

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica



Indagine sperimentale sull'aerodinamica di un ciclista su strada

Relatore:

Prof. Giuseppe Gibertini

Co-relatore:

Dott. Andrea Morelli

Tesi di laurea di:  
RICCARDO BOLDINI  
Matricola: 816327

ANNO ACCADEMICO 2014/2015



# Sommario

Nel mondo delle competizioni ciclistiche sono molti gli studi effettuati per ottimizzare la posizione del ciclista e ridurre la resistenza aerodinamica. Ad ora sono preferiti quelli in galleria del vento, dove la bicicletta viene fissata e l'atleta perde la possibilità di compiere alcuni movimenti. L'obiettivo della tesi è quello di effettuare lo studio dell'aerodinamica di un ciclista su strada tenendo in considerazione anche l'assetto assunto. Abbiamo effettuato diverse prove, determinando l'area resistente ( $SC_x$ ) delle posizioni tipiche. Mediante l'ausilio di apposite piattaforme inerziali abbiamo acquisito i dati sulla cinematica del ciclista. Da queste informazioni vogliamo capire se sia possibile ottimizzare la posizione dell'atleta direttamente su strada, mettendolo nella sua condizione naturale. Vogliamo poi capire se le oscillazioni influiscano sulla resistenza aerodinamica e di conseguenza se il fissaggio della bicicletta in galleria del vento comporti un peggioramento delle grandezze cercate. Effettivamente con la strumentazione utilizzata siamo riusciti a stimare la variazione di area resistente fra le varie posizioni, mettendo poi in relazione la resistenza con la cinematica del ciclista.

# Abstract

In the competition world there are a lots of researches about the improving of the cyclist position and decreasing the aerodynamic drag. Usually the wind tunnel tests are preferred, where the bike is fixed and the rider cannot do some typical movements. The target of this thesis is to study the cyclist aerodynamics, studying at the same time the position of the rider. We have done some road test to know the drag area ( $SC_x$ ) for many positions. With some inertial platforms we collect data on the rider kinematics. Using the information we want to understand if it is possible to optimize the rider position in his natural condition. We want also to understand if the fluctuations affect the drag and then if the wind tunnel tests are distorted from the fixed bike. In fact, we are able to find the configuration that seems to provide lowest  $SC_x$ . We are moreover able to find the influence of the cyclist kinematics on the resistance.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>12</b>
Breve storia della bicicletta . . . . .	12
Posizioni studiate . . . . .	14
Norme UCI . . . . .	17
Lavori pregressi . . . . .	21
Dinamica del ciclista . . . . .	25
Resistenza . . . . .	26
Potenza umana . . . . .	30
<b>1 Strumentazione sperimentale</b>	<b>32</b>
1.1 Data Logger con Arduino . . . . .	34
1.1.1 Scheda Arduino . . . . .	34
1.1.2 Archiviazione dati . . . . .	34
1.2 Misura del modulo della velocità del vento . . . . .	35
1.2.1 Taratura del sistema di misurazione della pressione . . . . .	35
1.3 Sistema per l'acquisizione della direzione del vento . . . . .	37
1.4 Sistema per l'acquisizione di pressione e temperatura ambiente . . . . .	39
1.5 Sostegno strumentazione . . . . .	39
1.6 Piattaforme inerziali <i>Gyko Microgate</i> . . . . .	43
1.7 Misuratore di potenza . . . . .	44
1.8 Strumentazione del Laboratorio . . . . .	45
1.9 Sistema di riferimento e angoli noti . . . . .	46
1.10 Grandezze utili . . . . .	50
<b>2 Prova sperimentale</b>	<b>51</b>
2.1 Prova in laboratorio . . . . .	51
2.2 Prova su strada . . . . .	55
2.2.1 Percorso . . . . .	55
2.2.2 Prove eseguite . . . . .	57

---

<b>3</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>71</b>
	<b>Appendice A</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>99</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>101</b>

---

# Elenco delle figure

1	Funny bike, olimpiadi di Los Angeles 1984 . . . . .	13
2	Posizione stem . . . . .	15
3	Posizione brake hoods . . . . .	15
4	Posizione drops . . . . .	16
5	Posizione time trial . . . . .	16
6	Appendici ammesse dalle norme UCI . . . . .	17
7	Esempio schermatura aerodinamica . . . . .	18
8	Dimensioni strutturali ammesse . . . . .	19
9	Posizione relativa telaio-ruota ammessa dall'UCI . . . . .	20
10	Esempio di carenatura vietata dall'UCI . . . . .	20
11	Prova in galleria del vento . . . . .	22
12	Ciclista in galleria del vento, studio Gibertini . . . . .	25
13	Effetto del peso . . . . .	27
14	Deformazione pneumatico in movimento . . . . .	28
15	Simulazione CDF ciclista . . . . .	30
16	Potenza umana . . . . .	31
1.1	Schema elettrico Arduino . . . . .	33
1.2	Sistema di acquisizione velocità relativa . . . . .	35
1.3	Taratura trasduttore di pressione . . . . .	36
1.4	Operazione di taratura . . . . .	36
1.5	Schema funzionamento banderuola . . . . .	37
1.6	Banderuola segnamento . . . . .	38
1.7	Strumentazione fissata sulla bicicletta . . . . .	40
1.8	Sistemazione Datalogger . . . . .	41
1.9	Fissaggio potenziometro al sostegno . . . . .	41
1.10	Zoom interruttore di accensione e spegnimento della registrazione . . . . .	42
1.11	Sistemazione datalogger arduino e fissaggio cavi . . . . .	42
1.12	Sensori Gyko durante la fase di trimmatura esterna . . . . .	43
1.13	PowerTap, immagine modificata tratta da <a href="http://www.cyclinside.com">www.cyclinside.com</a> . . . . .	44

---

1.14	Rappresentazione SRM . . . . .	45
1.15	Disposizione riferimenti sull'atleta . . . . .	46
1.16	Sistema di riferimento . . . . .	47
1.17	Sistema di riferimento sensori Gyko Microgare . . . . .	47
1.18	Angoli di beccheggio ciclista . . . . .	48
1.19	Angoli di rollio ciclista . . . . .	48
1.20	Angolo rollio manubrio . . . . .	49
1.21	Angolo rollio telaio . . . . .	49
2.1	Rulli liberi usati per la prova in laboratorio . . . . .	52
2.2	Posizionamento sensori sull'atleta . . . . .	53
2.3	Sensori Gyko posti sulla bicicletta . . . . .	53
2.4	Angolo tronco . . . . .	55
2.5	Altimetria tracciato ricavata con coordinate GPS . . . . .	56
2.6	Vista satellitare del tracciato . . . . .	56
2.7	Prova su strada atleta B . . . . .	57
2.8	Sostegno strumentazione . . . . .	58
2.9	Strumentazione sull'atleta . . . . .	58
2.10	Confronto $SC_x$ nelle 3 posizioni . . . . .	59
2.11	Confronto angolo beccheggio lombare nelle 3 posizioni . . . . .	59
2.12	Confronto angolo beccheggio cervicale nelle 3 posizioni . . . . .	59
2.13	Confronto $SC_x$ posizione brake hoods, andata-ritorno . . . . .	60
2.14	Confronto angolo di beccheggio lombare . . . . .	60
2.15	Confronto angolo di beccheggio cervicale . . . . .	60
2.16	Confronto $SC_x$ a $V_1$ e $V_2$ . . . . .	61
2.17	Confronto angolo di beccheggio lombare . . . . .	61
2.18	Confronto angolo di beccheggio cervicale . . . . .	61
2.19	Atleta A in prova, posizione drops . . . . .	62
2.20	$SC_x$ atleta A velocità $V_1$ . . . . .	63
2.21	$SC_x$ medio atleta A . . . . .	63
2.22	Atleta A in prova, posizione stem . . . . .	63
2.23	$SC_x$ atleta A velocità $V_2$ . . . . .	64
2.24	$SC_x$ medio atleta A . . . . .	64
2.25	Atleta A in prova, posizione brake hoods . . . . .	64
2.26	Confronto $SC_x$ nelle 3 posizioni . . . . .	65
2.27	Confronto angolo di beccheggio lombare . . . . .	65
2.28	Confronto angolo di beccheggio cervicale . . . . .	65
2.29	Confronto $SC_x$ andata-ritorno . . . . .	66

---

---

2.30	Confronto angolo di beccheggio lombare . . . . .	66
2.31	Confronto angolo di beccheggio cervicale . . . . .	66
2.32	Confronto $SC_x$ a $V_1$ e $V_2$ . . . . .	67
2.33	Confronto angolo di beccheggio lombare . . . . .	67
2.34	Confronto angolo di beccheggio cervicale . . . . .	67
2.35	Atleta B in prova, posizione stem andata . . . . .	68
2.36	Atleta B in prova, posizione stem ritorno . . . . .	68
2.37	$SC_x$ atleta B . . . . .	69
2.38	$SC_x$ medio andata-ritorno atleta B . . . . .	69
2.39	Atelta B in prova, posizione drops . . . . .	69
2.40	$SC_x$ atleta B . . . . .	70
2.41	$SC_x$ medio andata-ritorno atleta B . . . . .	70
2.42	Atleta B in prova, posizione brake hoods . . . . .	70
3.1	Atelta B in prova, posizione stem . . . . .	74
3.2	Storia temporale $SC_x$ , prova 1, atleta A . . . . .	75
3.3	Storia temporale $SC_x$ , prova 2, atleta A . . . . .	76
3.4	Storia temporale $SC_x$ , prova 3, atleta A . . . . .	77
3.5	Storia temporale $SC_x$ , prova 4, atleta A . . . . .	78
3.6	Storia temporale $SC_x$ , prova 5, atleta A . . . . .	79
3.7	Storia temporale $SC_x$ , prova 6, atleta A . . . . .	80
3.8	Storia temporale $SC_x$ , prova 7, atleta A . . . . .	81
3.9	Storia temporale $SC_x$ , prova 8, atleta A . . . . .	82
3.10	Storia temporale $SC_x$ , prova 9, atleta A . . . . .	83
3.11	Storia temporale $SC_x$ , prova 10, atleta A . . . . .	84
3.12	Storia temporale $SC_x$ , prova 11, atleta A . . . . .	85
3.13	Storia temporale $SC_x$ , prova 12, atleta A . . . . .	86
3.14	Storia temporale $SC_x$ , prova 1, atleta B . . . . .	87
3.15	Storia temporale $SC_x$ , prova 2, atleta B . . . . .	88
3.16	Storia temporale $SC_x$ , prova 3, atleta B . . . . .	89
3.17	Storia temporale $SC_x$ , prova 4, atleta B . . . . .	90
3.18	Storia temporale $SC_x$ , prova 5, atleta B . . . . .	91
3.19	Storia temporale $SC_x$ , prova 6, atleta B . . . . .	92
3.20	Storia temporale $SC_x$ , prova 7, atleta B . . . . .	93
3.21	Storia temporale $SC_x$ , prova 8, atleta B . . . . .	94
3.22	Storia temporale $SC_x$ , prova 9, atleta B . . . . .	95
3.23	Storia temporale $SC_x$ , prova 10, atleta B . . . . .	96
3.24	Storia temporale $SC_x$ , prova 11, atleta B . . . . .	97

---

---

3.25 Storia temporale $SC_x$ , prova 12, atleta B . . . . .	98
---	----

---

# Elenco delle tabelle

1	Risparmio energetico in scia . . . . .	23
1.1	Valore in uscita dal potenziometro . . . . .	38
1.2	Caratteristiche sensore BMP085 . . . . .	39
1.3	Caratteristiche sensori . . . . .	44
1.4	Angoli studiati . . . . .	46
2.1	Dati laboratorio, altezza dal suolo . . . . .	54
2.2	Dati laboratorio, angoli tronco . . . . .	54
2.3	SC <sub>x</sub> medio, atleta A . . . . .	64
2.4	SC <sub>x</sub> medio, atleta B . . . . .	70
3.1	Risultati SC <sub>x</sub> , confronto con posizione drops . . . . .	71
3.2	Prova 1, atleta A . . . . .	75
3.3	Angoli medi, prova 1, atleta A . . . . .	75
3.4	Prova 2, atleta A . . . . .	76
3.5	Angoli medi, prova 2, atleta A . . . . .	76
3.6	Prova 3, atleta A . . . . .	77
3.7	Angoli medi, prova 3, atleta A . . . . .	77
3.8	Prova 4, atleta A . . . . .	78
3.9	Angoli medi, prova 4, atleta A . . . . .	78
3.10	Prova 5, atleta A . . . . .	79
3.11	Angoli medi, prova 5, atleta A . . . . .	79
3.12	Prova 6, atleta A . . . . .	80
3.13	Angoli medi, prova 6, atleta A . . . . .	80
3.14	Prova 7, atleta A . . . . .	81
3.15	Angoli medi, prova 7, atleta A . . . . .	81
3.16	Prova 8, atleta A . . . . .	82
3.17	Angoli medi, prova 8, atleta A . . . . .	82
3.18	Prova 9, atleta A . . . . .	83
3.19	Angoli medi, prova 9, atleta A . . . . .	83

---

3.20 Prova 10, atleta A . . . . .	84
3.21 Angoli medi, prova 10, atleta A . . . . .	84
3.22 Prova 11, atleta A . . . . .	85
3.23 Angoli medi, prova 11, atleta A . . . . .	85
3.24 Prova 12, atleta A . . . . .	86
3.25 Angoli medi, prova 12, atleta A . . . . .	86
3.26 Prova 1, atleta B . . . . .	87
3.27 Angoli medi, prova 1, atleta B . . . . .	87
3.28 Prova 2, atleta B . . . . .	88
3.29 Angoli medi, prova 2, atleta B . . . . .	88
3.30 Prova 3, atleta B . . . . .	89
3.31 Angoli medi, prova 3, atleta B . . . . .	89
3.32 Prova 4, atleta B . . . . .	90
3.33 Angoli medi, prova 4, atleta B . . . . .	90
3.34 Prova 5, atleta B . . . . .	91
3.35 Angoli medi, prova 5, atleta B . . . . .	91
3.36 Prova 6, atleta B . . . . .	92
3.37 Angoli medi, prova 6, atleta B . . . . .	92
3.38 Prova 7, atleta B . . . . .	93
3.39 Angoli medi, prova 7, atleta B . . . . .	93
3.40 Prova 8, atleta B . . . . .	94
3.41 Angoli medi, prova 8, atleta B . . . . .	94
3.42 Prova 9, atleta B . . . . .	95
3.43 Angoli medi, prova 9, atleta B . . . . .	95
3.44 Prova 10, atleta B . . . . .	96
3.45 Angoli medi, prova 10, atleta B . . . . .	96
3.46 Prova 11, atleta B . . . . .	97
3.47 Angoli medi, prova 11, atleta B . . . . .	97
3.48 Prova 12, atleta B . . . . .	98
3.49 Angoli medi, prova 12, atleta B . . . . .	98

---

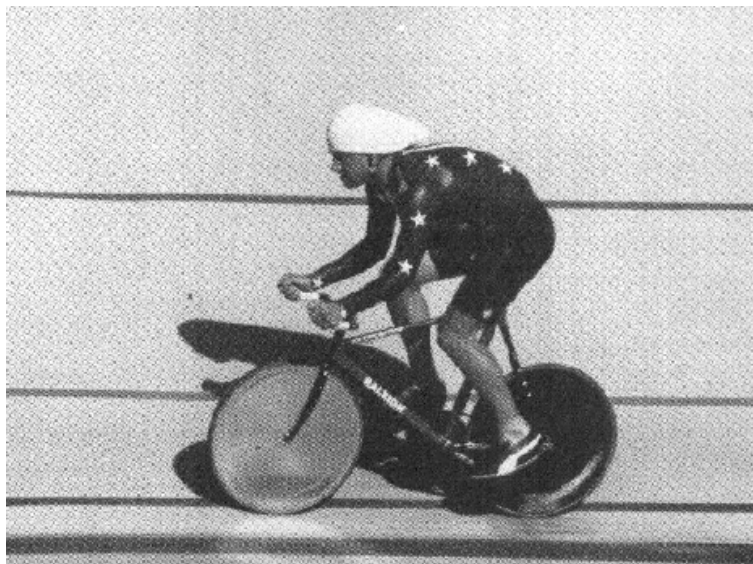


# Introduzione

## Breve storia della bicicletta

Nel 1817 nasce in Germania il velocipede, antenato della bicicletta, ad opera del barone Karl von Drais. Quarant'anni dopo viene realizzato il primo modello con pedali. Spinti dalla grande richiesta del mercato, molti imprenditori apportano diverse migliorie alla bicicletta, garantendone così una vasta diffusione sia verso il mondo femminile, sia verso la parte più povera della società. Nella seconda metà del XIX secolo la bicicletta inizia ad essere vista non solo come mezzo di trasporto ma anche come svago ed è così che nel 1868 viene organizzata a Parigi la prima gara di ciclismo su strada lungo un percorso di circa mille metri. L'enorme successo porta alla fondazione di diversi club ciclistici. Nel 1870 si svolge la prima gara in Italia, che prevede la partenza da Firenze e l'arrivo a Pistoia per un totale di 35 km. Nascono così le prime unioni ciclistiche nazionali e nel 1892 nasce quella internazionale (**UCI**). Il primo campionato del mondo viene disputato nel 1883. Con il nuovo secolo iniziano a disputarsi alcune gare classiche dei giorni nostri, come la Liegi-Bastogne-Liegi, la Parigi-Bruxelles, il giro di Lombardia e la Milano-Sanremo. Nascono anche le corse a tappe come il Tour de France (1903) e il Giro d'Italia (1909). Vista la sempre più estesa diffusione della bicicletta si iniziano a studiare nuovi materiali, strumenti e tecniche per migliorarla al fine di cogliere l'obiettivo ultimo: *vincere*. Nel momento in cui si capisce quanto una buona aerodinamica possa aiutare, l'UCI interviene in modo da evitare che i cicli utilizzati in gara vengano modificati eccessivamente (1938). È così che viene impedito l'utilizzo di schermi, parti aggiuntive non utili ai fini strutturali o bici recumbent, atte esclusivamente ad agevolare il ciclista dal punto di vista aerodinamico. Viene stabilito che si possa intervenire solamente sulla forma degli elementi strutturali già presenti e sulla posizione del ciclista. Nelle gare a cronometro le regole sono meno restrittive anche per la minor pericolosità, essendo la prova disputata dal singolo atleta o dalle singole squadre (cronosquadre, composte al massimo da nove elementi). Posti tali vincoli si è quindi pensato a come ottimizzare il tutto rimanendo nel lecito. I primi grandi

passi in questo senso sono dovuti a Kyle<sup>1</sup> che nel 1984, alle olimpiadi di Los Angeles, fornisce al team statunitense la famosa Funny bike per le gare in pista. Come si capisce



**Figura 1:** Funny bike, olimpiadi di Los Angeles, immagine modificata tratta da Cycling Science, Settembre 1990

dal nome, per quei tempi, la forma risultava molto buffa. I risultati sono ottimi con la vittoria e il secondo posto (Gorski e Vails) nella velocità maschile, la vittoria e il terzo posto (Hegg e Nitz) nell'inseguimento individuale maschile 4000 m e il secondo posto nell'inseguimento a squadre. Grazie a questi successi già dalle olimpiadi del 1988, a Seoul, molte squadre si dotano di biciclette con forma simile. È da sottolineare che lo studio di Kyle è mirato al miglioramento dell'intero sistema, composto sia dal ciclo che dal ciclista. Già prima degli studi di Kyle, infatti, diverse squadre introducono singoli elementi per migliorare il rendimento aerodinamico. Un esempio è quello del team cecoslovacco, primo ad utilizzare i caschi aerodinamici. Se per il mondo legato alla pista il 1984 è l'anno della svolta, il 1989 è invece l'anno più importante per il mondo della strada. È nel Luglio di quell'anno che vengono introdotte le appendici<sup>2</sup> sul manubrio, condizionando pesantemente il risultato del Tour de France: l'ultima tappa è una cronometro individuale, nella quale Greg Lemond parte con 50" di ritardo dal leader della classifica generale Fignon e riesce a chiudere la cronometro con 58" di vantaggio vincendo così la *Gran Bouclè* per 8". Diventa sempre più importante la posizione assunta in bicicletta in quanto una sua variazione corretta comporta una diminuzione dell'area frontale e una modifica della di-

---

<sup>1</sup>Nel 1976 insieme a Lambie, suo collega, fonda la International Human Powered Vehicle Association, volta a sviluppare veicoli a propulsione umana. Questo perchè si trovava in pieno disaccordo con le norme UCI. Tuttora si svolgono diverse gare in cui tutti i componenti aerodinamici sono permessi. Il record di velocità massima per un ciclo supera i 100 km/h.

<sup>2</sup>Vedi sezione seguente, "Posizioni studiate", pag. 14

stribuzione di pressione. Iniziano allora a prendere piede le prove in galleria del vento, utili a trovare la configurazione più efficiente. Sono interessanti due particolari posizioni che hanno consentito di stracciare tutti i record stabiliti precedentemente: *Obree* e *Superman*, nelle quali l'atleta si presenta particolarmente rannicchiato o disteso. Queste due posizioni sono state rese non legittime durante le prove ufficiali UCI e di conseguenza tutti i record sono stati annullati. Insieme alle appendici sono divenute di uso comune le ruote a profilo alto. In particolare, nelle gare contro il tempo, sono permesse anche le ruote lenticolari, ovvero quelle completamente chiuse purché la copertura sia parte integrante della struttura stessa. Usualmente la ruota lenticolare viene utilizzata solo come ruota posteriore in quanto utilizzandola come ruota anteriore si renderebbe il ciclo difficilmente governabile in presenza di vento laterale o di raffiche improvvise. Il vantaggio fornito dalle ruote lenticolari consiste nell'evitare il passaggio dell'aria e quindi l'iterazione di quest'ultima con i raggi; inoltre garantiscono un ulteriore effetto dinamico che favorisce l'avanzata dell'atleta. Per le ruote a profilo basso vi è la formazione di vortici che contribuiscono ad aumentare la resistenza all'avanzamento. Una via di mezzo tra i modelli appena descritti è rappresentata dalle ruote a profilo alto, che preservano buona parte dei vantaggi delle ruote lenticolari pur riducendo i rischi di caduta, essendo diminuita l'area laterale. Un ulteriore elemento da considerare durante le prove contro il tempo è il casco, che interviene modificando il ricircolo che si viene a generare nella zona a valle della testa del ciclista.

