \dot{\varphi} \dot{\theta} y_q \\ \ddot{\psi} x_q - (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2) y_q - \ddot{\theta} z_q + \dot{\psi} \dot{\varphi} z_q + \dot{\varphi} \dot{\theta} x_q \\ \ddot{\theta} y_q - (\dot{\theta}^2 + \dot{\varphi}^2) z_q - \ddot{\varphi} y_q + \dot{\theta} \dot{\psi} x_q + \dot{\varphi} \dot{\psi} y_q \end{bmatrix}}_{\bar{a}} \quad (2.4)$$

Dove  $\bar{\omega} = [\dot{\theta}; \dot{\varphi}; \dot{\psi}]$ , ossia il vettore delle velocità angolari (rispettivamente di rollio, beccheggio e imbardata) e i parametri  $x_q$ ,  $y_q$  e  $z_q$  rappresentano le coordinate dello smartphone rispetto al sistema di riferimento *body*.

Come si può notare, le due accelerazioni sono legate dalla velocità angolare e dalla distanza che separa i due punti. Poiché non è possibile stabilire la distanza dello smartphone dal baricentro del veicolo in quanto non si conosce a priori nessuna delle due posizioni, nell'applicazione si è deciso di trascurare il contributo di  $\bar{a}$ , ovvero considerando lo smartphone

posizionato esattamente nel baricentro del veicolo. Di conseguenza, si avrà che:

$$\bar{a}_q \cong \bar{a}_G \quad (2.5)$$

E quindi che le accelerazioni fornite in output dall'applicazione rappresentano le accelerazioni del baricentro rispetto al sistema di riferimento del veicolo a meno di:

- Angoli di rollio e beccheggio (che differenzia sistema di riferimento *body* da quello veicolo);
- Distanza dello smartphone dal baricentro.

### **2.1.2.3. Velocità assoluta e coordinate GPS**

Come per le accelerazioni, anche la velocità assoluta e le coordinate spaziali devono essere traslate nel baricentro del veicolo. Tuttavia, si è scelto di trascurare quest'operazione in quanto il GPS ha una sensibilità molto minore rispetto alla distanza esistente tra baricentro del veicolo e smartphone. In altri termini, nell'ipotesi di vincolare il telefono esattamente nel baricentro del veicolo, non si avrebbero miglioramenti in termini di precisione dei segnali di velocità e coordinate spaziali.

## 2.2. Stima dell'angolo volante

Generalmente, in una strumentazione sensoristica professionale l'angolo volante viene calcolato tramite un collegamento con la rete CAN interna del veicolo, oppure utilizzando un volante strumentato.

L'idea alla base dell'applicazione, invece, prevede l'eliminazione di qualsiasi tipo di vincolo con la centralina del veicolo, oltre ad essere molto meno esosa di una comune strumentazione professionale. Per questo motivo è stato creato un algoritmo di riconoscimento dell'angolo volante a partire dal video del volante stesso, utilizzando una libreria apposita di *Computer Vision* che elabora le immagini tramite trasformazioni applicate su matrici (di pixel).

L'algoritmo ha alla base una funzione che riesce a riconoscere l'orientazione nello spazio di particolari *marker*. Applicandone alcuni sul volante, come esemplificato in *Figura 2.3*, l'applicazione riconosce l'angolo di sterzo tramite la rotazione nello spazio (e non semplicemente nel piano) dei *marker* stessi. Questo non rende necessario un posizionamento dell'inquadratura perfettamente parallela al piano del volante, per cui lo smartphone può essere collocato anche lateralmente rispetto alla postazione di guida.

Questo aspetto assume un'importanza non indifferente nell'ergonomia della guida e nella facilitazione del fissaggio dello smartphone all'interno del veicolo.

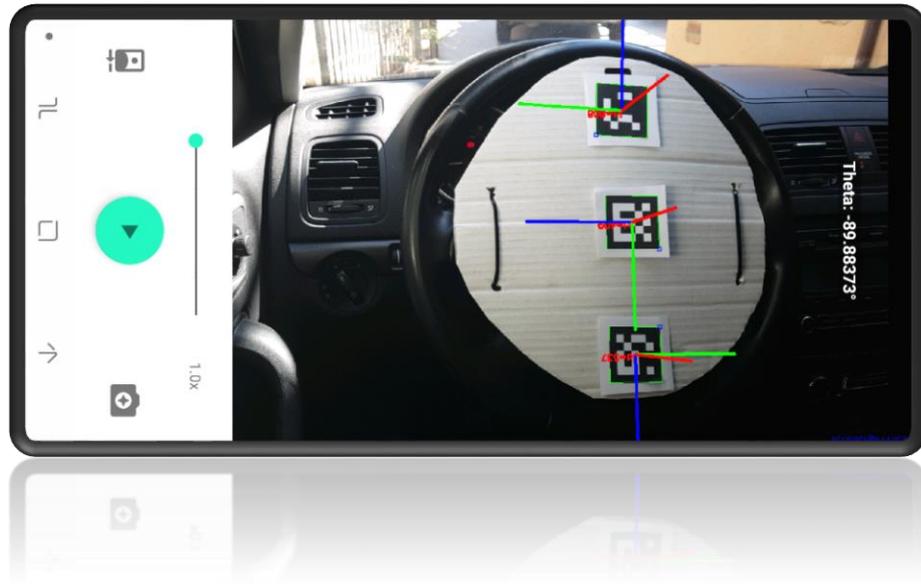


Figura 2.3 Schermata app per l'individuazione dei marker

### 2.2.1. Difetti del sistema

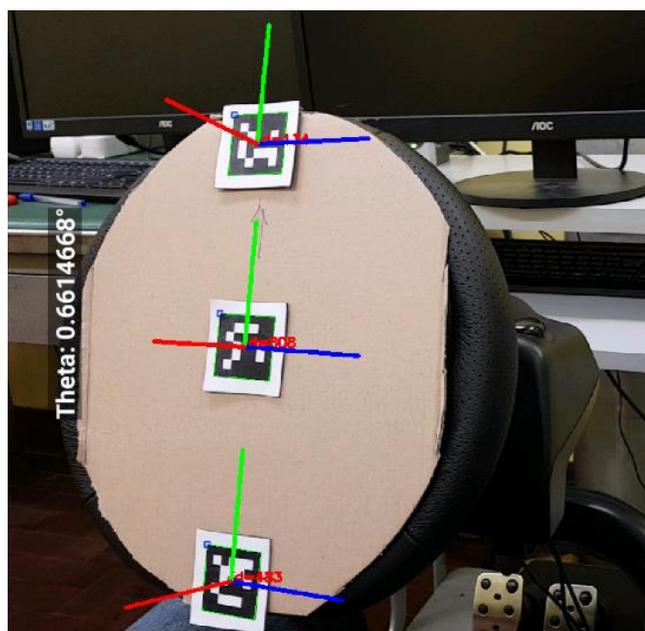
Il metodo utilizzato risulta molto semplice da adottare e *user-friendly*, tuttavia non è esente da difetti e problemi di vario tipo, tra cui:

- **Pessime condizioni di luce:** essendo la vettura in movimento, le condizioni di luminosità sono in continuo cambiamento. Questo potrebbe rappresentare un problema per l'algoritmo che lavora sulla proiezione in *black & white* dell'immagine. Un calo repentino di luminosità o un suo brusco aumento provoca una fase cieca di ricerca dei *marker* che può causare una perdita del riferimento;

- **Eccessive vibrazioni:** essendo montato a bordo vettura, il sistema è comunque sensibile alle vibrazioni provocate dall'auto stessa. Nonostante sia stata implementata una funzione di *follow* dei punti, se la vibrazione è molto accentuata si potrebbe rischiare di avere la perdita di alcuni dei *marker*.
- **Ostacoli tra camera e volante:** in caso di manovra azzardata o di curva con ampio raggio, in alcuni casi il pilota può involontariamente coprire i *marker* con il movimento delle braccia. Nonostante l'algoritmo implementi una funzione di *recovery* dei punti, se si perdesse il riferimento dei *marker* per più di in un singolo frame, il calcolo risulterebbe eccessivamente compromesso.

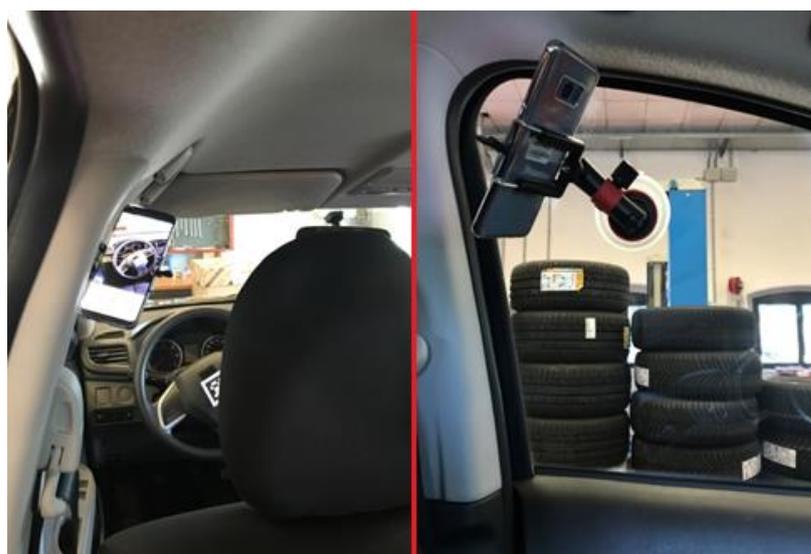
Dopo diversi test si è intuito che la precisione dell'algoritmo è inversamente proporzionale al numero di *marker* installati sul volante. La soluzione ideale è rappresentata da un solo *marker* posizionato nella zona centrale del volante. In questo modo, il segnale è molto più pulito in quanto il *marker* unico compie solo un movimento di rotazione e non di rototraslazione.

Tuttavia, alla luce dei possibili problemi sopra elencati, appare evidente come la presenza di un solo *marker* aumenti il rischio di perdita del riferimento da parte della fotocamera, soprattutto con angoli di sterzo elevati. Per questo motivo, si è deciso di apporre due *marker* aggiuntivi in posizione diametralmente opposta, una combinazione che dà una buona garanzia di non perdere il riferimento col minor numero possibile di tracce. È inoltre importante che i tre *marker* siano tutti orientati nello stesso modo, come evidenziato in *Figura 2.4*.



**Figura 2.4** Combinazione ottimale dei marker sul volante

La presenza di una base di cartone al di sotto dei *marker* è dovuta alla necessità di coprire i comandi optional apposti sul volante, che potrebbero accidentalmente essere riconosciuti come *marker* dalla videocamera durante il movimento.

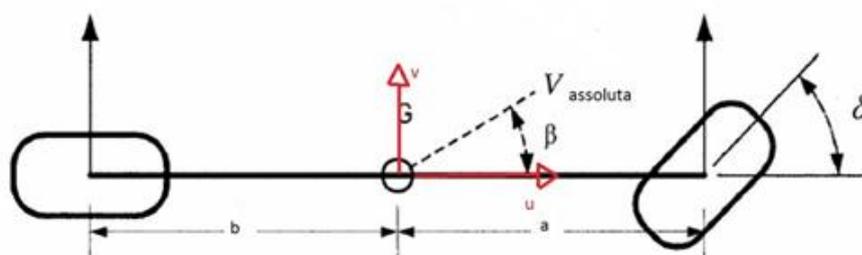


**Figura 2.5** Esempio montaggio smartphone sul finestrino lato guidatore

## 2.3. Stima dell'angolo di assetto

L'angolo di assetto è una grandezza fondamentale da stimare per valutare il comportamento di un veicolo in curva. La sua misura diretta è ovviamente irrealizzabile utilizzando la sensoristica in dotazione in un comune smartphone: di conseguenza, la strada alternativa è rappresentata da una sua stima nel modo più accurato possibile, partendo dai dati raccolti dai sensori.

L'algoritmo di stima dell'angolo di assetto si basa su un modello ideale di veicolo semplificato, detto *monotraccia lineare* e rappresentato in *Figura 2.5*.



**Figura 2.6** Schema del modello di veicolo monotraccia

Come anticipato nel *Paragrafo 1.2*, in dinamica del veicolo l'angolo di assetto  $\beta$  è l'angolo compreso fra la direzione della velocità assoluta del veicolo, nel suo baricentro, e la direzione longitudinale della stessa secondo il sistema di riferimento del veicolo. Secondo tale definizione, considerando lo schema proposto in *Figura 2.5*, vale la seguente relazione:

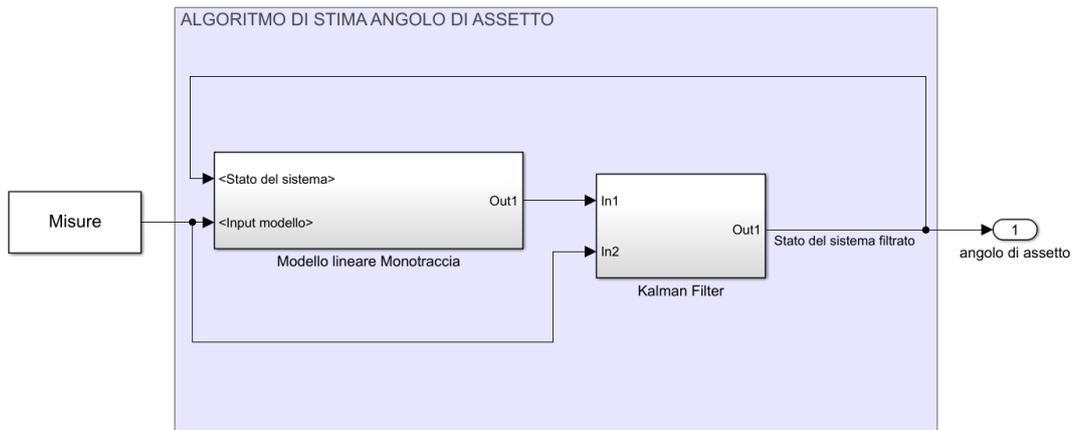
$$\beta = \text{atan}\left(\frac{v}{u}\right) \quad (2.6)$$

Poiché l'angolo di assetto  $\beta$  assume generalmente valori molto bassi, è possibile considerare la velocità longitudinale  $u$  circa uguale alla velocità assoluta  $V$ , ammettendo un piccolissimo margine di errore. Questo è un vantaggio per la nostra applicazione, che ci permette di misurare direttamente il valore della velocità assoluta  $V$  tramite il sensore GPS riducendo la valutazione dell'angolo di assetto  $\beta$  alla stima della velocità laterale  $v$ .

$$\beta \cong \text{atan}\left(\frac{v}{V}\right) \quad (2.7)$$

Il modello monotraccia verrà trattato più in dettaglio nel capitolo successivo, tuttavia emerge subito dalla *Figura 2.5* il suo elevato livello di semplificazione ed idealità. In tale ottica, l'algoritmo utilizza anche un *filtro di Kalman*, che compara i risultati del modello con le misure effettuate per ottenere la migliore stima possibile dell'angolo d'assetto  $\beta$ . In questo modo, quindi, l'output non sarà solo frutto del modello lineare, ma anche dei dati ottenuti dai sensori. In altri termini, si ottiene un angolo di assetto  $\beta$  dato dal modello lineare e filtrato secondo i dati misurati.

Lo schema rappresentato in *Figura 2.6* rappresenta in maniera semplificata il funzionamento dell'algoritmo di stima dell'angolo di assetto  $\beta$ .



**Figura 2.7** Schema semplificato dell' algoritmo di stima dell'angolo di assetto  $\beta$

### 3. Modelli di veicolo

Le sue numerosi componenti, ognuna con una sua natura e una funzionalità specifica, rendono piuttosto elevato il grado di complessità di un veicolo. Riuscire a considerare ogni singolo aspetto in un unico modello risulta perciò assai difficile e, nel corso degli anni, sono stati sviluppati diversi modelli con vari gradi di approssimazione: si parte da un modello base, il *monotraccia lineare*, fino ad arrivare a varianti molto più complesse adottate da diversi simulatori come *CarMaker*<sup>®</sup> e a modelli *multi-body* come quelli di *ADAMS*<sup>®</sup>.

Come anticipato nel *Paragrafo 2.3*, l'algoritmo di stima dell'angolo di assetto si basa sul modello di veicolo *monotraccia lineare*. In questo capitolo ne verranno trattati i dettagli, introducendo inoltre un altro modello, quello cinematico.

### 3.1. Modello cinematico

Il *modello cinematico* è uno dei modelli più semplici, che trascura completamente tutta la parte dinamica e che tiene conto solo delle relazioni cinematiche che legano le accelerazioni e le velocità relative al baricentro del veicolo nel piano  $xy$  del sistema di riferimento veicolo. Questo modello ha quindi solo tre gradi di libertà nel sistema di riferimento assoluto:

- Coordinata  $X$ ;
- Coordinata  $Y$ ;
- Rotazione rispetto all'asse  $Z$ ;

E può essere riassunto con un due equazioni successive espresse nel sistema di riferimento del veicolo:

$$\begin{cases} a_x = \dot{u} - rv \\ a_y = \dot{v} + ru \end{cases} \quad (3.1)$$

Con:

- $a_x$  = accelerazione longitudinale;
- $a_y$  = accelerazione laterale;
- $u$  = velocità longitudinale;
- $v$  = velocità laterale;
- $r$  = velocità di imbardata.

Il sistema di equazioni può essere anche scritto in forma matriciale, che ne evidenzia gli stati:

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r \\ -r & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Nonostante la sua semplicità, il modello cinematico ha una grande potenzialità: rispetto al modello monotraccia lineare, esso non comporta nessuna idealizzazione o semplificazione, se non quella di limitare il moto del veicolo al piano  $xy$ .

In linea puramente teorica, quindi, permette di risalire, a partire dalla misura delle accelerazioni e della velocità di imbardata, alla stima esatta degli stati  $u$  e  $v$ , e quindi dell'angolo di assetto  $\beta$ , definito a sua volta dalla stessa relazione cinematica utilizzata nel modello.

Ovviamente questo è possibile solo in linea teorica, per tre principali motivi:

1. Trattandosi di misure, per quanto possano essere accurate, sono affette da rumore e da errori di accuratezza che non sempre è possibile stimare a priori;
2. I dati a disposizione non sono riferiti al sistema di riferimento del veicolo ma a quello *body*: per quanto possano essere simili, tali dati differiscono degli angoli di rollio e beccheggio non sempre trascurabili;
3. Le accelerazioni non sono esattamente quelle del baricentro del veicolo, ma di un punto distante una certa distanza da esso.

## 3.2. Modello monotraccia lineare

Il modello *monotraccia lineare* trascura, in prima approssimazione, i trasferimenti di carico longitudinali e laterali. Non essendo quindi considerate né la dinamica del rollio né quella del beccheggio, il veicolo può essere rappresentato con un modello monotraccia a due ruote, con baricentro posto a distanza fissa tra di loro. Per questa sua peculiarità, il modello è anche conosciuto sotto il nome di *modello a bicicletta*.

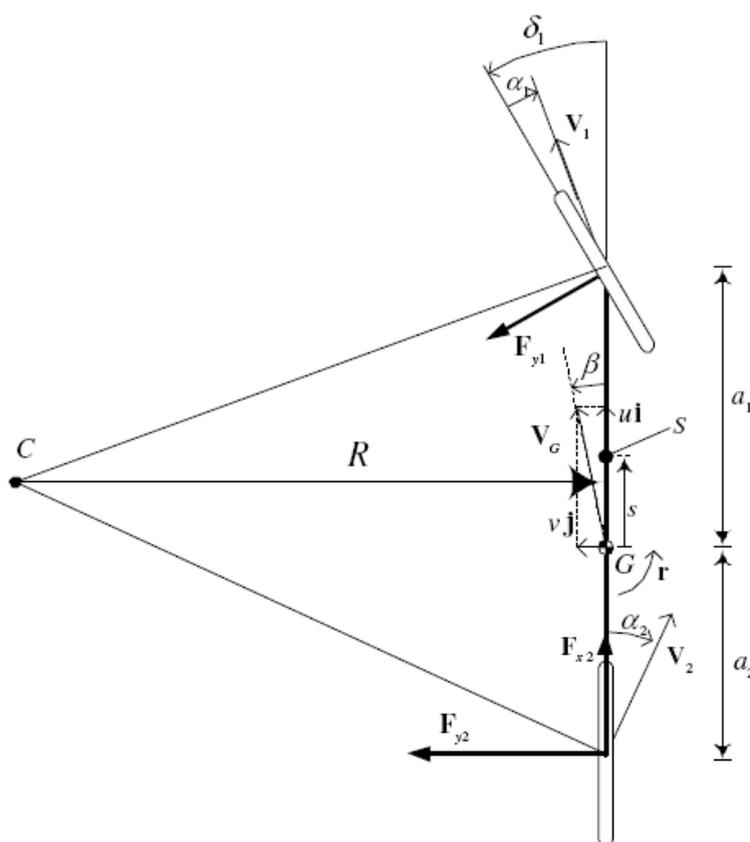


Figura 3.1 Modello *monotraccia lineare* o *a bicicletta*

Vengono inoltre considerate le seguenti semplificazioni:

- L'angolo  $\delta_2$  (angolo sterzo delle ruote posteriori) è nullo considerando solo l'azione di sterzata delle ruote anteriori;
- La massa del veicolo è concentrata nel baricentro  $G$  fisso del sistema;
- $J$  è considerato il momento di inerzia attorno al baricentro  $G$  per l'asse  $z$  che passa verticalmente nel piano dove è situata l'autovettura;
- La dinamica longitudinale del veicolo è trascurata e sostituita dalla velocità longitudinale, considerata come input. Non verranno quindi considerate le forze longitudinali  $F_{x1}$  e  $F_{x2}$ .

Facendo riferimento alla *Figura 3.1*, è possibile scrivere le seguenti equazioni di equilibrio:

$$\begin{cases} m a_y = F_{y2} + F_{y1} \cos \delta \\ J \ddot{\psi} = a_1 F_{y1} \cos \delta - a_2 F_{y2} \end{cases} \quad (3.3)$$

Considerando, inoltre, la relazione dell'accelerazione laterale riportate nel *Paragrafo 3.1 (modello cinematico)* e che  $\cos \delta$  è approssimabile a 1 visto il limitato angolo sterzo, si ottiene:

$$\begin{cases} m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = F_{y1} + F_{y2} \\ J\ddot{\psi} = a_1 F_{y1} - a_2 F_{y2} \end{cases} \quad (3.4)$$

Con:

- $m$  = massa veicolo;
- $u$  = velocità longitudinale;

- $v$  = velocità laterale;
- $\psi$  = angolo di imbardata;
- $F_{y1}$  = forza laterale anteriore;
- $F_{y2}$  = forza laterale posteriore;
- $J$  = momento di inerzia attorno al baricentro  $G$  per l'asse  $z$  che passa verticalmente nel piano dove è situato il veicolo;
- $a_1$  = semipasso anteriore;
- $a_2$  = semipasso posteriore.

Si introducono ora le equazioni costitutive per gli pneumatici, che legano linearmente l'angolo di deriva  $\alpha$  e la forza laterale  $F_y$ :

$$\begin{cases} F_{y1} = C_1 \alpha_1 \\ F_{y2} = C_2 \alpha_2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Con:

- $C_1$  = rigidezza di deriva anteriore;
- $C_2$  = rigidezza di deriva posteriore;

E la formulazione delle equazioni di congruenza per gli angoli di deriva delle ruote:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \delta_1 - \frac{v + \psi a_1}{u} \\ \alpha_2 = \delta_2 - \frac{v - \psi a_2}{u} = - \frac{v - \psi a_2}{u} \end{cases} \quad (3.6)$$

Sostituendo queste relazioni nelle equazioni di equilibrio (3.3), si ottiene che:

$$\begin{cases} m(\dot{v} + u\dot{\psi}) = C_1 \left( \delta_1 - \frac{v+\dot{\psi}a_1}{u} \right) + C_2 \left( -\frac{v-\dot{\psi}a_2}{u} \right) \\ J\ddot{\psi} = C_1\alpha_1 \left( \delta_1 - \frac{v+\dot{\psi}a_1}{u} \right) - C_2\alpha_2 \left( -\frac{v-\dot{\psi}a_2}{u} \right) \end{cases} \quad (3.7)$$

Introducendo, infine, la relazione che lega l'angolo di sterzo all'angolo volante tramite il rapporto di sterzo  $\tau$ :

$$\delta_1 = \tau\delta_v \quad (3.8)$$

Si ottengono le seguenti relazioni finali:

$$\begin{cases} \dot{v} = V_2v + R_2\dot{\psi} + D_2\delta_v \\ \ddot{\psi} = V_3v + R_3\dot{\psi} + D_3\delta_v \end{cases} \quad (3.9)$$

Con:

$$\begin{cases} V_2 = -\left(\frac{C_1+C_2}{m \cdot u}\right) \\ R_2 = -\left(\frac{C_1a_1-C_2a_2}{m \cdot u} + u\right) \\ D_2 = \left(\frac{C_1\tau}{m}\right) \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} V_3 = -\left(\frac{C_1a_1-C_2a_2}{J \cdot u}\right) \\ R_3 = -\left(\frac{C_1a_1^2+C_2a_2^2}{J \cdot u}\right) \\ D_3 = \left(\frac{C_1a_1}{J} \tau\right) \end{cases} \quad (3.11)$$

Un sistema dinamico può essere espresso nella formulazione dello spazio degli stati, come segue:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.12)$$

Con  $x$  che rappresenta il vettore degli stati e  $u$  gli ingressi del sistema.

Nel caso in esame si ha:

$$\begin{cases} x = \begin{bmatrix} v \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\ u = \begin{bmatrix} \delta_v \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$A = \begin{bmatrix} V_2 & R_2 \\ V_3 & R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{C_1+C_2}{m \cdot u}\right) & -\left(\frac{C_1 a_1 - C_2 a_2}{m \cdot u} + u\right) \\ -\left(\frac{C_1 a_1 - C_2 a_2}{J \cdot u}\right) & -\left(\frac{C_1 a_1^2 + C_2 a_2^2}{J \cdot u}\right) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$B = \begin{bmatrix} D_2 & 0 \\ D_3 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C_1 \tau}{m}\right) & 0 \\ \left(\frac{C_1 a_1}{J} \tau\right) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

## 4. Test su pista

In questo capitolo verranno elencati e descritti i test realizzati in pista sul circuito di Balocco (VC), con lo scopo di valutare l'efficienza dell'applicazione per smartphone su manovre standard e ripetibili attraverso un confronto con una strumentazione sensoristica professionale.

Si è scelto e pianificato di svolgere simulazioni tipicamente normate e usate per l'analisi *Handling* del veicolo, nonostante l'obiettivo principale sia – come spiegato in precedenza – la valutazione delle performance della piattaforma inerziale sperimentale e delle sue funzionalità.

Verranno, quindi, confrontati i dati e le misurazioni effettuate dallo smartphone con quelle di una idonea strumentazione sensoristica, dopo aver effettuato una necessaria e accurata sincronizzazione tra i due segnali.

In altri termini, l'obiettivo di questi test è quello di creare più situazioni possibili per poter comprendere la risposta dello smartphone in diversi contesti.

## 4.1. Analisi *Handling*

Con il termine *Handling* si intende la guidabilità e manovrabilità di un veicolo. Le prestazioni di un veicolo in questo senso vengono tipicamente analizzate mediante manovre normate, divisibili rispetto a differenti criteri.

Una prima suddivisione è in base allo *stato della vettura* che vuole essere analizzato durante il test. Si possono quindi avere manovre di:

- **Stato stazionario:** in cui si analizza la vettura nei momenti di equilibrio, in particolare quando angolo volante e velocità sono costanti. Le manovre di stato stazionario sono tutte eseguite percorrendo a velocità costante una traiettoria curvilinea a raggio costante.
- **Stato transitorio:** l'analisi è focalizzata sui momenti in cui la vettura non è in equilibrio, ossia quando vengono fatte variare la velocità longitudinale e/o laterale del veicolo mediante input di acceleratore e sterzo.

Un'altra classificazione viene invece effettuata in base all'*input* dato al veicolo dal guidatore che interviene su volante, cambio, acceleratore e freno:

- La manovra viene detta in **anello aperto** quando l'*input* è prestabilito, indipendentemente dal risultato che genera;

- La manovra viene detta in **anello chiuso** quando, invece, il guidatore manipola i comandi del veicolo in modo da far percorrere al veicolo stesso una determinata traiettoria o da far raggiungere determinati valori alle grandezze fisiche in gioco (come, ad esempio, l'accelerazione laterale).

Di seguito sono riportate le manovre più comuni:

- Steering pad;
- Ramp steer (chiocciola);
- Accelerazione ad angolo volante fisso;
- ISO Lane Change;
- Sweep Sine Manoeuvre;
- Colpo di sterzo.

#### **4.1.1. Steering pad**

La manovra di *steering pad* (ISO 4138 – *Open loop tests methods for steady state circular driving behavior – Method 1: constant radius*) consiste nell'inseguimento di una traiettoria a raggio costante con velocità e/o accelerazione del veicolo imposta e adeguamento dell'angolo volante. Risulta, quindi, essere una manovra ad anello chiuso in quanto i controlli (sterzo e acceleratore) devono essere regolati al fine di garantire il

mantenimento della traiettoria. Può essere sia in stato transitorio che in stato stazionario a seconda che la velocità sia mantenuta costante o meno.

### **4.1.2. Ramp steer**

Con veicolo in marcia rettilinea a velocità costante, durante la manovra di *ramp steer* (o a chiocciola) si impone una determinata modalità di rotazione del volante. In particolare, viene fatto variare l'angolo fino ad un valore finale, ad una determinata velocità di rotazione del volante [ $^{\circ}/s$ ]. Tale manovra può essere utile per determinare sia il comportamento in regime transitorio sia quello in regime quasi-stazionario, a seconda della velocità di variazione dell'angolo di sterzo.

### **4.1.3. Accelerazione ad angolo volante fisso**

Secondo la normativa ISO 4138, in questa manovra si mantiene fisso un angolo volante e si impone una determinata velocità e/o accelerazione al veicolo. È una manovra in anello aperto che serve a valutare lo stato transitorio di accelerazione in curva oppure lo stato stazionario a seconda che la velocità venga lasciata variare o meno.

#### **4.1.4. ISO lane change**

Secondo la normativa ISO 3888, con veicolo in marcia rettilinea a velocità costante, operando solamente sul volante, si deve effettuare una manovra di sorpasso simulata cercando di stare entro una traiettoria imposta da corridoi di birilli. Si tratta di una manovra ad anello chiuso, in quanto il guidatore è forzato a seguire una traiettoria imposta.

#### **4.1.5. Sweep sine manoeuvre**

Secondo le normative ISO 7401 e ISO/TR 8726, con veicolo in marcia rettilinea si impone un input sinusoidale allo sterzo di ampiezza costante e frequenza variabile, solitamente 0 e 5 Hz (frequenze tipiche delle analisi Handling). La manovra può essere svolta in anello aperto se si imposta l'ampiezza della sinusoide, oppure in anello chiuso, se si imposta il valore massimo di accelerazione laterale raggiunta.

L'obiettivo del test è quello di determinare la risposta del veicolo in regime di moto transitorio. Solitamente i dati ottenuti vengono analizzati nel dominio delle frequenze, in termini di guadagno e fase delle grandezze caratteristiche della dinamica del veicolo.

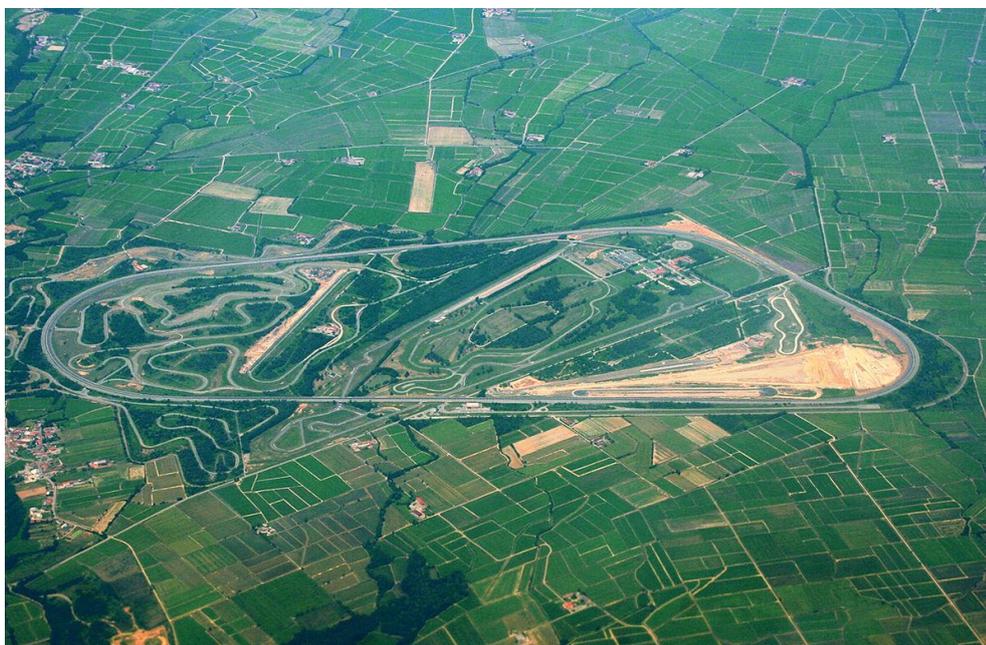
#### **4.1.6. Colpo di sterzo**

La manovra di *colpo di sterzo* può essere utile per acquisire informazioni riguardo la prontezza di risposta del sistema, la frequenza smorzata e il fattore di smorzamento dello stesso, oltre che il valore di regime della variabile di stato considerata cui il veicolo si porta quando avviene la stabilizzazione. Consiste nella rapida e netta variazione dell'angolo volante, che poi viene riportato altrettanto rapidamente nella sua posizione originale.

## 4.2. Circuito di Balocco

Il Centro sperimentale Balocco è un complesso di circuiti automobilistici sito nei pressi di Balocco (VC), costruito nel 1962 da *Alfa Romeo* e attualmente di proprietà di *Fiat Chrysler Automobiles*.

Il progetto originale prevedeva una pista principale (l'attuale *Misto Alfa Romeo*), all'interno del quale realizzare anche un tracciato di durata più piccolo, oltre ad aree con pavimentazioni speciali e alla riproduzione di una strada di campagna. Il circuito misto venne realizzato ispirandosi ai tracciati facenti parte del calendario del Campionato Mondiale di Formula 1 di quegli anni.



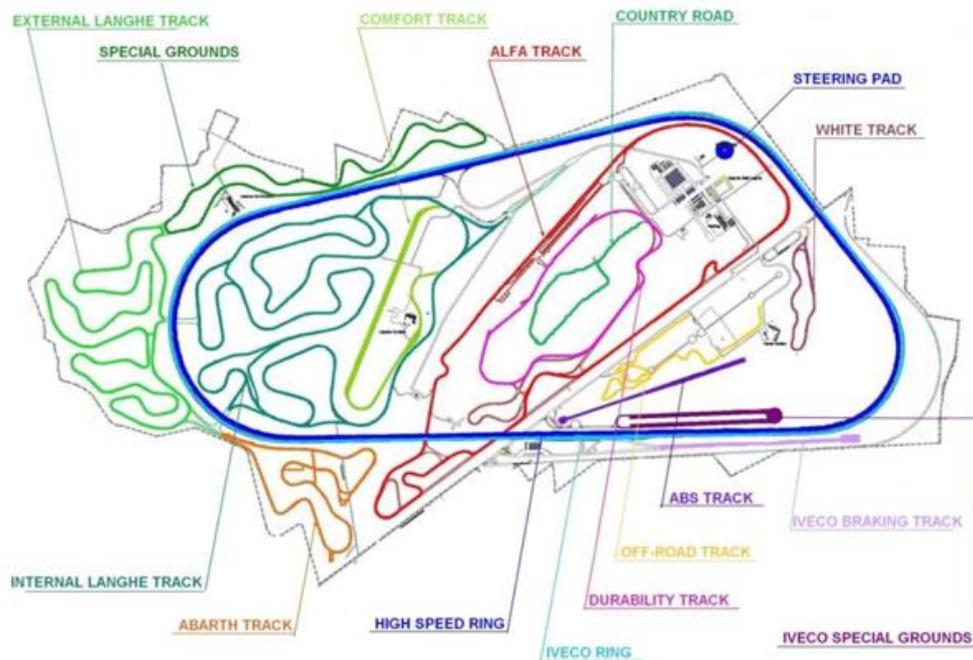
**Figura 4.1** Centro Sperimentale Balocco – Vista aerea

Quando il Gruppo Fiat acquistò l'Alfa Romeo, il circuito entrò in possesso della Casa torinese. Sotto la nuova gestione, l'impianto è stato soggetto a importanti cambiamenti, che lo hanno dotato di diversi nuovi tracciati, con caratteristiche e finalità diverse. Nel 1992 è entrato in funzione l'*anello di alta velocità*, un triovale lungo 7,8 chilometri, con curve sopraelevate caratterizzate da una pendenza fino al 30%, che consente velocità massime superiori ai 300 km/h, attorno al quale è stato costruito, nel 2010, un altro triovale simile ma con curve piatte, dedicato ai collaudi ad alta velocità di mezzi pesanti. Nel 1993 è entrato in funzione il percorso *Langhe*, riproduzione di una strada secondaria con numerose vie di fuga e varianti che consentono di ricavare diversi percorsi. Complessivamente, il percorso *Langhe* misura oltre 22 chilometri e presenta una irregolarità del fondo stradale con numerosi saliscendi (pendenze fino al 14%), studiati per mettere in crisi l'assetto delle vetture da collaudare. Di questo percorso fa parte anche un tratto di pavimentazioni speciali lungo 3,3 chilometri.

A questi tracciati principali se ne affiancano diversi altri con funzioni specifiche di collaudo delle vetture:

- *Pista Comfort*, inaugurata nel 1999, con particolari superfici stradali studiate per il collaudo delle sospensioni;
- *Pista ABS*, inaugurata nel 2005 e utilizzata per l'omologazione di veicoli;
- *Pista Off Road*, realizzata nel 2006;
- *Pista bianca*, realizzata nel 2008 allo scopo di simulare condizioni di bassa aderenza per testare i sistemi di sicurezza attiva installati sui veicoli;

- *Steering Pad*, realizzato nel 2011, piazzale circolare di 80 m di diametro con una pendenza del 2% verso l'interno, realizzato con tre diversi tipi di asfalto;
- *Pista rumorosità*, utilizzata per l'omologazione dei veicoli.



**Figura 4.2 Centro Sperimentale Balocco - Mappa tracciati**

### **4.3. Manovre analizzate**

Al fine della valutazione dell'efficacia del sistema sperimentale, l'analisi si concentrerà sulla ripetizione delle seguenti manovre, le cui caratteristiche nominali sono riportate in *Tabella 4.1*:

- Steering pad;
- Ramp steer;
- Colpo di sterzo;
- Sweep steer.

**Tabella 4.1 Riepilogo manovre analizzate**

<b>STEERING PAD</b>	
<b>Prova</b>	<b>Raggio nominale</b>
<b>Test 21</b>	45 m
<b>Test 36</b>	20 m
<b>Test 43</b>	60 m
<b>RAMP STEER</b>	
<b>Prova</b>	<b>Velocità nominale</b>
<b>Test 03</b>	80 km/h
<b>Test 08</b>	80 km/h
<b>COLPO DI STERZO</b>	
<b>Prova</b>	<b>Velocità nominale</b>
<b>Test 52</b>	80 km/h
<b>Test 56</b>	80 km/h
<b>SWEEP STEER</b>	
<b>Prova</b>	<b>Ampiezza</b>
<b>Test 08</b>	Amp: +/- 50°
<b>Test 16</b>	Amp: +/- 100°
<b>Test 23</b>	Amp: +/- 30°
<b>Test 28</b>	Amp: +/- 50°

## 4.4. Caratteristiche veicolo

Per i test in pista a Balocco (VC) sono state svolte e ripetute diverse manovre tra quelle descritte nei paragrafi precedenti, utilizzando un veicolo di segmento C (Tipo Crossover SUV) le cui caratteristiche sono riportate nelle tabelle seguenti.

**Tabella 4.2 Dati veicolo: generale**

<b>Segmento</b>	C
<b>Tipo principale</b>	Crossover SUV
<b>Semipasso anteriore (a)</b>	1,004 m
<b>Semipasso posteriore (b)</b>	1,566 m
<b>Passo (l)</b>	2,570 m
<b>Altezza baricentro da terra (<math>h_G</math>)</b>	0,640 m
<b>Carreggiata anteriore</b>	1,545 m
<b>Carreggiata posteriore</b>	1,535 m

**Tabella 4.3 Dati veicolo: sterzo**

<b>Rapporto di sterzo a progetto (<math>\tau</math>)</b>	15,4
<b>Asservimento</b>	Elettrico

**Tabella 4.4 Dati veicolo: sospensioni**

<b>Anteriore</b>	McPherson
<b>Posteriore</b>	McPherson

**Tabella 4.5 Dati veicolo: motore**

<b>Alimentazione</b>	Benzina
<b>Cilindrata</b>	1600 cc
<b>Posizione</b>	Transv. Ant.

**Tabella 4.6 Dati veicolo: trazione e cambio**

<b>Trazione</b>	
<b>Tipo</b>	Anteriore
<b>Cambio</b>	
<b>Tipo</b>	Manuale
<b>N° rapporti</b>	6

**Tabella 4.7 Dati veicolo: pneumatici**

<b>Misura anteriore</b>	225/45 R18
<b>Misura posteriore</b>	225/45 R18
<b>Pressione anteriore</b>	2,8 bar
<b>Pressione posteriore</b>	2,8 bar

**Tabella 4.8 Dati veicolo: distribuzione pesi**

<b>Anteriore sinistra (<math>M_{FL}</math>)</b>	490,0 kg
<b>Anteriore destra (<math>M_{FR}</math>)</b>	467,8 kg
<b>Posteriore sinistra (<math>M_{RL}</math>)</b>	314,2 kg
<b>Posteriore destra (<math>M_{RR}</math>)</b>	299,4 kg
<b>Peso + collaudatore + pieno (<math>M_{TOT}</math>)</b>	1571,4 kg

## 5. Sincronizzazione dati

Prima di procedere con l'analisi *Handling*, è importante che il segnale della nostra piattaforma inerziale sia sincronizzato (e quindi in fase) con il segnale proveniente dalla strumentazione sensoristica professionale adottata.

Si parte da una prima fase di inizializzazione dei segnali provenienti dai singoli sensori dello smartphone, a cui seguirà un opportuno filtraggio degli stessi. Questa operazione ci permette di eliminare in parte (evitando di alterare in modo incisivo il segnale stesso) il rumore di sottofondo legato principalmente alle vibrazioni del veicolo durante le manovre, e renderlo più facilmente confrontabile con quello (già filtrato) della strumentazione professionale.

Successivamente si passerà alla fase di ricerca della frequenza di ricampionamento del segnale smartphone, che non ha un valore fisso e oscilla nell'intorno dei 50 Hz secondo l'esperienza raccolta da test svolti in passato. Individuato il valore ottimale di tale frequenza, si procede con il ricampionamento del segnale professionale (inizialmente campionato a una frequenza di 500 Hz) e quindi al confronto tra le due misurazioni.

## 5.1. Frequenza di ricampionamento

È noto che i sensori presenti nel telefono misurano a frequenze di campionamento ben diverse tra di loro, tuttavia lo smartphone ha una funzione di ricampionamento delle misure che permette di avere tutti i segnali sincronizzati tra di loro.

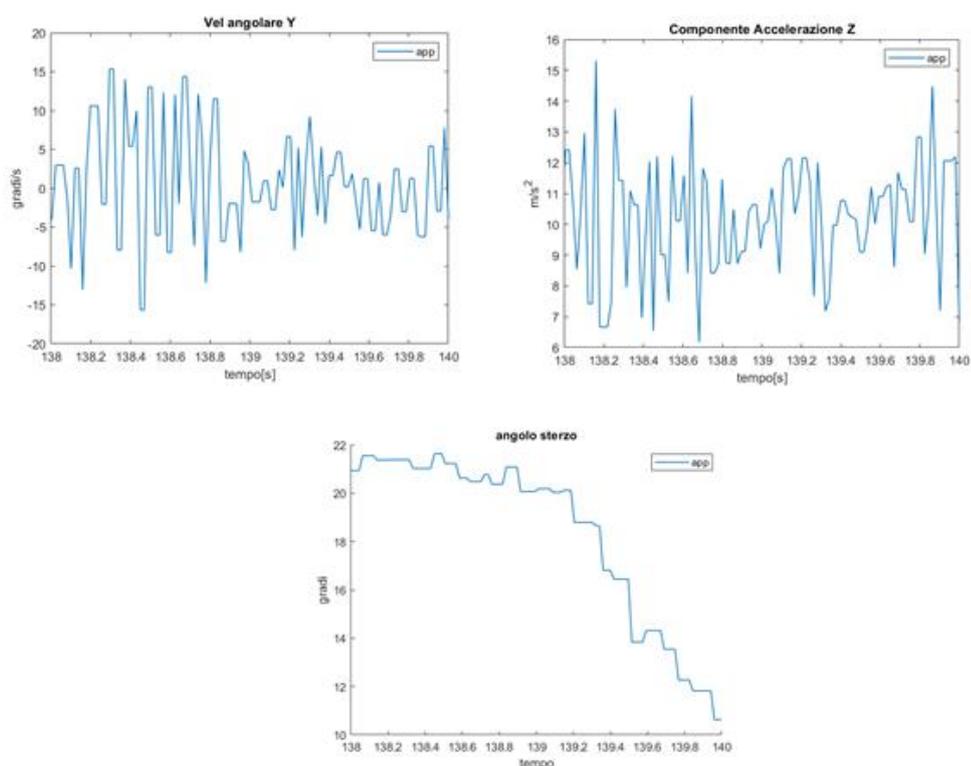
Purtroppo, non essendo lo smartphone uno strumento di misura caratterizzata da elevata precisione e sensibilità, la frequenza di ricampionamento non è nota a priori e varia nel tempo durante la misurazione. In ogni caso, dall'esperienza sviluppata in sessioni precedenti e dall'analisi dei dati raccolti durante gli ultimi test, si è concluso che questa vada ricercata nell'intorno dei 50 Hz. Il segnale proveniente dalla strumentazione professionale è invece perfettamente campionato a una frequenza di 500 Hz.

**Tabella 5.1** Frequenze di campionamento reali per ogni singolo sensore integrato nello smartphone

<b>SENSORE</b>	<b>FREQ. CAMPIONAMENTO</b>
Accelerometro	39,5 Hz
Giroscopio	28,8 Hz
GPS	20,9 Hz
Videocamera	15,1 Hz

Per questo, i segnali di output dell'app non rappresentano la misura diretta del sensore, ma sono quindi frutto del ricampionamento svolto dallo smartphone per rendere sincroni tutti i segnali tra di loro. Questo aspetto

emerge anche graficamente (*Figura 5.1*) analizzando in dettaglio gli andamenti non filtrati dei segnali di uno qualsiasi dei sensori, in cui si notano diversi tratti piani: ciò significa che il dato non viene aggiornato ad ogni campione, ossia che la frequenza di campionamento reale del sensore è minore rispetto a quella del ricampionamento svolto dallo smartphone.



**Figura 5.1** Grafici che mostrano il ricampionamento sulle misure smartphone

È inoltre necessario sottolineare che una volta esportate le misure dello smartphone su Matlab<sup>®</sup> per la successiva analisi, queste hanno lunghezze diverse (numero di punti rilevati) a seconda del sensore. Analizzando invece le misure direttamente da smartphone, queste hanno la stessa dimensione. Ciò è dovuto al fatto che i file di testo salvati

dall'applicazione per l'esportazione dei dati non contengono gli ultimi punti misurati. La perdita parziale dei dati è riconducibile ad un bug dell'applicazione non ancora eliminato: il taglio non è prevedibile, ma dalle ultime analisi si è intuito che:

- Accelerometro e giroscopio sono i sensori che perdono meno dati e tra i due c'è poca differenza;
- Videocamera e GPS hanno un perdita più considerevole, fino anche a 30 secondi di registrazione.

## 5.2. Filtraggio segnale smartphone

Per rendere più nitido il segnale proveniente dalla sensoristica integrata dello smartphone si è scelto di procedere con un'operazione di filtraggio utilizzando un *filtro Butterworth*.

Il *filtro Butterworth* è tra i più semplici filtri elettronici passa-basso che ha lo scopo di mantenere il più piatto possibile il modulo della risposta in frequenza nella banda passante. La definizione del filtro non vincola la realizzazione del circuito elettronico, che può essere liberamente progettato, ma solo la sua funzione di trasferimento, che ha come denominatore e/o numeratore dei polinomi di Butterworth di ordine arbitrario.

Per la nostra analisi, il *filtro Butterworth* è stato implementato in Matlab® tramite un tool già presente nel software, che prevede come input da selezionare a monte la frequenza di cut-off, l'ordine del filtro e la frequenza di Nyquist.

La frequenza di cut-off è stata fissata a 5 Hz per tutti segnali; stesso approccio per l'ordine, pari a 4. Per quanto riguarda, invece, la frequenza di Nyquist (minima frequenza necessaria per campionare un segnale senza perdere informazioni) verrà calcolata successivamente nel processo di valutazione della frequenza di ricampionamento per ogni segnale di ciascuna prova, in quanto pari alla metà della frequenza di ricampionamento.

## 5.3. Ricerca frequenza di ricampionamento ottimale

Per ottimizzare il confronto tra i dati raccolti dallo smartphone e quelli della strumentazione professionale si è reso necessario definire la frequenza di ricampionamento dei dati smartphone, supposta costante e nell'intorno dei 50 Hz. Una volta stabilito il suo valore ottimale tramite un apposito algoritmo, sono stati ricampionati anche i segnali rilevati dalla strumentazione professionale per ogni singolo test eseguito in pista a Balocco.

L'operazione di ricerca della frequenza di ricampionamento è stata inizialmente effettuata su tre prove diverse, con lo scopo di testare la relativa efficienza:

- Colpo di sterzo (Test 52);
- Ramp steer (Test 03);
- Sweep steer (Test 08).

Per ogni prova sono state analizzate le seguenti grandezze:

- Accelerazione laterale ( $a_y$ );
- Velocità di imbardata ( $\psi'$ );
- Angolo di sterzo al volante ( $\delta_v$ ).

### 5.3.1. Fasatura segnali

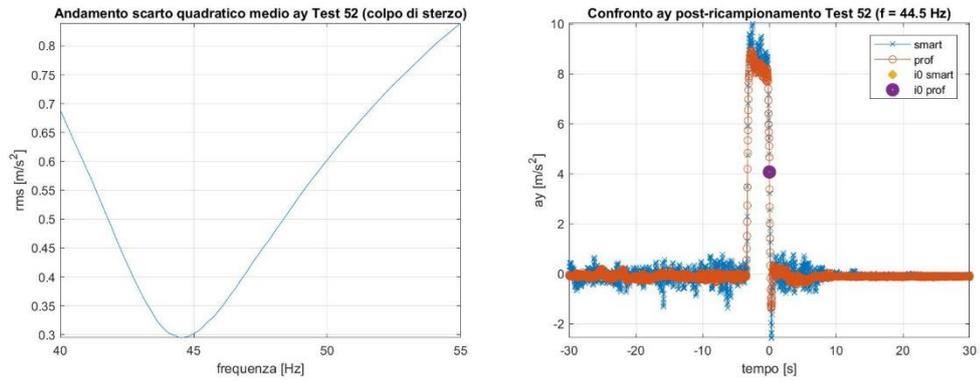
Il primo passo è stato quello di mettere in fase le due distribuzioni di dati, che per semplicità indicheremo con le sigle *smart* e *prof*. La fasatura è stata effettuata sull'andamento dell'accelerazione laterale  $a_y$  (e utilizzata anche per studiare la velocità di imbardata  $\psi'$ ) e sull'andamento dell'angolo volante  $\delta_v$ , individuando un valore di riferimento per entrambe e associandolo al tempo  $t_0$ .

## 5.4. Ricampionamento e confronto

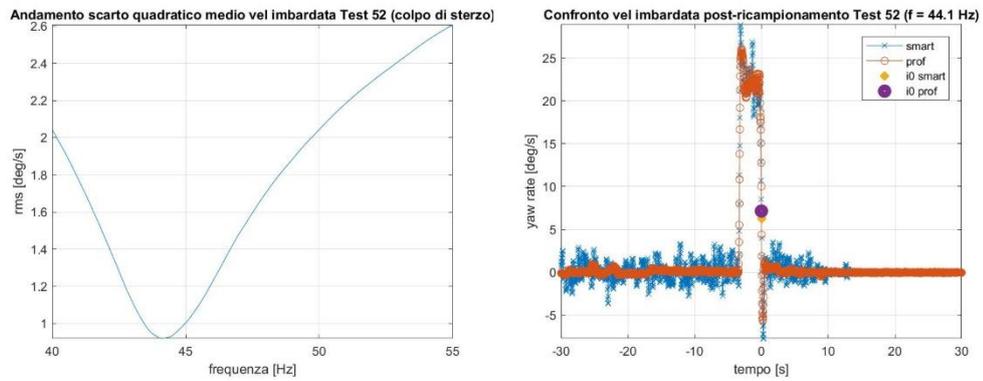
Per ricercare la miglior frequenza di ricampionamento dei segnali provenienti da smartphone e strumentazione professionale è stato seguito il seguente processo:

- **Fasatura dei segnali:** è stato identificato in istante di riferimento per ciascuna prova, associandolo al tempo  $t_0$ ;
- **Identificazione della medesima lunghezza per due segnali:** si è partiti dal segnale *prof* (di cui è nota la frequenza di campionamento iniziale, pari a 500 Hz) per determinare la porzione temporale di interesse di entrambi i segnali;
- **Filtraggio dei dati smartphone** attraverso un *filtro Butterworth* (vedi *Paragrafo 5.2*), per eliminare parte del rumore di fondo del segnale e migliorare il confronto;
- **Ricerca della frequenza di ricampionamento** tramite l'implementazione di un ciclo *for* su Matlab<sup>®</sup>: la frequenza ottimale identificata è quella corrispondente al valore minore dello scarto quadratico medio della differenza tra i valori dei segnali *smart* e *prof*.
- **Ricampionamento segnale prof** utilizzando la funzione *resample* di Matlab<sup>®</sup>.

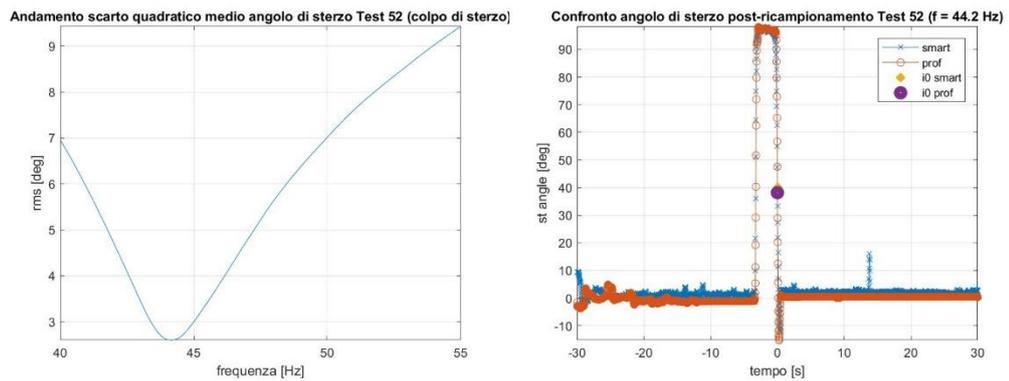
La scelta dell'intervallo di frequenze da analizzare è stato identificato, secondo l'esperienza costruita in sessioni di test precedenti, nell'intorno di 50 Hz – in generale tra 40 e 55 Hz con una precisione di 0,1 Hz.



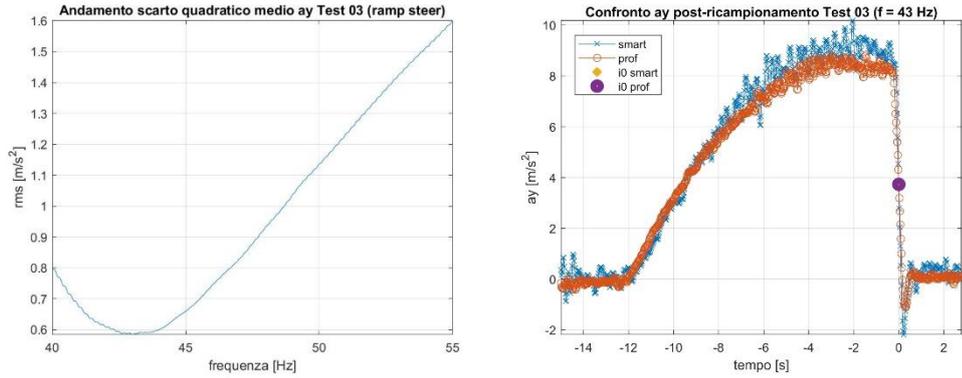
**Figura 5.2 Ricampionamento segnali accelerazione laterale *smart* e *prof* Test 52 - colpo di sterzo**



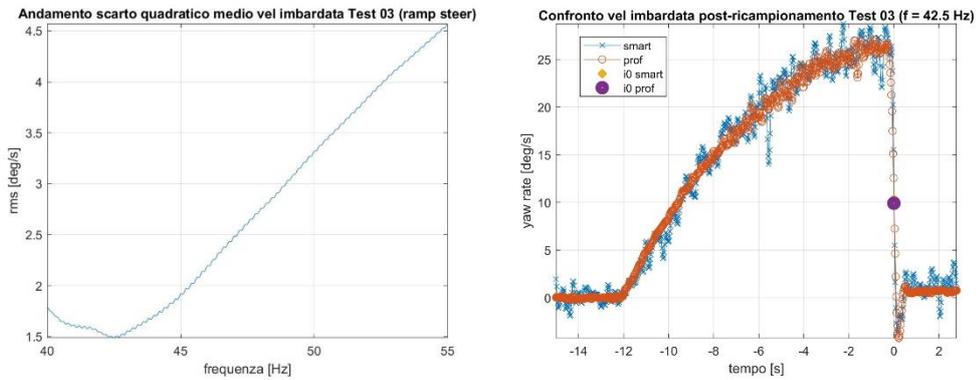
**Figura 5.3 Ricampionamento segnali velocità di imbardata *smart* e *prof* Test 52 - colpo di sterzo**



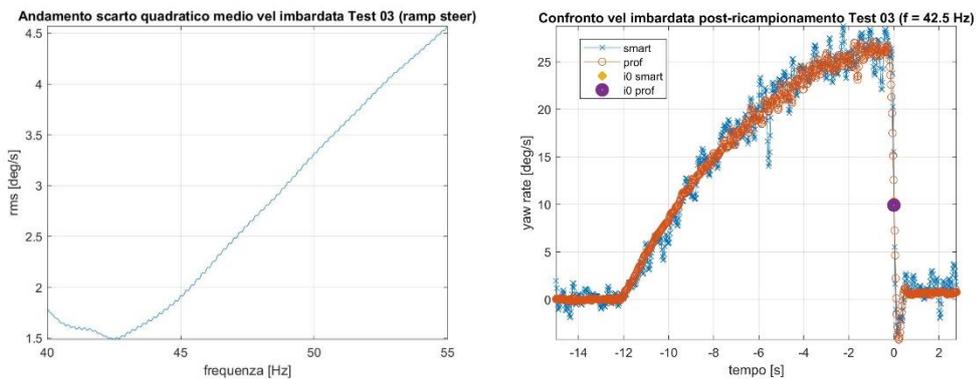
**Figura 5.4 Ricampionamento segnali angolo di sterzo *smart* e *prof* Test 52 - colpo di sterzo**



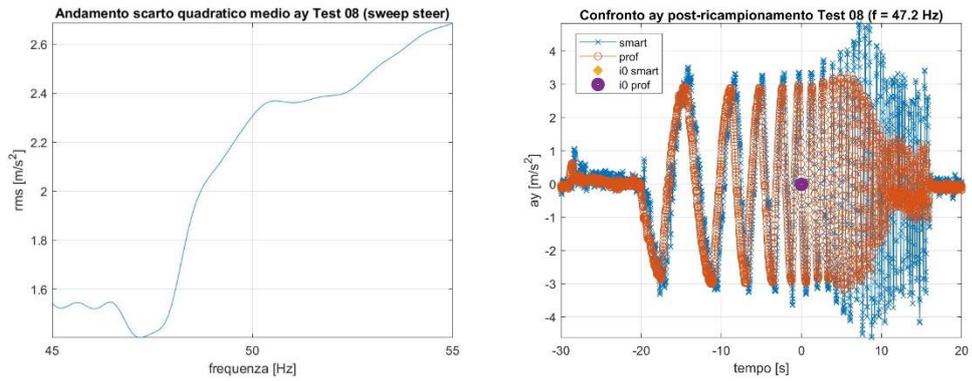
**Figura 5.5 Ricampionamento segnali accelerazione laterale *smart* e *prof* Test 03 - ramp steer**



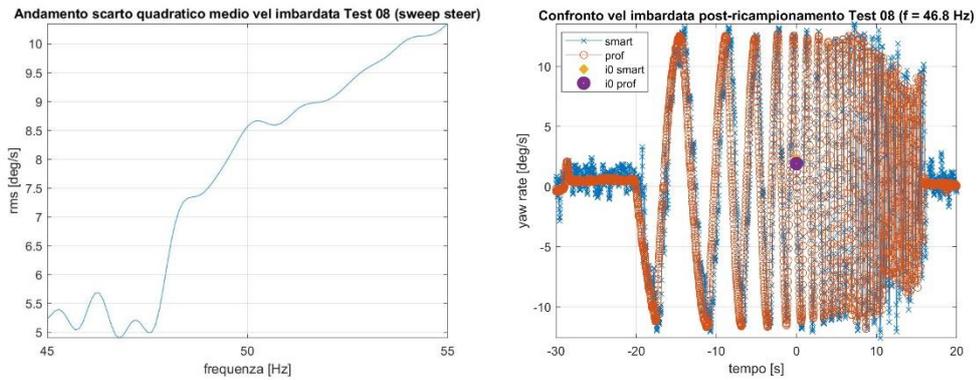
**Figura 5.6 Ricampionamento segnali velocità di imbardata *smart* e *prof* Test 03 - ramp steer**



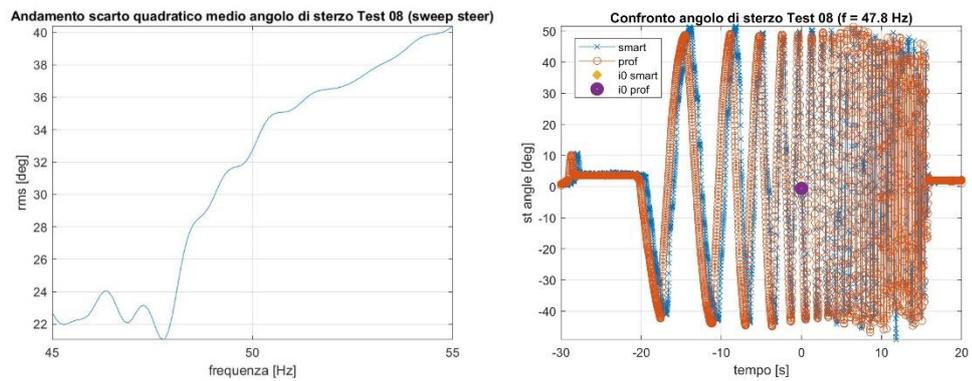
**Figura 5.7 Ricampionamento segnali angolo di sterzo *smart* e *prof* Test 03 - ramp steer**



**Figura 5.8 Ricampionamento segnali accelerazione laterale *smart* e *prof* Test 08 - sweep steer**



**Figura 5.9 Ricampionamento segnali velocità di imbardata *smart* e *prof* Test 08 - sweep steer**



**Figura 5.10 Ricampionamento segnali angolo di sterzo *smart* e *prof* Test 08 - sweep steer**

## 5.5. Valutazione processo di ricerca della frequenza di ricampionamento

Dopo aver scelto in modo mirato il punto di inizializzazione del processo ( $t_0$ ) – scelto in comune per accelerazione laterale e velocità di imbardata e diverso per angolo di sterzo – l'efficienza del processo di fasatura dei segnali *smart* e *prof* appare molto buona, con valori di frequenza di ricampionamento molto simili – seppur non esattamente coincidenti – per le tre grandezze in ognuna delle tre prove analizzate (colpo di sterzo, ramp steer e sweep steer). Quanto emerso può far ipotizzare che il processo di ricampionamento adottato dallo smartphone sui segnali provenienti dai diversi sensori non avvenga a frequenza costante e rappresenta un aspetto su cui indagare con maggiore attenzione nel prossimo futuro.

Si è poi proceduto, quindi, con il calcolo delle frequenze di ricampionamento anche per le altre prove di interesse di questa analisi, mettendo a punto anche il *filtro Butterworth* per i segnali *smart* come specificato nel *Paragrafo 5.2*.