## Posizioni studiate

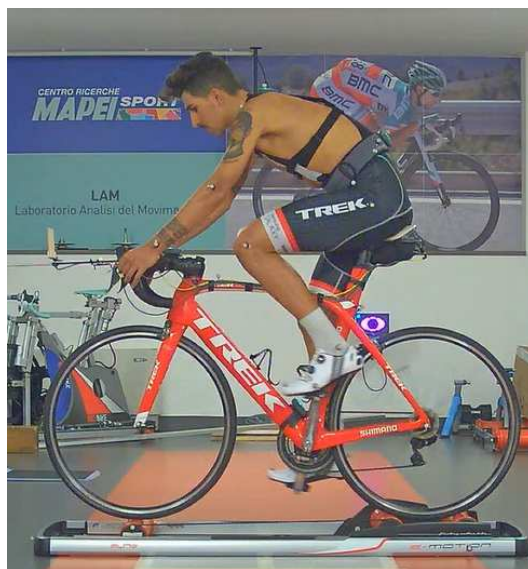
Per meglio comprendere gli studi effettuati vengono ora riportate le tipiche posizioni adottate in bicicletta. In particolare abbiamo:

1. **Posizione stem:** l'atleta afferra con le mani la parte centrale del manubrio, tenendo le braccia distese. È la posizione nella quale l'atleta ha il tronco in posizione quasi eretta. (fig. 2)
2. **posizione brake hoods:** l'atleta afferra la zona delle leve del freno. La maggior lontananza dell'impugnatura fa sì che le braccia, come il busto, risultino più piegate rispetto alla posizione stem. (fig. 3)
3. **Posizione drops:** l'atleta afferra l'impugnatura bassa del manubrio andando così ad incrementare ulteriormente la curvatura della schiena. (fig.4)
4. **Posizione time trial (TTP):** come si vede, per utilizzare la posizione time trial sono necessarie appendici, ovvero protuberanze collegate al manubrio che consentono all'atleta di assumere una posizione maggiormente distesa. Il loro utilizzo è regolato dalla norma UCI 1.3.023 riportata nella sezione seguente (pag.16)

Viene riportata la TTP come riferimento per i lavori pregressi. Nell'ambito del nostro studio sono state utilizzate solamente le prime tre posizioni. Essendo in ambito scientifico riconosciuta la nomenclatura inglese, verrà utilizzata anche in questo studio, in modo da garantire possibili confronti e una maggior comprensione.



**Figura 2:** Posizione stem



**Figura 3:** Posizione brake hoods



**Figura 4:** Posizione drops

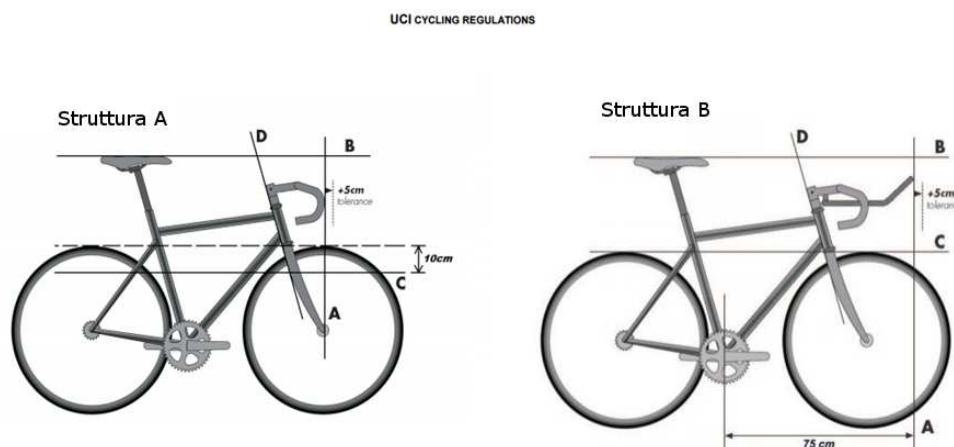


**Figura 5:** Posizione time trial, immagine modificata tratta da [www.treksegafredo.com](http://www.treksegafredo.com)

## Norme UCI

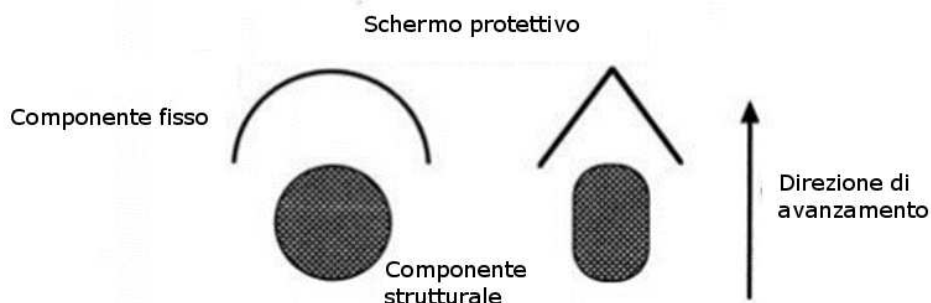
L'Unione Ciclistica Internazionale, come anticipato nella prima sezione, ha imposto diverse norme da rispettare nella fase di progettazione e utilizzo del ciclo; queste influenzano fortemente lo studio e lo sviluppo in campo aerodinamico. Le disposizioni più importanti si trovano nella prima parte del regolamento, denominata “*General organisation of cycling as a sport*”. All'interno della seconda sezione di suddetto capitolo troviamo:

- **Preambolo:** “...i ciclisti devono competere su un piano di pari livello... il principio afferma il primato dell'uomo sulla bicicletta”.
- **1.3.006:** “La bicicletta è un veicolo con due ruote di ugual diametro. La ruota frontale può essere orientabile; la ruota posteriore può essere guidata da un sistema composto da pedali e catena”. Questa prima norma impedisce l'utilizzo di tutte le biciclette dotate di due ruote con diametro differente.
- **1.3.008:** “L'atleta deve normalmente assumere la posizione seduta sulla bicicletta. Questa posizione comporta come unici punti di appoggio: i piedi sui pedali, le mani sul manubrio e il perineo sulla sella”. Questa regola impone il divieto dell'utilizzo di biciclette come le recumbent, per ovvi motivi di sicurezza.
- **1.3.023:** “Per le competizioni a cronometro individuali e in squadra un'estensione fissa può essere aggiunta al sistema da strada.”



**Figura 6:** Appendici ammesse durante le cronometro, immagine modificata tratta dal regolamento UCI

- **1.3.024:** “Ogni dispositivo, aggiunto o incorporato nella struttura, che è destinato a diminuire la resistenza alla penetrazione dell'aria o a creare un'accelerazione artificiale, come schermi protettivi, carene o simili, è proibito”.

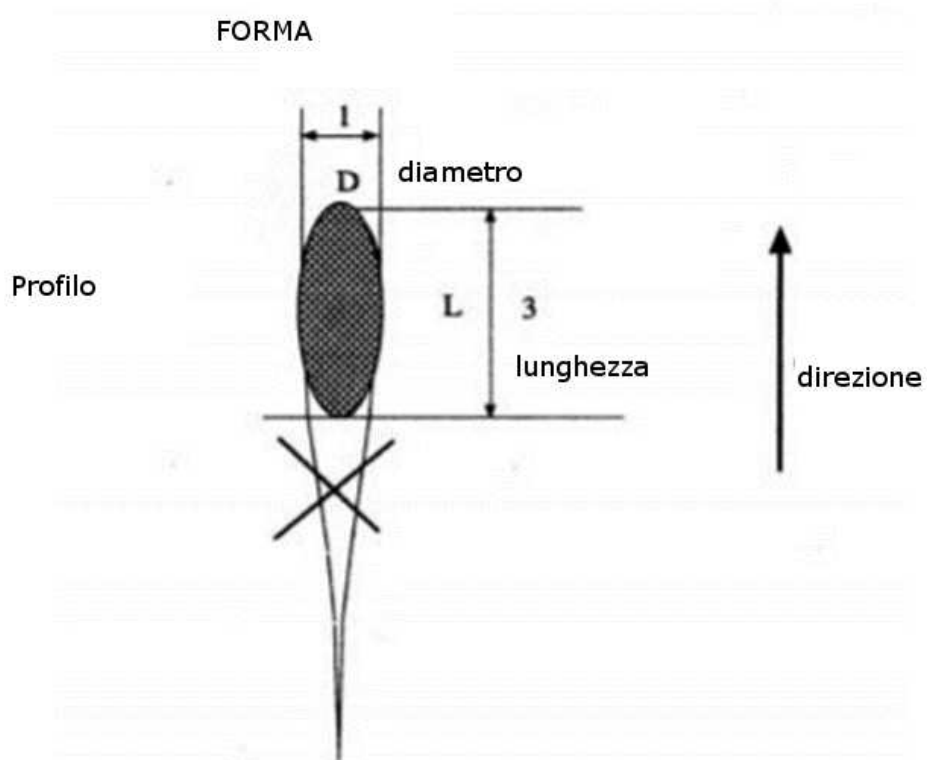


**Figura 7:** Esempio di schermo aerodinamico, immagine modificata tratta dal regolamento UCI

Uno schermo protettivo può essere definito come un componente fisso che serve come parabrezza o frangivento progettato per proteggere un altro elemento fisso della bici in modo tale da ridurre la sua resistenza dal vento. Una fusoliera è definita come un'estensione di una sezione. Ciò deve essere tollerato, purché il rapporto tra la lunghezza  $L$  ed il diametro  $D$  non superi un valore pari a 3.

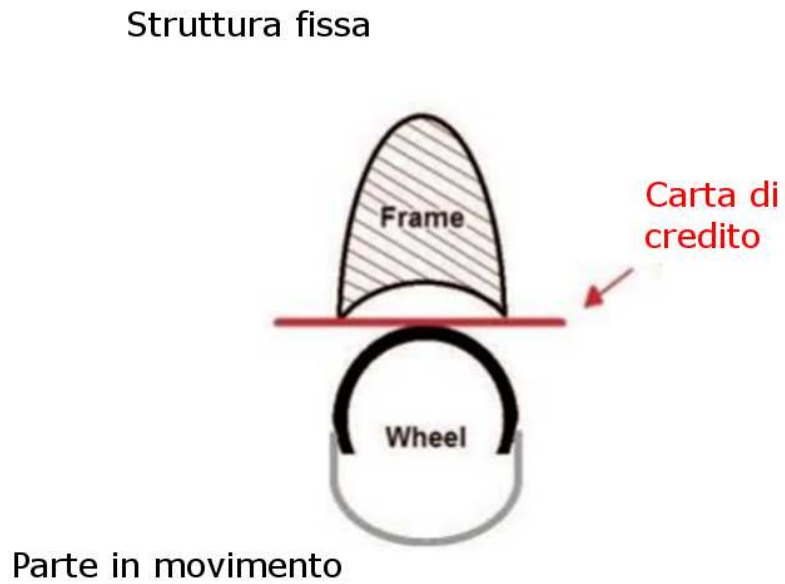
Una carenatura è definita come l'uso o l'adattamento di un componente della bicicletta in modo tale da racchiudere una parte mobile della bicicletta stessa, come le ruote o i pedali. Pertanto, deve essere possibile far passare una carta rigida (come una carta di credito) fra la struttura fissa e la parte mobile.

- **1.3.026:** “Le borracce non possono essere integrate nel telaio e possono essere posizionate solamente su un tubo dello stesso, nella sua parte interna. La dimensione del diametro della borraccia non può essere inferiore ai 4 cm...”
- **1.3.033:** “È vietato indossare oggetti non essenziali di abbigliamento o oggetti progettati per influenzare le prestazioni di un atleta, come ridurre la resistenza dell'aria o modificare il corpo dell'atleta stesso (compressione, stiramento, supporto). Capi di abbigliamento o attrezzature possono essere considerate essenziali quando le condizioni climatiche le rendono appropriate per la sicurezza o la salute dell'atleta. In questo caso, la natura e la consistenza dell'abbigliamento o delle attrezzature devono essere chiaramente ed unicamente giustificate dalla necessità di proteggere l'atleta. Discrezionalità al riguardo è lasciata ai commissari di gara. L'uso di copriscarpe è vietato durante gli eventi su una pista coperta. Attrezzature (caschi, scarpe, maglie, pantaloncini, ecc) indossati dall'atleta non possono essere adattati per un uso diverso da quello di abbigliamento o di sicurezza con l'aggiunta o l'incor-

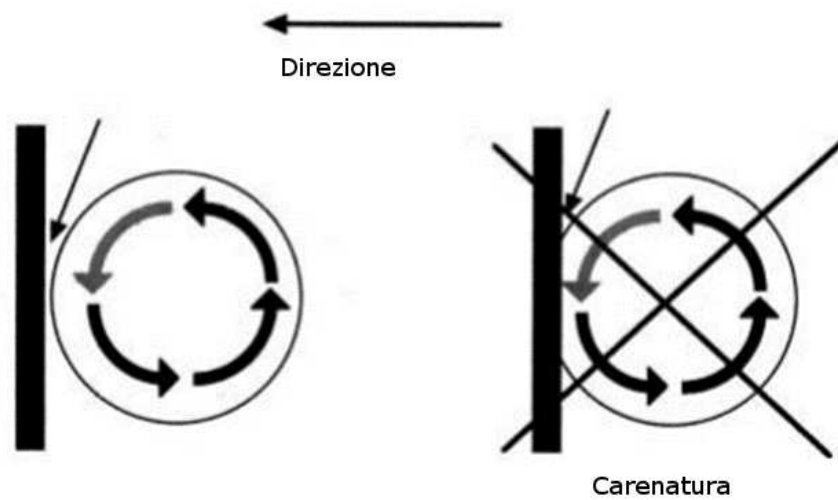


**Figura 8:** Rapporto lunghezza-larghezza strutturale, immagine modificata tratta dal regolamento UCI





**Figura 9:** Posizione relativa telaio-ruota ammessa dall'UCI, immagine modificata tratta dal regolamento UCI



**Figura 10:** Esempio di carenatura vietata dall'UCI, immagine modificata tratta dal regolamento UCI

porazione di sistemi meccanici o elettronici che non sono approvati come innovazioni tecniche nell'articolo 1.3.004

## Lavori pregressi

A partire dagli anni Ottanta sono stati numerosi gli studi legati all'aerodinamica. Nel 1980 nessuna compagnia prova i suoi prodotti in galleria del vento, ma già nel 1990 tutte le maggiori ne usufruiscono. Uno dei primissimi studi aerodinamici è stato effettuato da *Nonweiler* (1956 e 1959). Egli riesce ad ottenere il  $C_d$  legato alla posizione drops, stimandolo a 0.93, ripetibile con una variazione del  $\pm 3\%$ . *Pugh*, nel 1979, lo stima invece a 0.79. Nello stesso anno *Prampero* definisce un'equazione di moto studiando due ciclisti in aria calma. Definisce la resistenza aerodinamica come un coefficiente (che rappresenta  $1/2\rho AC_d$ ) per la velocità al quadrato:

$$D = 0.19V^2 \quad (1)$$

Con  $A$  area frontale,  $\rho$  densità dell'aria e  $C_d$  coefficiente di resistenza aerodinamica. Tra i pionieri degli studi in galleria del vento, nel 1983, troviamo *Antonio Del Monte*, che nella galleria del vento della Pininfarina aiuta Moser a migliorarsi per battere il record dell'ora. Numerosi studi sono stati invece effettuati presso la *Texas A&M wind tunnel*, galleria del vento costruita dopo la seconda guerra mondiale dalla Nasa, con sezione di prova di circa 2x3 m. Questa galleria è dotata di un piatto girevole con bilancia in grado di misurare portanza, resistenza e forza laterale, oltre ai momenti sui tre assi. Tra i primi ad effettuare ricerche in tale galleria troviamo *Kyle* che, sempre nel 1983, testa la Funny bike e tutta l'attrezzatura del team statunitense per le olimpiadi del 1984. Anche *Steve Hed* effettua numerosi studi per apportare migliorie ai prodotti della sua azienda. In particolare, inizia studiando gli effetti delle appendici rispetto al manubrio tradizionale: a 48 km/h la riduzione di resistenza è pari a circa 5 N; il tempo di percorrenza per 40 km si riduce di ben 1-2 minuti. Hed studia anche la posizione delle braccia e dimostra che, tenendole meno compatte, la scia che si viene a formare è più estesa, generando una resistenza superiore oltre a contribuire ad un ovvio aumento dell'area frontale. Studia anche l'inclinazione delle appendici: per un angolo compreso fra  $0^\circ$  e  $30^\circ$  la resistenza aerodinamica rimane a bassi valori, se invece le appendici vengono inclinate a  $45^\circ$  il valore inizia ad aumentare. La posizione ottimale del capo è invece quella in cui l'atleta guarda la pavimentazione stradale. Questo ovviamente rende molto difficoltosa la guida. Se il capo dell'atleta ha un'inclinazione di  $0^\circ$  aumentano le dimensioni della scia nella parte retrostante il casco stesso, incrementando la resistenza. Un ottimo compromesso è quello in cui l'inclinazione è pari a  $45^\circ$ : le linee di flusso seguono il casco, e la resistenza non

raggiunge i valori massimi. Gli stessi risultati sulla posizione del capo sono stati trovati da Kyle nei test in galleria, fra il 1983 e il 1986.



**Figura 11:** Prova in galleria del vento con visualizzazione della componentistica utilizzata dal team statunitense nel 1984. Immagine modificata tratta da *Cycling science*, Dicembre 1989

Nella fine degli anni Ottanta la *Du Pont Advanced Composite Division*, in collaborazione con *Specialized Bicycle Component*, investe molto nello sviluppo di una ruota che sia la più aerodinamica disponibile in commercio, per velocità comprese fra i 40 e i 56 km/h. Per raggiungere questo obiettivo vengono effettuati svariati test in galleria del vento, oltre ad utilizzare simulazioni a elementi finiti per fornire una struttura leggera ( $\leq 1250\text{g}$ ) ma capace di sorreggere i carichi applicati. Il primo confronto è stato effettuato con ruote di tipo lenticolare; queste, non permettendo il passaggio dell'aria, presentano un centro aerodinamico in posizione più avanzata rispetto all'asse di sterzo (25% del diametro circa), il che si traduce in un momento sul manubrio in caso di vento laterale. Viene quindi aumentata l'area libera in grado di permettere il passaggio del flusso d'aria, fino al 50% del totale. Una volta ridotta l'instabilità si è passati a migliorare la resistenza aerodinamica, sia da parte dei raggi, sia da parte del cerchione con copertone integrato. Sono utilizzati profili aerodinamici NACA, e i risultati sono ottimi. Svariati test comparativi eseguiti in galleria del vento hanno mostrato come nessun'altra ruota presente allora sul mercato, fosse in grado di garantire valori così bassi di resistenza. Per provare le ruote in galleria, e simularne il rotolamento, viene utilizzato un motore elettrico che le mette in rotazione. Mediante la bilancia vengono poi misurate resistenza in avanzamento e laterale, mentre attraverso il motore viene misurata la potenza necessaria per metterla in movimento. Kyle, tra il 1985 e il 1990 lavora molto sui caschi aerodinamici, sia per la nazionale statuni-

tense che per la Specialized e la Bell Helmet. L'UCI interviene imponendo una lunghezza massima dei caschi, norma che non blocca lo sviluppo aerodinamico pur comportando un peggioramento delle prestazioni.

Nei primi anni Novanta si vuole quantificare l'effetto che ha la scia sull'energia consumata. Da un lato vengono effettuati studi in galleria ad opera di Kyle: egli è in grado di stimare un risparmio di energia, per il quarto ciclista in scia rispetto al primo, pari al 29% per una velocità di 24 km/h e del 35% a 56 km/h. Studio analogo è stato svolto ad opera di *Hagberg* nel 1990, che stima un risparmio del 23% a 37km/h, se in scia ad un solo atleta rispetto al primo, e del 39% se schermato da 8 persone. Dall'altro lato si iniziano ad eseguire test su strada: *James Hagberg* e *Steve D. McCole*, professori dell'Università del Maryland, stimano un risparmio di energia rispetto al primo atleta, pari a:

Posizione	Risparmio
Seconda posizione	26±8%
Terza posizione	27±6%
Quarta posizione	27±7%
Nel gruppo	39±6%
Dietro ad un camion	62±6%

**Tabella 1:** Risparmio energetico in scia

Nel 1991 *Drake Geoff* e *Zahradnik Fred* studiano l'effetto delle appendici rispetto alla posizione tradizionale. La prova è stata effettuata presso il *Lehigh Valley Velodrome* in una giornata ventosa. Mediante un dispositivo posto nella ruota posteriore viene monitorata la potenza erogata. Agli atleti è stato chiesto di compiere 10 giri a potenza costante prima nella posizione tradizionale e poi con le appendici. Il risparmio per 40 km a 37-40 km/h si quantifica in ben 3' e 40". Nel 1995 *Steven P. Burns* e *Jhon P. Sullivan*, professori della *Purdue University*, hanno eseguito uno studio per quantificare il miglioramento delle prestazioni con le appendici. Lo studio è stato eseguito prima su strada, poi in galleria del vento. La prova su strada è particolare in quanto seguono gli standard SEA (Society of Automotive Engineers) per il *Coast down test*. Questo esperimento è mirato alla ricerca della resistenza aerodinamica, mediante lo studio della decelerazione libera. L'atleta viene portato ad una velocità costante di 40 km/h e lasciato poi rallentare senza l'intervento di nessuna forza esterna, se non quella aerodinamica, quella di rotolamento e gli attriti interni. Vengono raccolti i dati e realizzato un grafico velocità/tempo dal quale si risale all'accelerazione. Si può quindi trovare la resistenza mediante la semplice formula  $D=m'a$ ;  $m'$  rappresenta la massa equivalente, ovvero la massa dell'atleta sommata alla massa dovuta al rotolamento delle parti. Note le condizioni ambientali e l'area frontale (mediante analisi grafica di una fotografia) è stato ricavato il coefficiente di resistenza aerodinamica,

per le tre posizioni provate: posizione stem, posizione drops e posizione time trial. I test in galleria sono avvenuti in camera di prova aperta per prevenire l'effetto di bloccaggio, prima con la sola bicicletta e poi con il sistema completo, nelle tre posizioni. I risultati hanno mostrato che al variare delle velocità varia il numero di Reynolds, e ci si potrebbe porre cavallo della transizione laminare-turbolenta. Questo può far sì che lo strato limite presenti una separazione ritardata. Il test si è dimostrato inadeguato per il ciclismo, in quanto i risultati mostrano che la posizione drops risulta meno aerodinamica della posizione stem.

Essendo cresciuta la qualità delle simulazioni CFD (Computational Fluid Dynamics), si iniziano ad effettuare anche nel contesto ciclistico. Nel 2010 *Defraeye, Broken, Koninckx, Hespel e Carmeliet* presentano un lavoro nel quale confrontano i risultati ottenuti in galleria del vento con quelli delle simulazioni. Eseguono quindi una prova in galleria del vento con tre posizioni fissate (attraverso l'ausilio di un sostegno): posizione trial time (TTP), posizione drops e posizione stem. Dopo aver acquisito la posizione mediante scanner 3D hanno eseguito delle simulazioni RANS e LES. I risultati finali hanno mostrato uno scostamento del 7% per le LES e dell'11% per le RANS rispetto alla prova in galleria. Hanno poi valutato l'effetto del numero di Reynolds per velocità tra i 10 e i 20 m/s, non trovando variazioni significative. Nel 2012 gli stessi autori pubblicano un lavoro simile al precedente come procedura operativa, ma questa volta analizzano l'effetto che si ha stando in scia: studiano l'effetto della scia tra 0.01 m e 1 m di distanza. Considerando il solo atleta non in scia la differenza tra simulazione e prova in galleria si discosta di un massimo del 10% per la posizione stem, e un minimo dello 0.7% per la TTP. Se invece si considera la resistenza in scia, i valori cambiano passando da un 0.8% per la posizione stem ad un 2.6% per la TTP. Nel 2010 un gruppo guidato dal professor *Giuseppe Gibertini*, professore del Politecnico di Milano, in collaborazione con il *Pro Tour Cycling Team Quickstep*, ha svolto una serie di studi per comparare i risultati ottenuti in galleria del vento e su pista. La prima parte è stata svolta nella galleria del vento del Politecnico di Milano. Sei atleti hanno provato le tre posizioni tipiche, corrispondenti alle tre differenti impugnature del manubrio. Mediante l'ausilio della bilancia sono stati misurati i carichi agenti sull'atleta. Analogamente, al velodromo di Montichiari, sono state riprovate le medesime posizioni alle stesse velocità. In questo caso è stato utilizzato un misuratore di potenza posto sulla bicicletta stessa. Sono stati poi raccolti i pareri degli atleti riguardo al comfort percepito (più la posizione è aerodinamica, meno risulta confortevole). Il confronto tra la prova in galleria e quella in pista ha confermato l'andamento dell'efficienza aerodinamica tra le varie posizioni (fig. 12).

Nel 2015 un lavoro di *Blocken B. e Toparlar Y.* ha mostrato i benefici aerodinamici che può ottenere un ciclista se nella sua scia si pone un'autovettura. Lo studio è stato



**Figura 12:** Ciclista in galleria del vento, studio Gibertini

effettuato sia in galleria del vento che tramite simulazione (steady RANS), e i risultati mostrano una diminuzione della resistenza rispettivamente del 3.7% se la distanza è pari a 3 m, 1.4% se è a 5 m e dello 0.2% se è a 10 m. In termini di tempo equivalgono ad un risparmio rispettivamente di 62.4 s, 24.1 s, 3.9 s per una tipica cronometro di 50Km.

## Dinamica del ciclista

Se consideriamo un ciclista in movimento sappiamo che la sua condizione di moto viene determinata in base al bilancio delle forze agenti su di esso. In particolare avremo una spinta, impressa dal ciclista stesso, e una forza resistente al moto composta da più contributi. Un'equazione semplice (Kyle) per esprimere analiticamente l'equilibrio è:

$$m \frac{dv}{dt} = T - [W \sin(\arctan G) + WCrr_1 \cos(\arctan G) + NCrr_2 V + \frac{1}{2} C_d A (V + V_w)^2] \quad (2)$$

Dove  $m$  è la somma delle singole masse dell'atleta e della bicicletta che moltiplica l'accelerazione.  $T$  è la spinta propulsiva,  $W$  è il peso,  $Crr_1$  è il coefficiente di resistenza di rotolamento con valore di 0.0023,  $G$  è la pendenza,  $N$  è il numero di ruote,  $Crr_2$  è un fattore che definisce la variazione della resistenza di rotolamento con la velocità e vale 0.0502 Ns/m,  $V$  è la velocità di avanzamento del ciclo, mentre  $V_w$  esprime la velocità del vento.  $C_d$  è il coefficiente di resistenza aerodinamica,  $A$  è l'area frontale e  $\rho$  è la densità dell'aria. Moltiplicando tutto per la velocità  $V$ , si ottiene il bilancio in termini energetici:

$$mV \frac{dv}{dt} = P - [WV \sin(\arctan G) + WVCrr_1 \cos(\arctan G) + NCrr_2 V^2 + \frac{1}{2} C_d AV (V + V_w)^2] \quad (3)$$

Dove  $P$  è la potenza generata dall'atleta. In caso di accelerazione nulla tutta la potenza viene utilizzata per controbilanciare il dispendio di energia dato dalla resistenza. In base al problema questa equazione può essere risolta o direttamente o integrata numericamente (*Kyle e Burke 1984*). Ora analizziamo più da vicino ogni fattore di questa equazione.

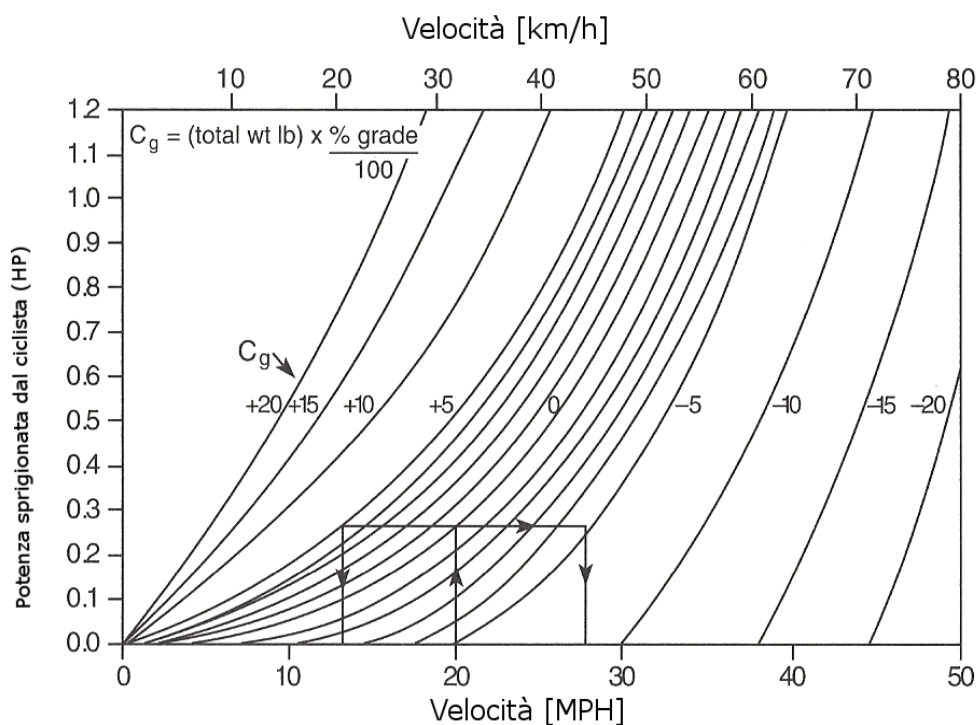
## Resistenza

La forza che si oppone al moto del ciclista è costituita dai seguenti elementi:

- Forza gravitazionale e peso
- Resistenza di rotolamento
- Forze di inerzia
- Rendimento interno
- Resistenza aerodinamica

### Forza gravitazionale e peso

L'effetto principale di questa parte della resistenza è legato all'inclinazione della strada percorsa dall'atleta. In caso di percorso completamente pianeggiante, il vettore legato alla forza gravitazionale posto nel centro di massa del sistema ha direzione perpendicolare al suolo e quindi alla velocità. Se invece ci troviamo su un piano inclinato, avremo un contributo positivo al bilancio in caso di salita, negativo in caso di discesa. È facile immaginare che maggiore sarà la pendenza affrontata, maggiore sarà il contributo di questo termine al bilancio finale considerato che la proiezione lungo l'asse delle  $X$  aumenta con il seno dell'angolo di inclinazione. Per valori di pendenza superiori al 2-3% questo termine fornisce il maggior contributo, favorito anche dalla diminuzione di velocità di avanzamento imposta dall'atleta. Nel grafico 13 viene riportata l'influenza che la pendenza ha sulla velocità di avanzamento a parità di potenza per un sistema di 90 kg: sprigionando 210 W di potenza può affrontare una salita al 2.5% a circa 32 km/h, uno inclinato al -5% a 42 km/h e uno inclinato al +5% a 22 km/h (*Chester R. Kyle*). Il secondo effetto della gravità è meno visibile: a parità di condizioni del ciclo un peso più elevato deforma maggiormente gli pneumatici e aumenta il carico agente sui cuscinetti, comportando così un peggioramento della resistenza di rotolamento. Ne consegue quindi che anche su un piano non inclinato un aumento di peso porti ad un aumento di resistenza, anche se l'effetto rispetto alla resistenza aerodinamica è trascurabile: un aumento di peso di un chilogrammo equivale all'effetto aerodinamico di un tratto di cavo esposto.

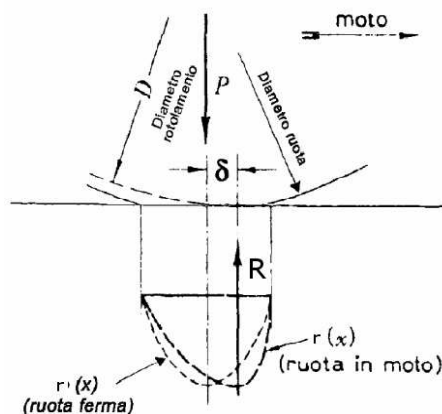


**Figura 13:** Effetto del peso sull'avanzamento, immagine modificata tratta da High Tech Cycling pag.10

### Resistenza di rotolamento

È la resistenza di rotolamento che si oppone principalmente all'avanzamento in caso di piano non inclinato e velocità inferiori ai 12 km/h circa (Kyle 1988). A partire dalla fine degli anni Ottanta sono stati numerosi gli studi per lo sviluppo dei tubolari al fine di ridurre gli effetti negativi, senza pregiudicare la sicurezza dell'atleta: durante l'avanzamento, il battistrada e la carcassa del copertone si deformano a contatto con la strada provocando uno spostamento, pari a  $\delta$ , nella direzione del moto del punto di applicazione della forza di reazione R (fig. 14). Si avrà quindi un momento resistente pari a  $M=R \cdot \delta$ . Si è puntato dunque allo sviluppo di pneumatici in grado di resistere a pressioni interne più elevate, riducendo l'attrito con l'asfalto e il loro ingombro. Tutto questo è possibile lavorando sui materiali utilizzati: i migliori sono quelli rinforzati con Nylon o Kevlar.





**Figura 14:** Deformazione pneumatica in movimento, immagine modificata tratta da [www.dica.unict.it](http://www.dica.unict.it), cenni di meccanica della locomozione

### Rendimento interno

Come ogni componente meccanico, all'interno della bicicletta esistono dei rendimenti che sono sempre inferiori a quello unitario. In particolare abbiamo due elementi: cuscinetti e trasmissione a catena. Entrambi migliorano continuamente, ma nonostante questo avremo sempre una perdita di energia. Per quanto riguarda il rendimento della catena questo varia fra 0.99 nei casi in cui essa lavori in modo corretto, sia in ottime condizioni e ben lubrificata ma può scendere fino a 0.8 nelle peggiori condizioni (James B. Spicer, Johns Hopkins University, 1999).

### Resistenza aerodinamica

Considerando l'azione di un atleta su un piano non inclinato, a partire da velocità di circa 12 km/h il contributo principale alla resistenza inizia ad essere quello aerodinamico. Salendo a 46km/h il contributo cresce al 90% (Grappe et al. 1997, Kyle e Burke 1984), di cui il 70% circa è dovuto al ciclista mentre il restante alla bicicletta (Kyle, 1979). La resistenza aerodinamica è definita come:

$$D = \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \quad (4)$$

Si noti come la resistenza  $D$  cresce con il quadrato della velocità. Raddoppiare la velocità corrisponde ad un dispendio energetico otto volte superiore (Gross, Kyle, Malewicki, 1983). Noi siamo interessati alla forza che si oppone al moto del ciclista. Per questo motivo, nel corso della trattazione, si farà riferimento al  $C_x$ , invece del  $C_d$ . Possiamo individuare due contributi aerodinamici:

- Resistenza di attrito
- Resistenza di forma

**Resistenza di attrito** Questa componente è dovuta alle forze viscosse che nascono fra il corpo e il fluido. Considerando un ciclista in movimento nel fluido indisturbato, avremo le particelle a contatto con velocità relativa nulla (condizione di aderenza). Il corpo mette quindi in movimento le particelle di fluido più vicine ad esso. Si vengono a generare delle forze tangenziali dovute alla differenza di velocità e alla viscosità stessa. La parte di flusso coinvolta è chiamata *strato limite* e per un ciclista varia fra pochi millimetri e qualche centimetro. Viene definito come la zona adiacente al corpo in cui la velocità è inferiore al 99% della velocità della zona esterna del fluido, assumendo per quest'ultima il modello di moto a potenziale (caratterizzato da un campo di velocità irrotazionale). Lo strato limite può essere laminare se le linee di flusso scorrono regolarmente una sull'altra, oppure turbolento se abbiamo piccoli e casuali vortici. In presenza di forti gradienti di pressione avversa, lo strato limite tende alla separazione, generando così una serie di grandi vortici. Il punto di separazione è quello in cui lo sforzo di taglio assume valore nullo. Uno strato limite laminare presenta valori di attrito inferiori, è però vero che tende a separarsi più facilmente, generando così valori di resistenza molto più elevati. Lo strato limite turbolento, invece, tende a separarsi meno facilmente, garantendo di conseguenza valori di resistenza inferiori. Molto importante in questo campo è il **numero di Reynolds**, in quanto riesce a fornire informazioni riguardo alle condizioni del fluido. In particolare è definito come:

$$Re = \frac{LV}{\nu} \quad (5)$$

in cui  $L$  è la lunghezza di riferimento,  $V$  è la velocità macroscopica e  $\nu$  è la viscosità cinematica, che per l'aria vale  $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . La transizione tra laminare e turbolento fa cambiare il  $C_d$ , garantendo valori di resistenza inferiori. Per cercare di ridurre questa forza si utilizzano superfici molto lisce e aderenti.

**Resistenza di forma** È la componente predominante della resistenza, dovuta alla viscosità del fluido, ma legata maggiormente alla separazione delle linee di flusso. Se il fluido non fosse viscoso avremmo campi di velocità e pressione uguali sia a valle che a monte del corpo investito, ovvero avremmo un perfetto inseguimento del corpo da parte delle linee di flusso, che invece si distaccano provocando una zona di ricircolo nella parte retrostante il ciclista. Qui la pressione statica è inferiore a quella nella zona precedente il corpo. Una forma tozza agevola la separazione, per questo i profili utilizzati oggi per la realizzazione dei telai tendono ad avere un carattere fortemente aerodinamico. Dal punto di vista ingegneristico la loro realizzazione non è complicata. Analogamente, si può

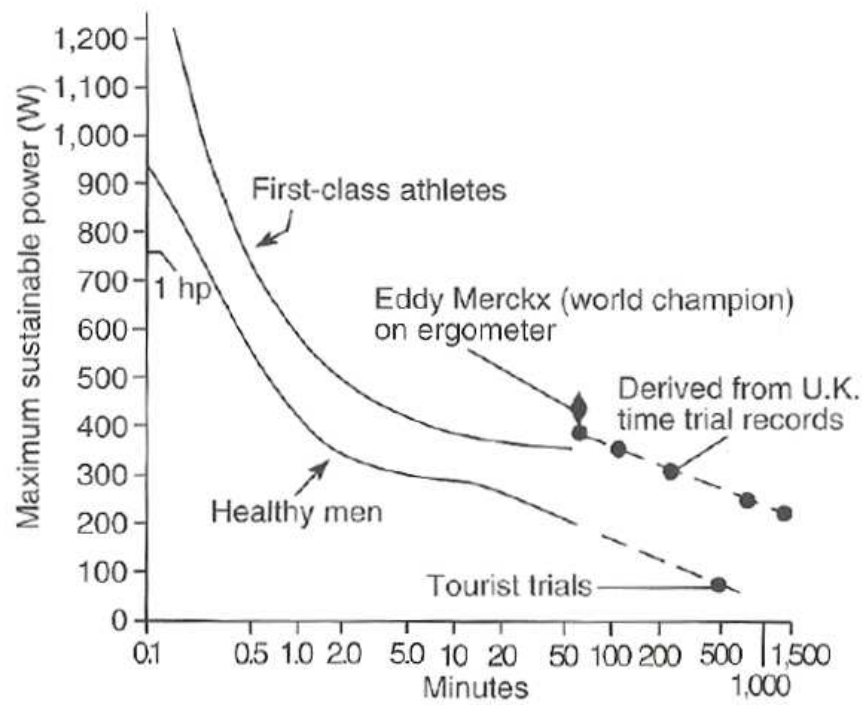
intervenire facilmente su elementi quali la borraccia, posizionandola dietro ad elementi già presenti, mettendola in zone di ricircolo oppure dandole una forma aerodinamica. Il vero problema lo si riscontra studiando il ciclista: si vengono a formare zone di ricircolo dietro a testa, braccia, gambe e torso.



**Figura 15:** Simulazione CDF ciclista, immagine modificata tratta da [www.cervelo.net](http://www.cervelo.net)

## Potenza umana

Prima di cercare la posizione più efficiente dal punto di vista aerodinamico e prima di utilizzare materiali che garantiscano il risparmio di qualche secondo a fine prova bisogna lavorare sulla componente che più influenza la prestazione: il motore umano. Cerchiamo di capire ora qual è il livello di potenza in gioco, per poi capire quali possono essere i miglioramenti ottenibili. Si è visto che un uomo in salute può sviluppare una potenza che varia fra i 75 W e i 100 W (Kyle 1973) in modo continuativo. Una tale potenza permette di raggiungere velocità comprese fra i 16 km/h e i 24 km/h in assenza di vento. Se invece si considerano atleti di alto livello che devono sottoporsi ad attività fisica per un tempo limitato troviamo valori maggiori: il livello di potenza erogata per giocarsi il record dell'ora in velodromo si attesta sui 450 W, approssimativamente 5 Watt/Kg (Padilla et al.2000). Se invece si considera la potenza erogata da un velocista in volata (per 30" circa) possiamo trovare valori superiori ai 1200 W. Con queste considerazioni ci aspettiamo che la potenza erogata durante la prova dagli atleti sia di 400W circa. Grazie alle considerazioni sulla dinamica del ciclista, possiamo affermare che gli studi aerodinamici hanno senso per prove effettuate su percorsi caratterizzati dall'assenza di particolari variazioni altimetriche, in cui le velocità sono sostenute. Nelle altre condizioni è meglio lavorare sulla componentistica per ridurre il peso e gli attriti.



**Figura 16:** Potenza umana erogabile. Immagine modificata tratta da High tech cycling, cap.1, Kyle

# Capitolo 1

## Strumentazione sperimentale

La prova avviene su strada, in modo da ricreare le normali condizioni e tutti i fattori che influenzano l'attività del ciclista nella competizione. Durante la prova è per noi essenziale riuscire ad acquisire differenti tipologie di dati in modo tale da poter eseguire una corretta analisi, senza intralciare o influenzare il moto del soggetto studiato. Si è ovviamente evitato l'utilizzo di cablaggi per trasmettere i dati in quanto renderebbero la prova rischiosa e scomoda per l'atleta. È stata scartata anche la trasmissione wireless per il trasferimento dei dati in tempo reale per rendere più agevole lo studio e non dover seguire l'atleta a poca distanza. Tutti i dati sono quindi memorizzati su una scheda SD. Per il nostro obiettivo interessa conoscere:

- Condizioni del vento relativo, cioè modulo e direzione
- Pressione atmosferica
- Temperatura ambiente
- Accelerazioni in più punti della bicicletta
- Accelerazioni in più punti del ciclista
- Velocità angolari della bicicletta
- Velocità angolari del ciclista

Al fine di acquisire questi dati è stato sviluppato un sistema compatto basato su tecnologia *Arduino* il cui schema elettrico è riportato nel grafico 1.1, oltre all'utilizzo di piattaforme inerziali Gyko della *Microgate*.

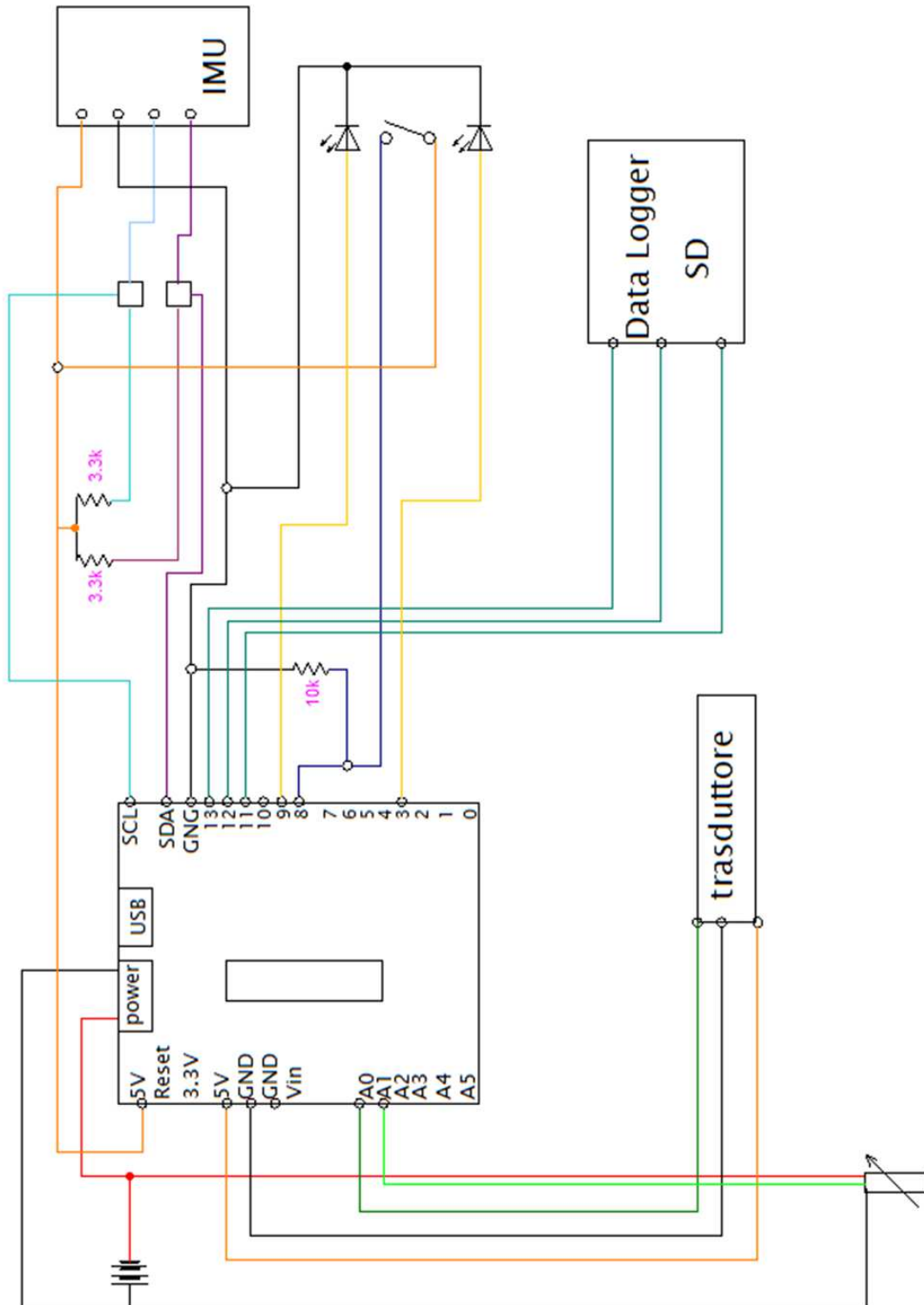


Figura 1.1: Schema elettrico Arduino

Come si vede, il sistema si basa su una scheda Arduino che gestisce il campionamento e la memorizzazione dei segnali analizzati. Attraverso Arduino abbiamo alimentato anche la piattaforma inerziale GY-88, il trasduttore di pressione e la shield di espansione con SD. È stato poi realizzato un collegamento con pulsante switch digitale; questo permette il campionamento o meno del valore del trasduttore e del potenziometro o di quello delle variabili ambientali. Sono stati aggiunti inoltre due led per indicare l'alimentazione del sistema e la fase di campionamento.