### 5.5.1. Risultati prove di *steering pad*

Tabella 5.2 Frequenze di ricampionamento prove di *steering pad*

Prova	Segnale	Frequenza [Hz]
<b>Test 21</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	35,8
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	35,1
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	35,1
	Velocità assoluta (V)	33,6
<b>Test 36</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	49,2
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	48,1
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	48,2
	Velocità assoluta (V)	49,2
<b>Test 43</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	45,7
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	44,4
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	45,0
	Velocità assoluta (V)	45,3

Tabella 5.3 Filtro Butterworth prove di *steering pad*

<b>Filtro Butterworth segnale smartphone</b>		
<b>Test 21</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	18
<b>Test 36</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	24
<b>Test 43</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	23

## 5.5.2. Risultati prove di *ramp steer*

Tabella 5.4 Frequenze di ricampionamento prove di *ramp steer*

Prova	Segnale	Frequenza [Hz]
<b>Test 03</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	43,0
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	42,5
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	42,7
	Velocità assoluta (V)	41,6
<b>Test 08</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	49,2
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	47,2
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	49,3
	Velocità assoluta (V)	47,4

Tabella 5.5 Filtro Butterworth prove di *ramp steer*

Filtro Butterworth segnale smartphone		
<b>Test 03</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	21
<b>Test 08</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	24

### 5.5.3. Risultati prove di *colpo di sterzo*

Tabella 5.6 Frequenze di ricampionamento prove di *colpo di sterzo*

Prova	Segnale	Frequenza [Hz]
<b>Test 52</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	44,5
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	44,1
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	44,2
	Velocità assoluta (V)	45,3
<b>Test 56</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	60,9
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	60,4
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	65,3
	Velocità assoluta (V)	60,6

Tabella 5.7 Filtro Butterworth prove di *colpo di sterzo*

<b>Filtro Butterworth segnale smartphone</b>		
<b>Test 52</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	22
<b>Test 56</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	31

### 5.5.4. Risultati prove di *sweep steer*

Tabella 5.8 Frequenze di ricampionamento prove di *sweep steer*

Prova	Segnale	Frequenza [Hz]
<b>Test 08</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	47,2
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	46,8
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	47,8
	Velocità assoluta (V)	46,9
<b>Test 23</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	53,4
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	53,1
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	53,1
	Velocità assoluta (V)	51,8
<b>Test 28</b>	Accelerazione laterale ( $a_y$ )	46,7
	Velocità di imbardata ( $\psi'$ )	46,5
	Angolo di sterzo ( $\delta_v$ )	46,2
	Velocità assoluta (V)	44,5

Tabella 5.9 Filtro Butterworth prove di *sweep steer*

<b>Filtro Butterworth segnale smartphone</b>		
<b>Test 08</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	24
<b>Test 23</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	27
<b>Test 28</b>	Frequenza di cut-off [Hz]	5
	Ordine	4
	Frequenza di Nyquist [Hz]	23

## 6. Confronto analisi Handling

Dopo aver perfezionato la sincronizzazione e il calcolo della frequenza di ricampionamento dei segnali registrati tramite l'applicazione installata sullo smartphone, il passo successivo è stato quello di svolgere un'analisi Handling parallelamente sulle grandezze *smart* e *prof* per le manovre di *ramp steer*, *colpo di sterzo* e *sweep steer*.

L'obiettivo è quello di tracciare un confronto tra i due sistemi di rilevazione e valutare la bontà e l'efficienza del modello scelto e implementato nell'algoritmo alla base dell'applicazione studiata, cercando di mettere in evidenza i limiti principali per proporre successivi ed eventuali sviluppi.

## 6.1. Prove analizzate

La *Tabella 6.1* riporta le caratteristiche nominali delle prove analizzate per ciascuna manovra standard (*ramp steer*, *colpo di sterzo* e *sweep steer*) scelta per il confronto sull'analisi Handling tra segnali *smart* e *prof*.

**Tabella 6.1** Caratteristiche nominali prove analizzate

<b>RAMP STEER</b>	
<b>Prova</b>	<b>Velocità nominale</b>
<b>Test 03</b>	80 km/h
<b>Test 08</b>	80 km/h
<b>COLPO DI STERZO</b>	
<b>Prova</b>	<b>Velocità nominale</b>
<b>Test 52</b>	80 km/h
<b>Test 56</b>	80 km/h
<b>SWEEP STEER</b>	
<b>Prova</b>	<b>Ampiezza angolo di sterzo</b>
<b>Test 08</b>	+/- 50°
<b>Test 16</b>	+/- 100°
<b>Test 23</b>	+/- 30°
<b>Test 28</b>	+/- 50°

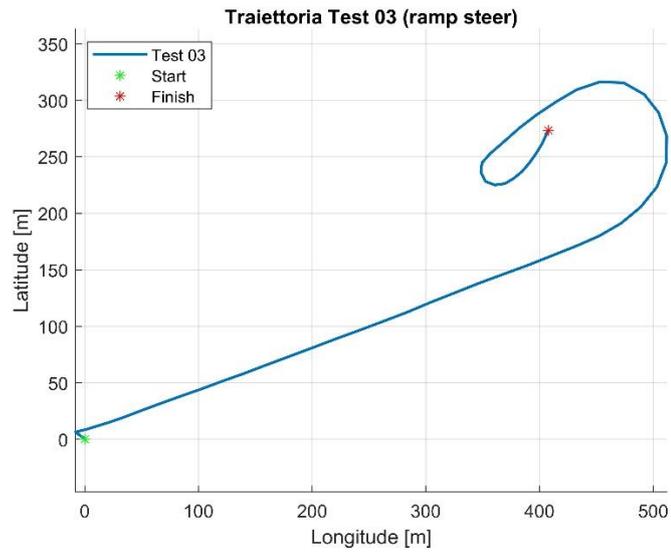
## 6.2. Ramp steer

Dalle due prove stazionarie di *ramp steer* analizzate – indicate con i nomi Test 03 e Test 08 – sono stati ricavati:

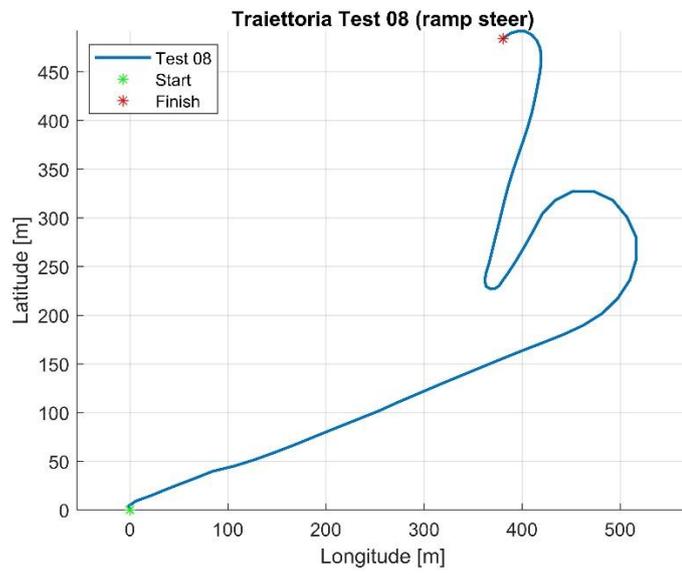
- Caratteristica di sottosterzo;
- Caratteristica di assetto;
- Gradiente di sottosterzo ( $K_{US}$ );
- Gradiente di assetto ( $K_{\beta}$ );
- Angoli di deriva anteriore e posteriore ( $\alpha_F$  e  $\alpha_R$ );
- Forze laterali anteriore e posteriore ( $F_{yF}$  e  $F_{yR}$ ).

## **6.2.1. Traiettoria manovre**

Le *Figure 6.5* e *6.6* riportano la traiettoria delle due prove – Test 03 e Test 08 – di *ramp steer* effettuate. Le traiettorie sono state ricavate sfruttando esclusivamente la misurazione delle coordinate spaziali da parte del sensore GPS dello smartphone, in quanto durante le prove si è verificato un mancato funzionamento del sensore GPS della strumentazione sensoristica professionale.



**Figura 6.1 Traiettorie Test 03 - ramp steer**



**Figura 6.2 Traiettorie Test 08 - ramp steer**

## 6.2.2. Caratteristiche di sottosterzo

La *caratteristica di sottosterzo* è una caratteristica stazionaria che mette in relazione la differenza tra l'angolo di sterzo e l'angolo di sterzo cinematico ( $\delta - \delta_0$ ) e l'accelerazione laterale ( $a_y$ ). Per angolo di sterzo cinematico si intende il rapporto tra il passo della vettura utilizzata ( $l$ ) e il raggio della traiettoria a chioccola (quindi variabile, via via più piccolo) che si sta compiendo ( $R$ ).

$$\delta_0 = \frac{l}{R} \quad (6.1)$$

Con:

$$R = \frac{a_y}{\dot{\psi}^2} \quad (6.2)$$

Dalla caratteristica di sottosterzo è possibile ricavare anche il *gradiente di sottosterzo* ( $K_{US}$ ), inteso come coefficiente angolare del tratto rettilineo iniziale della caratteristica.

Riprendendo il modello monotraccia lineare di *Figura 3.1*, è possibile introdurre le relazioni di carattere geometrico conseguenti a una condizione di moto stazionario:

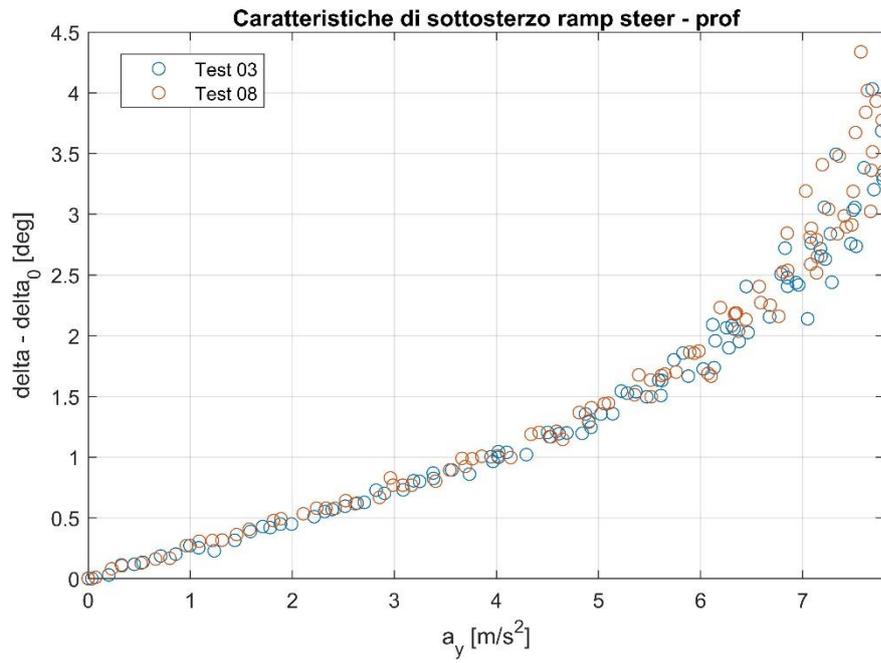
$$\delta - \delta_0 = \alpha_F - \alpha_R \quad (6.3)$$

$$\begin{cases} a_y \cong a_{yF} \cong a_{yR} \\ F_{yF} = m_F \cdot a_y = C_{yF} \cdot \alpha_F \\ F_{yR} = m_R \cdot a_y = C_{yR} \cdot \alpha_R \end{cases} \quad (6.4)$$

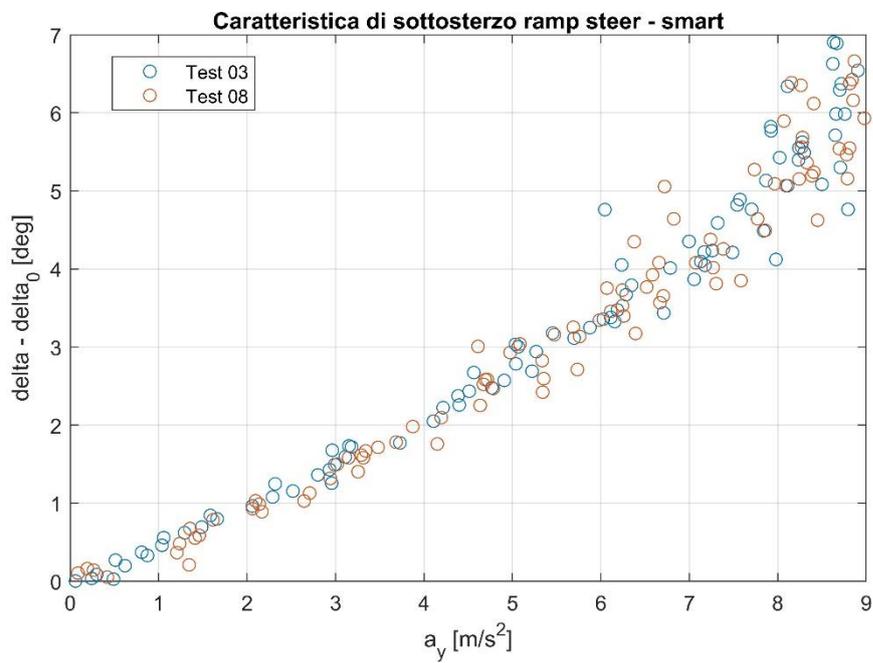
Dove  $C_{yF}$  e  $C_{yR}$  rappresentano le rigidità di deriva anteriore e posteriore.

Combinando le equazioni (6.3) e (6.4) si ha:

$$\delta - \delta_0 = \left( \frac{m_F}{C_{yF}} - \frac{m_R}{C_{yR}} \right) \cdot a_y = K_{US} \cdot a_y \quad (6.5)$$



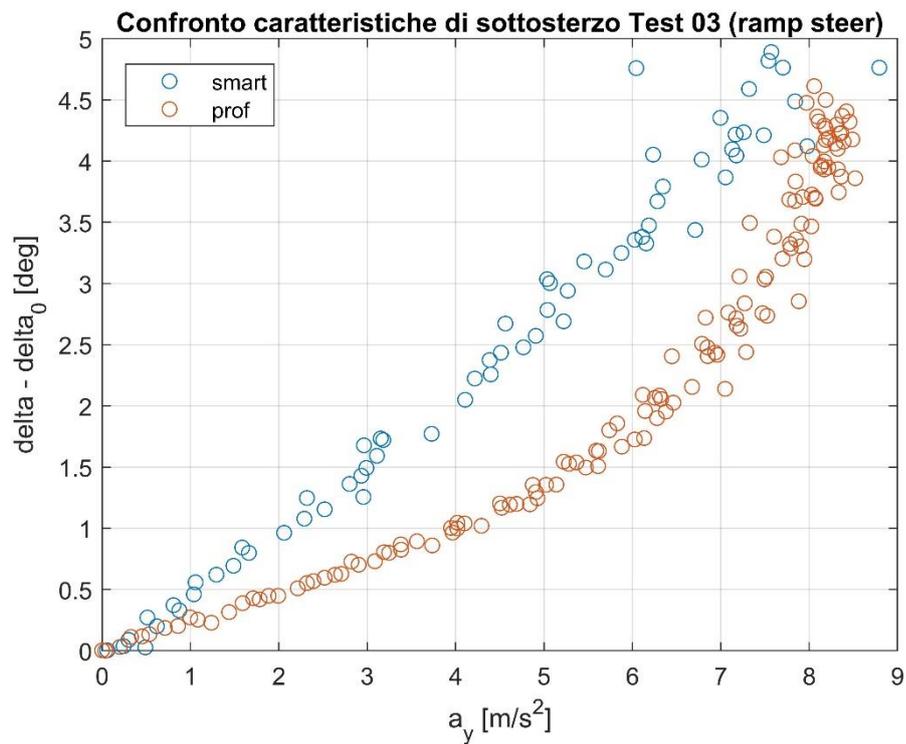
**Figura 6.3** Caratteristica di sottosterzo ramp steer – *prof*



**Figura 6.4** Caratteristica di sottosterzo ramp steer – *smart*

### 6.2.2.1. Confronto *smart* vs *prof*

In *Figura 6.9* è riportato il confronto diretto tra le caratteristiche di assetto *prof* e *smart* relative al Test 03, a titolo di esempio.



**Figura 6.5** Confronto caratteristiche di sottosterzo Test 03 - *prof* vs *smart*

### 6.2.3. Caratteristiche di assetto

La *caratteristica di assetto* è una caratteristica stazionaria che mette in relazione la differenza tra l'angolo di assetto e l'angolo di assetto cinematico ( $\beta - \beta_0$ ) e l'accelerazione laterale ( $a_y$ ). Per angolo di assetto cinematico si intende il rapporto tra il semipasso posteriore della vettura utilizzata ( $b$ ) e il raggio della traiettoria a chioccola (quindi variabile, via via più piccolo) che si sta compiendo ( $R$ ).

$$\beta_0 = \frac{b}{R} \quad (6.6)$$

Con:

$$R = \frac{a_y}{\dot{\psi}^2} \quad (6.7)$$

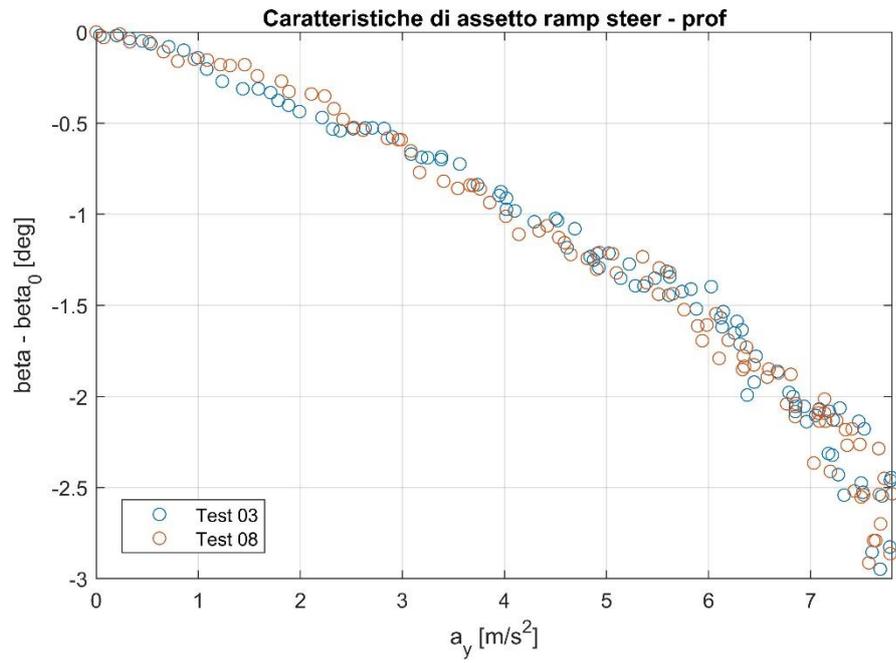
Dalla caratteristica di assetto è possibile ricavare anche il *gradiente di assetto* ( $K_\beta$ ), inteso come coefficiente angolare del tratto rettilineo iniziale della caratteristica.

Riprendendo il modello monotraccia lineare di *Figura 3.1*, è possibile introdurre le relazioni di carattere geometrico conseguenti a una condizione di moto stazionario:

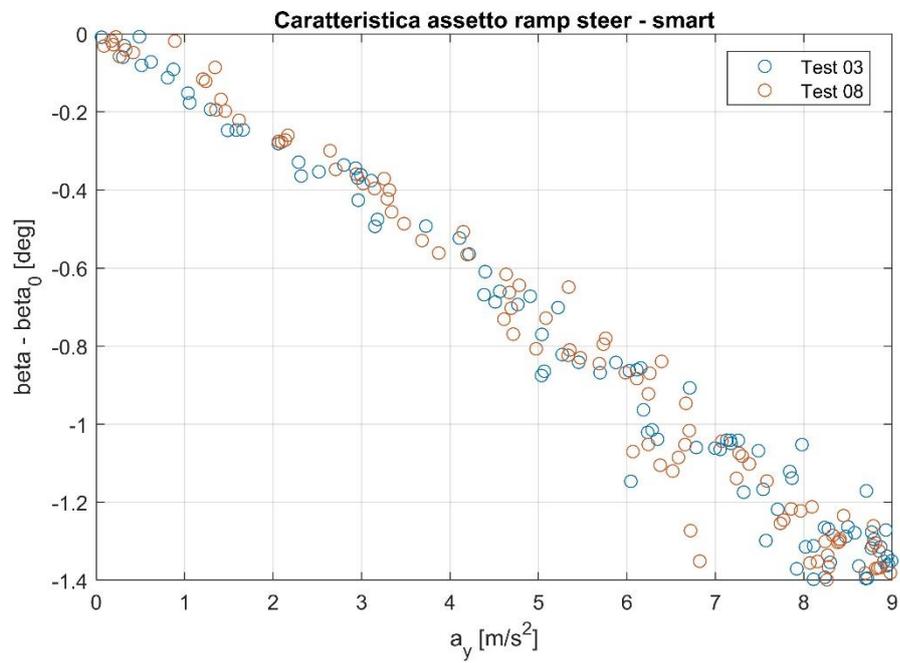
$$\beta - \beta_0 = -\alpha_R \quad (6.8)$$

Combinando le equazioni (6.4) e (6.8) si ha:

$$\beta - \beta_0 = -\left(\frac{m_R}{C_{yR}}\right) \cdot a_y = -K_\beta \cdot a_y \quad (6.9)$$



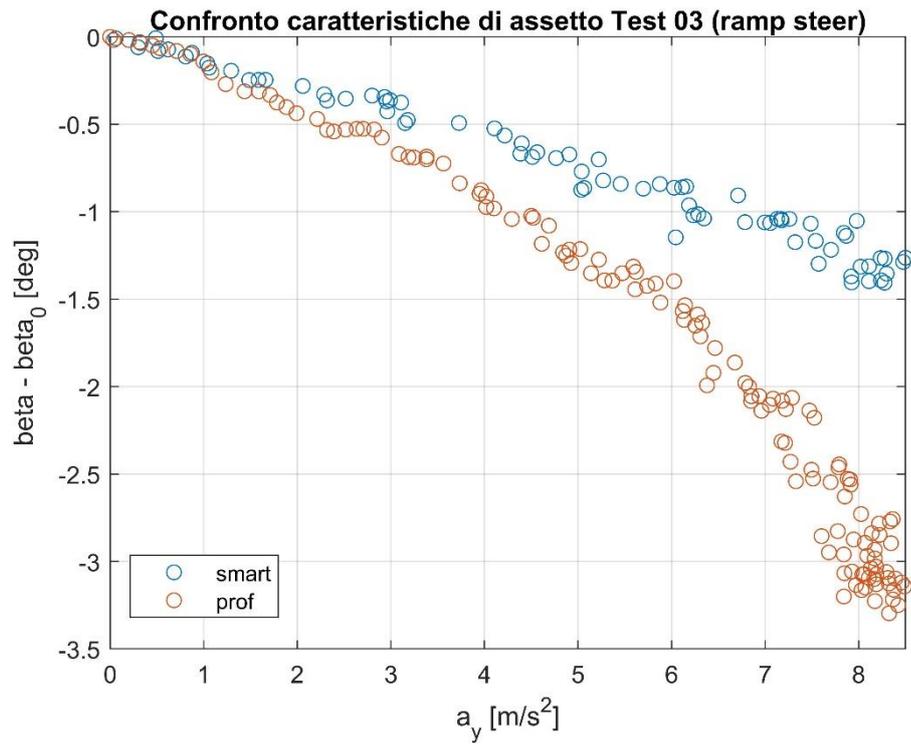
**Figura 6.6** Caratteristica di assetto ramp steer – *prof*



**Figura 6.7** Caratteristica di assetto ramp steer – *smart*

### 6.2.3.1. Confronto *smart* vs *prof*

In *Figura 6.16* è riportato il confronto diretto tra le caratteristiche di assetto *prof* e *smart* relative al Test 03, a titolo di esempio.



**Figura 6.8** Confronto caratteristiche di assetto Test 03 - *prof* vs *smart*

## 6.2.4. Coefficienti di sottosterzo e assetto

La *Tabella 6.3* sintetizza i parametri chiave di questa parte dell'analisi, ovvero i coefficienti di sottosterzo e assetto.

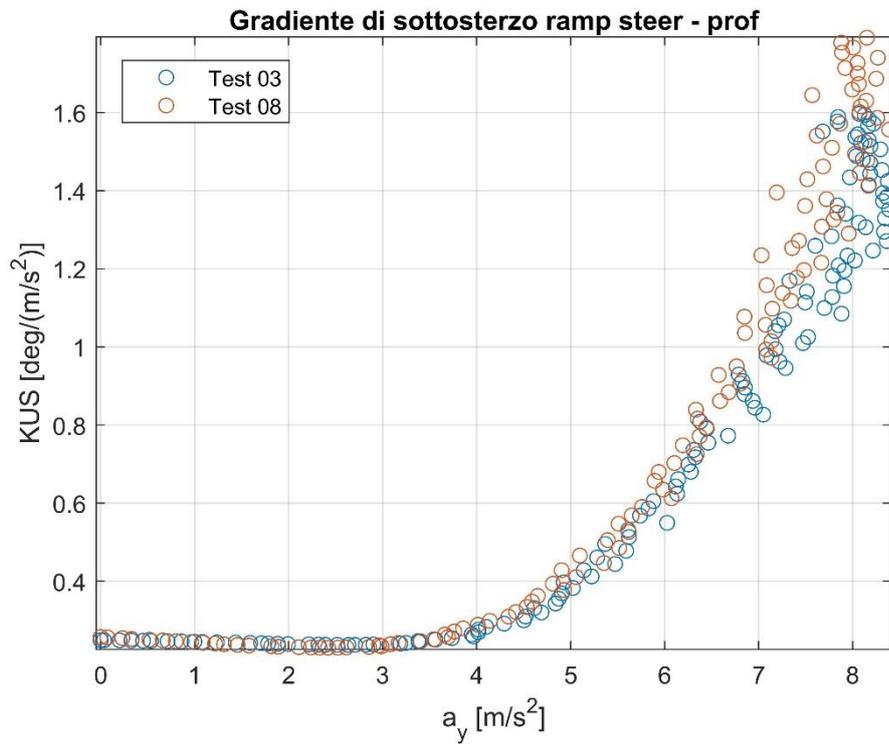
**Tabella 6.2 Sintesi parametri di analisi manovre ramp steer**

	<b>Prova</b>	<b>SMART</b>	<b>PROF</b>	<b>Errore ass.</b>	<b>Errore %</b>
<b>K<sub>US</sub> [°/g]</b>	Test 03	5,160	5,157	0,0	0,1%
	Test 08	4,739	5,066	-0,3	-6,4%
<b>K<sub>β</sub> [°/g]</b>	Test 03	1,570	1,727	-0,157	-9,1%
	Test 08	1,472	1,717	-0,245	-14,3%

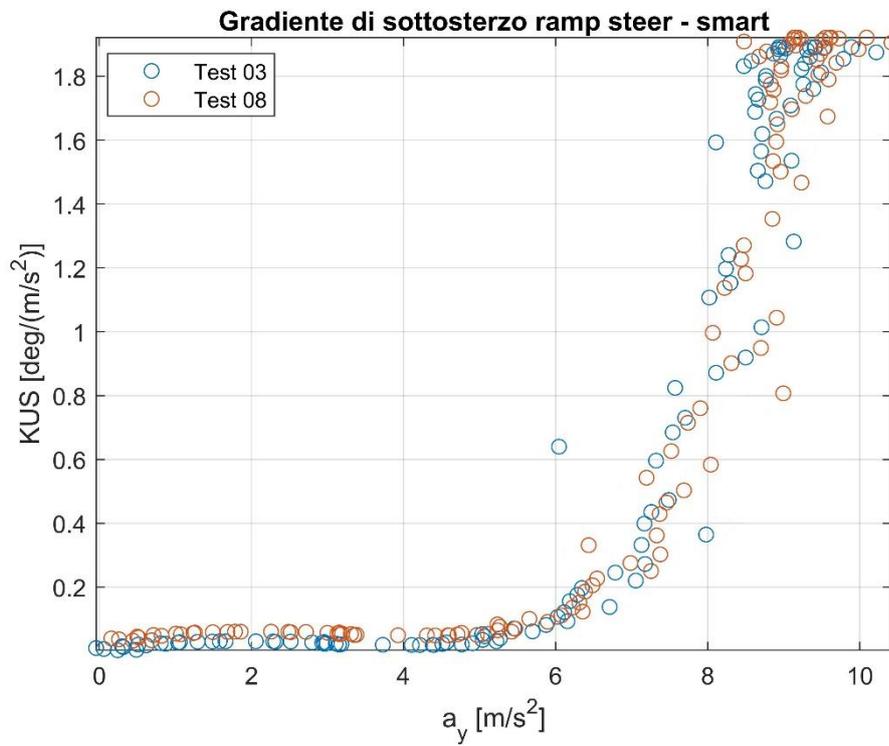
Nella sua definizione più generale, il gradiente di sottosterzo  $K_{US}$  è la pendenza locale, punto a punto, della caratteristica di sottosterzo. In formule:

$$K_{US} = \frac{\partial(\delta - \delta_0)}{\partial a_y} \quad (6.10)$$

Le *Figure 6.17* e *6.18* riportano il suo andamento (rispettivamente prof e smart) in funzione dell'accelerazione laterale  $a_y$ .



**Figura 6.9** Gradiente di sottosterzo in funzione di  $a_y$  ramp steer – prof



**Figura 6.10** Gradiente di sottosterzo in funzione di  $a_y$  ramp steer – smart

## 6.2.5. Angoli di deriva

L'*angolo di deriva*, o *slip angle*, è l'angolo formato fra l'asse longitudinale parallelo alla direzione delle ruote e la 'vera' traiettoria percorsa dal veicolo. Tale direzione è definita dalla traiettoria impostata e dalla reale direzione assunta dalla ruota (cerchio + pneumatico) durante la marcia.

Da un punto di vista analitico, gli angoli di deriva anteriore e posteriore sono definiti come:

$$\alpha_F = \tau \delta_v - \left( \frac{V_y + \dot{\psi} \cdot a}{V_x} \right) \quad (6.11)$$

$$\alpha_R = - \left( \frac{V_y - \dot{\psi} \cdot b}{V_x} \right) \quad (6.12)$$

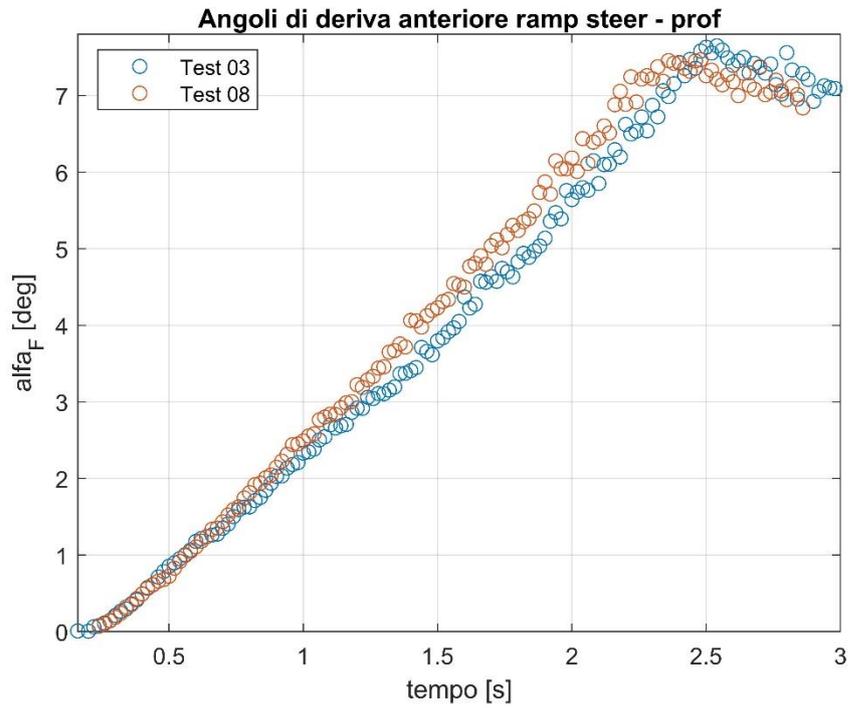


Figure 6.11 Angolo di deriva anteriore in funzione del tempo – *prof*

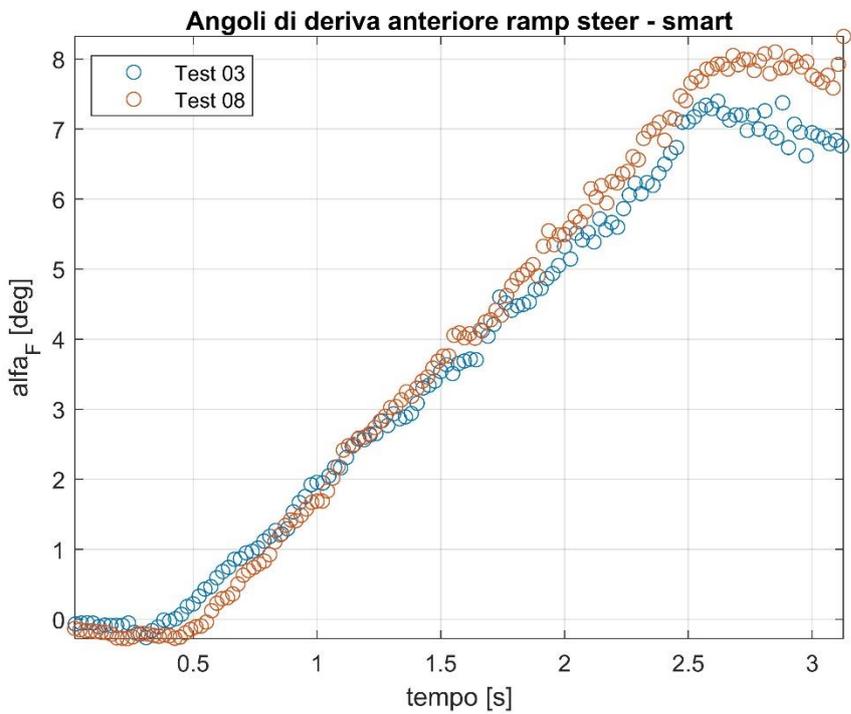
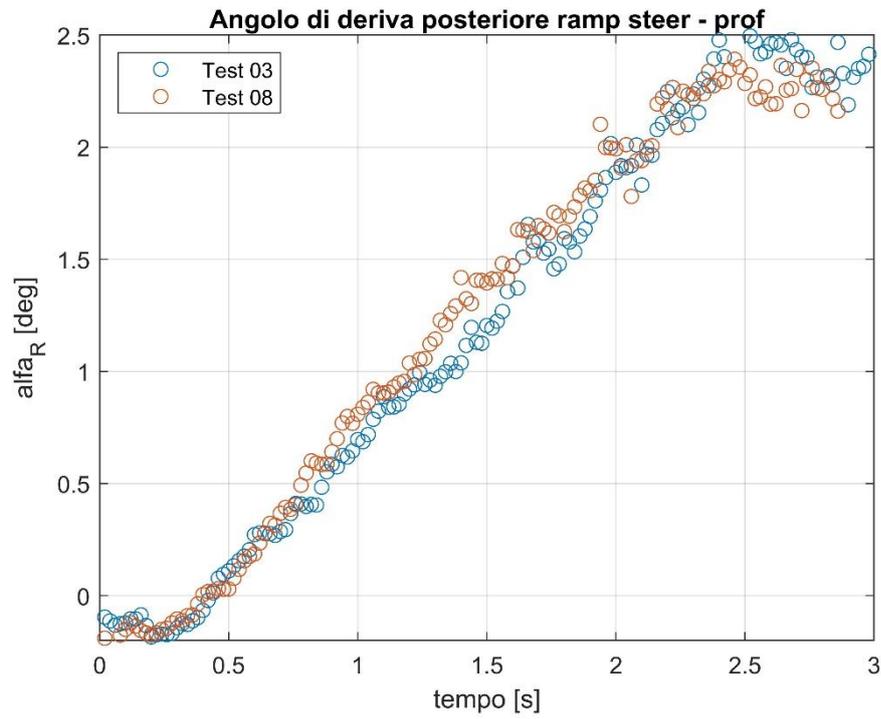
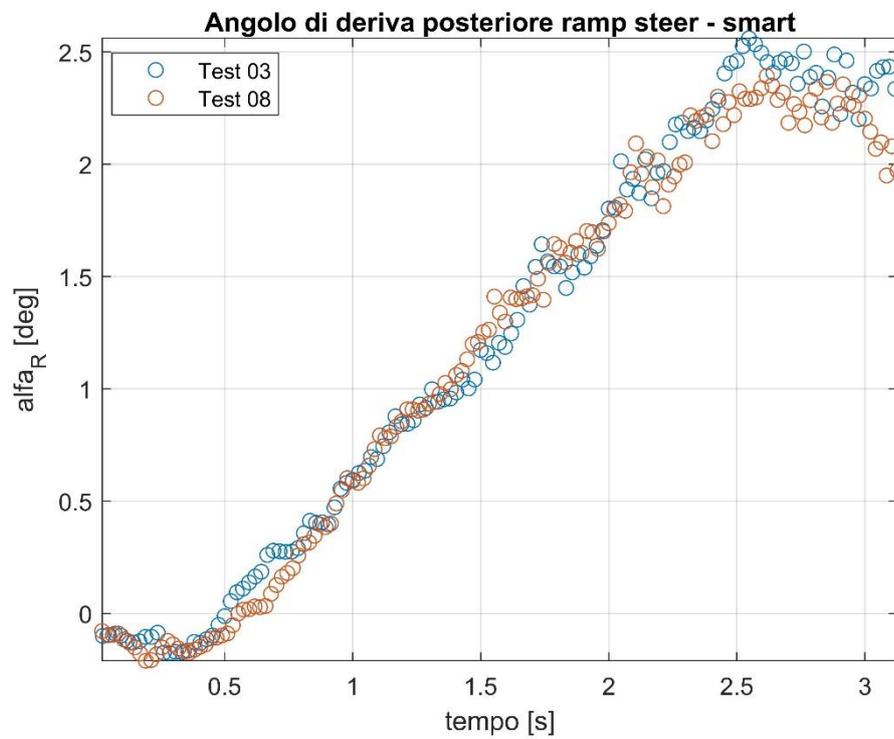


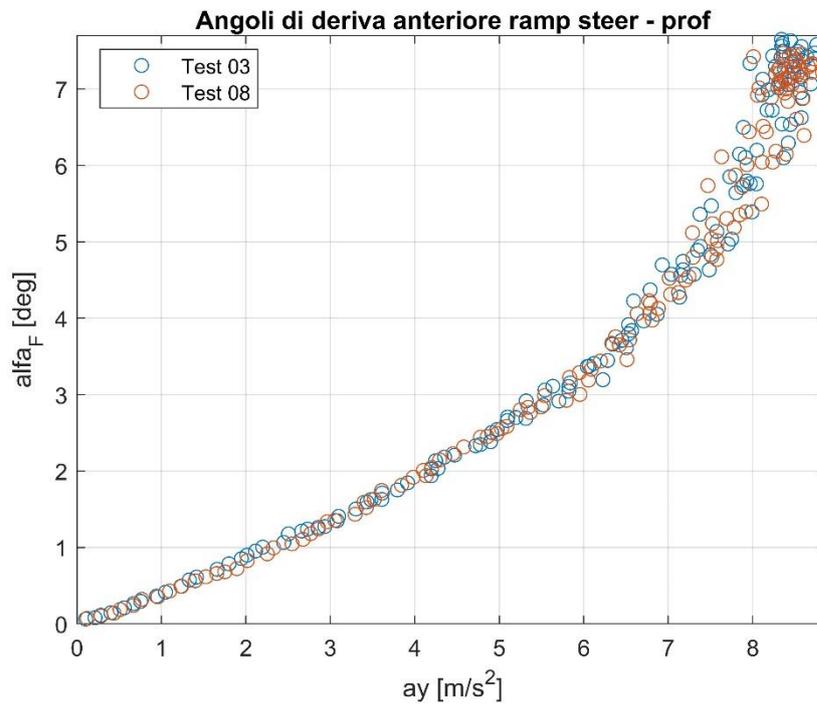
Figura 6.12 Angolo di deriva anteriore in funzione del tempo – *smart*



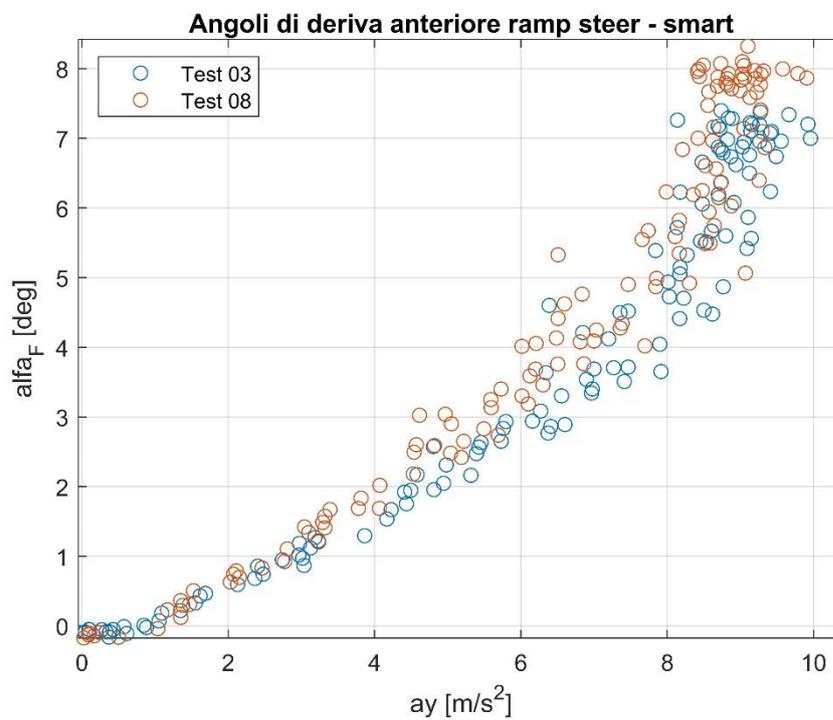
**Figura 6.13** Angolo di deriva posteriore in funzione del tempo – *prof*



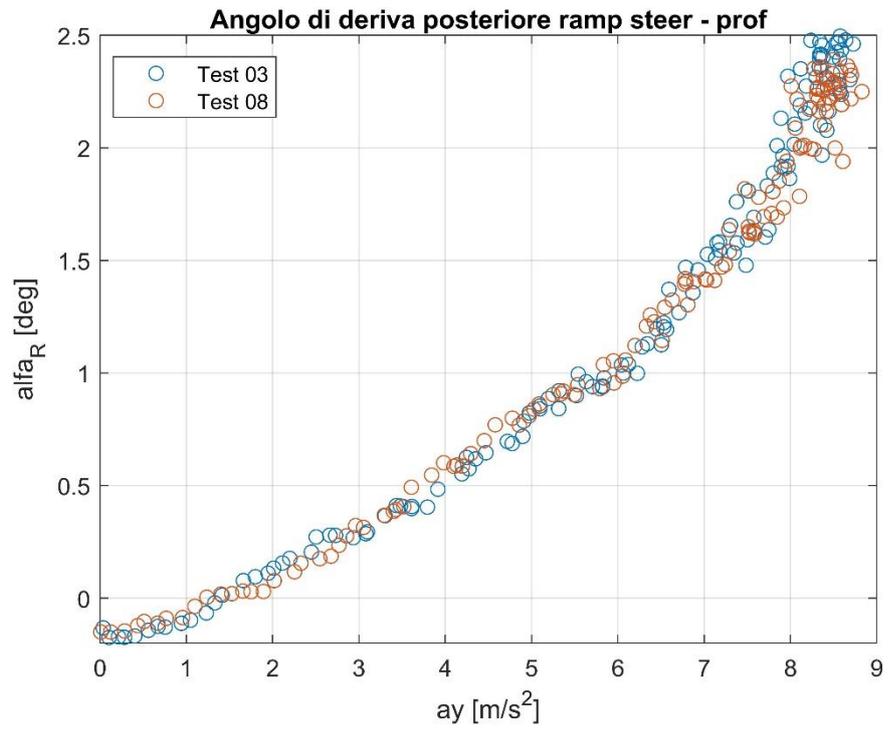
**Figura 6.14** Angolo di deriva posteriore in funzione del tempo – *smart*



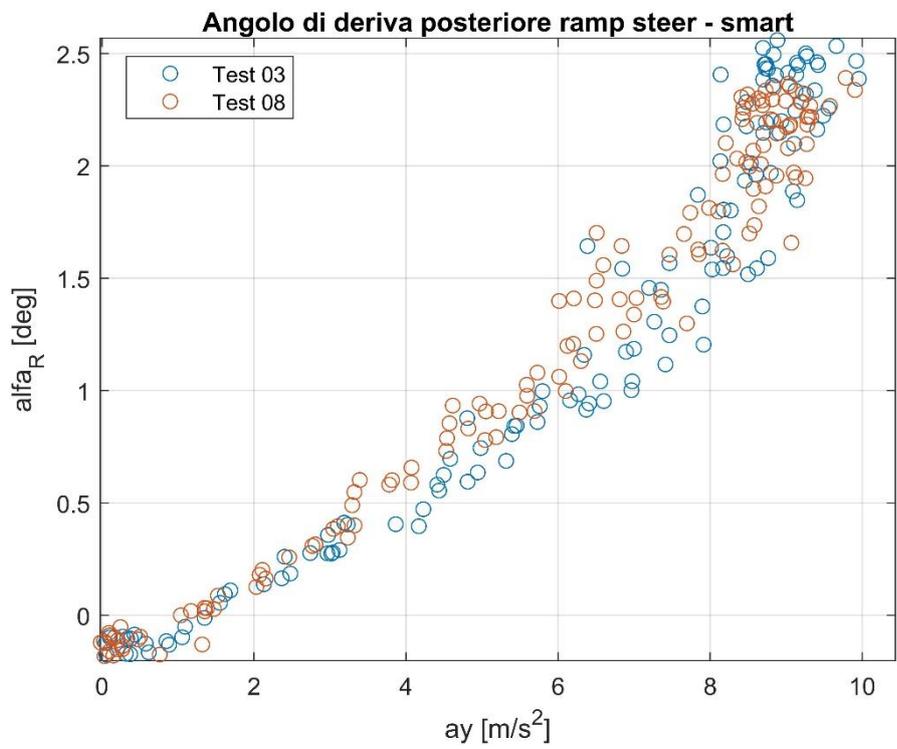
**Figura 6.15** Angolo di deriva anteriore in funzione di  $a_y$  – *prof*



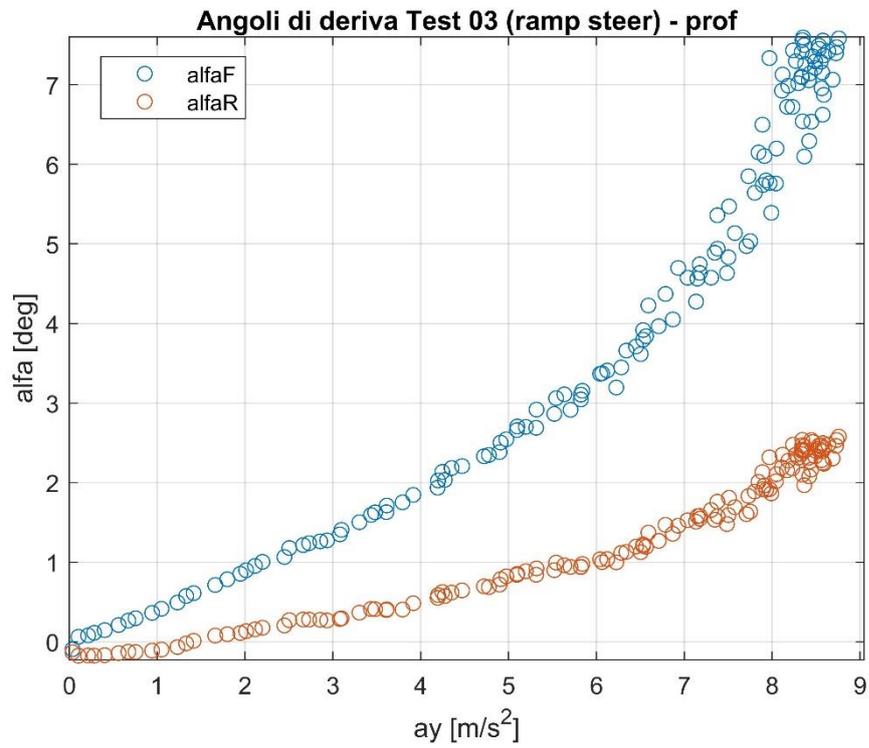
**Figura 6.16** Angolo di deriva anteriore in funzione di  $a_y$  – *smart*



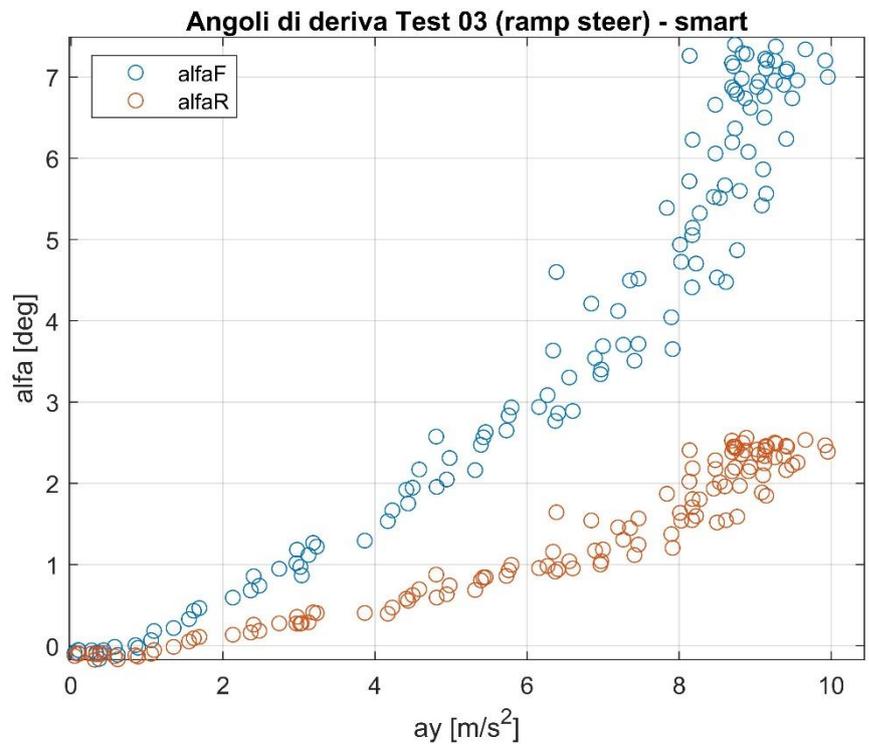
**Figura 6.17** Angolo di deriva posteriore in funzione di  $a_y$  – prof



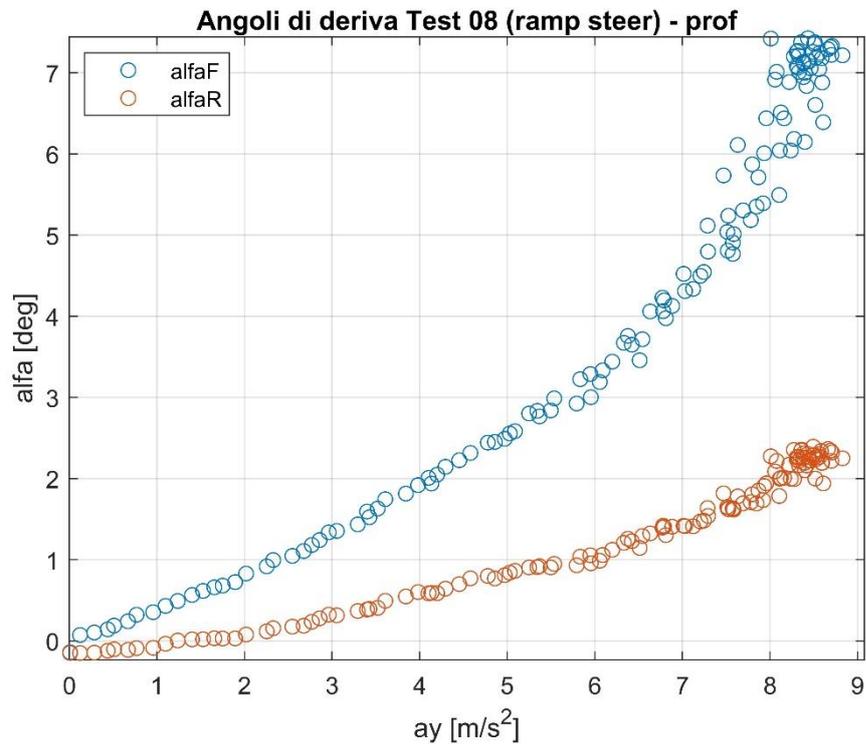
**Figura 6.18** Angolo di deriva posteriore in funzione di  $a_y$  – smart



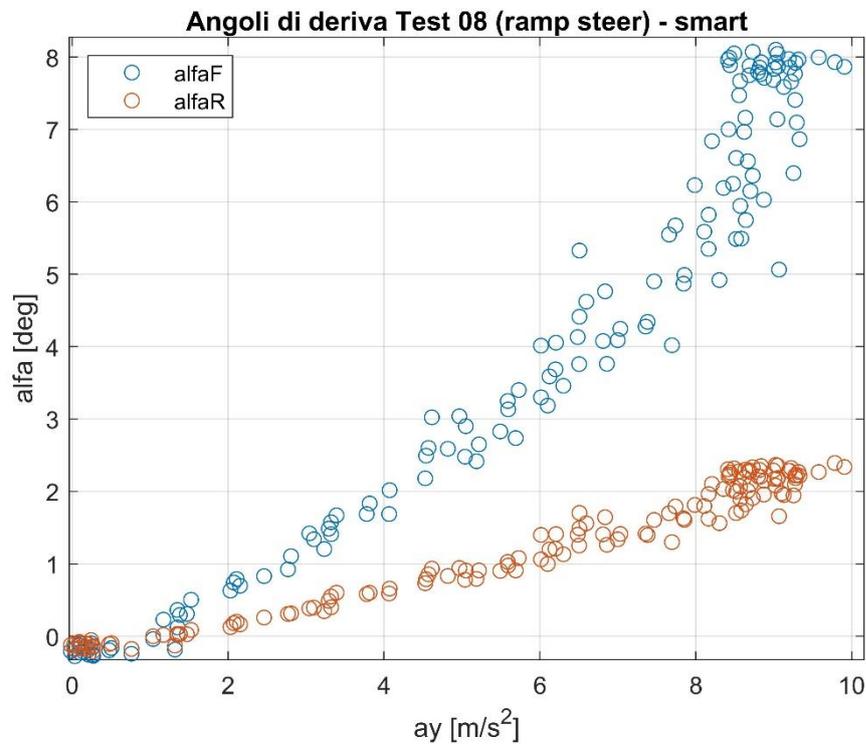
**Figura 6.19** Confronto angoli di deriva Test 03 – *prof*



**Figura 6.20** Confronto angoli di deriva Test 03 – *smart*



**Figura 6.21** Confronto angoli di deriva Test 08 – *prof*



**Figura 6.22** Confronto angoli di deriva Test 08 – *smart*

### 6.2.5.1. Confronto *smart* vs *prof*

Le figure seguenti riportano il confronto diretto tra gli andamenti degli angoli di deriva anteriore e posteriore (in funzione del tempo e dell'accelerazione laterale) *prof* e *smart* relativi al Test 03, a titolo di esempio.

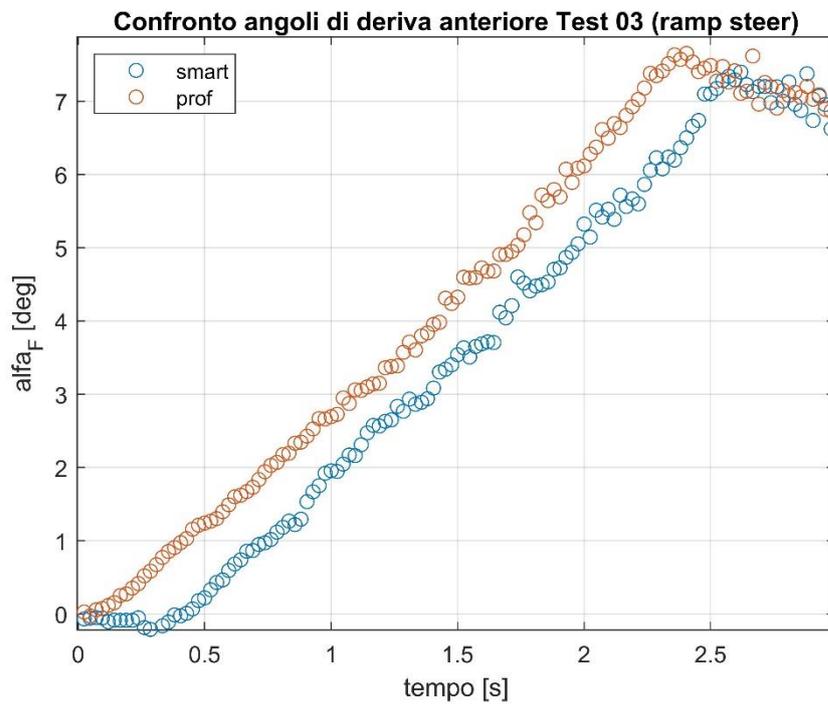


Figura 6.23 Confronto angolo di deriva anteriore in funzione del tempo Test 03 - *prof* vs *smart*

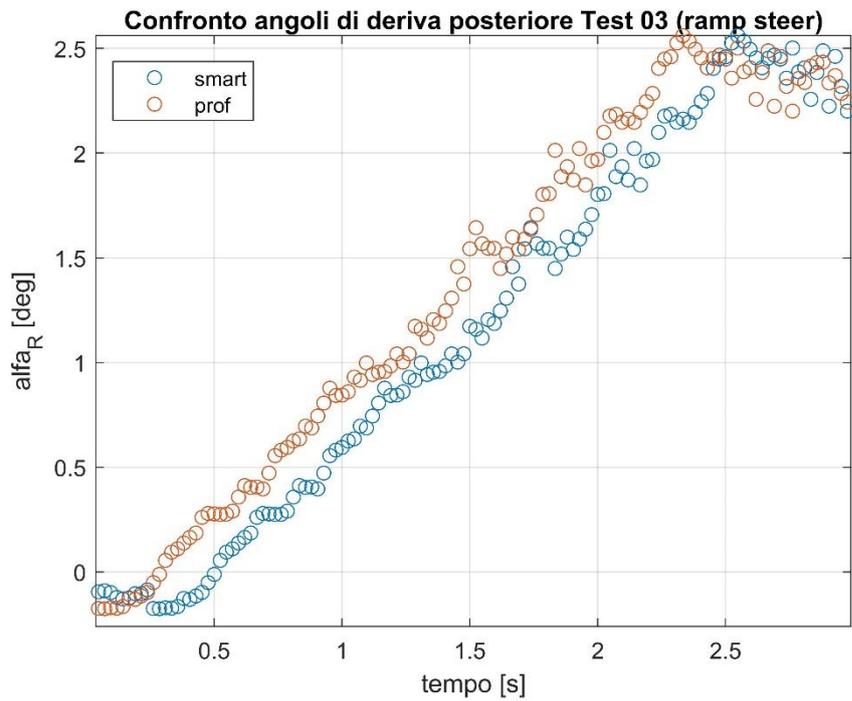


Figura 6.24 Confronto angolo di deriva posteriore in funzione del tempo Test 03 - *prof vs smart*

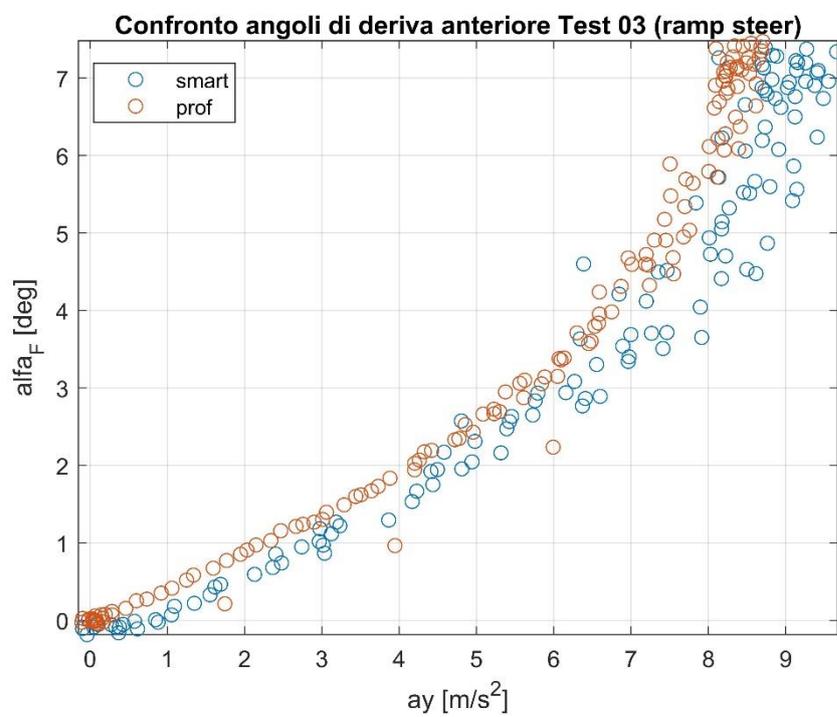
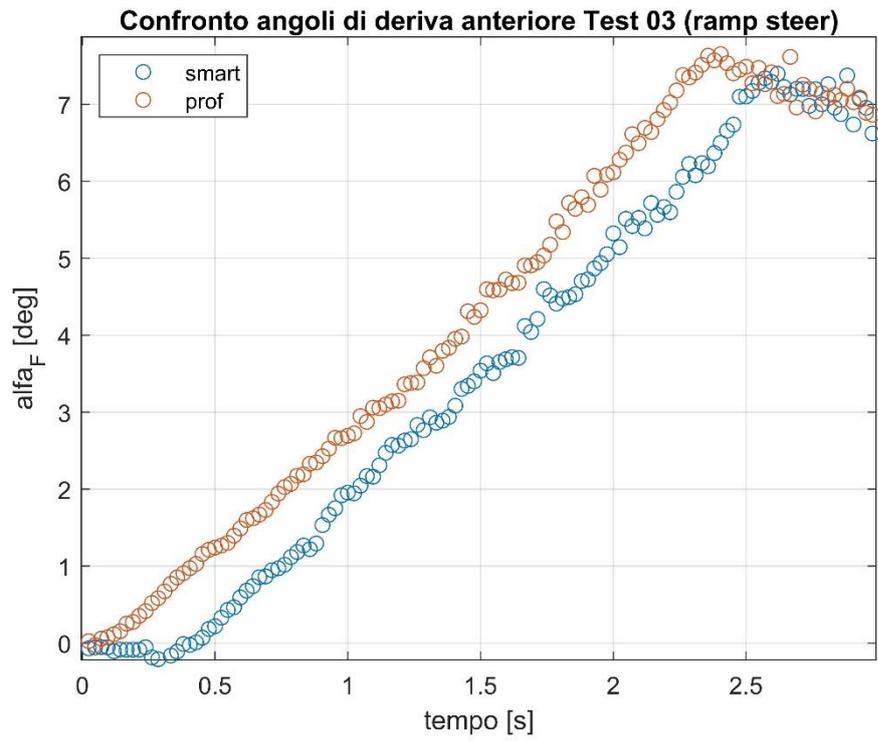


Figura 6.25 Confronto angolo di deriva anteriore in funzione di  $a_y$  Test 03 - *prof vs smart*

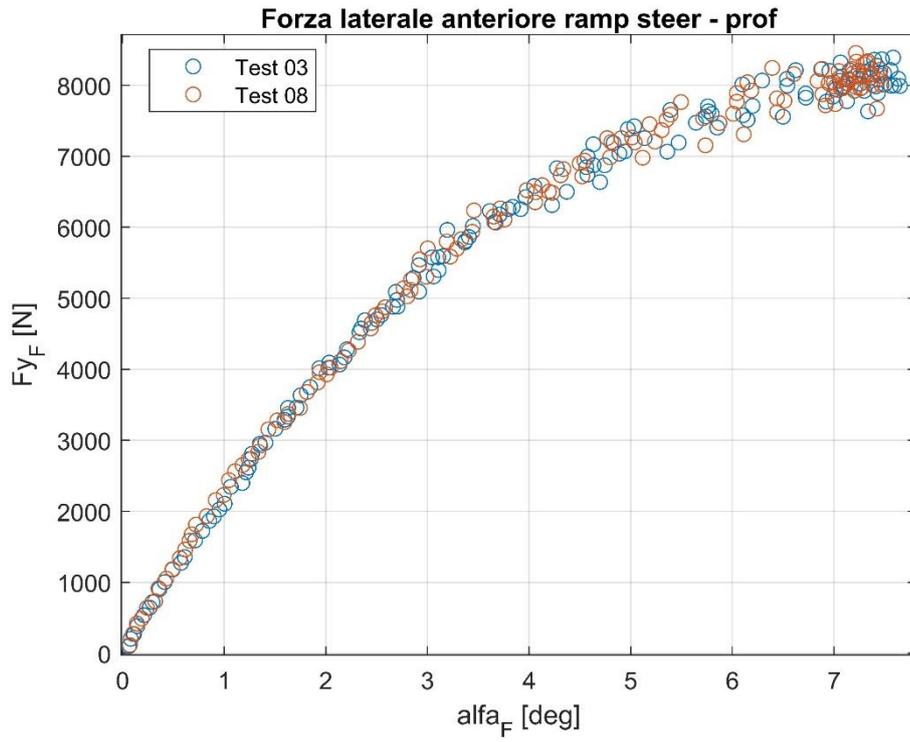


**Figura 6.26** Confronto angolo di deriva posteriore in funzione di  $a_y$  Test 03 - *prof* vs *smart*

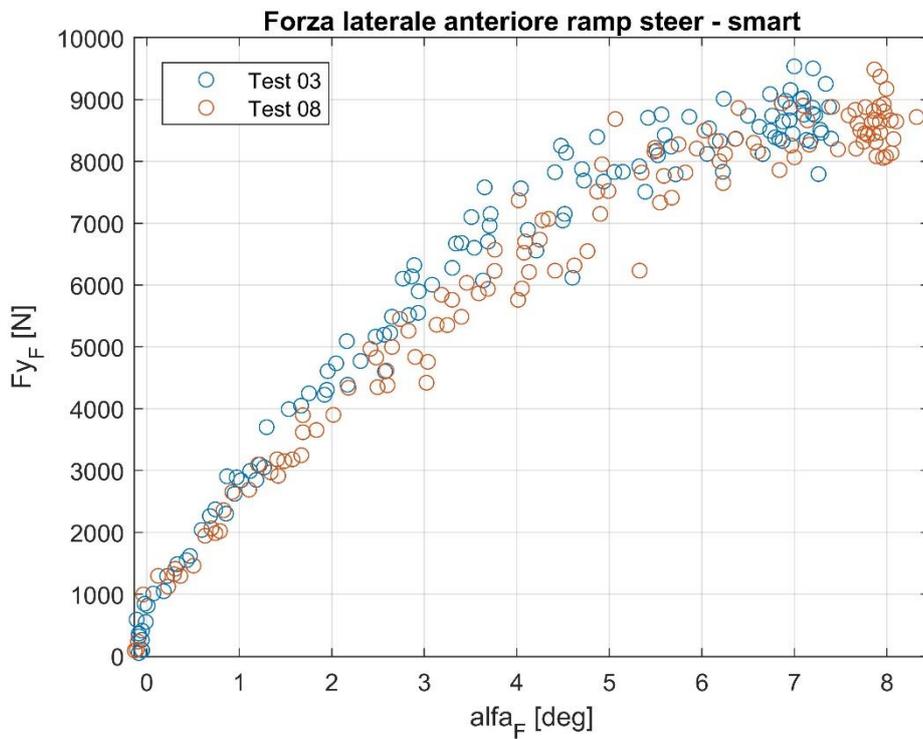
## 6.2.6. Forze laterali

Da un punto di vista analitico, le forze laterali anteriore e posteriore sono definiti come:

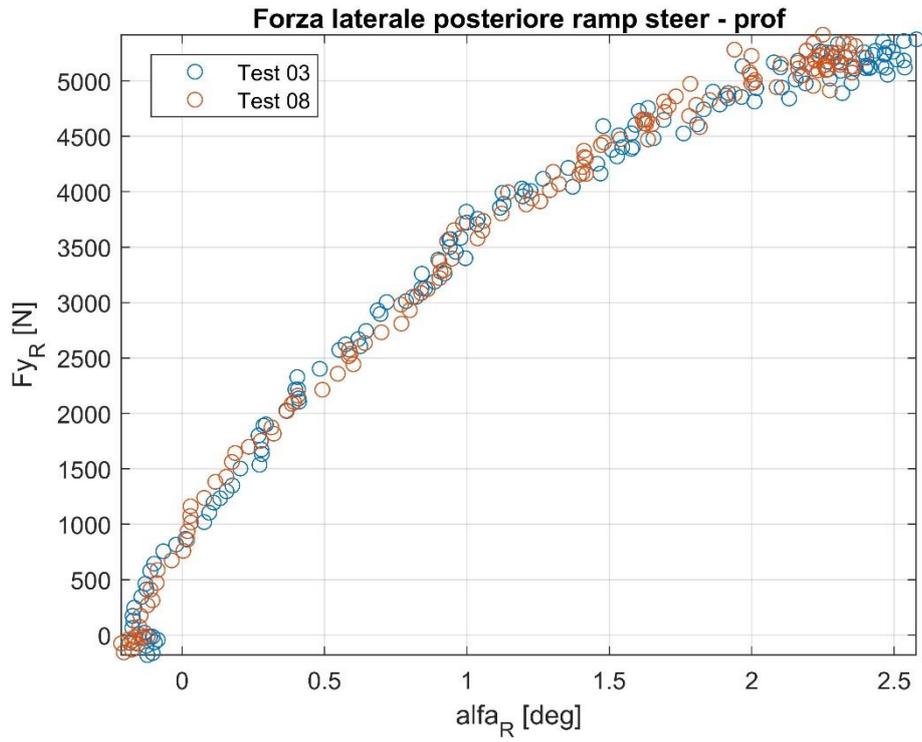
$$\begin{cases} a_y \cong a_{yF} \cong a_{yR} \\ F_{yF} = m_F \cdot a_y = C_{yF} \cdot \alpha_F \\ F_{yR} = m_R \cdot a_y = C_{yR} \cdot \alpha_R \end{cases} \quad (6.13)$$



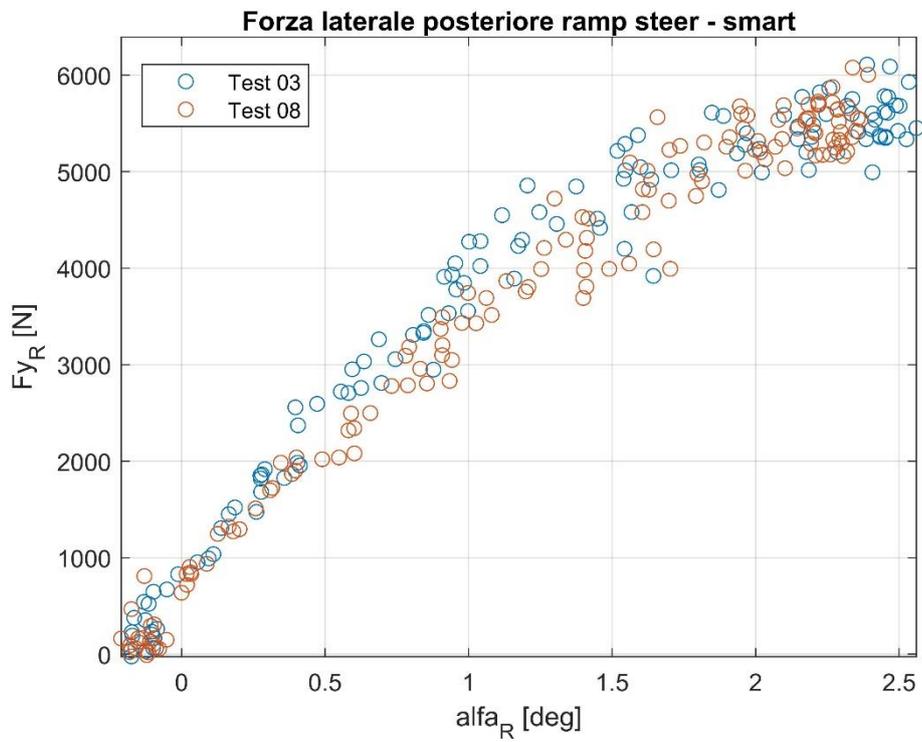
**Figura 6.27** Forza laterale anteriore – *prof*



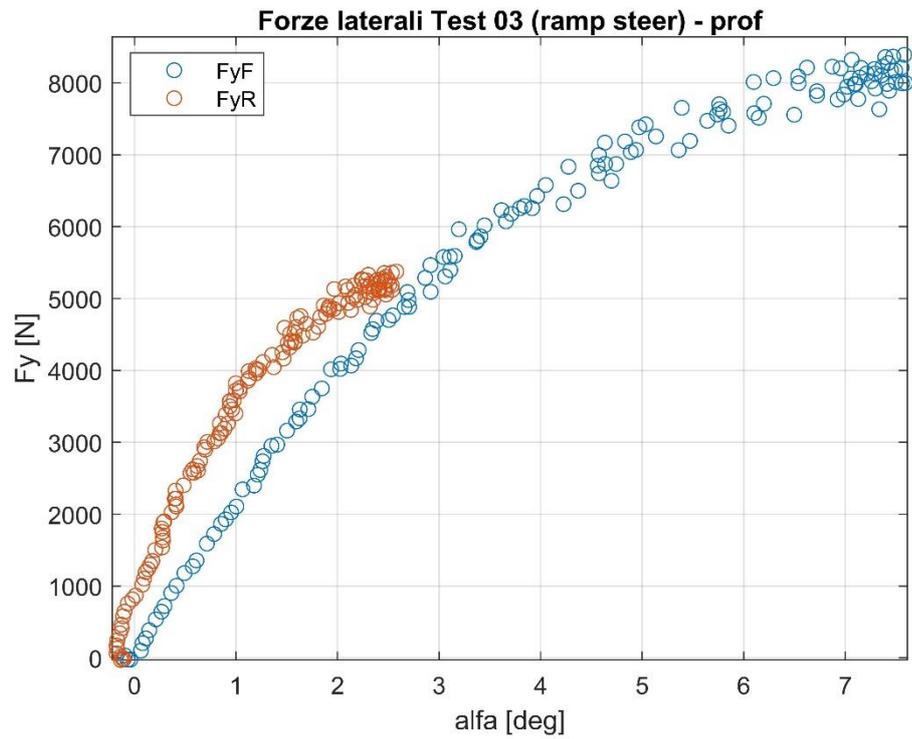
**Figura 6.28** Forza laterale anteriore – *smart*



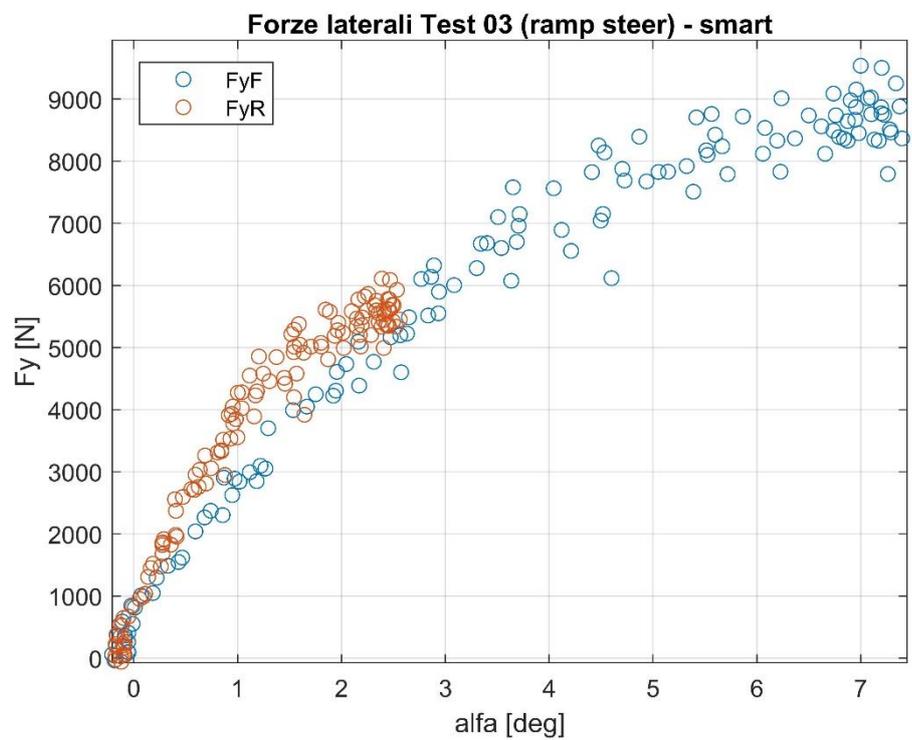
**Figura 6.29** Forza laterale posteriore – *prof*



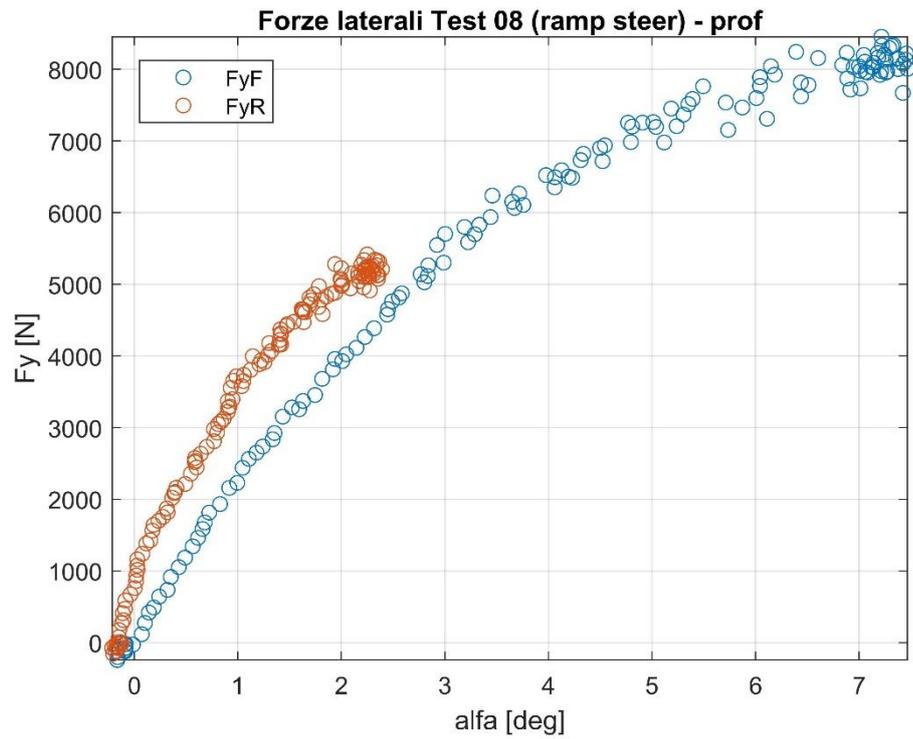
**Figura 6.30** Forza laterale posteriore – *smart*



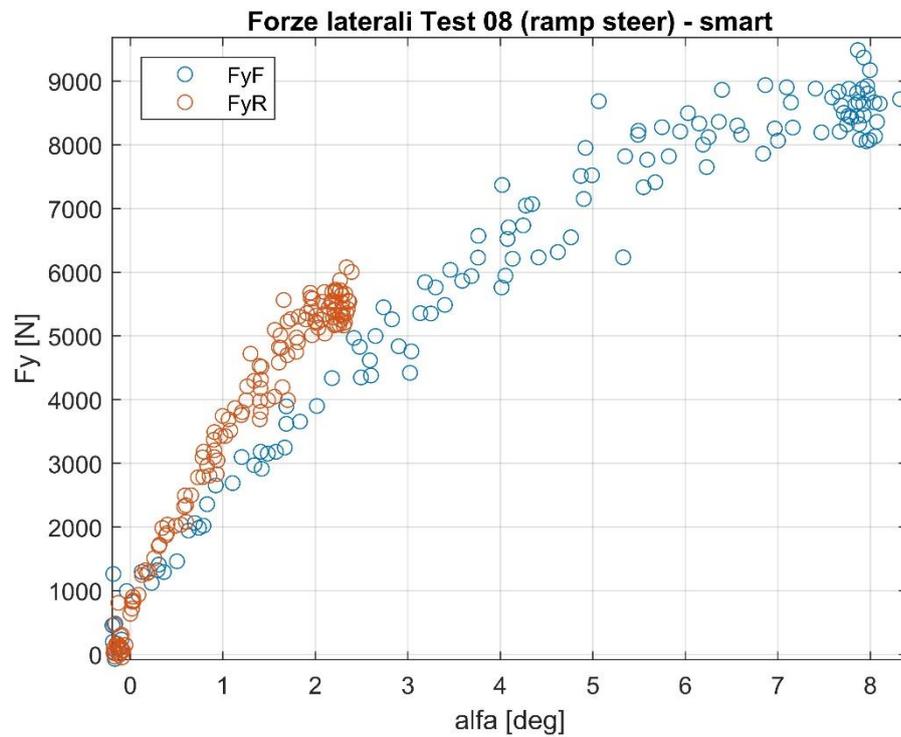
**Figura 6.31** Confronto forze laterali Test 03 – *prof*



**Figura 6.32** Confronto forze laterali Test 03 – *smart*



**Figura 6.33** Confronto forze laterali Test 08 – *prof*



**Figure 6.34** Confronto forze laterali Test 08 – *smart*

### 6.2.6.1. Confronto *smart* vs *prof*

Le figure seguenti riportano il confronto diretto tra gli andamenti delle forze laterali anteriore e posteriore *prof* e *smart* relativi al Test 03, a titolo di esempio.

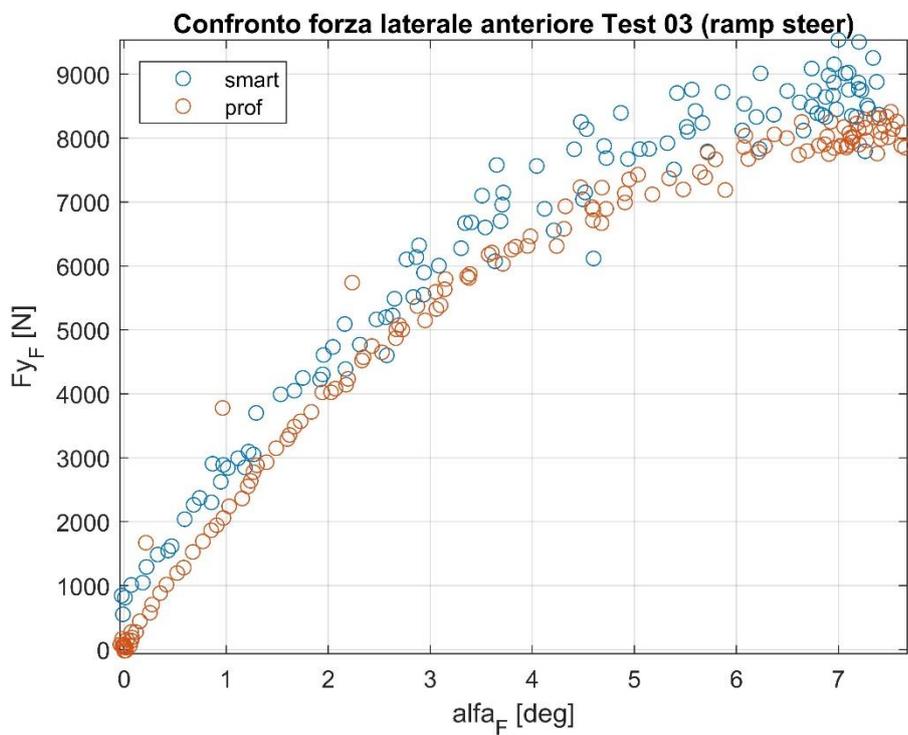
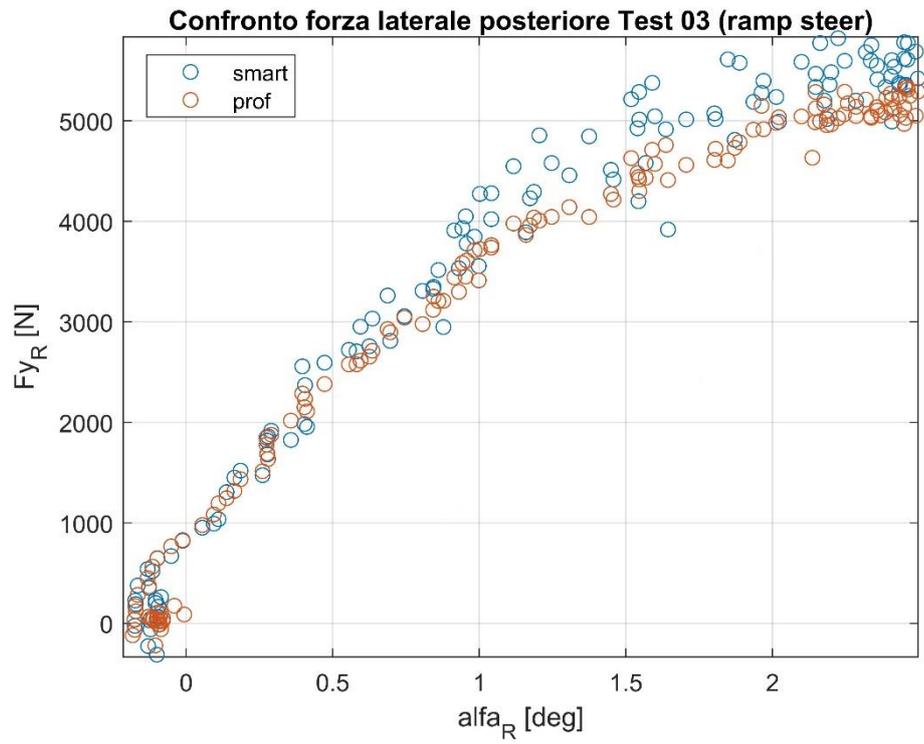


Figura 6.35 Confronto forza laterale anteriore Test 03 - *prof* vs *smart*



**Figura 6.36** Confronto forza laterale posteriore Test 03 - *prof* vs *smart*

## 6.2.7. Analisi confronto

Nell'ambito delle prove di *ramp steer* è stata riscontrata una correlazione molto buona tra dati rilevati dalla strumentazione sensoristica professionale e quelli ottenuti tramite smartphone, sia da un punto di vista grafico che da un punto di vista numerico.

La dispersione sul piano dei dati *smart* risulta essere ovviamente maggiore: ciò dipende da una serie di cause già trattate nei capitoli precedenti, come la sensibilità dei sensori dello smartphone o la presenza di un certo rumore di fondo nella rilevazione del segnale non del tutto rimosso per evitare di perdere informazioni utili ai fini del confronto.

Il calcolo potrebbe essere ulteriormente perfezionato lavorando sull'implementazione di un modello veicolo più complesso ed articolato rispetto al monotraccia lineare.

## 6.3. Colpo di sterzo

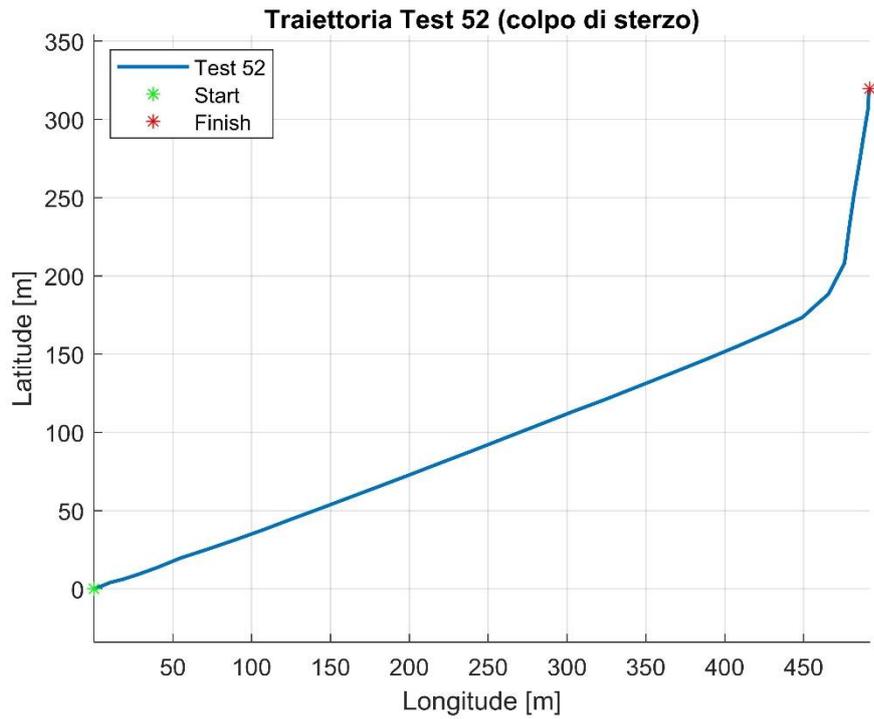
Dalle due prove stazionarie di *colpo di sterzo* analizzate – indicate con i nomi Test 52 e Test 56 – sono stati ricavati:

- Andamento temporale dell'accelerazione laterale [ $a_y(t)$ ];
- Andamento temporale della velocità di imbardata [ $\psi'(t)$ ];
- Andamento temporale dell'angolo di sterzo [ $\delta(t)$ ];
- Andamento temporale dell'angolo di assetto [ $\beta(t)$ ];
- Overshoot della risposta di imbardata;
- Valori massimo e minimo dell'angolo di assetto  $\beta$ ;
- Frequenza di oscillazione.

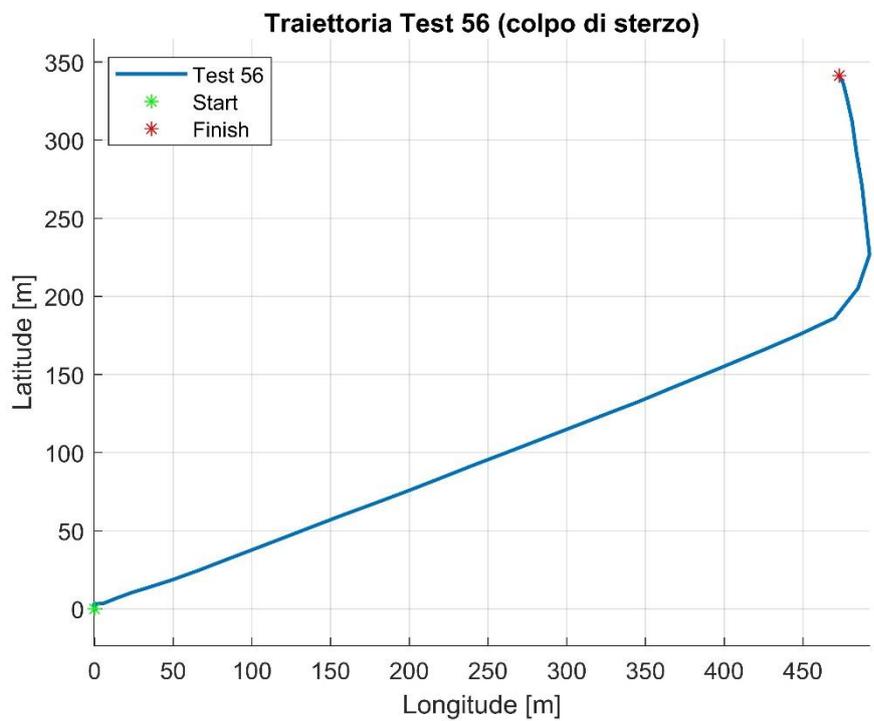
### **6.3.1. Traiettorie manovre**

Le *Figure 6.37* e *6.38* riportano la traiettoria delle due prove – Test 52 e Test 56 – di *colpo di sterzo* effettuate. Le traiettorie sono state ricavate sfruttando esclusivamente la misurazione delle coordinate spaziali da parte del sensore GPS dello smartphone, in quanto durante le prove si è verificato un mancato funzionamento del sensore GPS della strumentazione sensoristica professionale.

Da questi grafici è possibile valutare l'ampiezza del colpo di sterzo effettuato dal driver durante le due manovre. La seconda prova presenta, infatti, una variazione impulsiva più accentuata rispetto alla prima, con la velocità del veicolo nominalmente identica.