## 1.1 Data Logger con Arduino

### 1.1.1 Scheda Arduino

La scheda elettronica al centro del nostro sistema è *Arduino UNO*, dotata di 14 pin digitali e 6 analogici. Tutti i pin sono programmabili per essere usati come entrate o uscite. Il microcontrollore è l'ATmega328 prodotto da Atmel e caratterizzato da una velocità di 16 MHz, una memoria flash da 32 KB, una sram da 2 KB e una memoria EEPROM da 1 KB. Arduino accetta una tensione di alimentazione ottimale che varia tra i 7 V e 12 V. Nel nostro caso è stata utilizzata una batteria in grado di garantire una tensione di 9 V. A prescindere dal valore di alimentazione della scheda, tutti i pin possono erogare o campionare una tensione di 5 V. La massima corrente accettata o supportata è pari a 40 mA. Valori superiori in ingresso potrebbero portare al danneggiamento della scheda stessa. Vi sono anche due pin che funzionano da collegamento seriale con dispositivi digitali, ovvero i pin *Scl* e *Sda*. In particolar modo il primo fornisce il segnale *clock* ai dispositivi, mentre il secondo gestisce il flusso dei dati. A queste entrate si possono collegare più sensori, ognuno identificato con un indirizzo specifico. Nel nostro caso questi ingressi sono stati utilizzati per gestire la piattaforma inerziale GY-88. Le entrate analogiche sono utili per i segnali provenienti dal trasduttore di pressione e dal potenziometro. In questo caso il campionamento avviene a 10 bits, un valore non ottimale, ma per la nostra prova risulta accettabile.

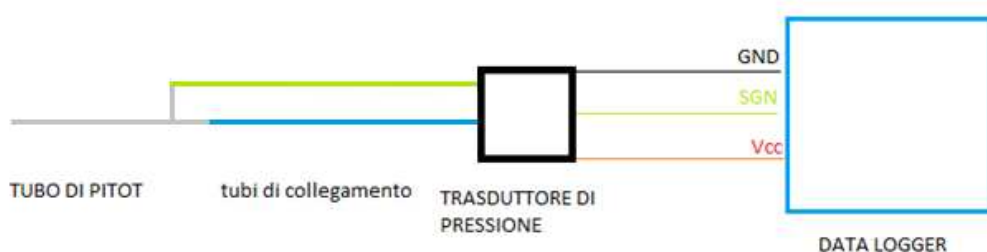
### 1.1.2 Archiviazione dati

Come detto precedentemente vogliamo salvare i dati in loco e prelevarli successivamente. Per questo motivo abbiamo utilizzato una scheda di espansione dotata di slot SD. La scheda di espansione è collegata mediante tre pin digitali (11-12-13). Sulla scheda SD abbiamo salvato due file differenti: il primo viene salvato quando lo stato del pin 8 è nella condizione HIGH, quindi l'interruttore è aperto, contiene i dati campionati dal trasduttore, dal potenziometro, dalla piattaforma inerziale (3 accelerazioni, 3 velocità angolari) e il

tempo intercorso da quando il programma è in funzione. Il secondo file contiene invece la pressione e la temperatura ambiente, utili per ricavare la densità. Una volta terminata la prova è possibile rimuovere la scheda SD ed accedere facilmente ai valori memorizzati.

## 1.2 Misura del modulo della velocità del vento

È per noi essenziale conoscere il valore della differenza di pressione (tra totale e statica); questa è utile per ricavare i coefficienti di resistenza aerodinamica e per la velocità relativa.



**Figura 1.2:** Sistema di acquisizione velocità relativa

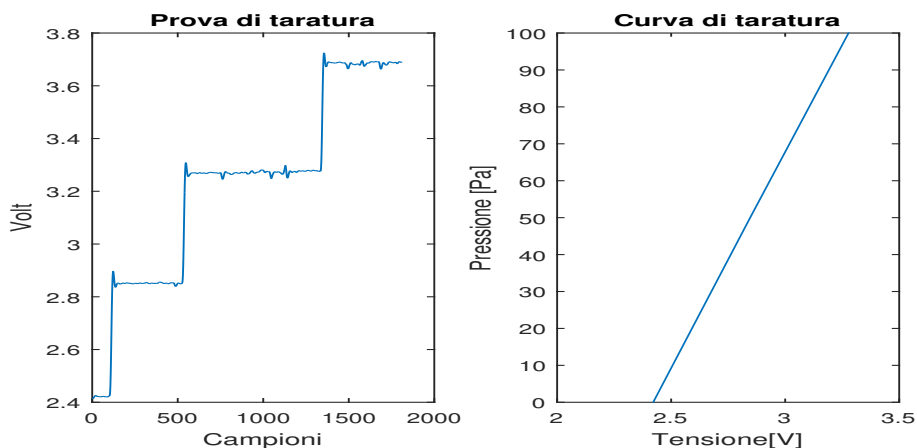
La velocità relativa è composta dalla velocità del ciclista, supposta parallela all'asse  $x$ , e dalla velocità del vento che invece può avere una certa inclinazione rispetto alla direzione dell'asse di riferimento (angolo di freccia). È stato utilizzato un tubo di Pitot collegato ad un trasduttore; il collegamento è stato effettuato mediante tubicini in gomma con diametro di 4 mm. Per agevolare montaggio e smontaggio è stata realizzata una giunzione lungo i due tubucini, poco prima del trasduttore. Essendo quest'ultimo collegato ad Arduino, condizione necessaria per il suo utilizzo è quella di avere un intervallo di uscita compreso fra 0 V e 5 V. Il trasduttore è alimentato da Arduino e il segnale è campionato mediante l'entrata analogica A0. Ovviamente il trasduttore fornisce un segnale proporzionale alla differenza fra la pressione totale e quella statica. Il valore viene quindi memorizzato sulla scheda SD, pronto per essere elaborato nella fase di analisi. Come noto, i tubi di Pitot presentano un errore  $\leq 1\%$  per un'angolazione minore di  $11^\circ$ . Nel caso in cui il vento relativo fosse stato caratterizzato da un valore superiore agli  $11^\circ$ , la prova sarebbe rimandata in quanto non era oggetto del nostro studio l'effetto del vento laterale sull'atleta.

### 1.2.1 Taratura del sistema di misurazione della pressione

Una volta campionati i valori, è necessario convertirli da Volt a Pascal. Per far questo è necessario conoscere la costante di conversione corretta. Abbiamo quindi effettuato in laboratorio una taratura di tutta la catena di misura. Mediante apposita apparecchiatura

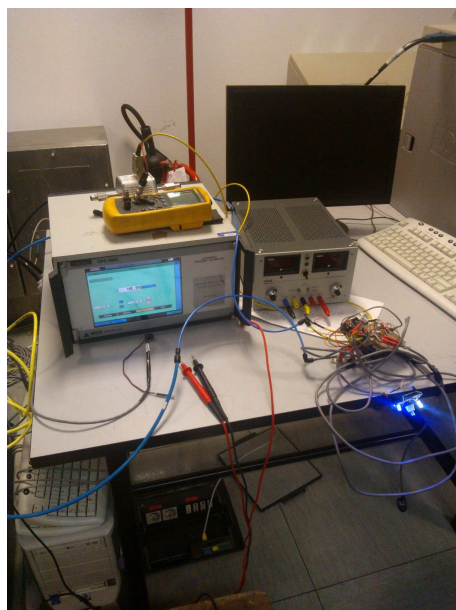


è stata generata una differenza di pressione nota in entrata al trasduttore. In particolare abbiamo iniziato con una differenza di pressione nulla, per poi variare di 50 Pascal alla volta (fig.1.3 a). Il nostro sistema di misura ha campionato la tensione in uscita. Una volta noti i valori abbiamo ricavato la curva in figura 1.3 b.



**Figura 1.3:** a) segnale campionato durante la prova b) curva di taratura

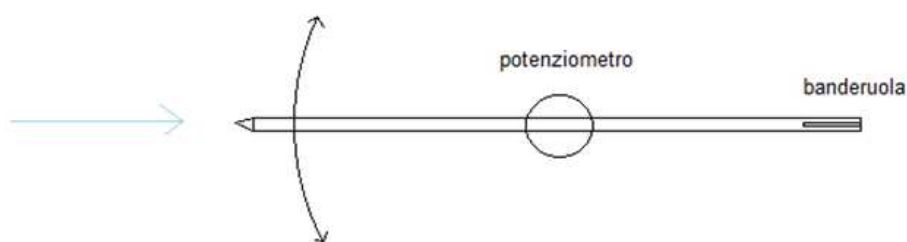
Il valore della costante di conversione è quindi di 116.7373 Pa/V.



**Figura 1.4:** Operazione di taratura

### 1.3 Sistema per l'acquisizione della direzione del vento

Come già anticipato, conoscere la direzione del vento ci permette di eseguire la prova nelle condizioni da noi richieste (angolo di freccia  $< 11^\circ$ ). Si è quindi pensato di studiare tale valore mediante l'utilizzo di un potenziometro lineare sul quale è stata montata una banderuola realizzata in alluminio e legno di balsa (fig. 1.6).

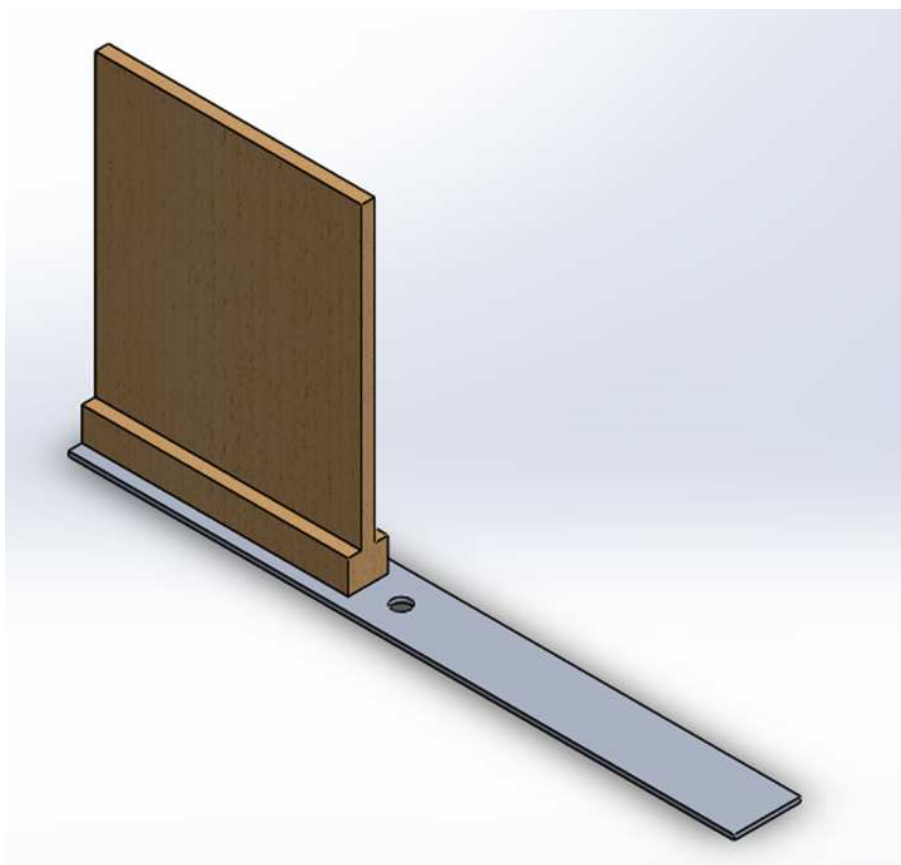


**Figura 1.5:** Schema funzionamento banderuola

Il potenziometro è un dispositivo elettrico equivalente ad un partitore di tensione resistivo variabile (cioè a due resistori collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo): una sua parte viene disposta in parallelo al carico utilizzatore. Il potenziometro è costituito da un cilindro isolante su cui è fittamente avvolto un filo metallico con resistività opportuna, mentre le due estremità sono connesse a due morsetti. Longitudinalmente al cilindro, e da un'estremità all'altra, scorre un cursore recante un contatto strisciante sul filo, a sua volta collegato ad un morsetto. Si evince quindi che la rotazione imposta dal vento produce una variazione del punto di contatto, e di conseguenza avremo una minore o maggiore resistenza in gioco. Essendo il potenziometro collegato in parallelo alla batteria che alimenta Arduino, questo avrà una tensione di ingresso pari a 9 V. Potendo Arduino campionare fra 0 V e 5 V ed essendo l'alimentazione pari a 9 V si è scelto un potenziometro di  $50\text{ K}\Omega$  in modo tale che il valore campionato rispettasse l'andamento riportato in tabella 1.1. Come si vede, l'uscita ideale del potenziometro è lineare e questo ci permette di calcolare facilmente l'angolo relativo una volta noto il segnale in uscita. Ovviamente il valore legato al range di uscita che lega i  $\pm 90^\circ$  a 0-5 V è legato alla carica della batteria; infatti se questa fornisce 8.8 V invece che 9 V il range di uscita è leggermente più basso. Questo è il motivo per il quale si è misurato il valore fornito dalla batteria prima e dopo ogni prova. La parte inferiore della banderuola è realizzata in alluminio, materiale che ci consente un buon sostegno, senza

Angolo relativo [°]	Segnale in uscita [V]
-90	0
0	2.5
90	5

**Tabella 1.1:** Valore in uscita dal potenziometro



**Figura 1.6:** Banderuola segnamento

appesantire troppo la struttura (Fig.1.6). Il materiale utilizzato per la realizzazione della parte verticale è la balsa. Essendo quest'ultima molto leggera, abbiamo potuto realizzare una superficie elevata, senza incorrere in fenomeni legati alle forze d'inerzia che avrebbero disturbato la misura. La banderuola è stata bilanciata staticamente mediante apposito contrappeso in modo tale da avere il baricentro corrispondente con l'asse del potenziometro e prevenire l'insorgere di momenti che avrebbero causato errori nel segnale.

## 1.4 Sistema per l'acquisizione di pressione e temperatura ambiente

L'acquisizione della pressione e della temperatura ambiente è stata possibile grazie all'utilizzo dei sensori implementati all'interno della piattaforma inerziale IMU GY-88. In particolare questa piattaforma inerziale monta un sensore di pressione digitale BMP085. Quest'ultimo è un sensore piezo-resistivo seguito da un convertitore analogico digitale e un controllo unità basato su EPROM e interfaccia I<sup>2</sup>C. In tabella 1.2 troviamo le principali caratteristiche del sensore.

Range pressione [hPa]	300-1100
Range temperatura [°C]	-40 +85
Risoluzione pressione [hpa]	0.01
Risoluzione temperatura [°C]	0.1
Dimensioni lxsxa [mm]	5x5x1.2
Livello di rumore in funzionamento a bassa energia	≤0.06
Livello di rumore in funzionamento ad alta energia	≤0.03

**Tabella 1.2:** Caratteristiche sensore BMP085

Questo sensore ci permette di ricavare anche i valori della temperatura. Essendo le prove di durata breve rispetto ai tempi di evoluzione delle condizioni ambientali si è scelto di campionare pressione e temperatura ambiente fra una prova e l'altra in modo da garantire una frequenza di campionamento più elevata per i valori caratterizzati da tempi di evoluzione minori. Nel realizzare il sistema si è quindi imposto il campionamento nel momento in cui lo switch digitale è interrotto, cioè se l'entrata del pin digitale 8 è nello stato LOW.

## 1.5 Sostegno strumentazione

Tutti i dispositivi descritti nei paragrafi precedenti devono essere fissati sul ciclo. Una parte di questi, ovvero il tubo di Pitot e la banderuola, vanno fissati nella zona anteriore

della bicicletta in modo da essere immersi nel flusso non ancora disturbato dalla presenza dell'atleta. Per facilitare questa operazione e fare in modo che disturbino poco la dinamica del ciclista è stato realizzato il sostegno visibile in fig. 1.7. Questo è stato realizzato in



**Figura 1.7:** Strumentazione fissata sulla bicicletta

alluminio ed ha una forma rettangolare (500 x 30 x 3 mm); inoltre è stato predisposto con una serie di fori per fissare:

- il *potenziometro*, al quale è collegata la banderuola segnamento
- l'*interruttore*, per l'accensione e lo spegnimento della registrazione
- i *led*, per indicare l'alimentazione del dispositivo e l'avvio di registrazione
- il *tubo di Pitot*, fissato mediante fascette
- il supporto stesso al manubrio della bicicletta

Il dettaglio del posizionamento viene riportato in fig. 1.9 e fig. 1.10. Il datalogger, con la batteria e il sensore BM085 è stato invece collocato in un borsello nella parte posteriore alla sella. Si è deciso di posizionarlo in questo punto per non esporlo direttamente al flusso d'aria ed evitare quindi che influisca sui risultati della prova (aumento della resistenza misurata per l'aumento dell'area frontale). I tubicini, insieme al connettore del pulsante,



**Figura 1.8:** Sistemazione Datalogger



**Figura 1.9:** Fissaggio potenziometro al sostegno





**Figura 1.10:** Zoom interruttore di accensione e spegnimento della registrazione

sono stati fatti correre lungo il telaio (Fig. 1.8), lasciando un po' di agio nella zona del manubrio in modo da permettere le manovre del ciclista.



**Figura 1.11:** Sistemazione datalogger arduino e fissaggio cavi

## 1.6 Piattaforme inerziali *Gyko Microgate*

Sono stati utilizzati quattro sensori Gyko dell'azienda *Microgate*. Questi dispositivi sono dotati di accelerometro a 3 assi, giroscopio a 3 assi e magnetometro. Per la nostra prova è risultato rilevante l'utilizzo dell'accelerometro e del giroscopio. Una delle caratteristiche di questi dispositivi che più ci ha aiutato nella prova è stata la sincronizzazione esterna: i quattro dispositivi si connettono nella fase iniziale mediante jack da 3,5 mm (fig. 1.12) ad un dispositivo esterno che genera un impulso, sincronizzandoli. In questo modo anche se la registrazione non parte esattamente nello stesso istante, avendo sincronizzato i *clock* di ogni dispositivo, si possono mettere in relazione tutti i segnali, senza l'ausilio di operazioni più complesse. Una volta posizionati sul sistema da studiare, mediante le apposite fasce forniteci in dotazione, si è proceduto ad impostare la frequenza di campionamento, i valori massimi misurabili (in termini di g e °/s) e infine si è inviato da PC, via Bluetooth, il segnale di inizio registrazione. Grazie ad una spia led sul dispositivo si può controllare che l'inizio registrazione sia stato recepito dal singolo dispositivo (il colore del led passa dal verde all'arancio). Una volta terminata la prova, sempre tramite segnale Bluetooth, si può interrompere il tutto. I file di registrazione vengono salvati su memoria microSD presente nel dispositivo in forma binaria (rende più veloci le operazioni di campionamento), scaricati sul PC mediante apposito software in formato ".csv". Riportiamo in tabella 1.3 le caratteristiche più significative dei dispositivi.



Figura 1.12: Sensori Gyko durante la fase di trimmatura esterna

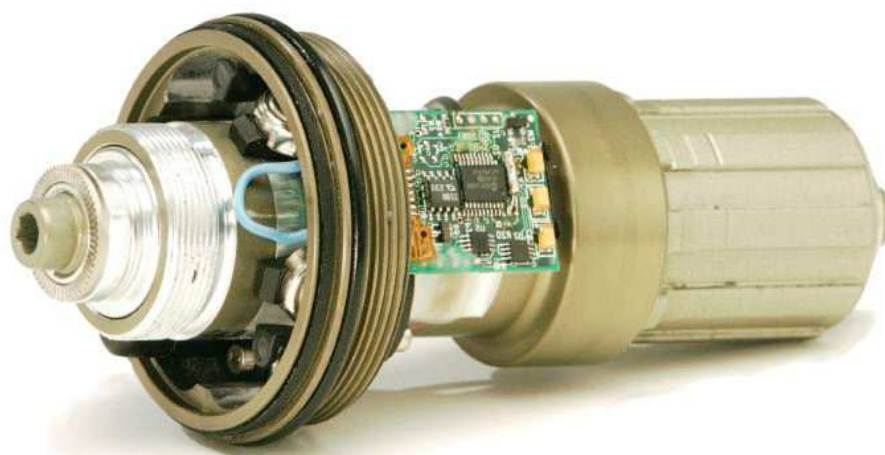


Bits ADCs integrato	16
Fondo scala giroscopio [ $^{\circ}/s$ ]	$\pm 250 \pm 500 \pm 1000 \pm 2000$
Non linearità giroscopio	$\pm 0.1\%$
Fondo scala accelerometro [g]	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$
Non linearità giroscopio	$\pm 0.5\%$

Tabella 1.3: Caratteristiche sensori

## 1.7 Misuratore di potenza

Per la prova su strada sono stati usati due misuratori di potenza differenti, uno per atleta. Per l'atleta A è stato utilizzato il *PowerTap*, un misuratore di potenza posizionato nel mozzo della ruota posteriore. Questo sistema garantisce una precisione del 1.5% sulla potenza misurata. Essendo montato sulla ruota posteriore non misura la potenza sprigionata dal ciclista ma quella scaricata al suolo, ovvero quella depurata dalle perdite per via dei rendimenti di trasmissione e frizione. Vengono campionati 60 valori al secondo, mediante 4 torsimetri collocati nel mozzo, poi trasmessi al computerino che sarà in grado di farne la media e salvarli.