**Figura 6.37 Traiettoria Test 52 - colpo di sterzo**



**Figura 6.38 Traiettoria Test 52 - colpo di sterzo**

### 6.3.2. Andamento temporale accelerazione laterale

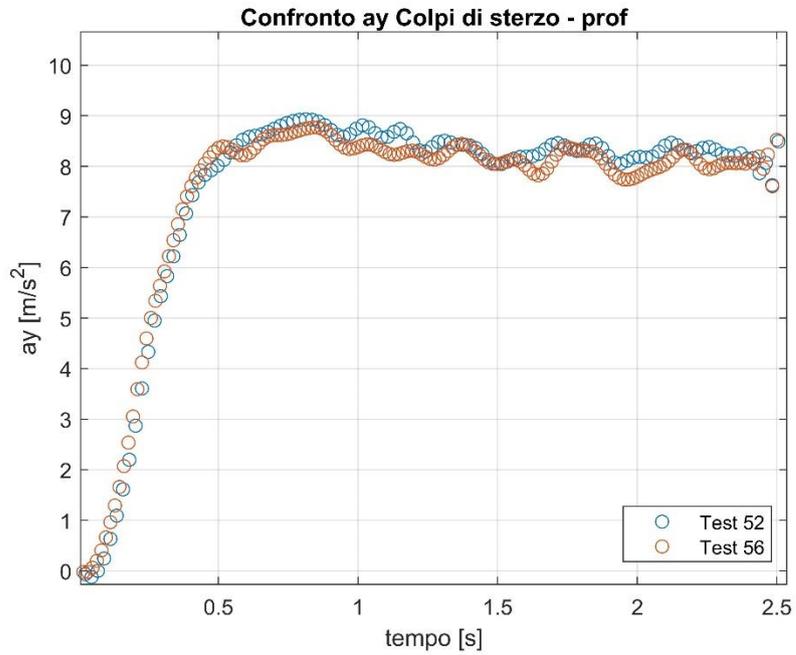


Figure 6.39 Confronto accelerazione laterale colpi di sterzo - *prof*

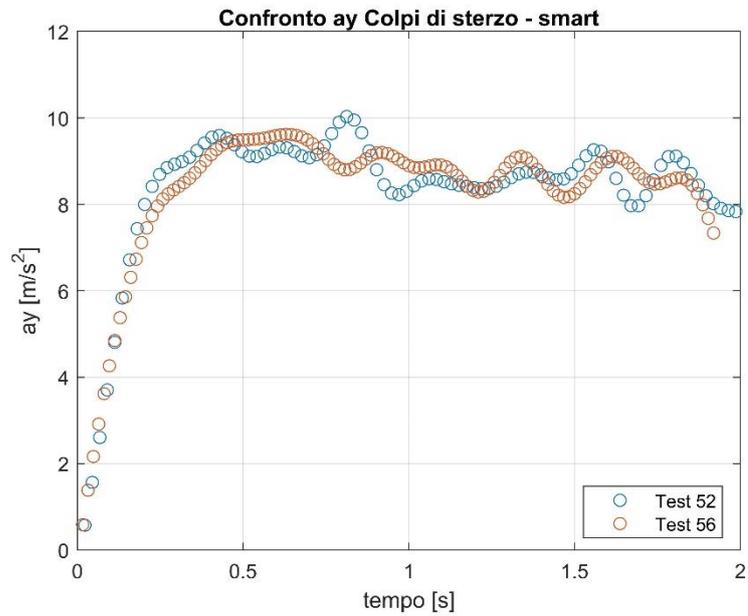


Figura 6.40 Confronto accelerazione laterale colpi di sterzo - *smart*

### 6.3.3. Andamento temporale velocità di imbardata

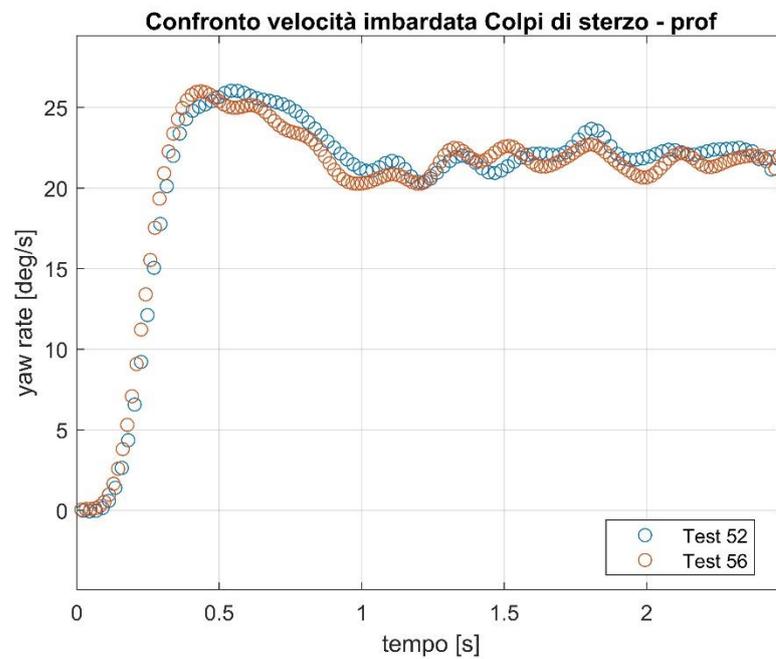


Figura 6.41 Confronto velocità di imbardata colpi di sterzo - *prof*

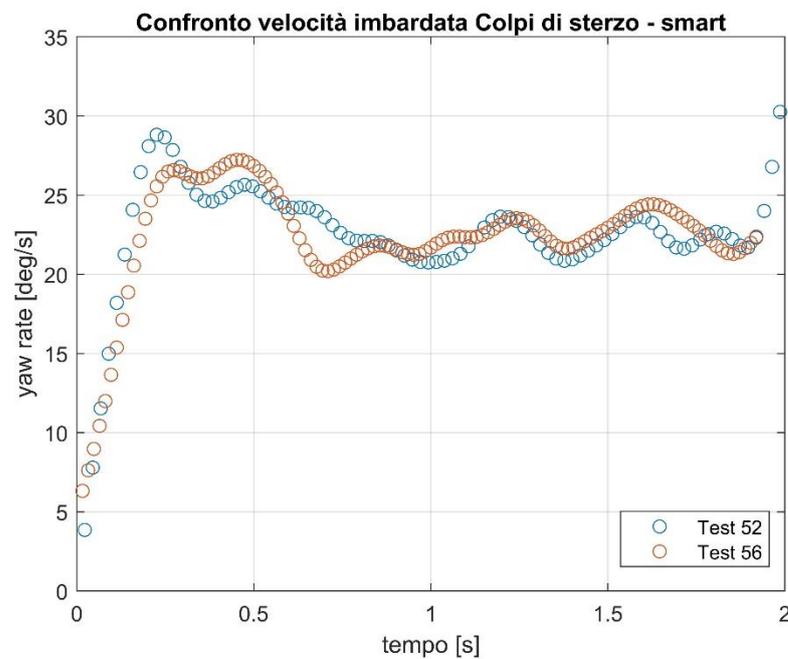


Figura 6.42 Confronto velocità di imbardata colpi di sterzo - *smart*

### 6.3.4. Andamento temporale angolo di sterzo

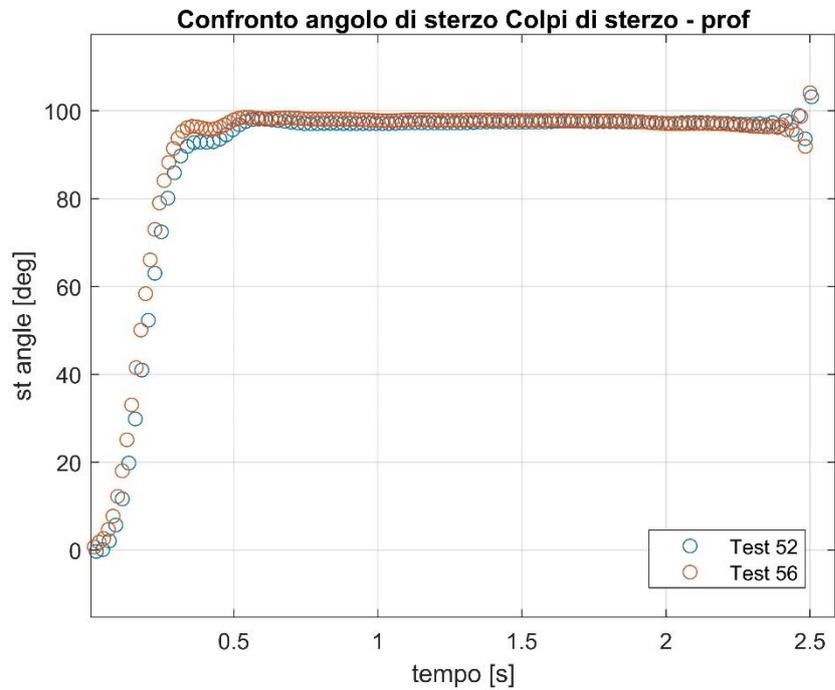


Figura 6.43 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo - *prof*

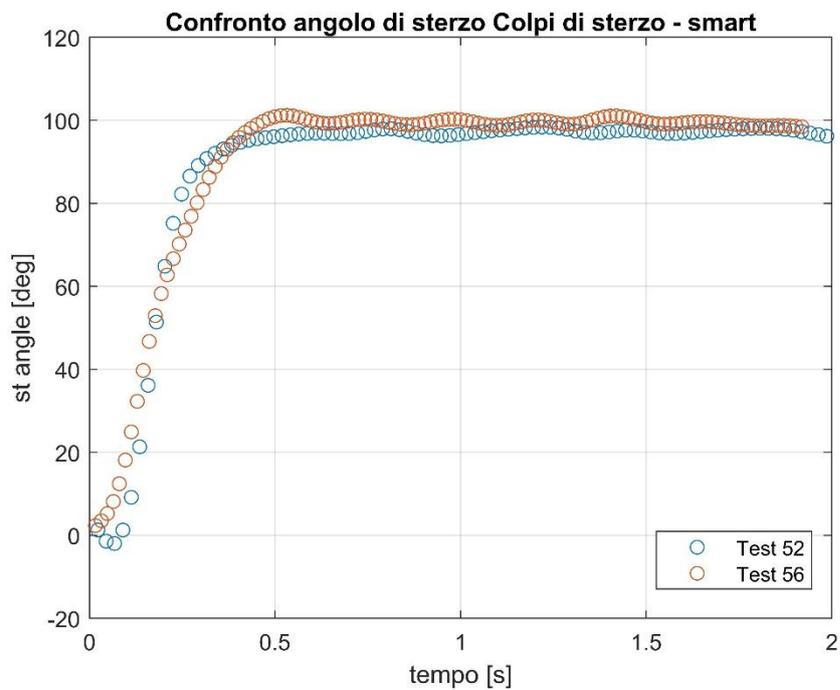


Figura 6.44 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo - *smart*

### 6.3.5. Andamento temporale angolo di assetto

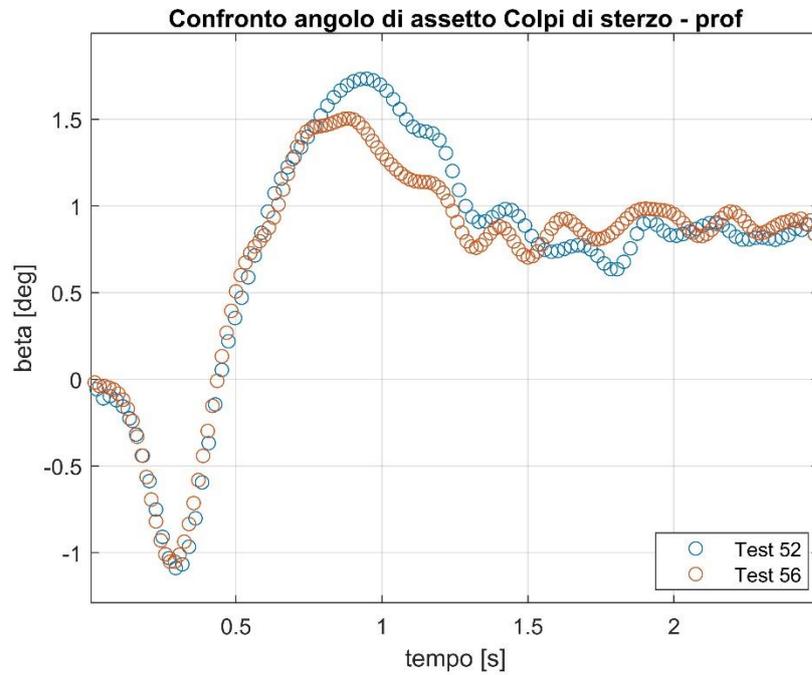


Figura 6.45 Confronto angolo di assetto colpi di sterzo - *prof*

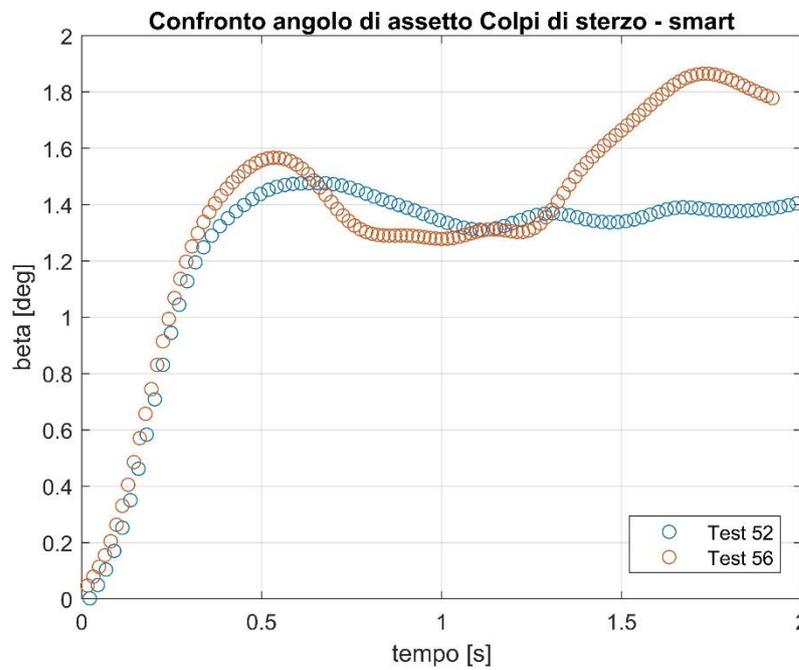


Figura 6.46 Confronto angolo di sterzo colpi di sterzo - *smart*

### 6.3.6. Confronto *smart* vs *prof*

Le figure seguenti riportano il confronto diretto tra gli andamenti *prof* e *smart* relativi al Test 52, a titolo di esempio.

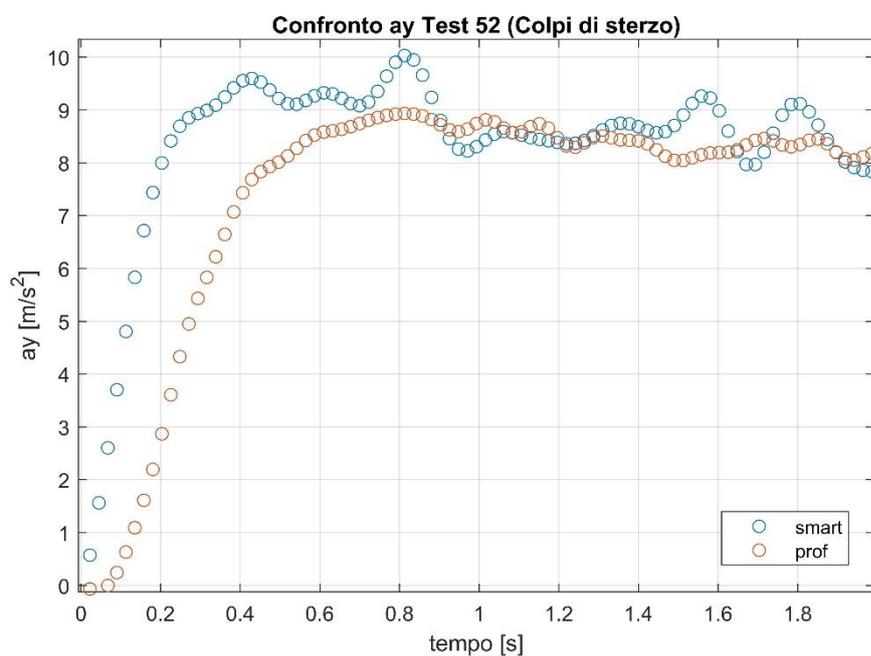
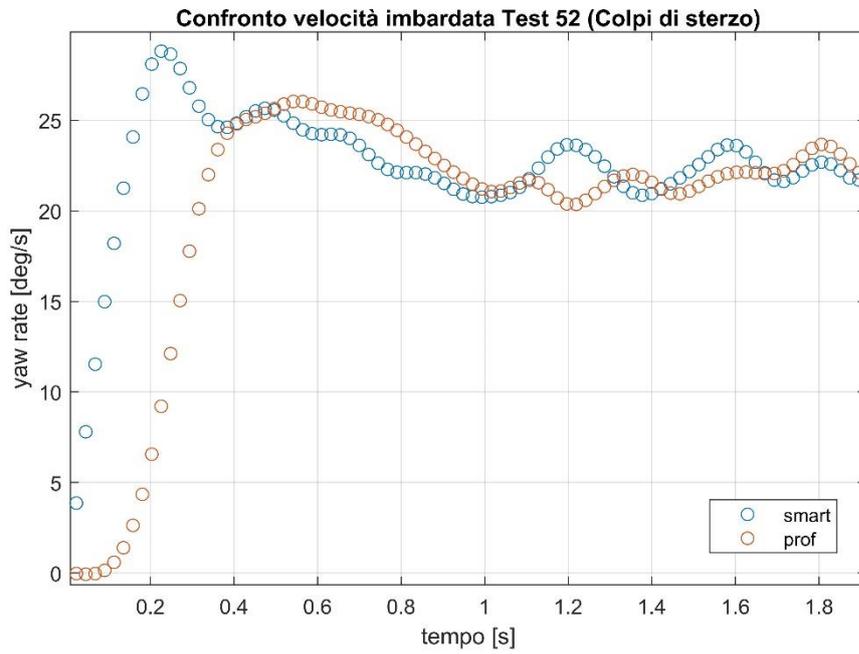
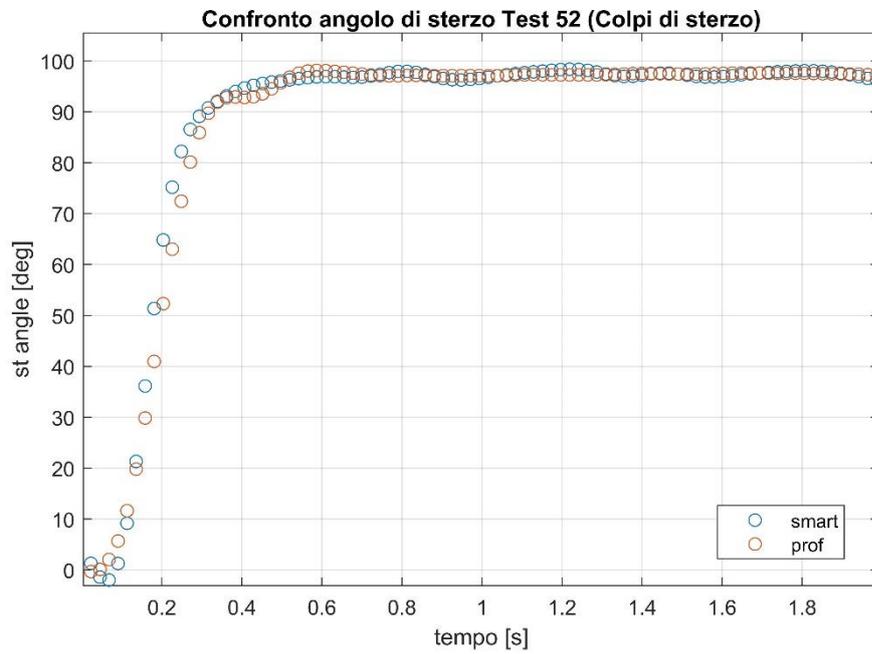


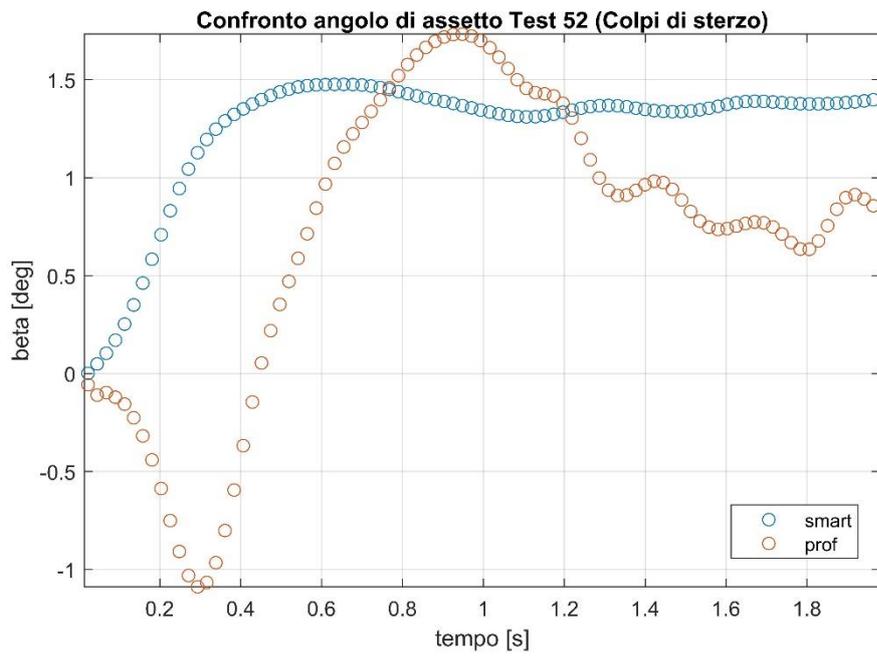
Figura 6.47 Confronto accelerazione laterale Test 52 - *prof* vs *smart*



**Figura 6.48** Confronto velocità di imbardata Test 52 - *prof vs smart*



**Figura 6.49** Confronto angolo di sterzo Test 52 - *prof vs smart*

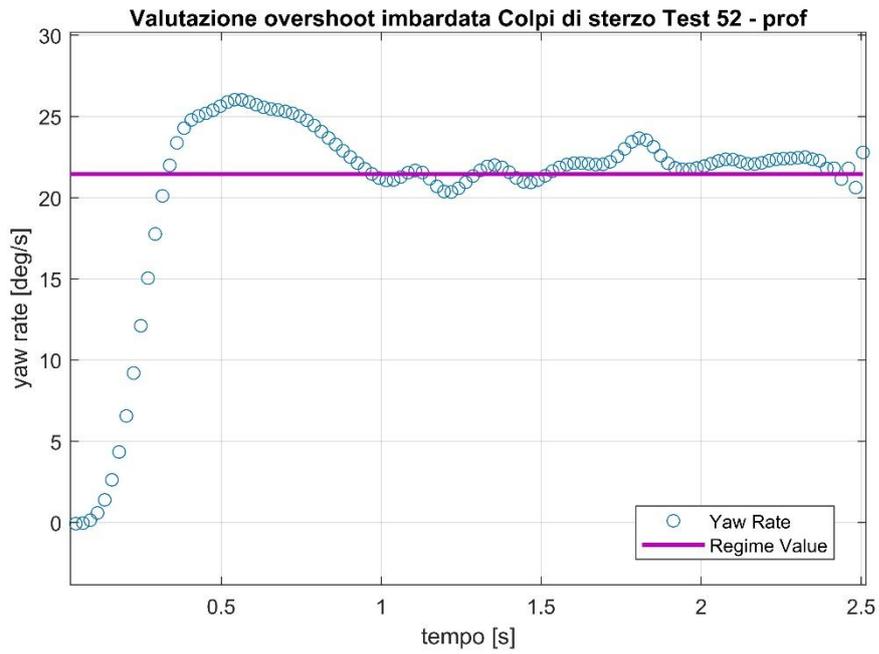


**Figura 6.50 Confronto angolo di assetto Test 52 - *prof* vs *smart***

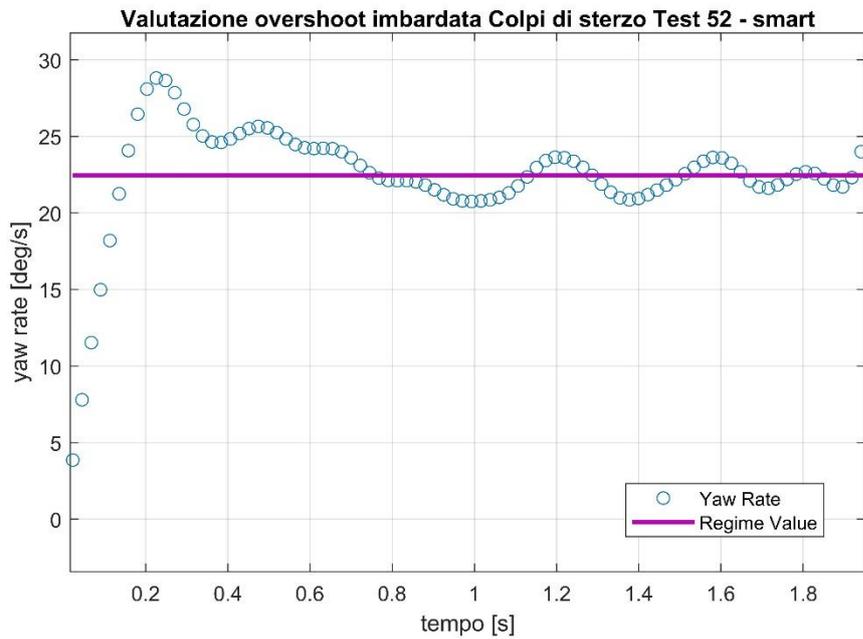
### **6.3.7. Overshoot della risposta di imbardata**

Dai grafici che esprimono l'andamento della velocità di imbardata in funzione del tempo è stato possibile fare una stima dell'overshoot di imbardata, calcolato come:

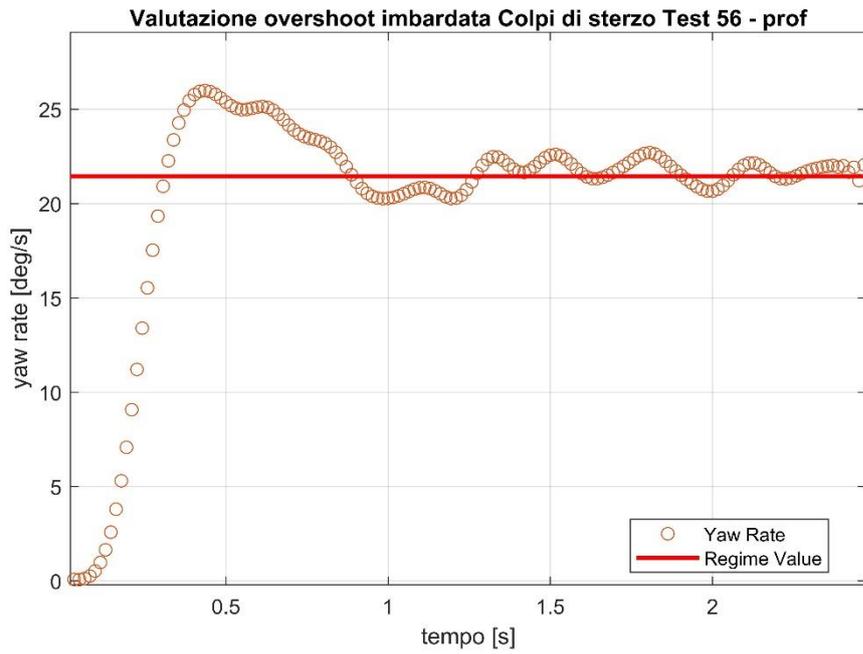
$$OS_{\%} = \frac{y_{max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \cdot 100 \quad (6.14)$$



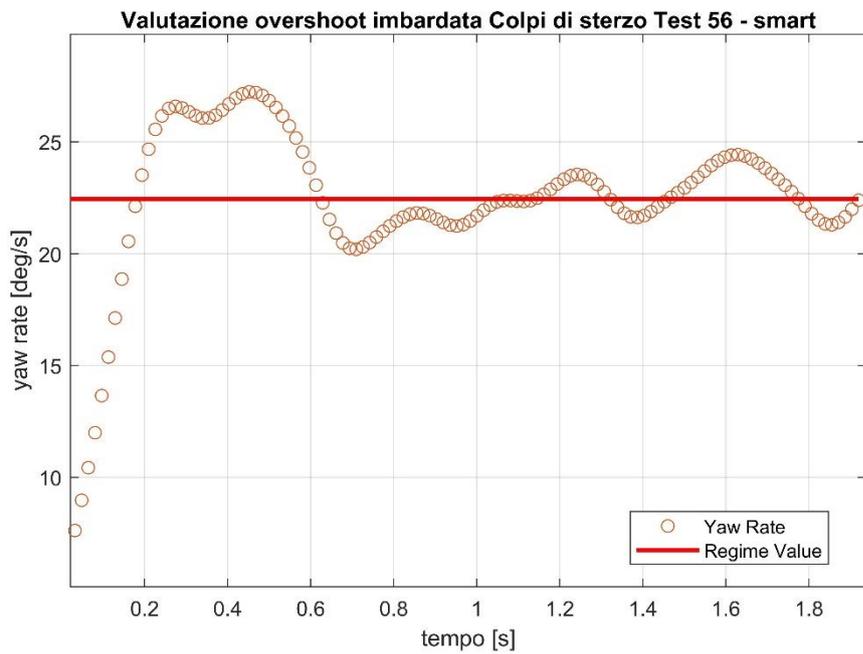
**Figura 6.51** Valutazione overshoot imbardata Test 52 - *prof*



**Figura 6.52** Valutazione overshoot imbardata Test 52 - *smart*



**Figura 6.53** Valutazione overshoot imbardata Test 56 - *prof*



**Figura 6.54** Valutazione overshoot imbardata Test 56 - *smart*

### 6.3.8. Analisi confronto

Come si evince dai grafici, gli andamenti *smart* e *prof* di accelerazione laterale, angolo di sterzo e velocità di imbardata sono molto simili per entrambe le prove effettuate, con lievi oscillazioni per quanto riguarda alcuni picchi.

Un'osservazione a parte merita l'angolo di assetto, che presenta un valore di minimo negativo nelle acquisizioni effettuate con la strumentazione sensoristica professionale, che invece è assente nel segnale proveniente dallo smartphone.

La *Tabella 6.4* sintetizza i parametri chiave di questa analisi.

**Tabella 6.3 Sintesi parametri di analisi manovre colpo di sterzo**

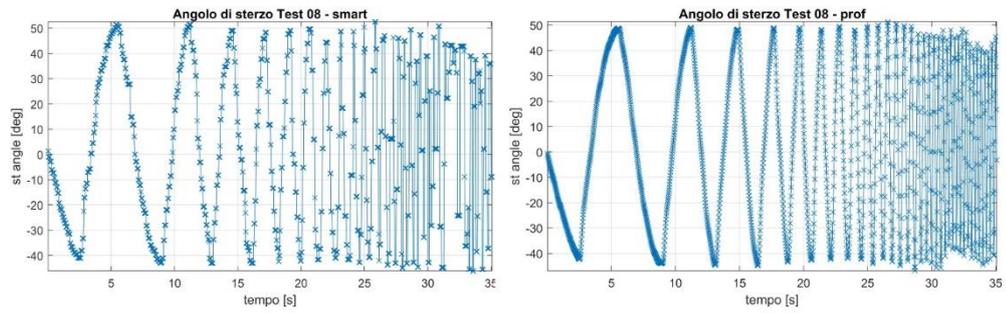
	<b>Prova</b>	<b>SMART</b>	<b>PROF</b>	<b>Errore ass.</b>	<b>Errore %</b>
<b>OS imbardata [%]</b>	Test 52	26,99	21,39	5,60	26,2%
	Test 56	22,55	21,27	1,28	6,0%
<b><math>\beta_{max}</math> [°]</b>	Test 52	1,49	1,73	-0,24	-13,9%
	Test 56	1,86	1,51	0,35	23,2%
<b><math>\beta_{min}</math> [°]</b>	Test 52	1,30	-1,09	2,39	-219,3%
	Test 56	1,28	-1,06	2,34	-220,8%
<b>T oscillazione [s]</b>	Test 52	0,25	0,25	0,00	0,0%
	Test 56	0,30	0,30	0,00	0,0%

## 6.4. Sweep steer

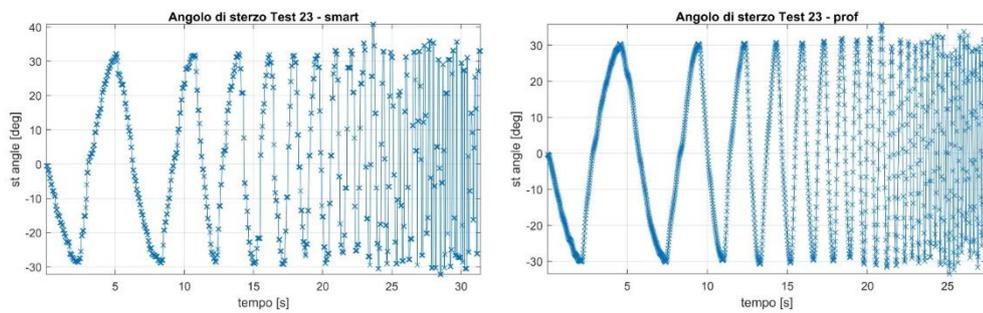
Come anticipato nel *Paragrafo 6.1*, le prove di *sweep steer* analizzate sono tre – indicate con i nomi Test 08, Test 23, Test 28 – e si differenziano tra loro per la variazione dell'ampiezza dell'angolo volante in ingresso (*Tabella 6.5*).

**Tabella 6.4 Ampiezza nominale angolo volante prove di sweep steer**

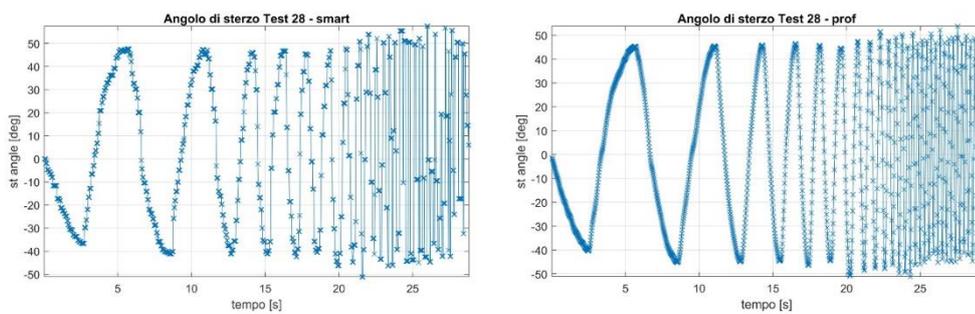
<b>SWEEP STEER</b>	
<b>Prova</b>	<b>Ampiezza nominale angolo di sterzo</b>
<b>Test 08</b>	+/- 50°
<b>Test 23</b>	+/- 30°
<b>Test 28</b>	+/- 50°



**Figure 6.55** Andamento temporale angolo volante Test 08 - *smart vs prof*



**Figure 6.56** Andamento temporale angolo volante Test 23 - *smart vs prof*



**Figure 6.57** Andamento temporale angolo volante Test 28 - *smart vs prof*

Per ciascuna delle prove sono state ricavate:

- Risposta in frequenza  $\alpha_y/\delta$ ;
- Risposta in frequenza  $\beta/\delta$ ;
- Risposta in frequenza  $\psi'/\delta$ .

Le risposte in frequenza sono state ottenute utilizzando la funzione *tfestimate* di Matlab<sup>®</sup>, che richiede come input:

- Frequenza temporale ( $t_{WIND}$ );
- Percentuale di overlap;
- Frequenza di campionamento ( $f_s$ );

I valori numerici sono riportati in *Tabella 6.6*.

**Tabella 6.5 Input risposte in frequenza sweep steer**

<b>Test 08</b>	Finestra temporale ( $t_{WIND}$ ) [s]	2
	Overlap [%]	90
	Frequenza di campionamento ( $f_s$ ) [Hz]	47,3
<b>Test 23</b>	Finestra temporale ( $t_{WIND}$ ) [s]	2
	Overlap [%]	90
	Frequenza di campionamento ( $f_s$ ) [Hz]	53,2
<b>Test 28</b>	Finestra temporale ( $t_{WIND}$ ) [s]	2
	Overlap [%]	90
	Frequenza di campionamento ( $f_s$ ) [Hz]	46,5

### 6.4.1. Risposta in frequenza $a_y/\delta$

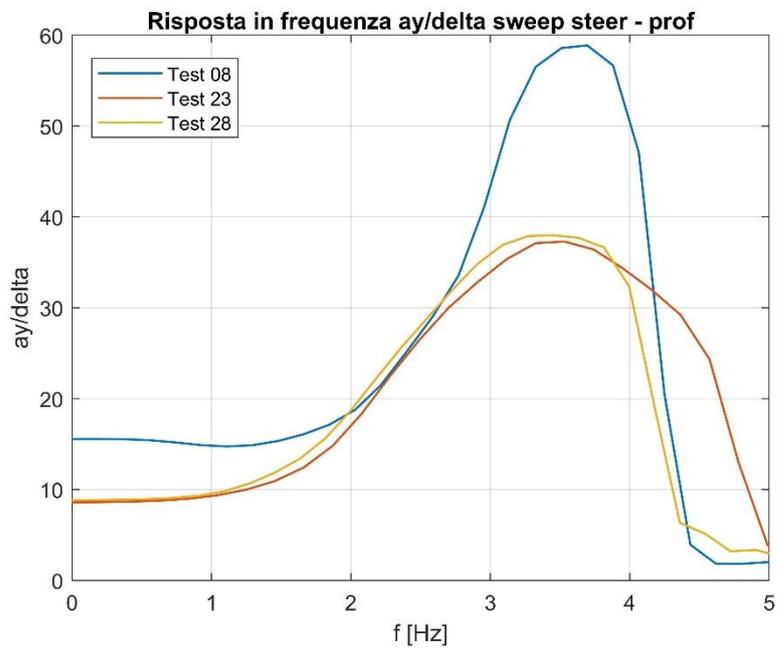


Figura 6.58 Risposta in frequenza  $a_y/\delta$  sweep steer - prof

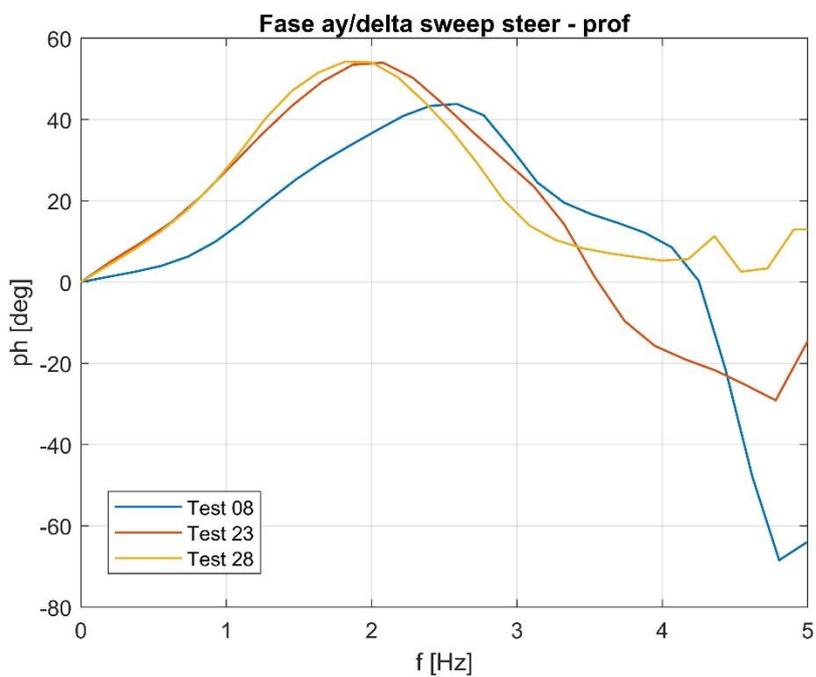
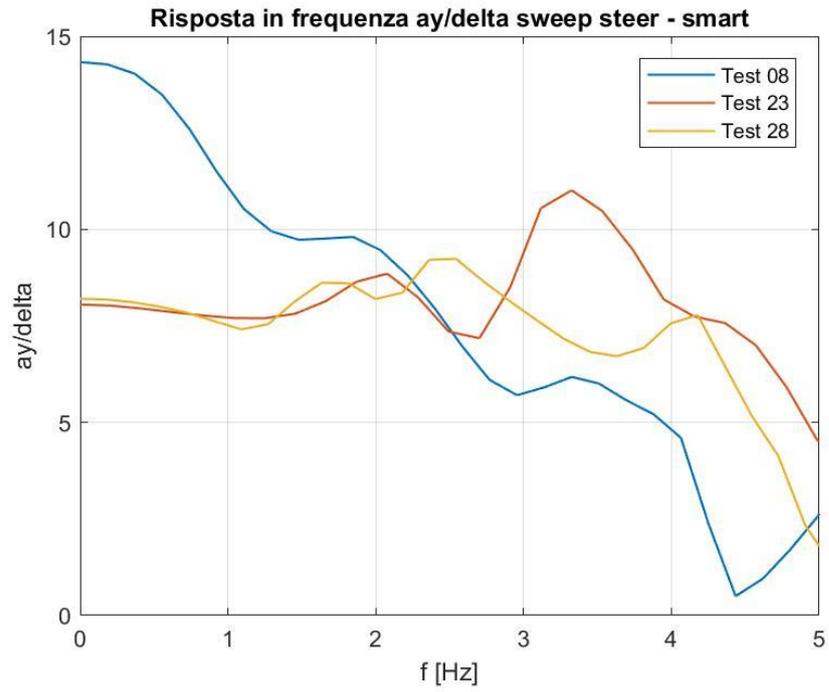
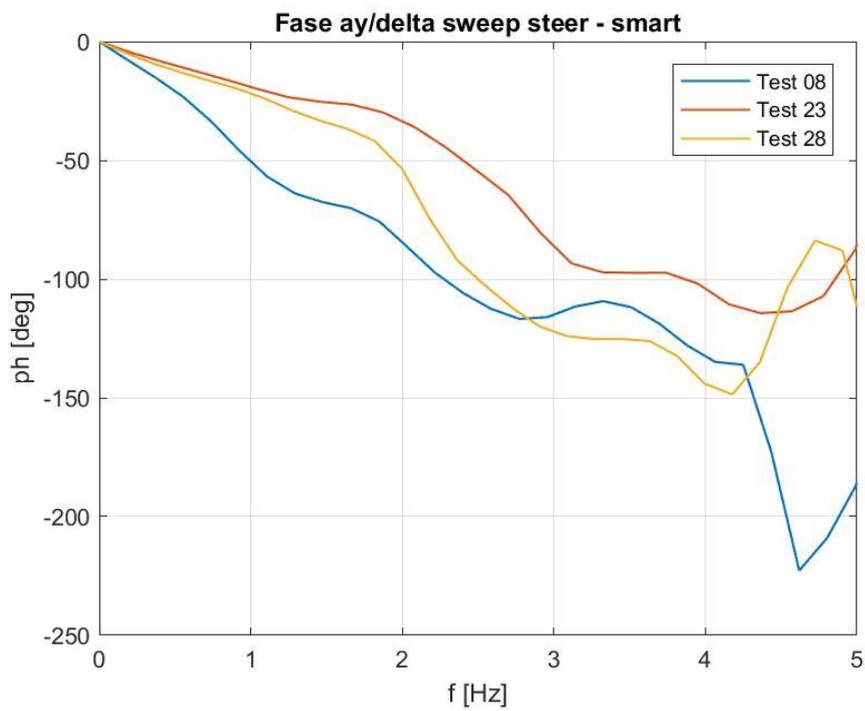


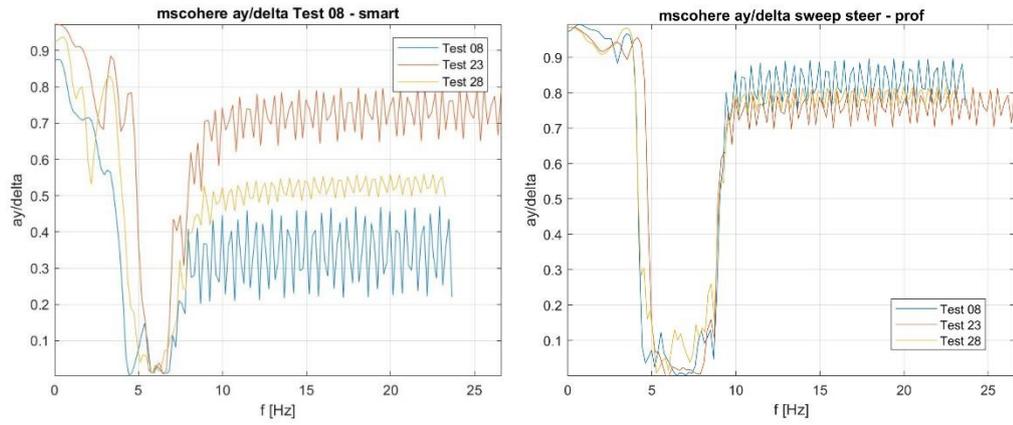
Figura 6.59 Fase  $a_y/\delta$  sweep steer - prof



**Figura 6.60** Risposta in frequenza  $a_y/\delta$  sweep steer - smart



**Figura 6.61** Fase  $a_y/\delta$  sweep steer - smart



**Figura 6.62** Coerenza risposta in frequenza  $a_y/\delta$  sweep steer – *smart* vs *prof*

## 6.4.2. Risposta in frequenza $\beta/\delta$

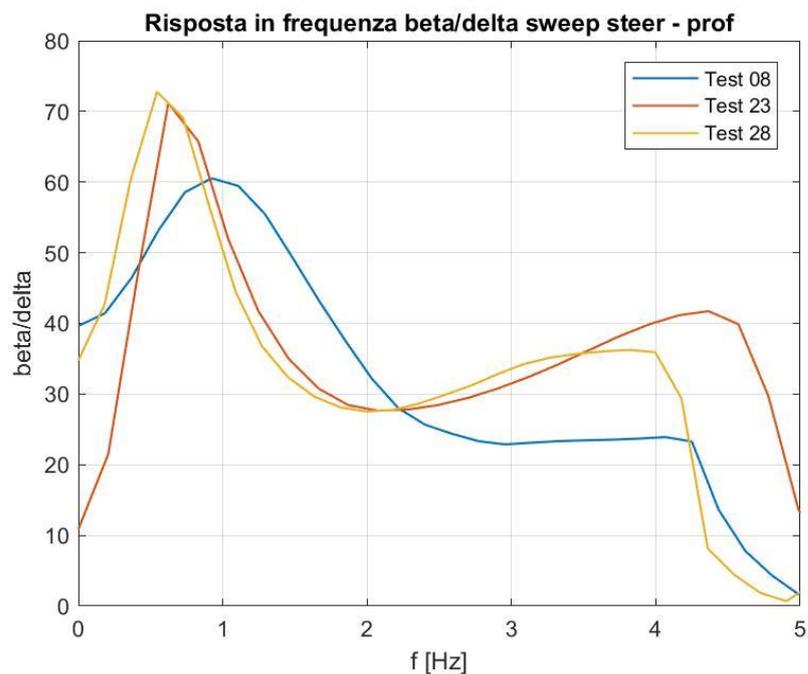


Figura 6.63 Risposta in frequenza  $\beta/\delta$  sweep steer - prof

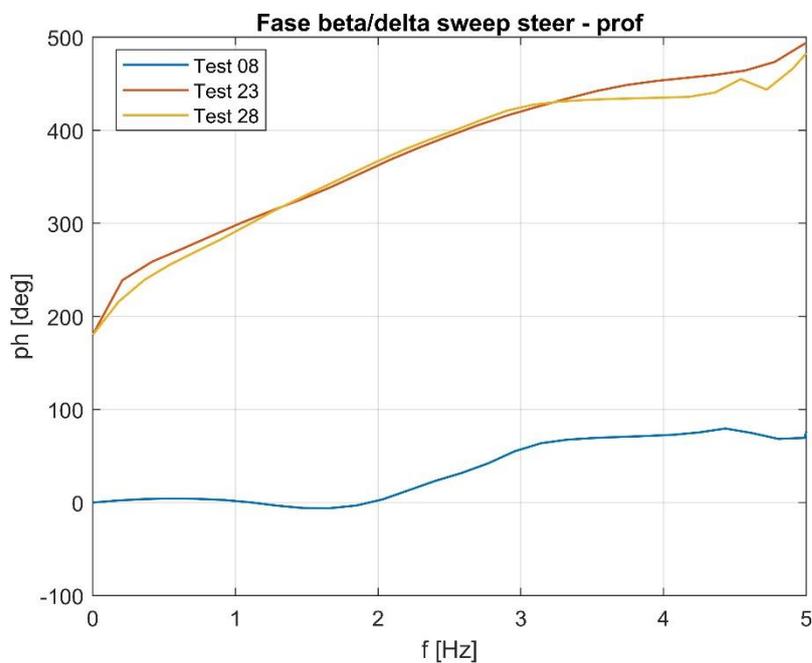


Figura 6.64 Fase  $\beta/\delta$  sweep steer - prof

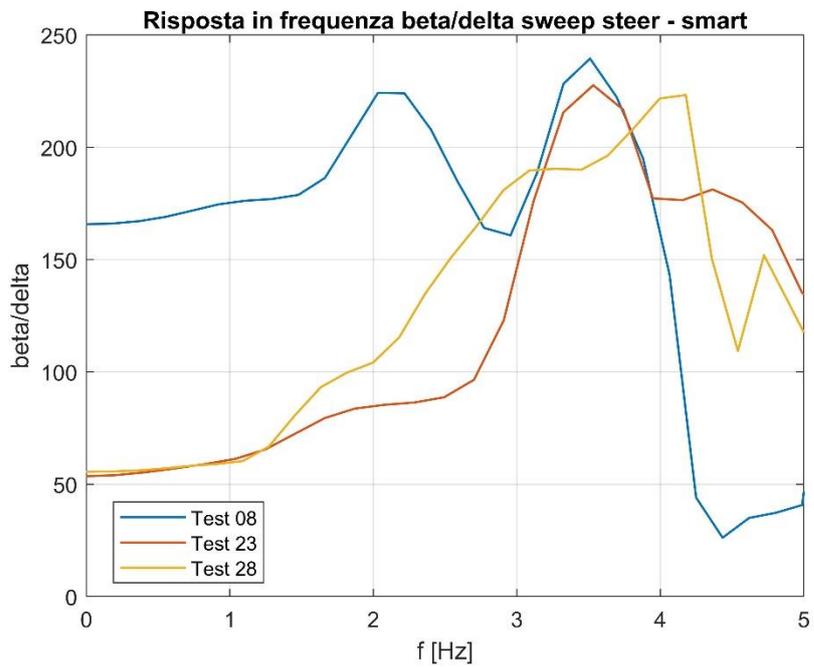


Figura 6.65 Risposta in frequenza  $\beta/\delta$  sweep steer - smart

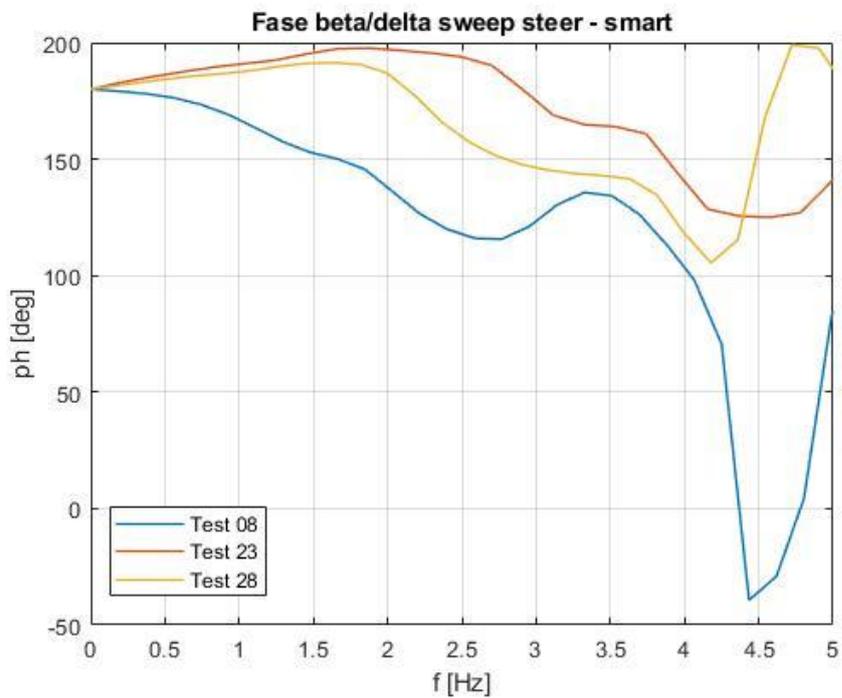
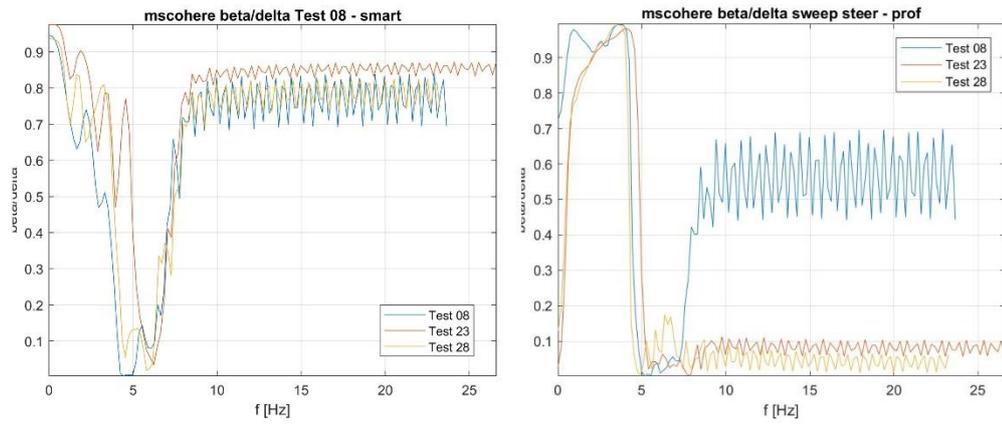


Figura 6.66 Fase  $\beta/\delta$  sweep steer - smart



**Figura 6.67** Coerenza risposta in frequenza  $\beta/\delta$  sweep steer – *smart* vs *prof*

### 6.4.3. Risposta in frequenza $\psi'/\delta$

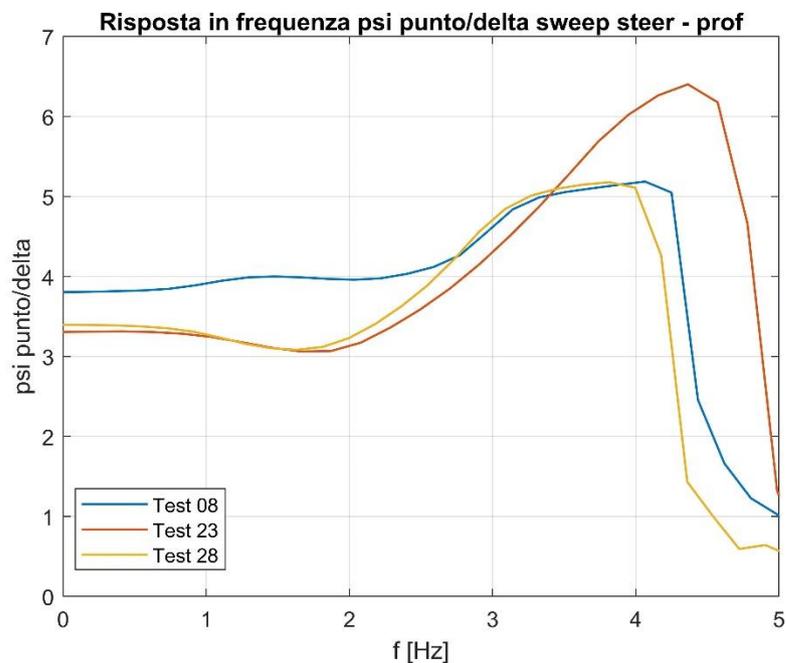


Figura 6.68 Risposta in frequenza  $\psi'/\delta$  sweep steer - prof

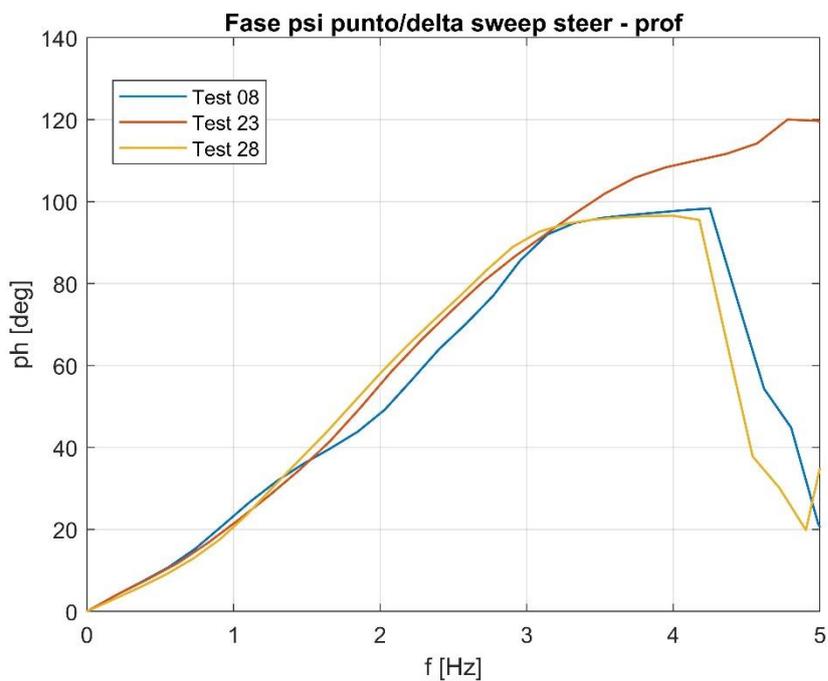
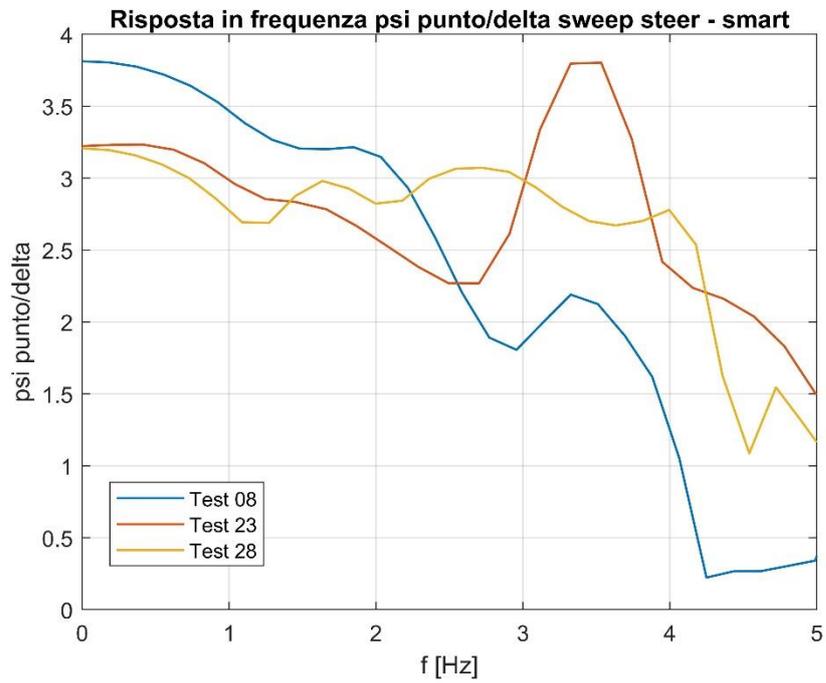
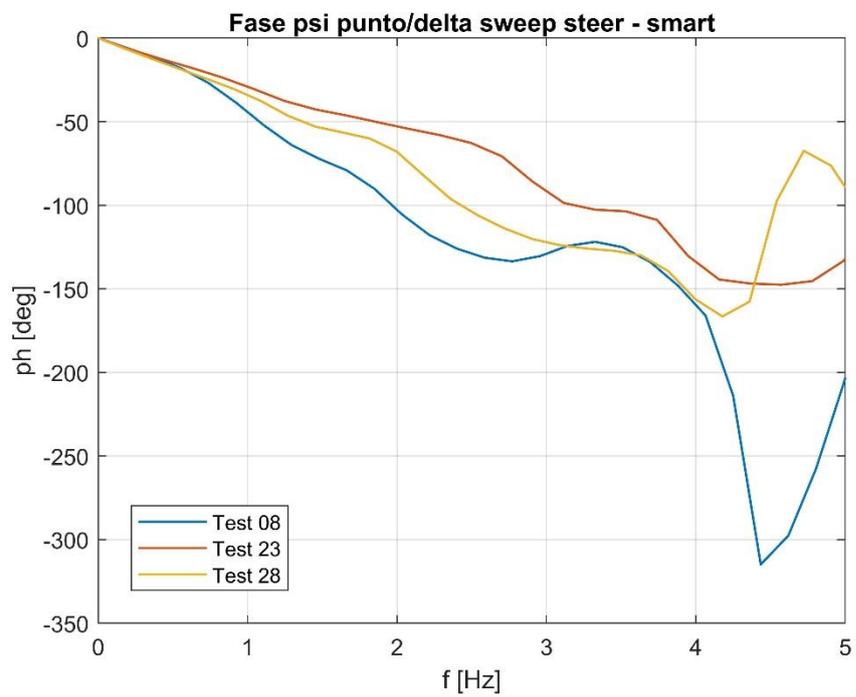


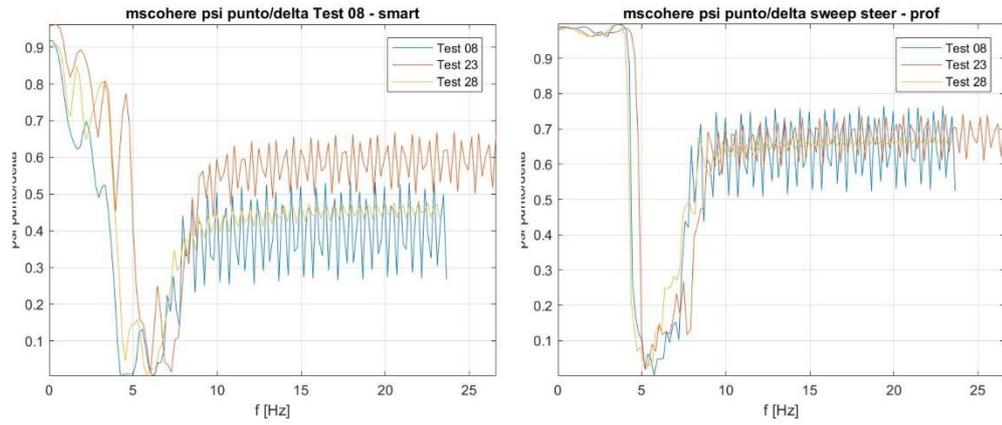
Figura 6.69 Fase  $\psi'/\delta$  sweep steer - prof



**Figura 6.70** Risposta in frequenza  $\psi'$ / $\delta$  sweep steer - smart



**Figura 6.71** Fase  $\psi'$ / $\delta$  sweep steer - smart



**Figura 6.72** Coerenza risposta in frequenza  $\psi'/\delta$  sweep steer – *smart* vs *prof*

#### **6.4.4.     Analisi confronto**

Come si evince dai grafici di coerenza, le risposte in frequenza mostrano risultati affidabili per frequenze inferiori ai 5 Hz. Entro questo *range* gli andamenti dovrebbero essere molto simili a quelli attesi.

Le risposte in frequenza si differenziano tra una prova e l'altra perché varia la frequenza delle sinusoidi in ingresso, ovvero l'ampiezza dell'angolo volante.

Proprio al tipo di segnale in ingresso si possono ricondurre le differenze tra le risposte in frequenza *prof* e quelle *smart*, con queste ultime che presentano un segnale più influenzato dal rumore esterno per le motivazioni già evidenziate nei paragrafi precedenti.

## 7. Valutazione parametri extra

La grande quantità di dati a disposizione grazie all'utilizzo della strumentazione sensoristica professionale montata a bordo del veicolo di prova ha dato la possibilità di valutare e plottare altri parametri oltre a quelli di esclusivo interesse per lo sviluppo dell'applicazione smartphone, che potrebbero essere utili per una successiva e più approfondita analisi *Handling* del veicolo.

Nello specifico, i parametri extra che sono stati valutati sono i seguenti:

- Coppia motore (stimata) in funzione del tempo [ $C_{Mot}(t)$ ];
- Posizione pedale accelerazione (misurata) in funzione del tempo;
- Coppia volante in funzione del tempo [ $C_{vol}(t)$ ];
- Coppia volante in funzione dell'accelerazione laterale [ $C_{vol}(a_y)$ ];
- Coppia volante in funzione dell'angolo di sterzo [ $C_{vol}(\delta_v)$ ];

## 7.1. Steering pad

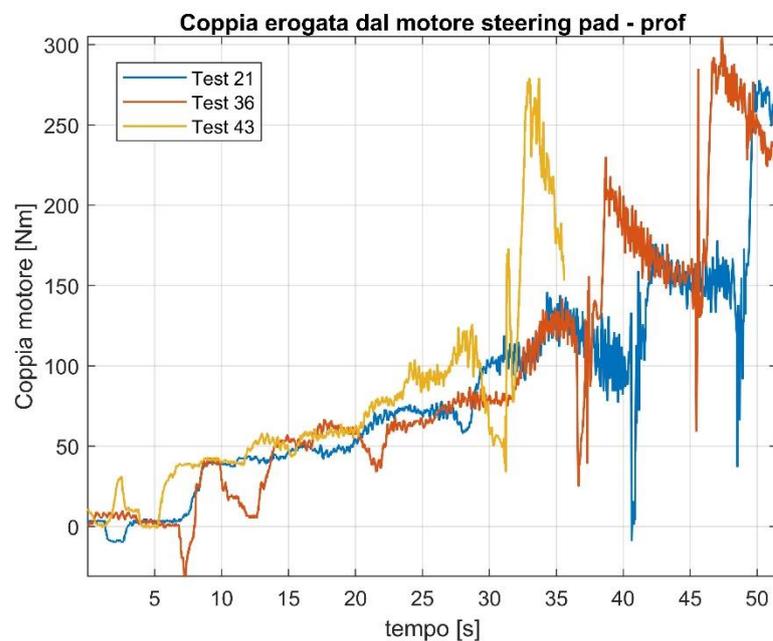


Figure 7.1 Coppia erogata dal motore in funzione del tempo (steering pad)

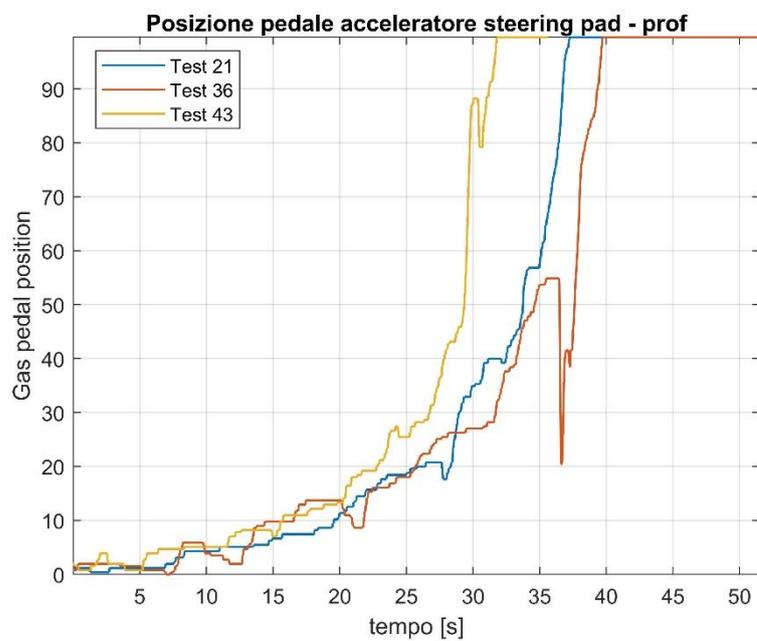
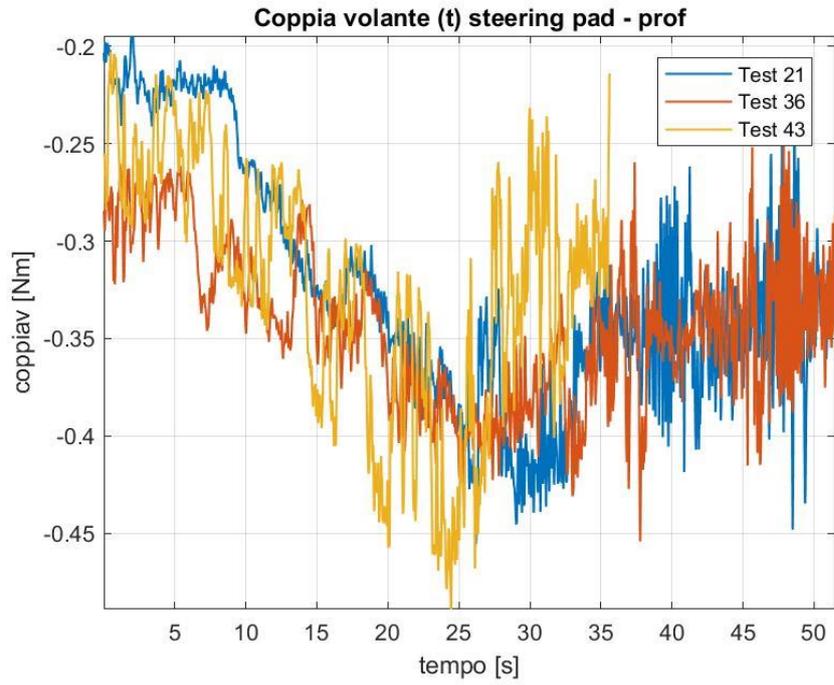
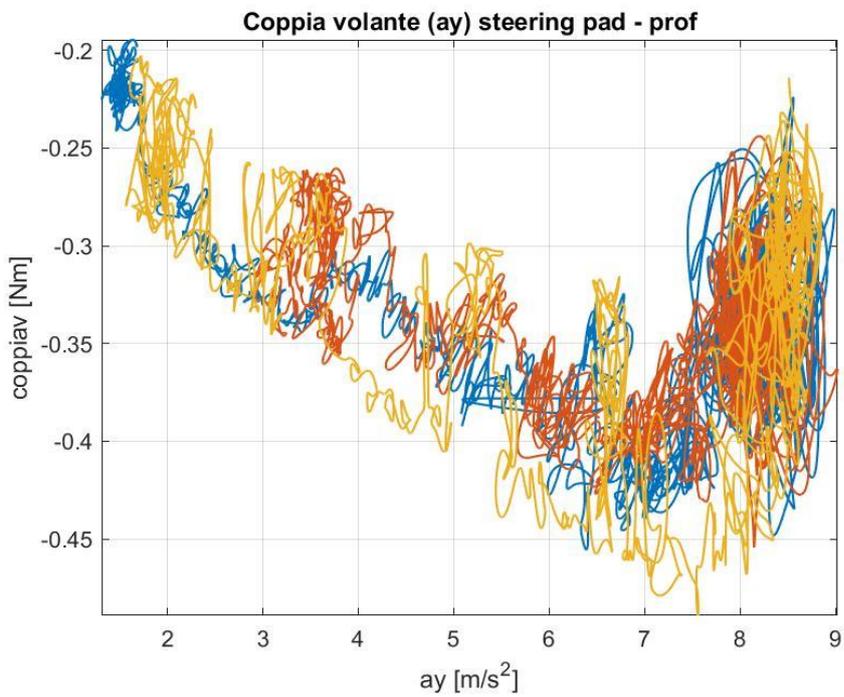


Figure 7.2 Posizione pedale acceleratore in funzione del tempo (steering pad)



**Figure 7.3 Coppia volante in funzione del tempo (steering pad)**



**Figure 7.4 Coppia volante in funzione di ay (steering pad)**

## 7.2. Ramp steer

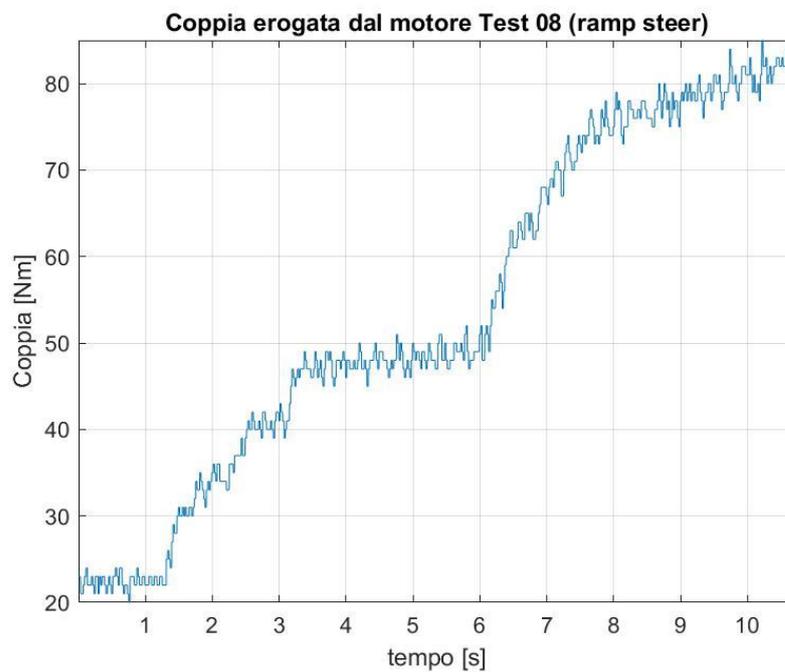


Figure 7.5 Coppia erogata dal motore in funzione del tempo (ramp steer)