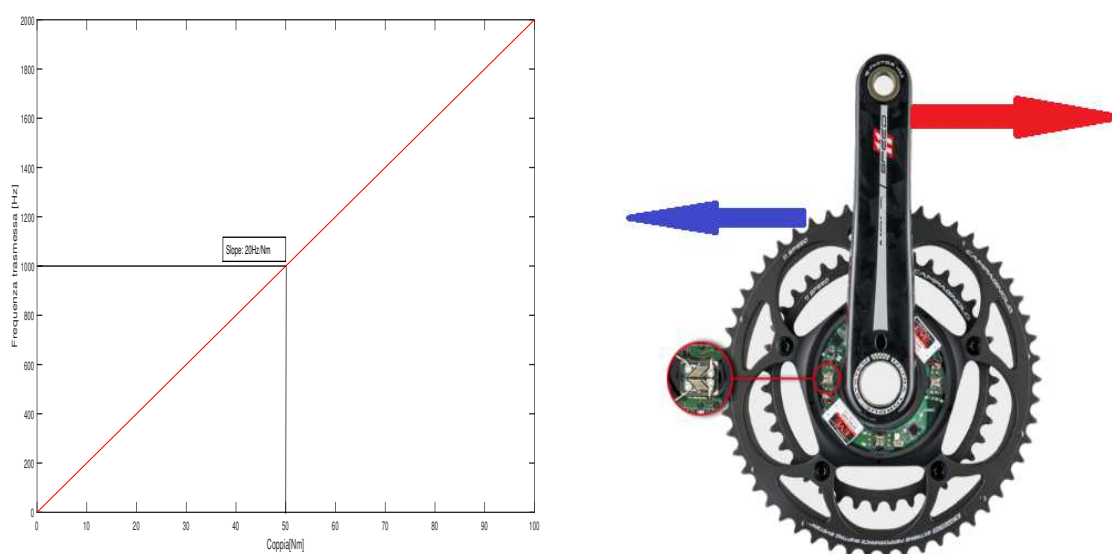


cyclinside.com  
s. guastorino

Figura 1.13: PowerTap, immagine modificata tratta da [www.cyclinside.com](http://www.cyclinside.com)

Il secondo misuratore di potenza è l'*SRM*, con precisione dichiarata e testata dalla casa dell'1%. Questo sistema è posizionato nel movimento centrale della bicicletta, va quindi a misurare la potenza generata dal ciclista stesso. L'*SRM* utilizza 8 estensimetri.

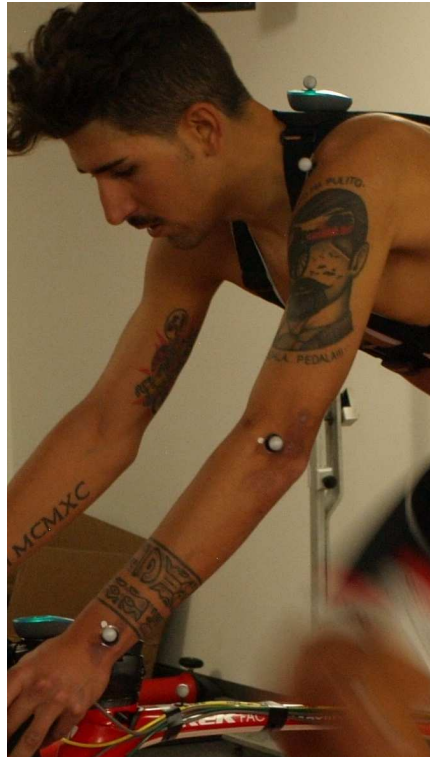
Quando la forza viene applicata sulle pedivelle, abbiamo una controreazione imposta dalla trasmissione, che si traduce in una tensione, andando così a deformare gli estensimetri. Abbiamo di conseguenza una variazione della resistenza elettrica. In funzione del segnale elettrico sarà nota la coppia applicata. Questa viene poi convertita in frequenza, modulata e trasmessa al PowerControl che provvederà poi a calcolare la potenza dell'atleta. Ovviamente questi dispositivi sono in grado di misurare cadenza della pedalata, velocità di avanzamento, distanza percorsa, tempo di allenamento oltre ad altri dati a noi non utili.



**Figura 1.14:** a) esempio di curva di taratura dell'SRM b) principio di funzionamento SRM, immagine modificata tratta da [www.srm.de](http://www.srm.de)

## 1.8 Strumentazione del Laboratorio

Durante la prova in laboratorio è stata acquisita la cinematica 3D dell'atleta con l'ausilio del sistema BTS SMARTanalyzer. Il sistema è in grado di effettuare un'analisi del movimento e ricostruire gli spostamenti eseguiti da ogni parte del corpo marcata mediante degli appositi indicatori. Questo è possibile mediante un sistema di videocamere che riprende l'azione dell'atleta; successivamente si possono elaborare le immagini e ricavare i valori desiderati con apposito software.



**Figura 1.15:** Disposizione riferimenti sull'atleta

## 1.9 Sistema di riferimento e angoli noti

Vengono ora riportati i riferimenti per una più chiara comprensione dei dati forniti in seguito. Il sistema di riferimento adottato, visibile in fig.1.16, vede l'asse x come asse anteroposteriore del corpo, l'asse y come asse trasversale e l'asse z come asse verticale. I sensori Gyko presentano un sistema di riferimento ruotato rispetto a quello scelto (fig.1.17); mediante semplice operazione analitica si è riportato il sistema al sistema di riferimento del ciclista, per congruenza nei calcoli. Sono riportati anche gli angoli di beccheggio (fig.1.18) e di rollio del ciclista (fig.1.19). Per quanto riguarda il ciclo vengono riportati gli angoli di rollio di manubrio e telaio (fig.1.20 e fig.1.21). Nella tabella 1.4 vengono riassunti gli angoli studiati.

Angolo beccheggio lombare	$\alpha$
Angolo beccheggio cervicale	$\beta$
Angolo rollio lombare	$\gamma$
Angolo rollio cervicale	$\delta$
Angolo rollio manubrio	$\epsilon$
Angolo rollio telaio	$\lambda$

**Tabella 1.4:** Angoli studiati

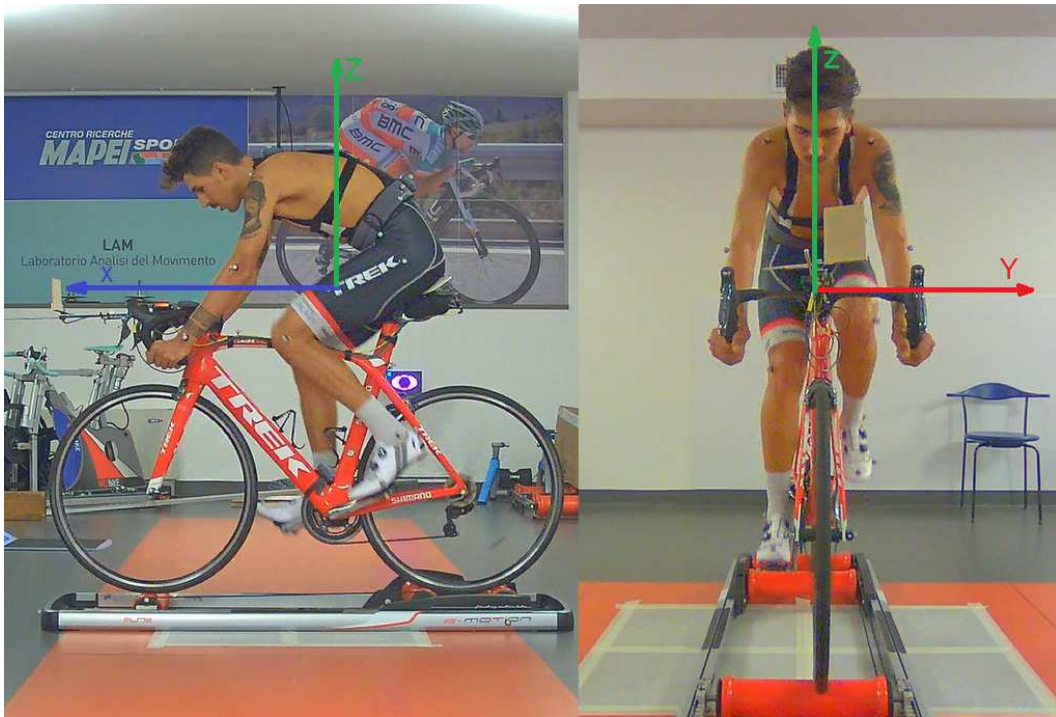


Figura 1.16: Sistema di riferimento

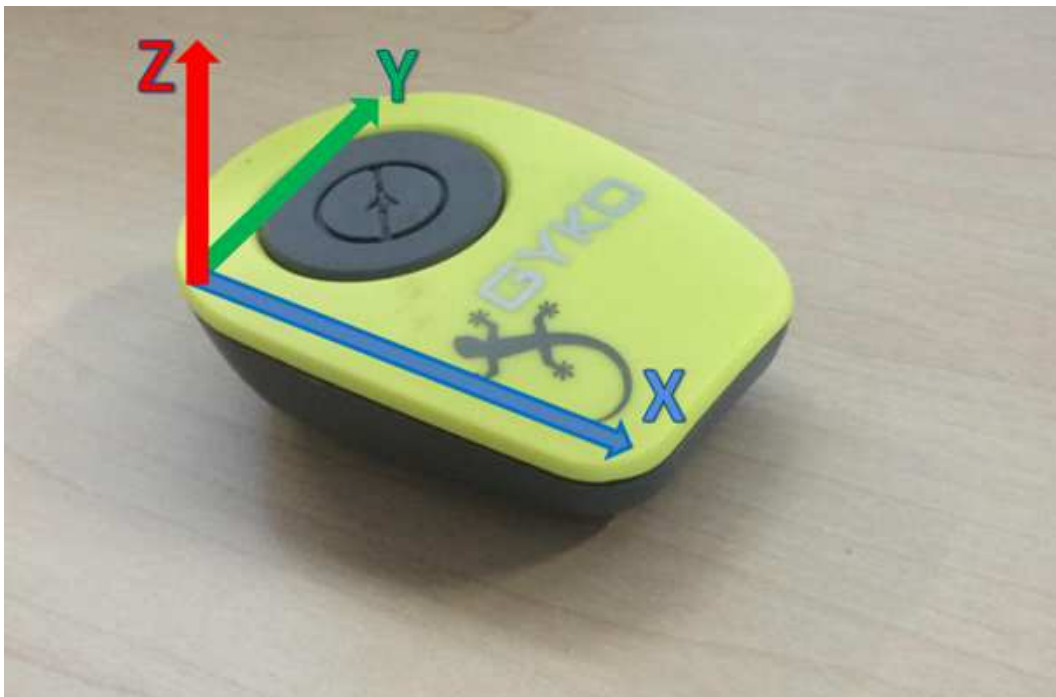


Figura 1.17: Sistema di riferimento sensori Gyko Microgare



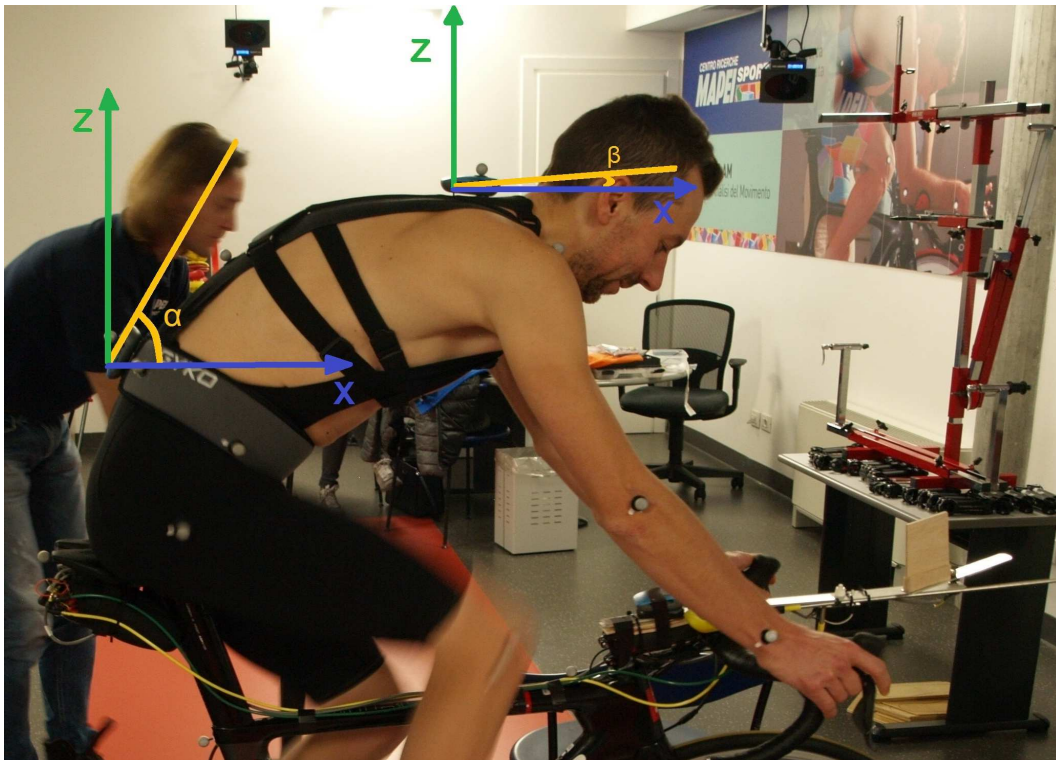


Figura 1.18: Angoli di beccheggio ciclista

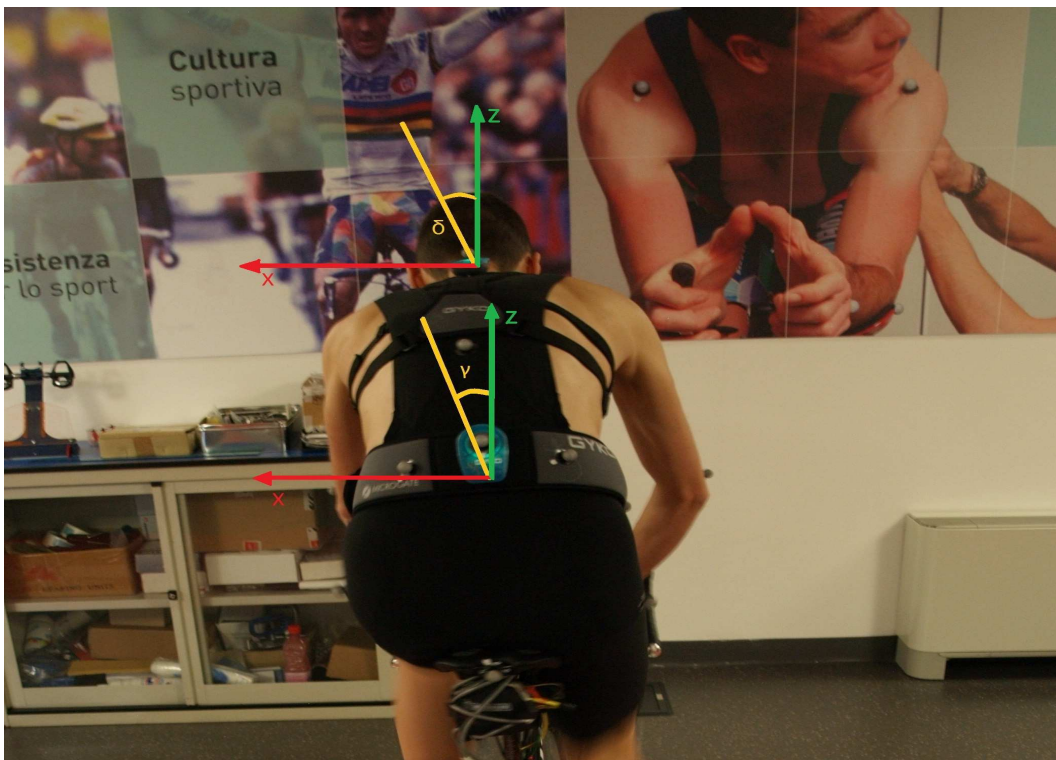


Figura 1.19: Angoli di rollio ciclista

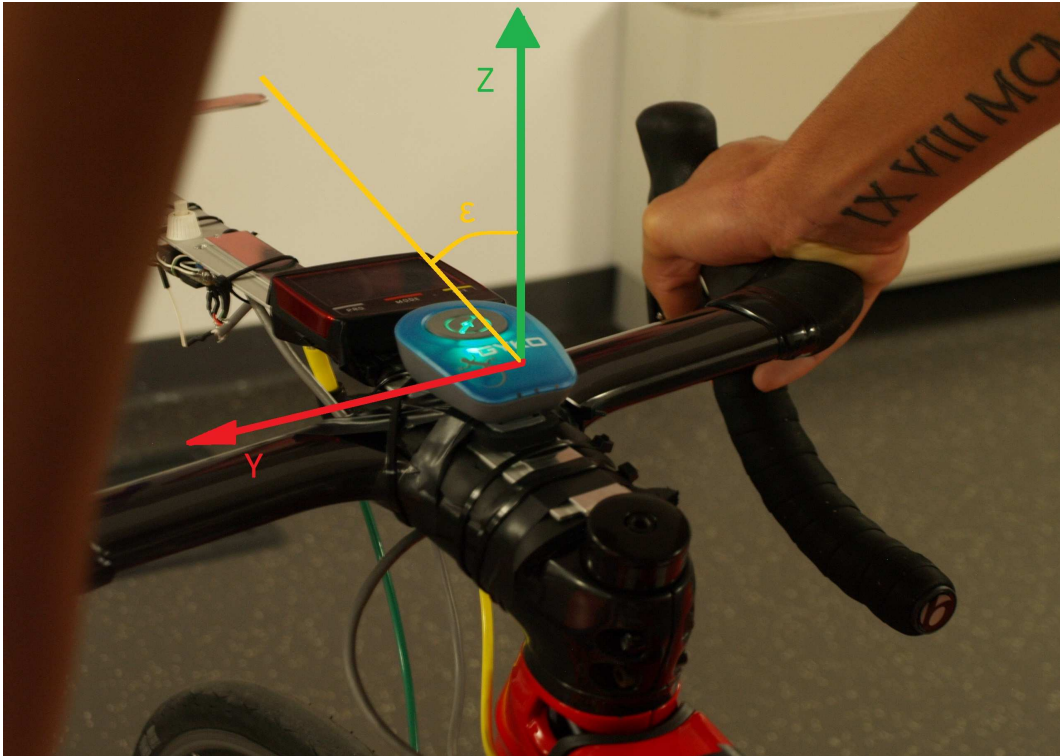


Figura 1.20: Angolo rollio manubrio

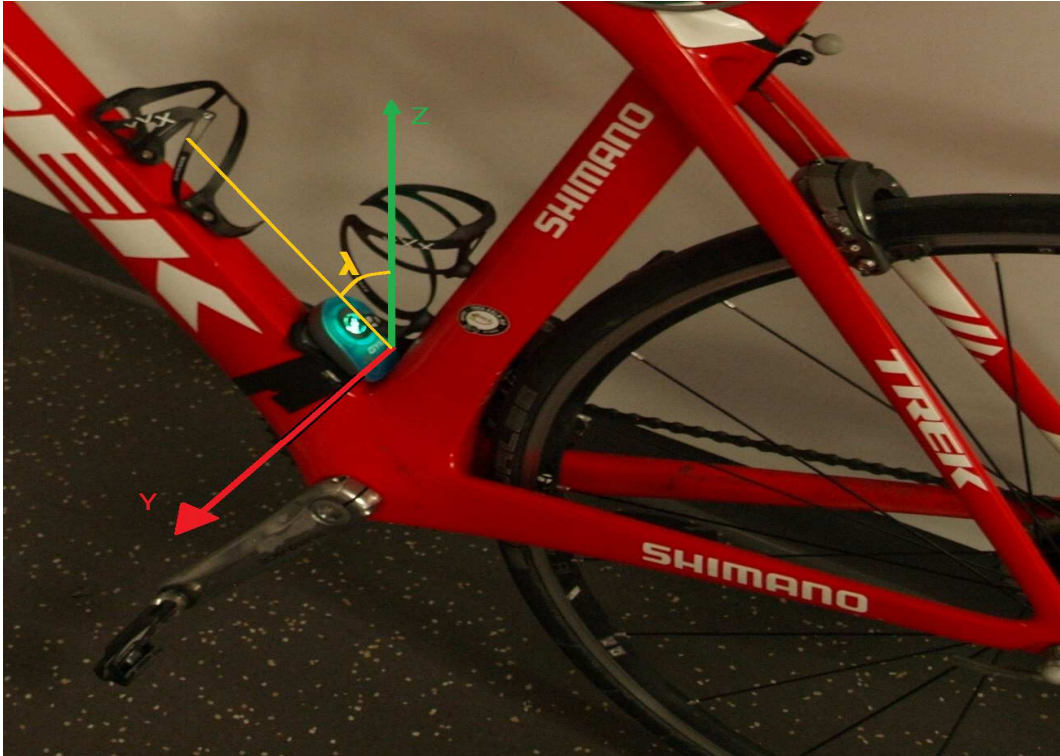


Figura 1.21: Angolo rollio telaio

## 1.10 Grandezze utili

Sono stati descritti gli strumenti di misura utilizzati, ora verrà riportato brevemente l'utilizzo dei dati acquisiti al fine di determinare le grandezze utili.

- *Differenza di pressione ( $\Delta P$ )*: campionata mediante il trasduttore di pressione, viene utilizzata per conoscere il modulo del vento relativo. In particolar modo si avrà:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.1)$$

- *Pressione ( $p$ ) e temperatura ambiente ( $T$ )*: Insieme all'umidità ( $\vartheta$ ) sono state utili per ricavare la densità dell'aria:

$$\rho = \frac{1}{T} \left( \frac{p - \vartheta \cdot 610.78 \cdot 10^{\frac{7.5T-2048.625}{T-35.85}}}{287.58} + \frac{\vartheta \cdot 610.78 \cdot 10^{\frac{7.5T-2048.625}{T-35.85}}}{461.495} \right) \quad (1.2)$$

- Note *potenza, velocità di avanzamento e pressione dinamica* si può ricavare l'area resistente:

$$SC_x = \frac{\text{Potenza}}{V_{\text{avanzamento}} * \Delta P} \quad (1.3)$$

Alla potenza misurata è stata tolta la parte legata al rotolamento, utilizzando i coefficienti trovati da Kyle; nello specifico:

$$P_{\text{effettiva}} = P_{\text{misurata}} - W_{\text{atleta}}[Crr_1 + Crr_2V] \quad (1.4)$$

In ambito sportivo si calcola tendenzialmente l'area resistente ( $SC_x$ ), in quanto non è facile definire un'area frontale di riferimento.

- *Accelerazioni*: note le accelerazioni possiamo risalire agli angoli di beccheggio e rollio.

$$\alpha = \frac{A_x}{A_z} \quad (1.5)$$

$$\gamma = \frac{A_y}{A_z} \quad (1.6)$$

# Capitolo 2

## Prova sperimentale

La prova sperimentale eseguita è stata svolta in due istanti separati: una prima parte è stata effettuata in laboratorio, dove l'atleta ha potuto operare su rulli liberi (fig. 2.1), la seconda parte è stata realizzata su strada. La prova è stata così strutturata al fine di conoscere in modo dettagliato la cinematica dell'atleta mediante la prova in laboratorio, conoscere i parametri aerodinamici direttamente dalla prova su strada ed effettuare un confronto, fra le due differenti situazioni, dei valori acquisiti con le piattaforme inerziali. La prova è stata ripetuta con due atleti differenti; entrambi sono professionisti ma differenti fra loro: il primo è più esile con un peso di 60 kg e un'altezza di 160 cm mentre il secondo pesa 76 kg ed è alto 187 cm. Come anticipato, grazie al nostro sistema di acquisizione siamo in grado di leggere le seguenti grandezze: potenza sviluppata dall'atleta, cadenza di pedalata, velocità di avanzamento, pressione dinamica, direzione del vento, pressione e temperatura ambiente, umidità dell'aria, accelerazione e velocità angolari lungo i tre assi. Ovviamente tutti i segnali acquisiti sono stati filtrati mediante filtro passabasso durante l'elaborazione, in modo da eliminare un possibile aliasing e rumore nel segnale.

### 2.1 Prova in laboratorio

La prova in laboratorio viene eseguita su un rullo libero (fig. 2.1); questo è costituito da tre cilindri, due nella parte posteriore e uno in quella anteriore, collegati mediante apposita cinghia. Essendo i cilindri collegati fra di loro avviene la rotazione delle ruote alla medesima velocità. Questa configurazione vede il ciclo libero di muoversi lungo i tre assi: in direzione  $x$  non è vincolato ma, trovandosi in condizioni di equilibrio stabile, se tende a spostarsi in avanti o indietro, questo ritornerà immediatamente nella condizione di partenza. Non essendo la bicicletta fissata come in galleria, non vi sono forze vincolanti nemmeno lungo l'asse verticale  $z$ . È scontato immaginare che gli spostamenti in questa direzione siano limitati. In direzione  $y$  è libero di spostarsi liberamente lungo

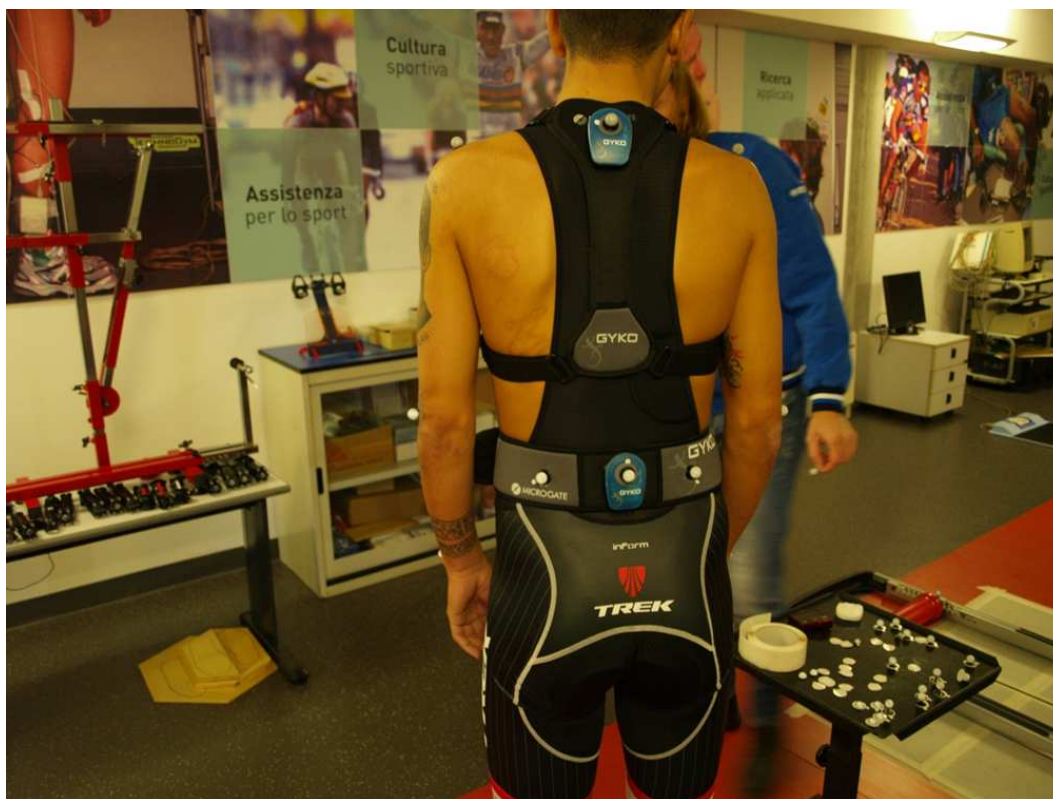


tutta la larghezza del rullo. Questa prova è interessante in quanto, pur differendo per i



**Figura 2.1:** Rulli liberi usati per la prova in laboratorio

vincoli sulla ruota posteriore, richiama la configurazione utilizzata in galleria del vento al Politecnico di Milano: l'atleta deve correggere la traiettoria per rimanere in posizione con la ruota anteriore. Al fine di acquisire i movimenti dell'atleta e del ciclo sono stati utilizzati i quattro sensori Gyko: due sensori sono stati posizionati sul ciclista e due sulla bicicletta. In particolare quelli sul ciclista sono stati collocati sulla zona lombare e sulla zona cervicale (fig. 2.2). È stato scelto di non posizionarne altri sul capo dell'atleta in quanto il confronto con la prova su strada sarebbe stato poco significativo (l'atleta deve continuamente correggere la posizione del capo per controllare il traffico e la condizione del manto stradale, cosa che in laboratorio non deve ovviamente fare). I due sensori sul ciclo sono stati collocati sul telaio (nei pressi del movimento centrale) e sul manubrio (fig. 2.3).



**Figura 2.2:** Posizionamento sensori sull'atleta



**Figura 2.3:** Sensori Gyko posti sulla bicicletta

In questo modo siamo stati in grado di confrontare tutti i movimenti fra loro e cercare di capire se vi è un andamento caratteristico. La prova sui rulli consiste nell'acquisire per circa 30-40 secondi i segnali nelle tre posizioni, già presentate a pag. 14:

- posizione Stem (fig. 2)
- posizione Brake hoods (fig. 3)
- posizione Drops (fig.4)

Dalle prova in laboratorio i valori che a noi interessano maggiormente sono quelli legati alla cinematica dell'atleta. Siamo riusciti ad acquisire un'ingente mole di dati, sulla posizione di più parti del corpo. Riportiamo qui l'altezza media dal suolo ( $h$ ) della zona cervicale e lombare (tab. 2.1) e l'angolo medio del tronco (tab. 2.2).

Posizione		h cerv. A	h lomb. A	h cerv. B	h lomb. B
Posizione stem	[m]	1.556	1.343	1.631	1.439
posizione brake hoods	[m]	1.538	1.349	1.604	1.444
posizione drops	[m]	1.485	1.350	1.539	1.447

**Tabella 2.1:** Dati laboratorio, altezza dal suolo

Posizione		Angolo tronco Atleta A	Angolo tronco Atleta B
posizione stem	[°]	36.78	38.76
posizione brake hoods	[°]	34.06	33.85
posizione drops	[°]	23.84	23.86

**Tabella 2.2:** Dati laboratorio, angoli tronco

L'angolo di tronco è l'angolo compreso tra la retta orizzontale e la retta passante per i marcatori posizionati sulla zona cervicale e su quella lombare (fig 2.4).

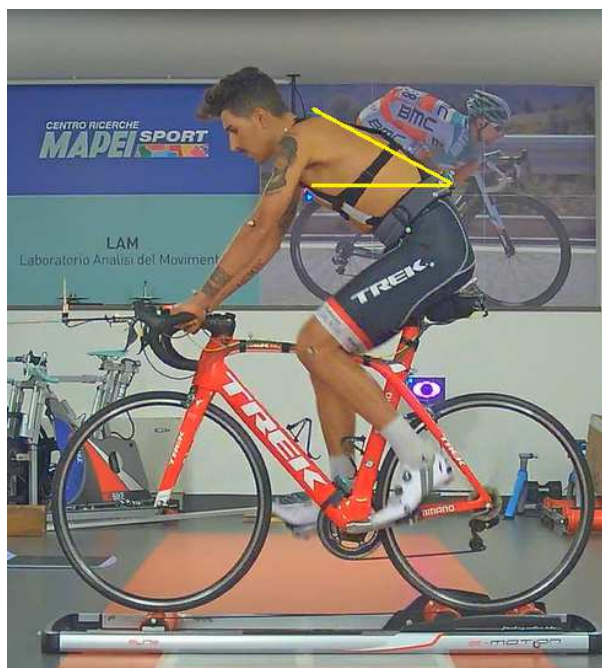


Figura 2.4: Angolo tronco

## 2.2 Prova su strada

### 2.2.1 Percorso

Il percorso scelto è pianeggiante, privo di curve o elementi artificiali; si vuole ricreare una condizione nella quale l'atleta è lanciato su un rettilineo e in cui l'effetto della pendenza non prevarichi quello aerodinamico. Si è scelto un tratto di strada vicino al *Centro ricerche Mapei Sport*, ad Olgiate Olona (Varese). Non potendosi effettuare la prova su un percorso chiuso al traffico, questo tracciato risulta una valida alternativa, in quanto il numero di autoveicoli è di numero irrisorio.

Caratteristiche del tracciato:

- Lunghezza del tracciato: 500 m circa
- Altimetria tracciato: (fig. 2.5)

Bisogna specificare che l'altimetria non è stata misurata mediante uno strumento di precisione, in quanto il tracciato risulta sostanzialmente pianeggiante e in quanto sono state eseguite tutte le prove in entrambi i sensi di marcia, in modo da mediare i valori e rimuovere l'effetto del dislivello. L'altimetria è stata calcolata dalle coordinate GPS, campionate dal computerino dell'atleta A.

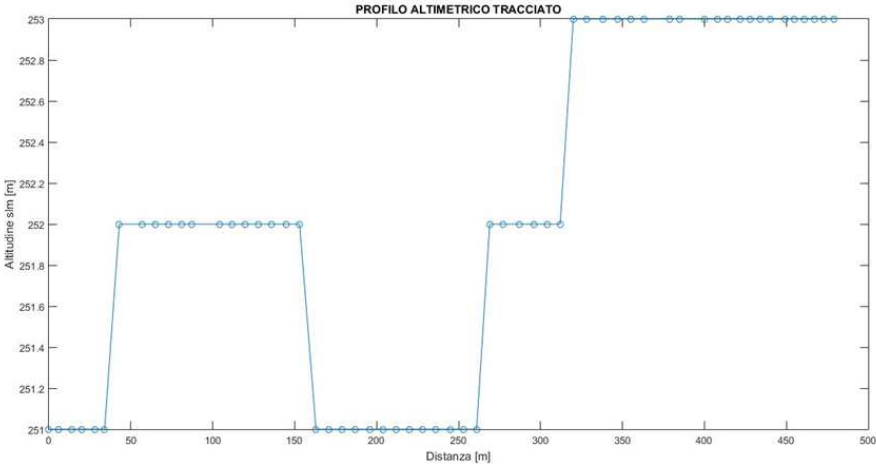


Figura 2.5: Altimetria tracciato ricavata con coordinate GPS



Figura 2.6: Vista satellitare del tracciato



### 2.2.2 Prove eseguite

Sul percorso stradale abbiamo provato le tre posizioni a due velocità differenti, ripetendole in andata e in ritorno. Le due velocità richieste sono:  $V_1$  vicino ai 7 m/s e  $V_2$  vicino agli 11 m/s. Per ogni atleta abbiamo 12 prove. La cadenza di pedalate richiesta è tra le 90 e le 100 pedalate/minuto. Nota la cadenza di pedalata  $P$ , la velocità di avanzamento  $V$  e lo sviluppo della ruota  $C$  siamo risaliti al rapporto  $R$  usato durante ogni singola prova.

$$R = \frac{1000V}{60PC} \quad (2.1)$$

con  $C$  pari a 2.10 m. Essendo  $V$  espressa in km/h, 1000 e 60 vengono usati come fattori per avere uniformità nelle unità di misura. Una volta noto il rapporto e sapendo che la corona anteriore ha un numero di denti pari a 53 si è potuto risalire facilmente al numero di denti del pignone.

$$N_{dentipignone} = \frac{53}{R} \quad (2.2)$$

Verranno esposti alcuni risultati significativi. In particolare si vogliono mettere in evidenza le differenze fra le varie condizioni. Vengono quindi messi a confronto gli  $SC_x$  al variare della posizione e della velocità, oltre alla variazione dell'assetto del ciclista. Vengono invece riportati nell'appendice A (pag. ??) tutte le storie temporali degli  $SC_x$ , insieme a tutti i parametri che hanno contraddistinto le varie prove (potenza media, cadenza di pedalata media, rapporto usato, velocità di avanzamento, velocità relativa, angolo di freccia massimo,  $SC_x$  medio, angoli caratteristici).



**Figura 2.7:** Prova su strada atleta B



Figura 2.8: Sostegno strumentazione



Figura 2.9: Strumentazione sull'atleta

Atleta A-risultati sperimentali

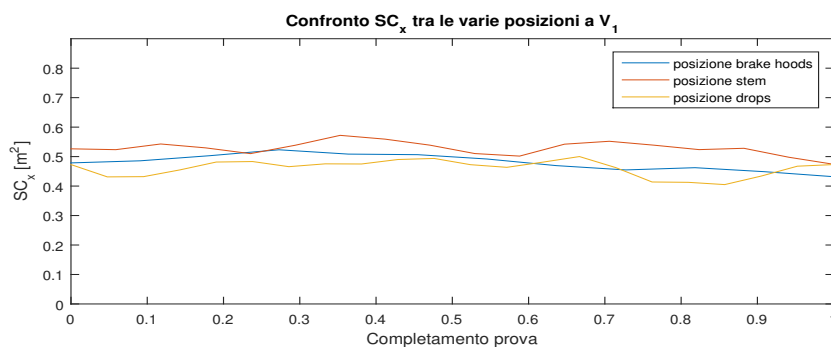


Figura 2.10: Confronto  $SC_x$  nelle 3 posizioni

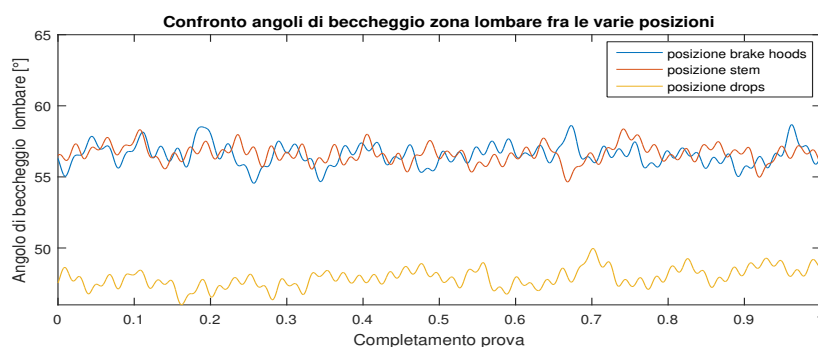


Figura 2.11: Confronto angolo beccheggio lombare nelle 3 posizioni

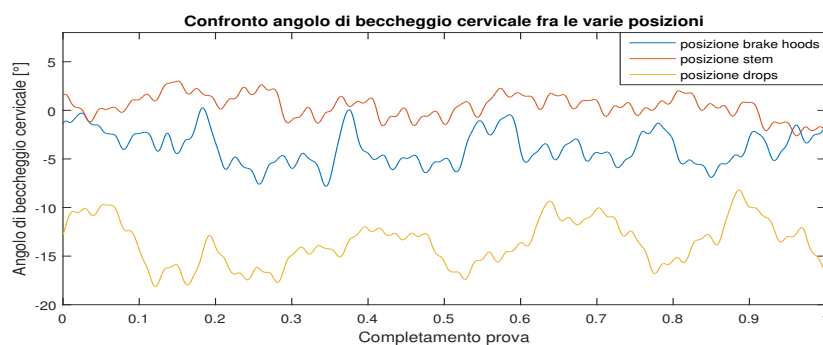
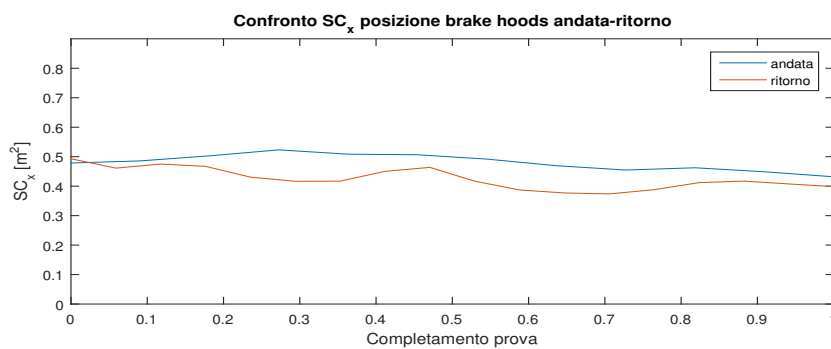
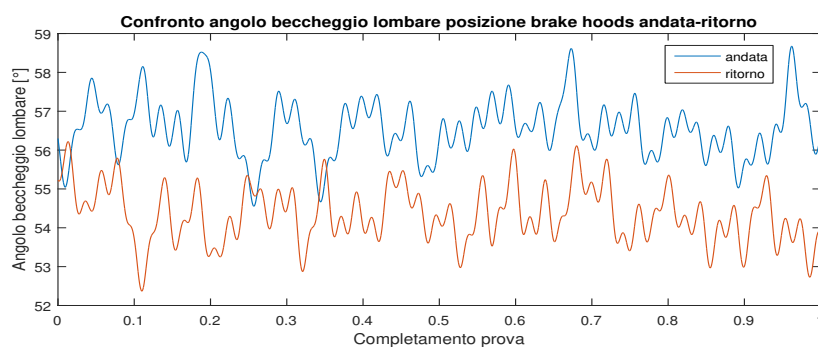


Figura 2.12: Confronto angolo beccheggio cervicale nelle 3 posizioni

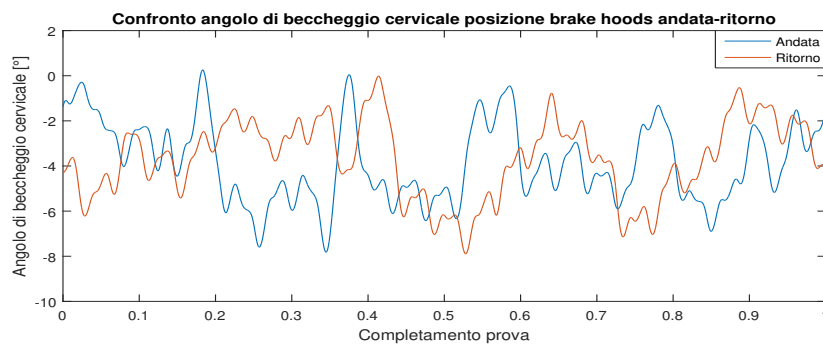




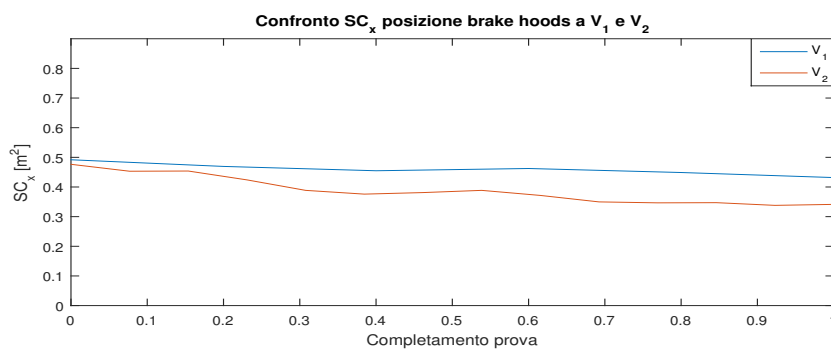
**Figura 2.13:** Confronto  $SC_x$  posizione brake hoods, andata-ritorno



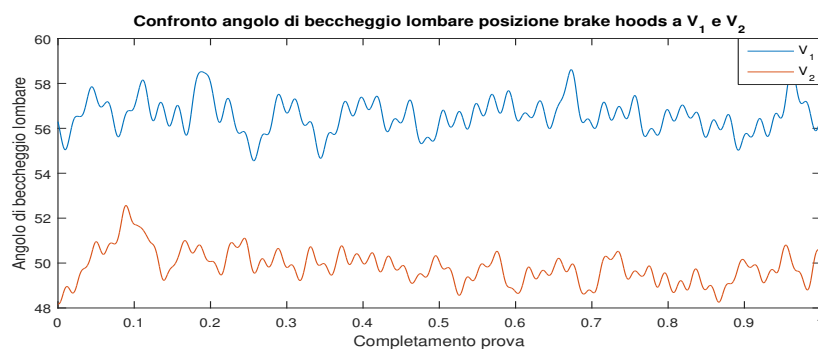
**Figura 2.14:** Confronto angolo beccheggio lombare posizione brake hoods, andata-ritorno



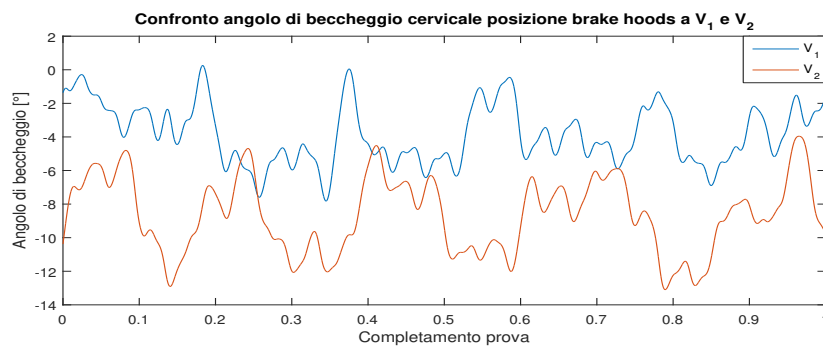
**Figura 2.15:** Confronto angolo beccheggio cervicale posizione brake hoods, andata-ritorno



**Figura 2.16:** Confronto  $SC_x$  a  $V_1$  e  $V_2$



**Figura 2.17:** Confronto angolo beccheggio lombare a  $V_1$  e  $V_2$



**Figura 2.18:** Confronto angolo beccheggio cervicale a  $V_1$  e  $V_2$

È stata riportata l'evoluzione temporale del  $SC_x$  in modo comparativo fra le varie condizioni studiate. Si nota un andamento simile a quello trovato in galleria del vento. In particolare nel grafico 2.26 possiamo vedere la variazione del  $SC_x$  al variare della posizione. Abbiamo rappresentato anche lo sviluppo dell'angolo di beccheggio sia della zona lombare (grafico 2.11) sia di quella cervicale (2.12). Notiamo come il valore del  $SC_x$  sia costantemente inferiore quando gli angoli di beccheggio diminuiscono. È stato poi rappresentato l'andamento del  $SC_x$  per le prove in entrambi i sensi di marcia, per le quali cambia il modulo del vento relativo (grafico 2.14). Situazione analoga a quella in cui l'atleta percorre lo stesso tratto di percorso a due velocità differenti (grafico 2.16). Si nota quindi come all'aumentare del modulo del vento relativo ci sia una variazione sistematica del  $SC_x$  in seguito alla variazione degli angoli di beccheggio dell'atleta. Quest'ultimo tende infatti ad assumere una posizione più incurvata. Riportiamo ora i grafici riassuntivi del  $SC_x$  delle singole prove. Nel grafico 2.20 troviamo i valori del  $SC_x$  per ogni singolo giro a velocità  $V_1$ . Ne è stata fatta poi la media tra il valore trovato di andata e quello di ritorno e riportato nel grafico 2.21. Lavoro analogo è stato effettuato per la velocità  $V_2$  (grafici 2.23 - 2.24 - 2.25). I valori medi ottenuti sono stati infine riportati in tabella 2.3.