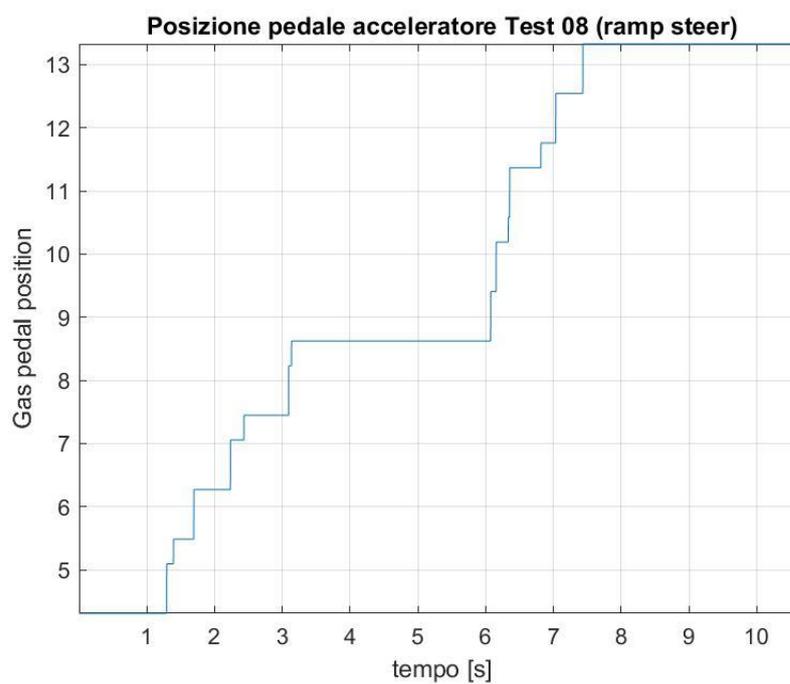
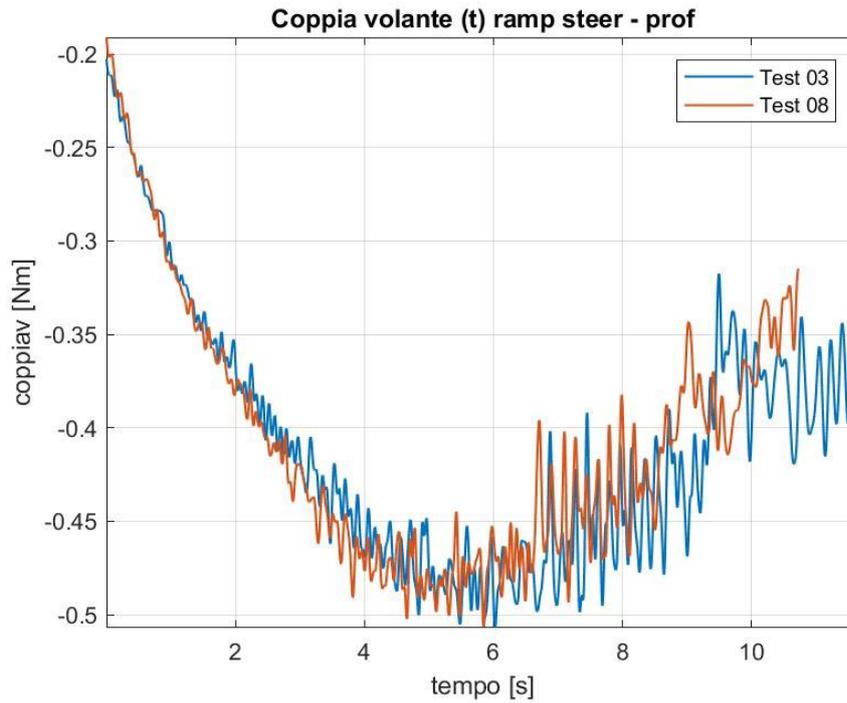
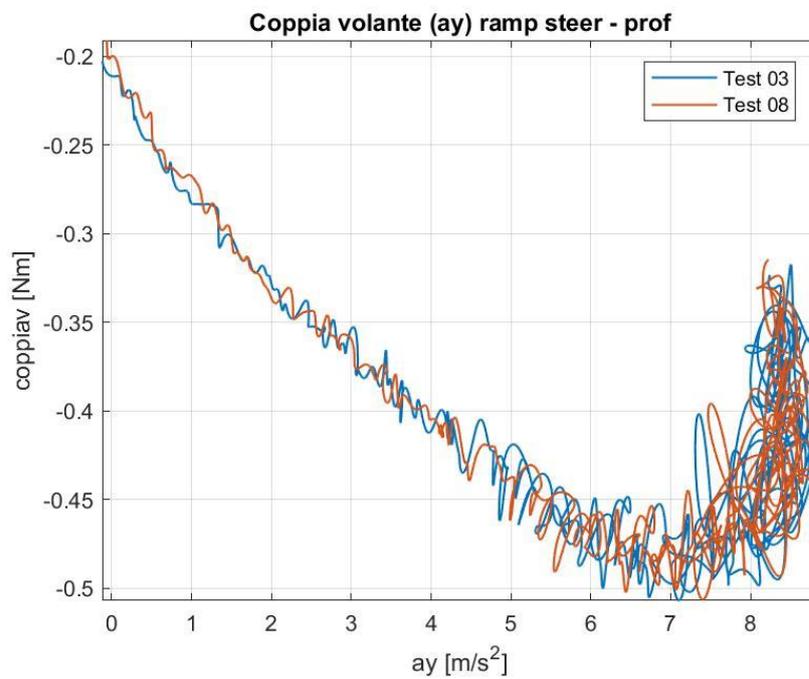


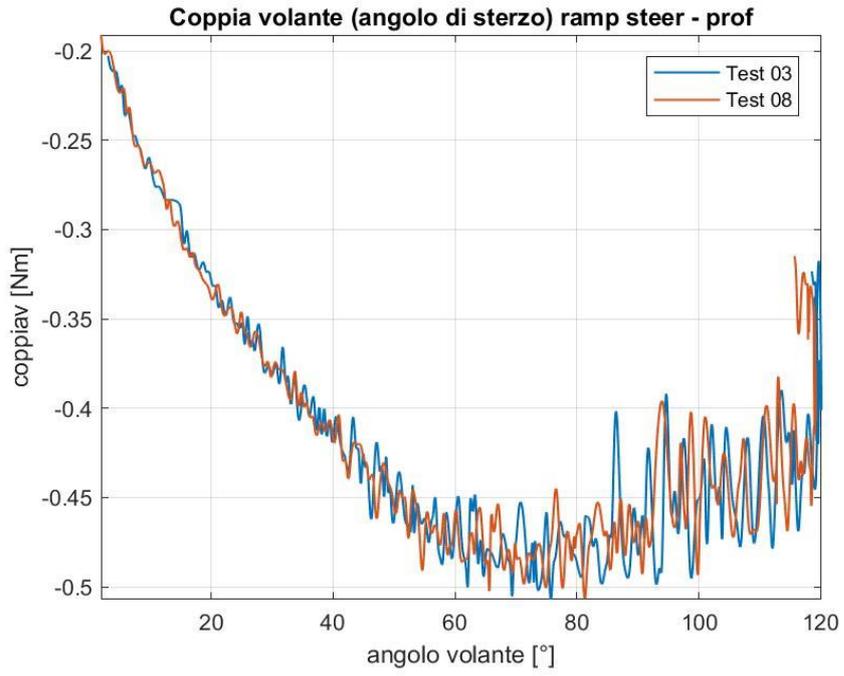
Figure 7.6 Posizione pedale acceleratore in funzione del tempo (ramp steer)



**Figure 7.7 Coppia volante in funzione del tempo (ramp steer)**



**Figure 7.8 Coppia volante in funzione di a<sub>y</sub> (ramp steer)**



**Figure 7.9 Coppia volante in funzione dell'angolo di sterzo (ramp steer)**

### 7.3. Colpo di sterzo

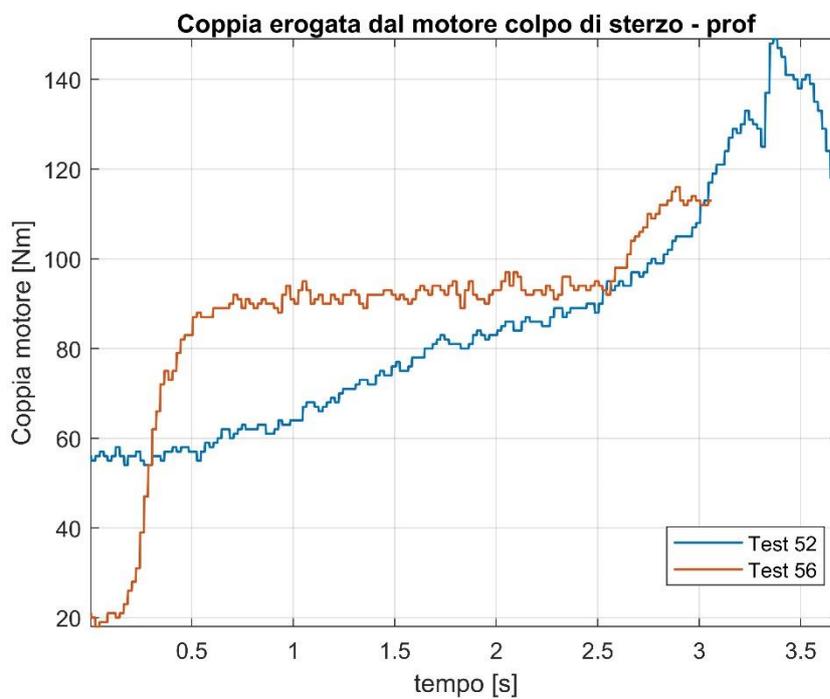


Figure 7.10 Coppia erogata dal motore in funzione del tempo (colpo di sterzo)

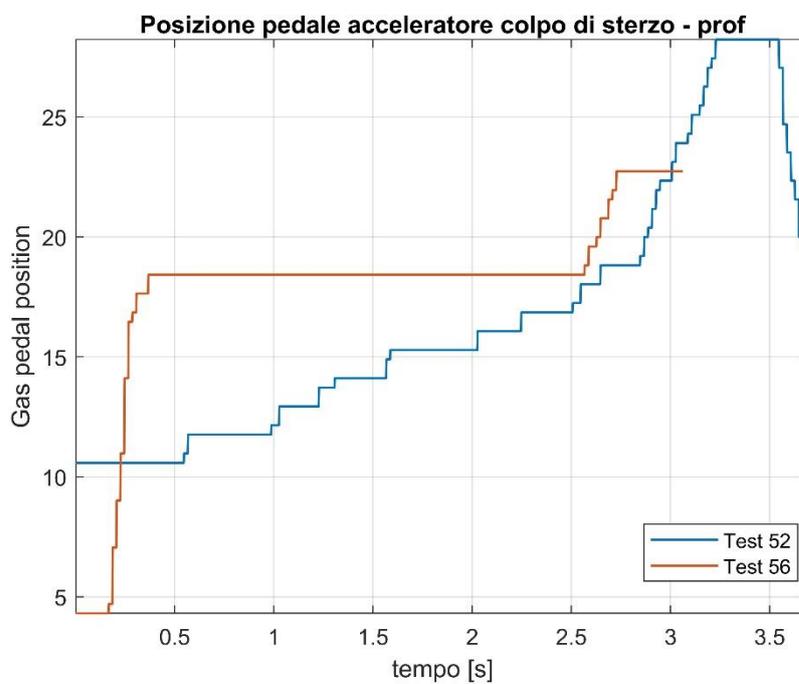


Figure 7.11 Posizione pedale acceleratore in funzione del tempo (colpo di sterzo)

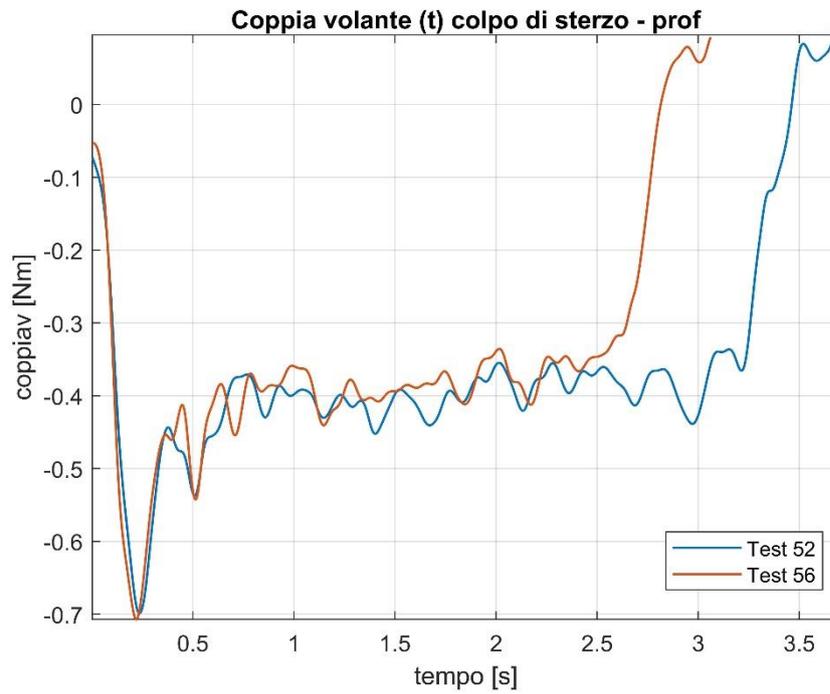


Figure 7.12 Coppia volante in funzione del tempo (colpo di sterzo)

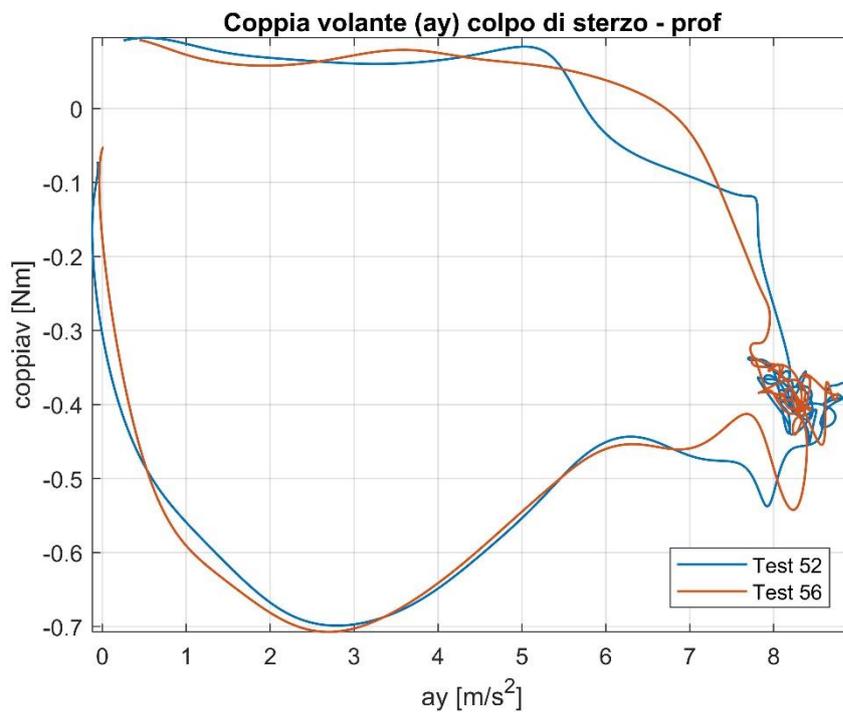
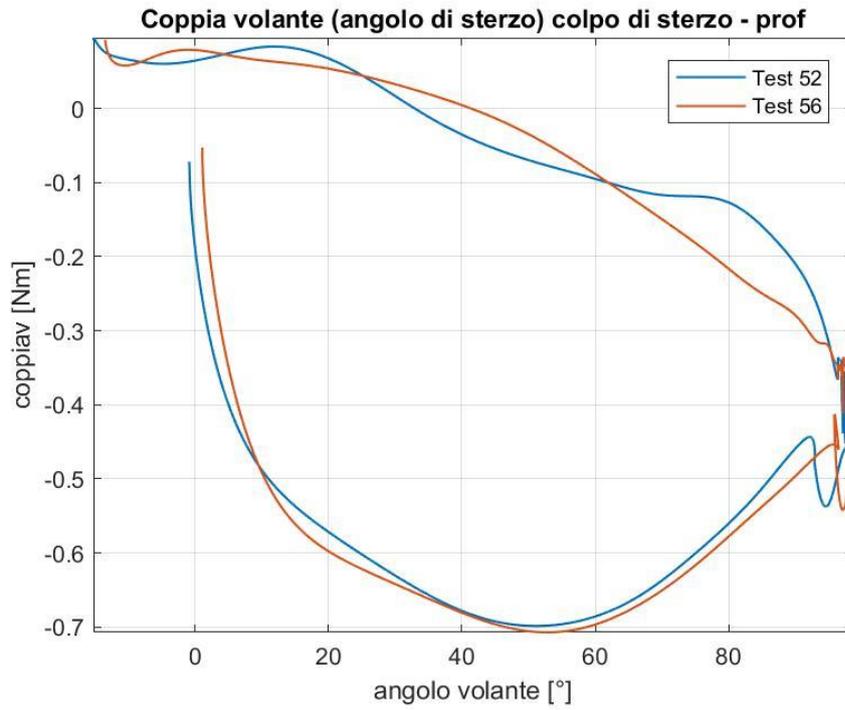


Figure 7.13 Coppia volante in funzione di  $a_y$  (colpo di sterzo)



**Figure 7.14 Coppia volante in funzione dell'angolo di sterzo (colpo di sterzo)**

## 7.4. Sweep steer

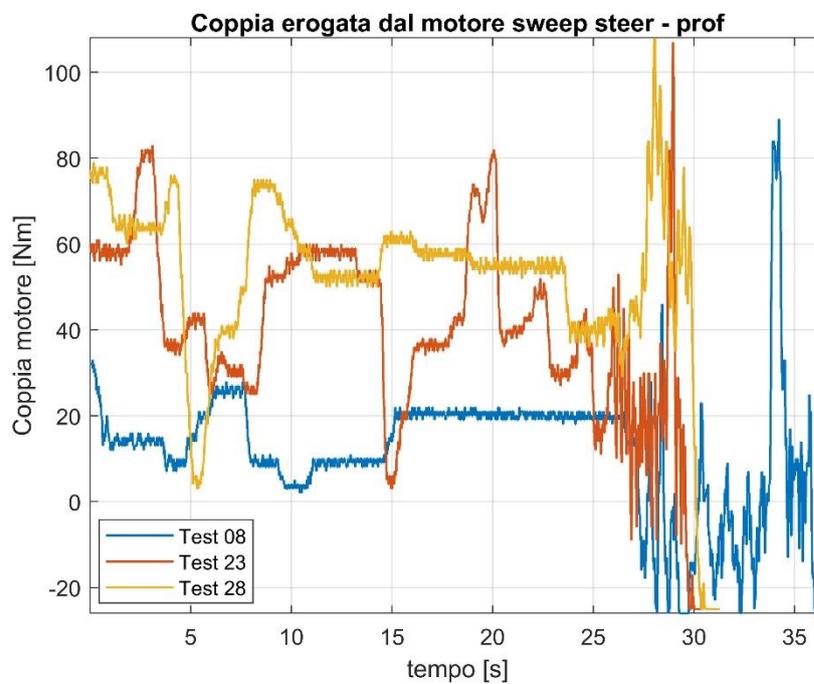


Figure 7.15 Coppia erogata dal motore in funzione del tempo (sweep steer)

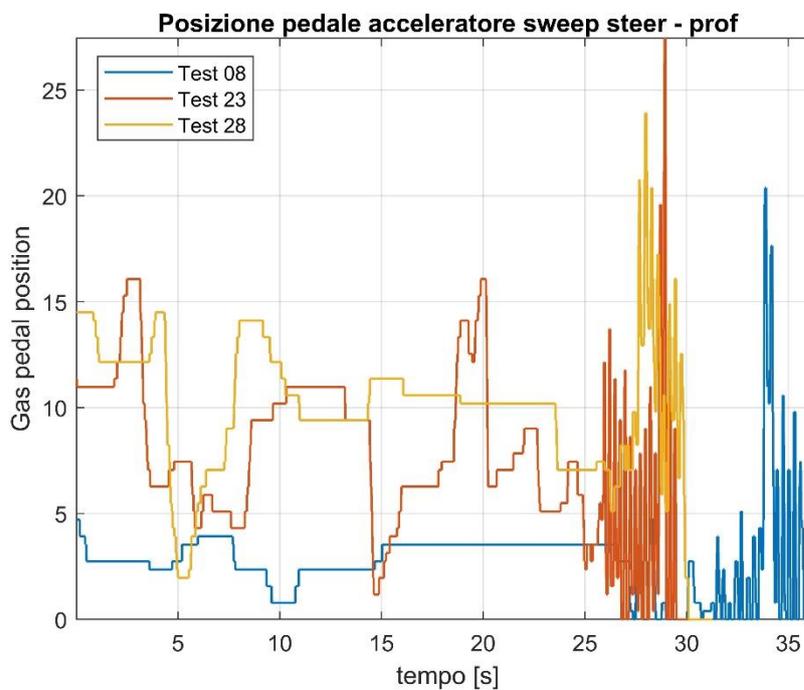
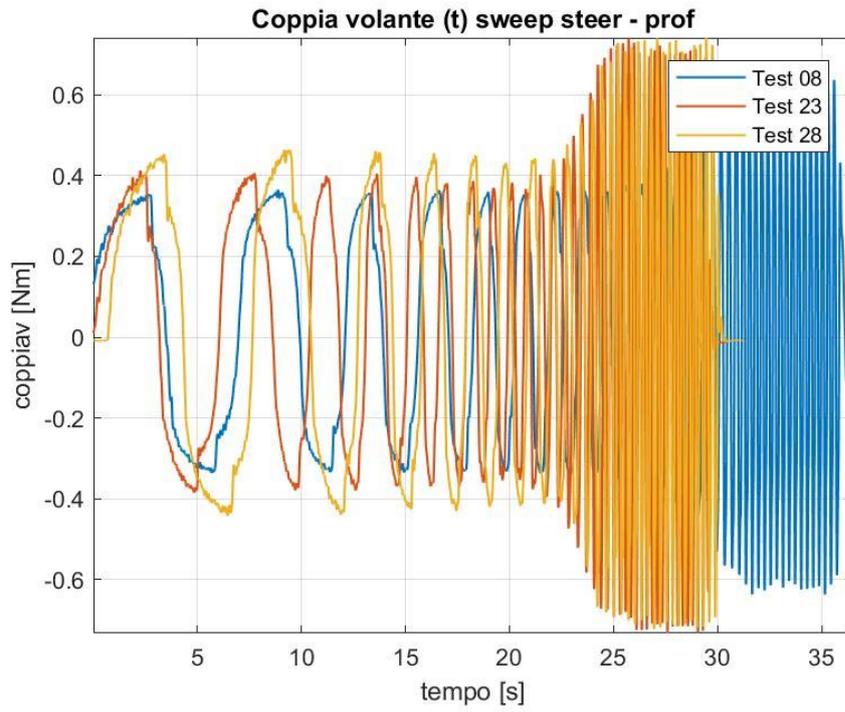
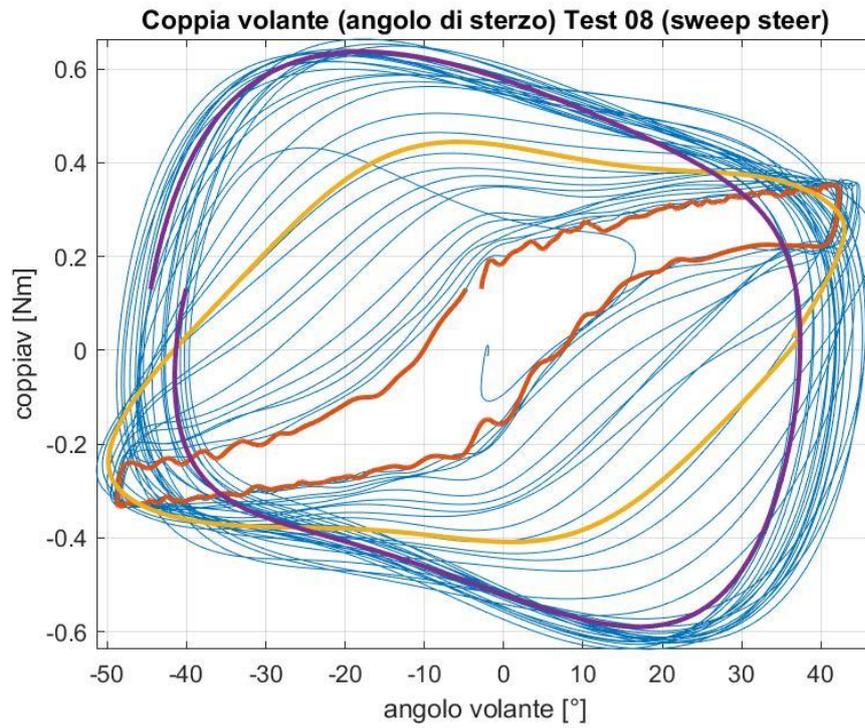


Figure 7.16 Posizione pedale acceleratore in funzione del tempo (sweep steer)



**Figure 7.17 Coppia volante in funzione del tempo (sweep steer)**



**Figure 7.18 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 08 (sweep steer)**

<b>Test 08 - frequenze base [Hz]</b>		
<b><math>f_1 = 0,14</math></b>	<b><math>f_2 = 1,72</math></b>	<b><math>f_3 = 3,33</math></b>

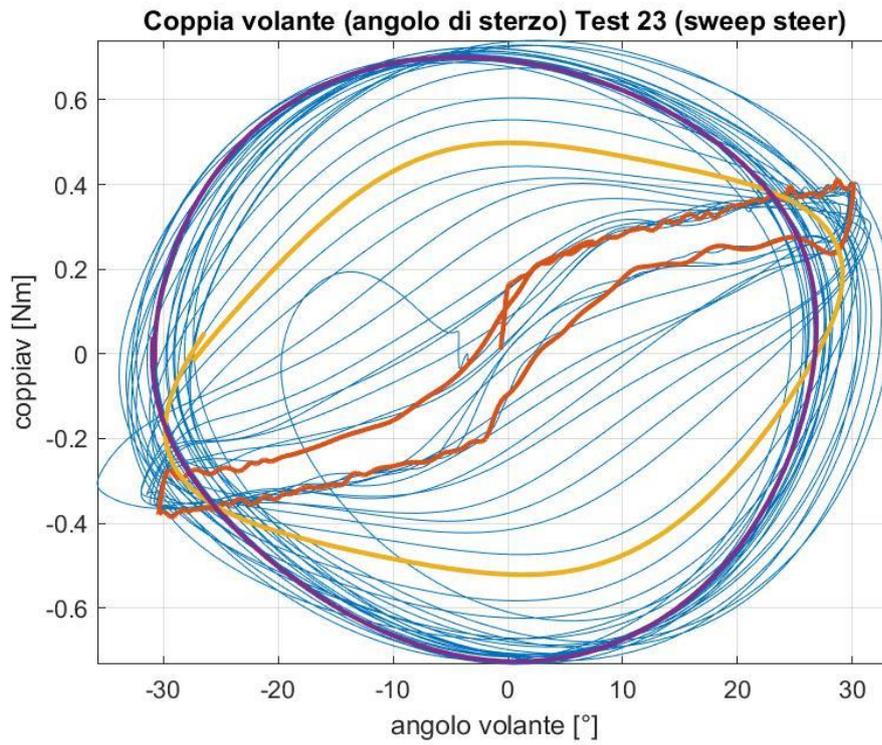
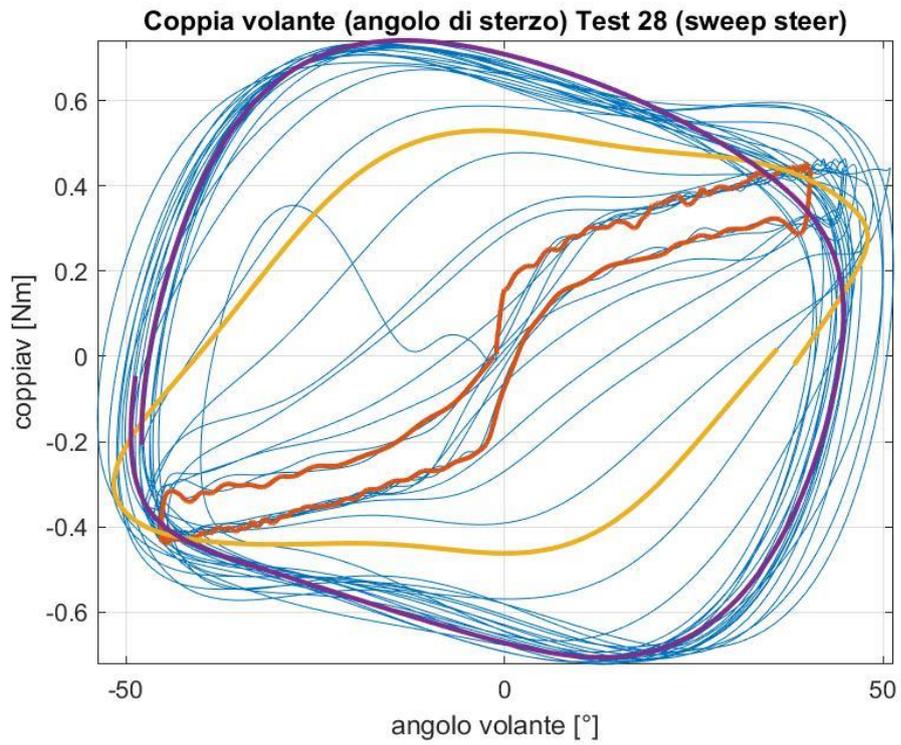


Figure 7.19 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 23 (sweep steer)

<b>Test 23 - frequenze base [Hz]</b>		
<b><math>f_1 = 0,16</math></b>	<b><math>f_2 = 2,33</math></b>	<b><math>f_3 = 4,00</math></b>



**Figure 7.20 Coppia volante in funzione di angolo sterzo Test 28 (sweep steer)**

<b>Test 28 - frequenze base [Hz]</b>		
<b><math>f_1 = 0,14</math></b>	<b><math>f_2 = 1,59</math></b>	<b><math>f_3 = 3,33</math></b>

## 8. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di questi mesi ha avuto come obiettivo quello di valutare, tramite l'analisi di dati sperimentali raccolti durante alcune sessioni di test in pista, la bontà del modello prima sviluppato e poi implementato nell'applicazione per smartphone grazie al confronto con le rilevazioni effettuate parallelamente tramite una strumentazione sensoristica professionale.

Il primo passo è stato quello di mettere a punto la sincronizzazione tra i segnali *smart* e *prof*, cercando di comprendere e definire analiticamente la logica alla base del ricampionamento dei segnali provenienti dai sensori dello smartphone.

L'algoritmo realizzato e implementato in ambiente Matlab® ci ha permesso di ricavare dei valori accettabili delle varie frequenze di ricampionamento, che comunque variano leggermente a seconda del sensore interessato. Questo può far ipotizzare che il processo di ricampionamento adottato dallo smartphone sui segnali provenienti dai diversi sensori non avvenga a frequenza costante e rappresenta un aspetto su cui indagare con maggiore attenzione nel prossimo futuro.

La seconda parte del lavoro è stata incentrata sul confronto dell'analisi Handling effettuata parallelamente sulle misure *smart* e *prof*. Seppure i riscontri numerici forniscano una buona correlazione tra le due analisi, da un punto di vista grafico gli andamenti presentano delle differenze più marcate dovute in primo luogo a una maggiore dispersione nel piano dei

dati ricavati dallo smartphone. Questo può essere giustificato in primo luogo dal minor pulizia del rumore di fondo dai segnali *smart* legati alla scelta di determinati filtri matematici, a cui va aggiunto una inevitabile minor sensibilità dei sensori installati all'interno dello smartphone.

Si è notato anche un errore più marcato per quanto riguarda gli andamenti dell'angolo di assetto, variabile di primaria importanza per l'intero progetto, il cui calcolo potrebbe essere ulteriormente migliorato implementando modelli più complessi ed articolati rispetto al monotraccia lineare attualmente utilizzato.

Infine è stata avviata l'analisi di ulteriori grandezze rilevate grazie alla strumentazione sensoristica professionale, che potrebbe consentire una più dettagliata analisi Handling del veicolo adottato nel prossimo futuro.

## 9. Bibliografia

Enrico Galvagno, Mauro Velardocchia, *Meccanica del veicolo – Esercitazioni*, 2017

Davide Borbiconi, *Misura dei parametri caratterizzanti il moto del veicolo mediante smartphone*, Tesi di Laurea Magistrale, 2019

Stefano Delzoppo, *Rilevazione della dinamica di un veicolo attraverso l'impiego di una piattaforma inerziale*, Tesi di Laurea Magistrale, 2015

Marco Albanese, *Stima dell'angolo di assetto di un veicolo*, Tesi di Laurea Magistrale, 2017

Andrea Mucci, *Utilizzo di una videocamera ed una piattaforma inerziale low-cost per il rilievo di grandezze di dinamica del veicolo*, Tesi di Laurea Magistrale, 2016

Marco di Rosa, *Misura dei parametri di dinamica del veicolo mediante smartphone*, Tesi di Laurea Magistrale, 2018