**Figura 2.19:** Atleta A in prova, posizione drops

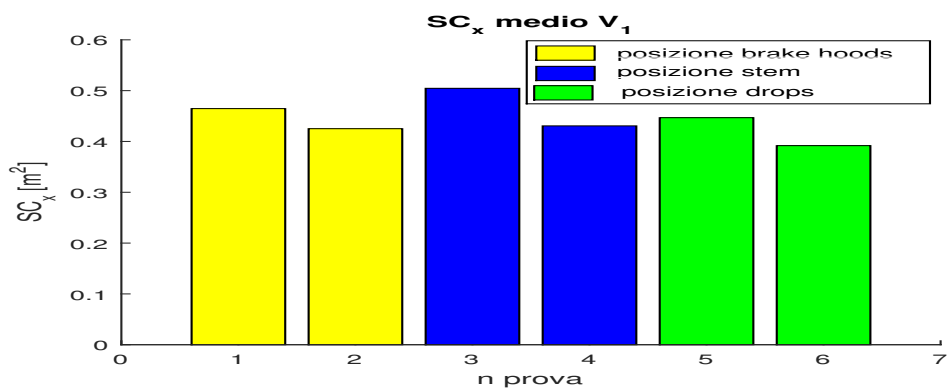


Figura 2.20: SC<sub>x</sub> atleta A velocità V<sub>1</sub>

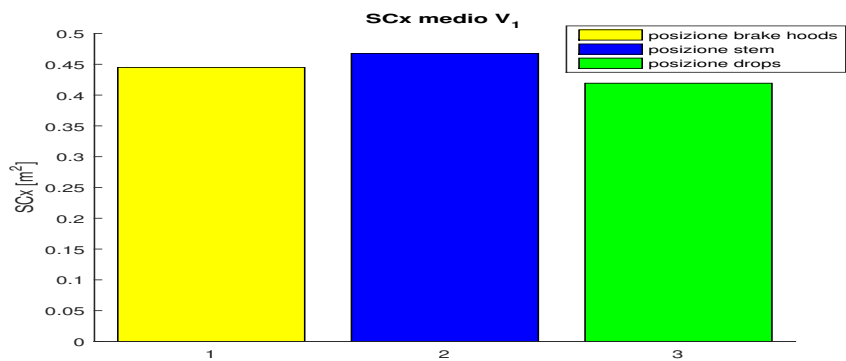


Figura 2.21: SC<sub>x</sub> medio andata-ritorno atleta A velocità V<sub>1</sub>

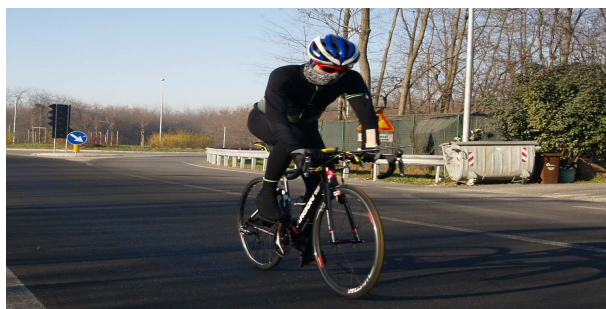


Figura 2.22: Atleta A in prova, posizione stem

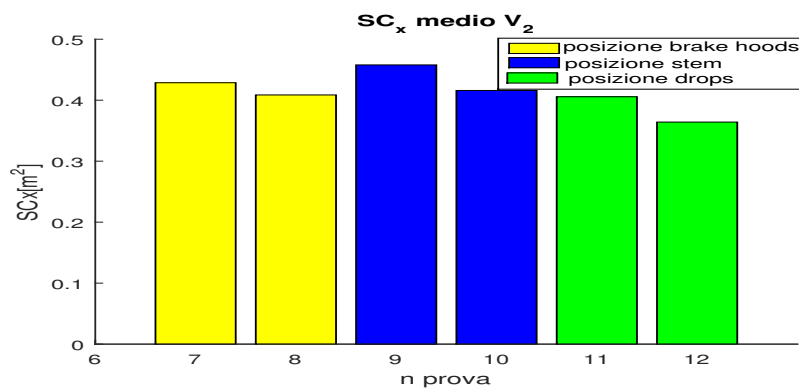


Figura 2.23: SC<sub>x</sub> atleta A velocità V<sub>2</sub>

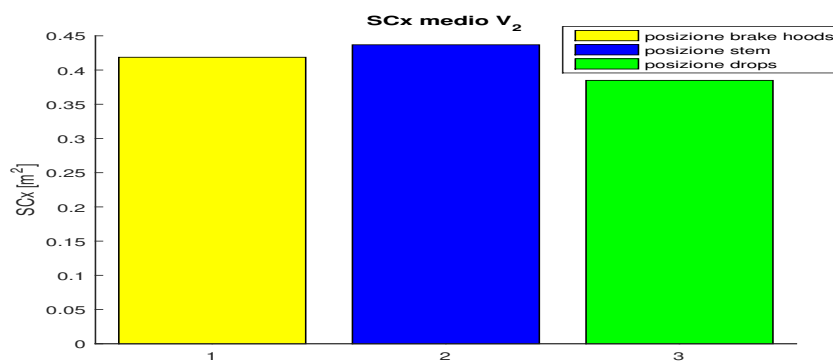


Figura 2.24: SC<sub>x</sub> medio andata-ritorno atleta A velocità V<sub>2</sub>

Posizione	SC <sub>x</sub> V <sub>1</sub>	SC <sub>x</sub> V <sub>2</sub>
Posizione stem	0.468	0.437
Posizione brake hoods	0.445	0.419
Posizione drops	0.419	0.385

Tabella 2.3: SC<sub>x</sub> medio, atleta A

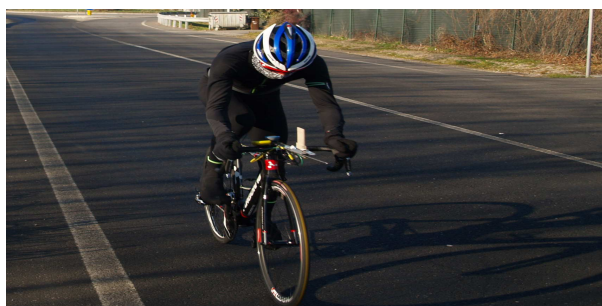


Figura 2.25: Atleta A in prova, posizione brake hoods

Atleta B-risultati sperimentali

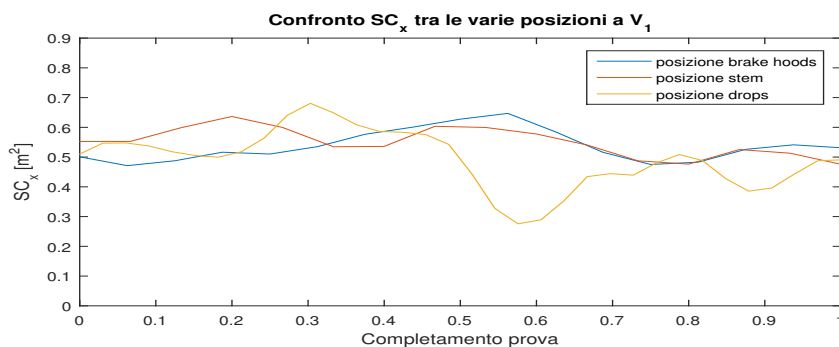


Figura 2.26: Confronto  $SC_x$  nelle 3 posizioni

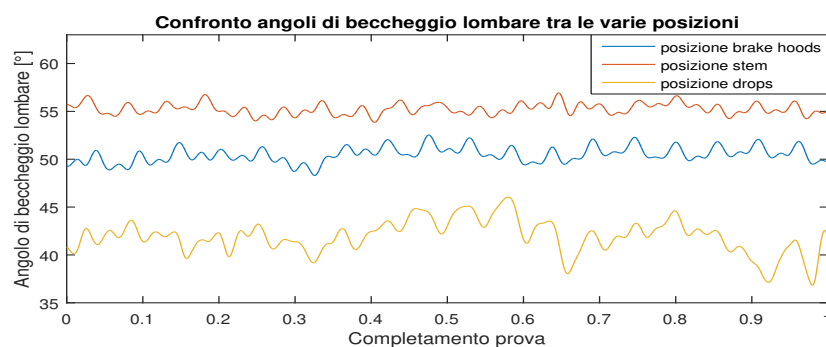


Figura 2.27: Confronto angolo beccheggio lombare nelle 3 posizioni

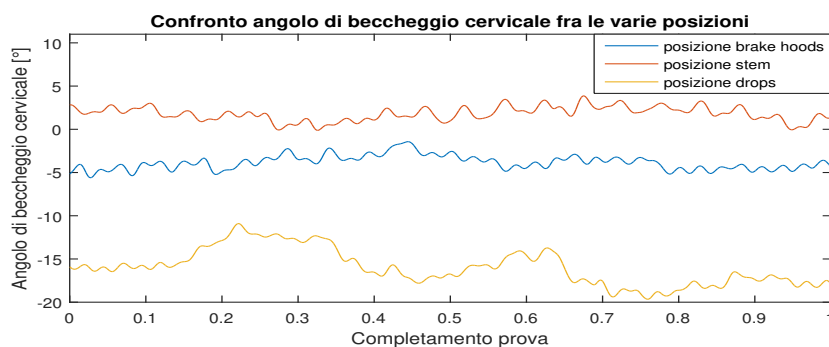
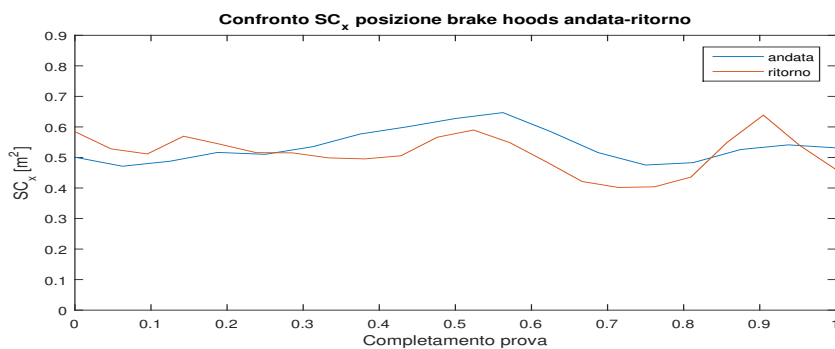
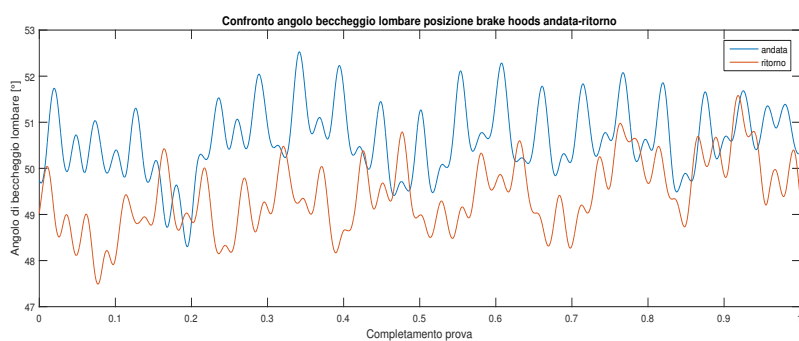


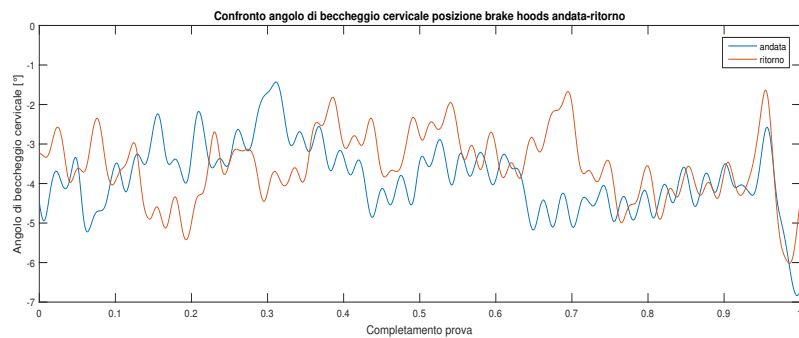
Figura 2.28: Confronto angolo beccheggio cervicale nelle 3 posizioni



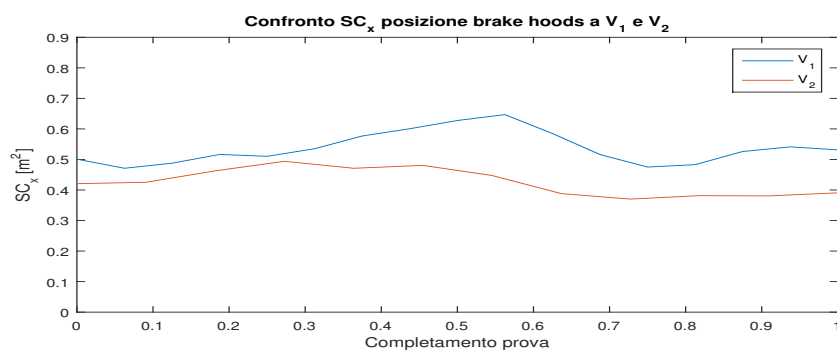
**Figura 2.29:** Confronto  $SC_x$  posizione brake hoods, andata-ritorno



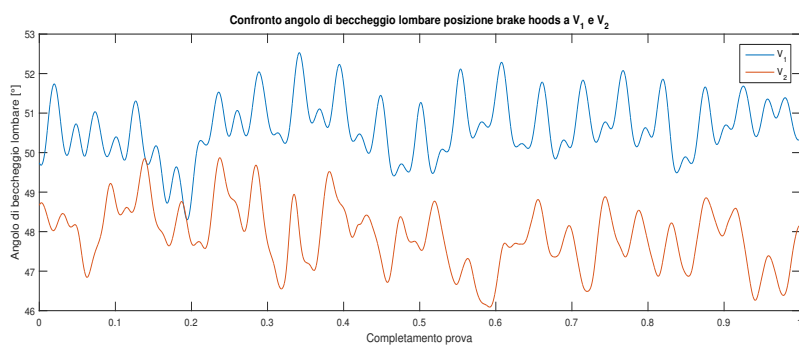
**Figura 2.30:** Confronto angolo beccheggio lombare posizione brake hoods, andata-ritorno



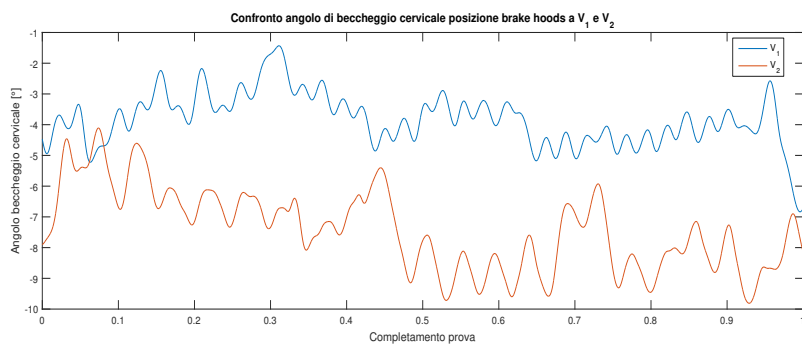
**Figura 2.31:** Confronto angolo beccheggio cervicale posizione brake hoods, andata-ritorno



**Figura 2.32:** Confronto  $SC_x$  a  $V_1$  e  $V_2$



**Figura 2.33:** Confronto angolo beccheggio lombare a  $V_1$  e  $V_2$



**Figura 2.34:** Confronto angolo beccheggio cervicale a  $V_1$  e  $V_2$



Abbiamo riportato gli stessi grafici rappresentanti la storia temporale del  $SC_x$  come per l'atleta A. Pur essendo i valori assoluti differenti da quelli precedenti troviamo una certa ripetitività nei risultati. Infatti l'atleta tende sempre a cambiare assetto al modificarsi delle condizioni esterne. Sono invece riportati di seguito i grafici con i valori medi delle singole prove del  $SC_x$ . Il tutto ripetuto per le due velocità di prova. Per questo atleta valgono le stesse considerazioni effettuate per l'atleta precedente in merito all'andamento dell' $SC_x$ .



**Figura 2.35:** Atleta B in prova, posizione stem andata



**Figura 2.36:** Atleta B in prova, posizione stem ritorno

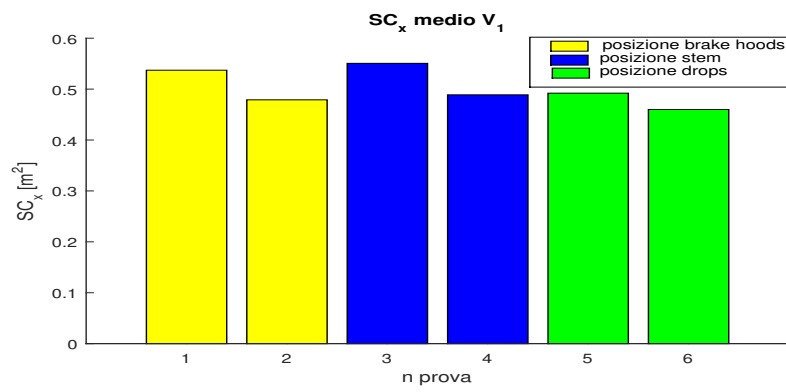


Figura 2.37: SC<sub>x</sub> atleta B

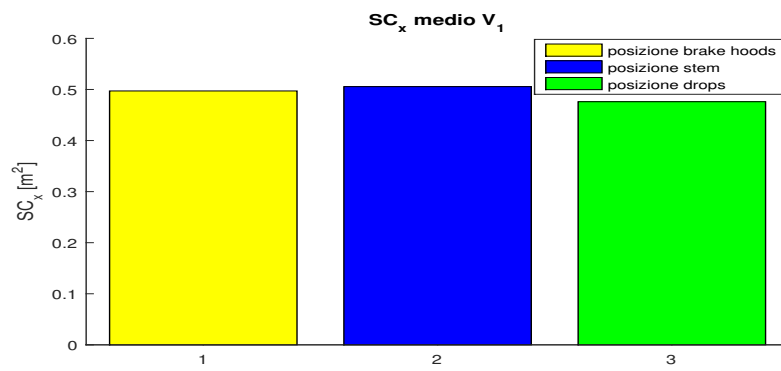


Figura 2.38: SC<sub>x</sub> medio andata-ritorno atleta B

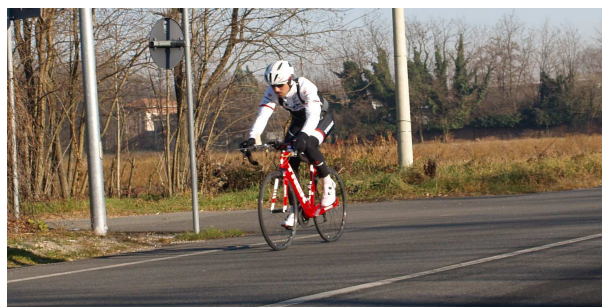


Figura 2.39: Atelta B in prova, posizione drops

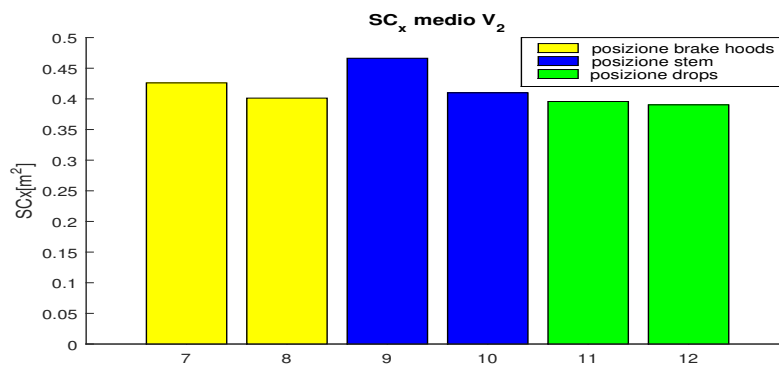


Figura 2.40: SC<sub>x</sub> atleta B

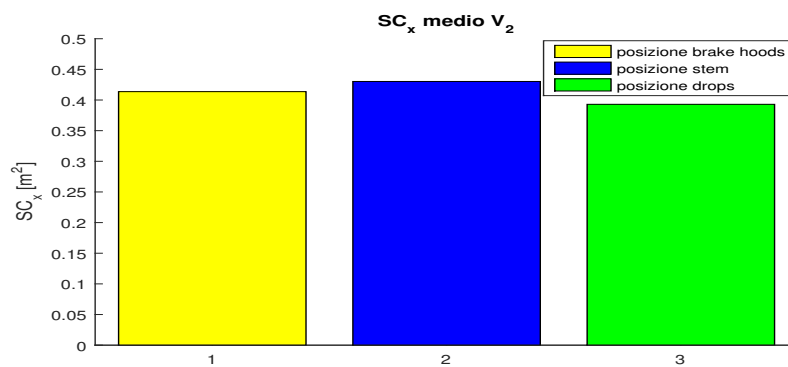


Figura 2.41: SC<sub>x</sub> medio andata-ritorno atleta B

Posizione	SC <sub>x</sub> V <sub>1</sub>	SC <sub>x</sub> V <sub>2</sub>
Posizione stem	0.506	0.430
Posizione brake hoods	0.497	0.414
Posizione drops	0.476	0.393

Tabella 2.4: SC<sub>x</sub> medio, atleta B

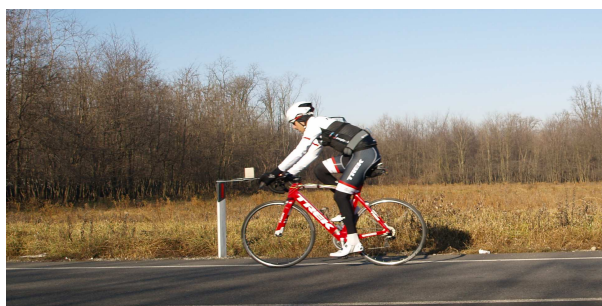


Figura 2.42: Atleta B in prova, posizione brake hoods

## Capitolo 3

# Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto è riuscito a fornire ottime indicazioni, pur essendo uno dei pochi lavori legati all'aerodinamica del ciclismo svolti su strada. Siamo stati in grado di ottenere informazioni su quale sia la posizione migliore che il ciclista deve assumere, trovando andamenti proporzionali simili a quelli trovati in galleria del vento:

Posizione	At. A $V_1$	At. A $V_2$	At. B $V_1$	At. B $V_2$	Gibertini,Grassi
posizione stem	11.5%	13.5%	6.20%	9.48%	10%
posizione brake hoods	6.1%	8.7%	4.4%	5.3%	5.2%

**Tabella 3.1:** Risultati  $SC_x$ , confronto con posizione drops

Abbiamo inoltre studiato la posizione dell'atleta, ed è risultato che esso la modifica in modo sistematico al variare delle condizioni del vento. Aerodinamicamente parlando, risulta che la *posizione stem* è la peggiore, la *posizione brake hoods* ha un rendimento intermedio; la migliore si conferma la *posizione drops*. Quest'ultima permette un notevole risparmio in termini di tempo rispetto alle precedenti. Facendo una veloce stima su quanto tempo si possa risparmiare, a parità di potenza erogata, consideriamo l'ultimo campionato del mondo a cronometro svoltosi a Richmond: il vincitore, Kiryenko, ha percorso i 53 km in 1h 02' 29"; supponiamo che li abbia percorsi sfruttando la posizione drops. Se l'atleta avesse percorso il tracciato utilizzando la posizione brake hoods avrebbe accumulato + 2' 4" di ritardo, mentre se avesse utilizzato la posizione stem sarebbe arrivato al traguardo con +3' di ritardo. Per quanto riguarda i valori del  $SC_x$ , questi sono superiori a quelli della galleria, ma ci sono più fattori che possono spiegarne il perché: innanzitutto in galleria del vento le condizioni del flusso d'aria sono migliori, in quanto meglio identificabili e ripetibili. In strada la velocità relativa non è sempre costante, oltre al fatto che, per quanto minimo, l'angolo di freccia varia. Un secondo fattore è legato all'abbigliamento degli atleti: la prova è stata svolta a fine Dicembre, gli atleti hanno

dovuto indossare un abbigliamento pesante, che ha provocato un peggioramento del  $SC_x$  (in particolare non essendo il giubbino aderente, tende a gonfiarsi durante la prova comportando un aumento sia dell'area frontale sia del  $C_x$ ). Dalla potenza letta è stata tolta una parte legata alla resistenza di rotolamento mediante una correzione analitica. Questa correzione potrebbe non coprire pienamente l'effetto del rotolamento. Inoltre, la strada è rimasta aperta al traffico e il transito delle autovetture, per quanto di numero irrisorio, può aver influito facendo cambiare assetto all'atleta. A questo si aggiunge l'effetto della strumentazione montata sulla bicicletta. Come anticipato abbiamo studiato l'aerodinamica del ciclista andando a considerarne anche la dinamica. Particolarmente importanti per noi sono gli angoli di beccheggio del busto: si è visto che una variazione dell'angolo lombare comporta per il primo atleta una variazione di  $0.08\text{m}^2/^\circ$ , per il secondo di circa  $0.09\text{m}^2/^\circ$  nel  $SC_x$ . L'andamento dell'angolo di beccheggio della cervicale è legato a quello dell'angolo lombare. Sono stati in seguito stimati gli angoli di rollio, sia del ciclista sia della bicicletta. Si nota che mediamente il ciclista assume un angolo opposto a quello della bicicletta. In seguito è stato studiato l'andamento dell'ampiezza delle oscillazioni che crescono di pari passo con la velocità, sia per gli angoli di beccheggio sia per quelli di rollio. Questo è valido sia per il ciclo, sia per l'atleta. Non vi sono però indicazioni che ci facciano presupporre che un aumento delle oscillazioni di rollio contribuisca alla variazione della resistenza aerodinamica. Sottolineiamo che non vi è similitudine aerodinamica tra le prove a bassa e alta velocità in quanto sono stati usati rapporti differenti. Mediante gli accelerometri si è risaliti agli spostamenti laterali: all'aumentare della velocità si ha un aumento di quest'ultimi, come per le oscillazioni. Possiamo concludere che dal punto di vista aerodinamico è la variazione dell'area frontale, legata all'assetto del ciclista, ad influire più del  $C_x$  stesso, come riportato in lavori precedenti. Il confronto fra la prova su strada e in laboratorio ci indica oscillazioni superiori sui rulli, dovute alle correzioni che l'atleta effettua per rimanere nella zona corretta di esercizio. Sicuramente per riuscire a validare questi risultati è necessario effettuare prove in galleria del vento, nelle medesime condizioni. Se venissero confermati i risultati trovati, si potrebbe affermare con certezza che lo studio aerodinamico di un ciclista può essere svolto direttamente in strada, permettendo all'atleta di assumere la sua posizione naturale. Questa tipologia di studio garantisce un forte risparmio economico a fronte di una buona qualità dei risultati e ci permette di capire se effettivamente la posizione più efficiente possa essere mantenuta dall'atleta durante l'intera prova. Andando in tale direzione sarebbe necessario ottimizzare le grandezze acquisite con strumenti di misura più precisi. D'altro canto i nostri risultati ci fanno presupporre che le oscillazioni di rollio non influiscano sui risultati aerodinamici, quindi utilizzare un sostegno in galleria che garantisce pochi gradi di libertà dovrebbe essere ininfluente al fine della prova. In alcuni studi precedenti si è fatto invece riferimento

ad un possibile effetto del numero di Reynolds con una conseguente transizione laminare turbolenta. Pur non potendo escluderlo totalmente siamo portati a pensare che per la geometria e le condizioni del ciclista si abbia transizione a velocità molto basse.

# Appendice A

Vengono ora riportati i seguenti parametri delle singole prove: potenza media, cadenza di pedalata, rapporto usato, velocità di avanzamento, velocità relativa, angolo di freccia massimo,  $SC_x$  medio, angoli caratteristici e storia temporale dell' $SC_x$ . Vengono presentate le prove nell'ordine di esecuzione, ovvero prima le prove a velocità  $V_1$  con la seguente successione di posizioni, in andata e in ritorno: posizione brake hoods, posizione stem e posizione drops. Successivamente sono riportate le prove a velocità  $V_2$ , con la stessa successione di posizioni.



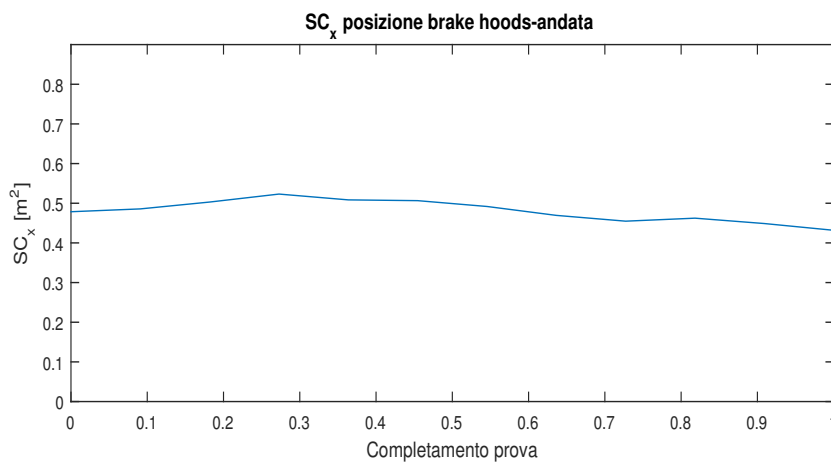
**Figura 3.1:** Atelta B in prova, posizione stem

## Prova atleta A

### Prova 1: posizione brake hoods-andata

Rapporto usato		53 x 24
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.78
Velocità media relativa	[m/s]	7.86
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	146.26
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	102
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.465

**Tabella 3.2:** Prova 1, atleta A



**Figura 3.2:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 1, atleta A

$\alpha$ [°]	56.59	$\sigma$ [°]	0.97
$\beta$ [°]	-4,51	$\sigma$ [°]	1.79
$\gamma$ [°]	-4.05	$\sigma$ [°]	0.48
$\delta$ [°]	-2.91	$\sigma$ [°]	0.81
$\epsilon$ [°]	3.51	$\sigma$ [°]	0.20
$\lambda$ [°]	6.84	$\sigma$ [°]	0.38

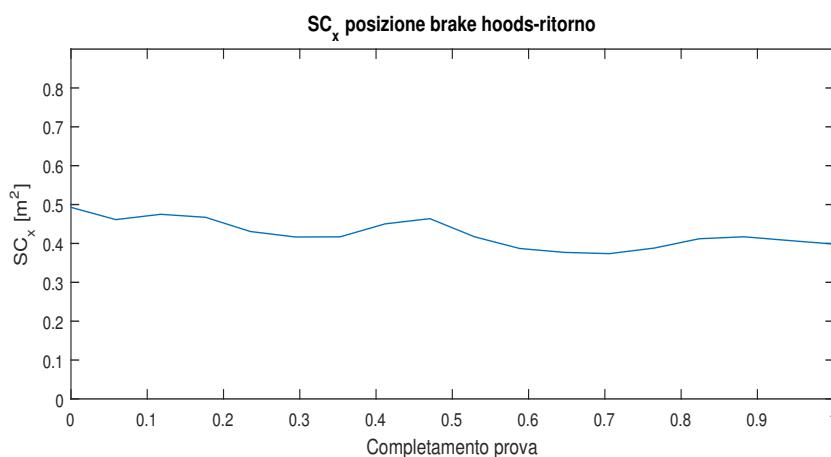
**Tabella 3.3:** Angoli medi, prova 1, atleta A



**Prova 2: posizione brake hoods-ritorno**

Rapporto usato		53 x 24
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.79
Velocità media relativa	[m/s]	8.58
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	149.32
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	101
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.425

**Tabella 3.4:** Prova 2, atleta A



**Figura 3.3:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 2, atleta A

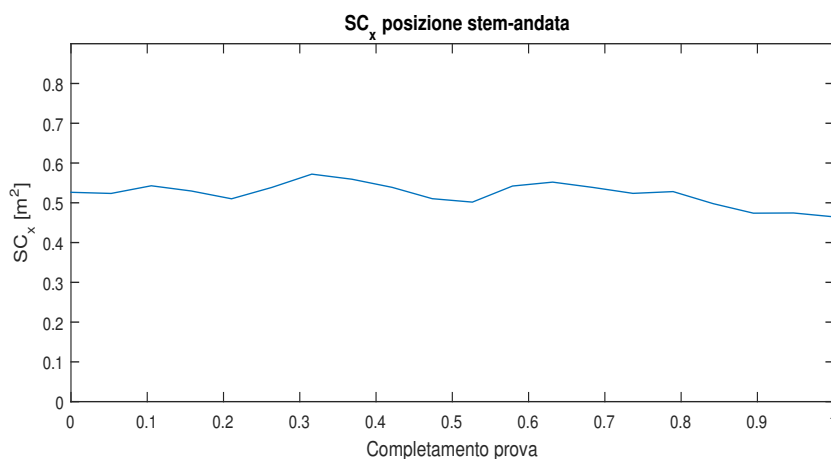
$\alpha$ [°]	54.22	$\sigma$ [°]	0.62
$\beta$ [°]	-3.54	$\sigma$ [°]	1.90
$\gamma$ [°]	-3.94	$\sigma$ [°]	0.46
$\delta$ [°]	-2.96	$\sigma$ [°]	0.52
$\epsilon$ [°]	3.30	$\sigma$ [°]	0.18
$\lambda$ [°]	6.50	$\sigma$ [°]	0.29

**Tabella 3.5:** Angoli medi, prova 2, atleta A

**Prova 3: posizione stem-andata**

Rapporto usato		53 x 24
Velocità media avanzamento	[m/s]	8.09
Velocità media relativa	[m/s]	7.38
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	136.68
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	100
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.505

**Tabella 3.6:** Prova 3, atleta A



**Figura 3.4:** Storia temporale  $SC_x$ , prova 3, atleta A

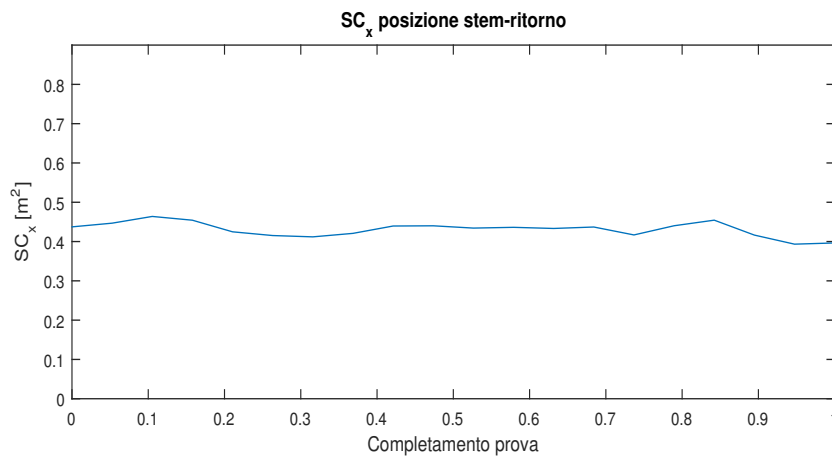
$\alpha$ [°]	56.77	$\sigma$ [°]	1.02
$\beta$ [°]	0.51	$\sigma$ [°]	1.23
$\gamma$ [°]	-4.44	$\sigma$ [°]	0.52
$\delta$ [°]	-3.25	$\sigma$ [°]	0.37
$\epsilon$ [°]	3.45	$\sigma$ [°]	0.12
$\lambda$ [°]	6.75	$\sigma$ [°]	0.31

**Tabella 3.7:** Angoli medi, prova 3, atleta A

**Prova 4: posizione stem-ritorno**

Rapporto usato		53 x 23
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.98
Velocità media relativa	[m/s]	8.72
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	163.25
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	99
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.431

**Tabella 3.8:** Prova 4, atleta A



**Figura 3.5:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 4, atleta A

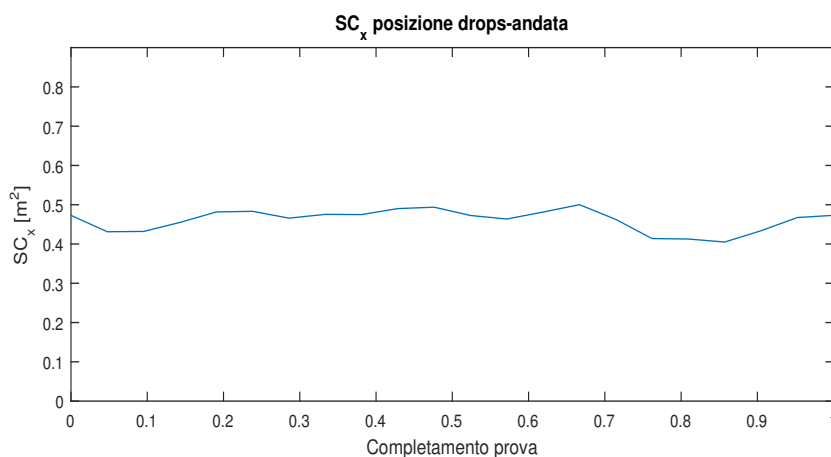
$\alpha$ [°]	55.72	$\sigma$ [°]	1.20
$\beta$ [°]	1.26	$\sigma$ [°]	1.58
$\gamma$ [°]	-4.34	$\sigma$ [°]	0.44
$\delta$ [°]	-3.59	$\sigma$ [°]	0.48
$\epsilon$ [°]	3.31	$\sigma$ [°]	0.17
$\lambda$ [°]	6.53	$\sigma$ [°]	0.32

**Tabella 3.9:** Angoli medi, prova 4, atleta A

**Prova 5: posizione drops-andata**

Rapporto usato		53 x 23
Velocità media avanzamento	[m/s]	8.35
Velocità media relativa	[m/s]	7.31
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	131.38
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minutio]	102
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.447

**Tabella 3.10:** Prova 5, atleta A



**Figura 3.6:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 5, atleta A

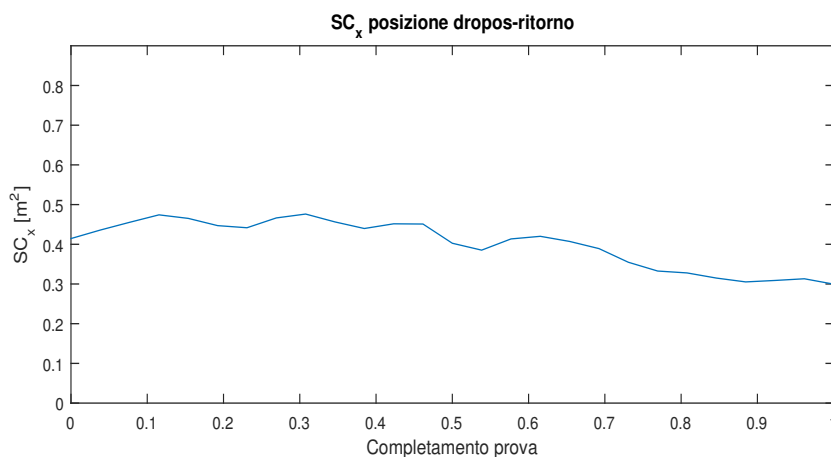
$\alpha$ [°]	47.92	$\sigma$ [°]	0.55
$\beta$ [°]	-13.47	$\sigma$ [°]	2.38
$\gamma$ [°]	-1.77	$\sigma$ [°]	0.57
$\delta$ [°]	-4.56	$\sigma$ [°]	0.51
$\epsilon$ [°]	3.26	$\sigma$ [°]	0.17
$\lambda$ [°]	6.60	$\sigma$ [°]	0.38

**Tabella 3.11:** Angoli medi, prova 5, atleta A

**Prova 6: posizione drops-ritorno**

Rapporto usato		53 x 23
Velocità media avanzamento	[m/s]	8.27
Velocità media relativa	[m/s]	8.62
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	150.41
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	100
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.392

**Tabella 3.12:** Prova 6, atleta A



**Figura 3.7:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 6, atleta A

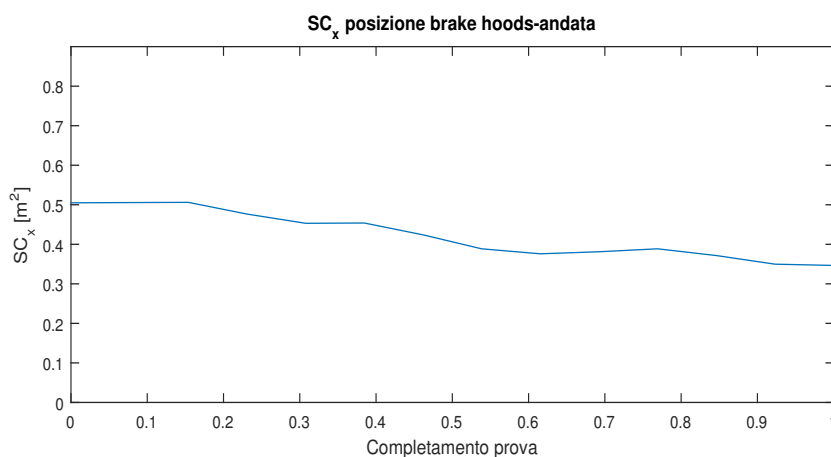
$\alpha$ [°]	47.11	$\sigma$ [°]	0.73
$\beta$ [°]	-11.77	$\sigma$ [°]	1.90
$\gamma$ [°]	-2.97	$\sigma$ [°]	0.37
$\delta$ [°]	-4.34	$\sigma$ [°]	0.67
$\epsilon$ [°]	3.26	$\sigma$ [°]	0.16
$\lambda$ [°]	6.55	$\sigma$ [°]	0.27

**Tabella 3.13:** Angoli medi, prova 6, atleta A

**Prova 7: posizione brake hoods-andata**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.3
Velocità media relativa	[m/s]	10.9
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	374.2
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	106
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.429

**Tabella 3.14:** Prova 7, atleta A



**Figura 3.8:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 7, atleta A

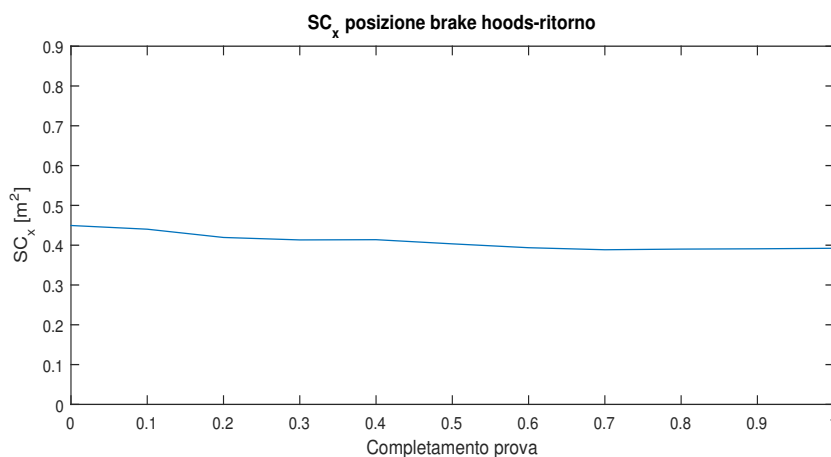
$\alpha$ [°]	50.44	$\sigma$ [°]	1.28
$\beta$ [°]	-8.36	$\sigma$ [°]	2.37
$\gamma$ [°]	-3.48	$\sigma$ [°]	0.48
$\delta$ [°]	-4.52	$\sigma$ [°]	1.01
$\epsilon$ [°]	3.48	$\sigma$ [°]	0.22
$\lambda$ [°]	7.05	$\sigma$ [°]	0.54

**Tabella 3.15:** Angoli medi, prova 7, atleta A

**Prova 8: posizione brake hoods-ritorno**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.3
Velocità media relativa	[m/s]	11.5
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	380.90
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	103
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.409

**Tabella 3.16:** Prova 8, atleta A



**Figura 3.9:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 8, atleta A

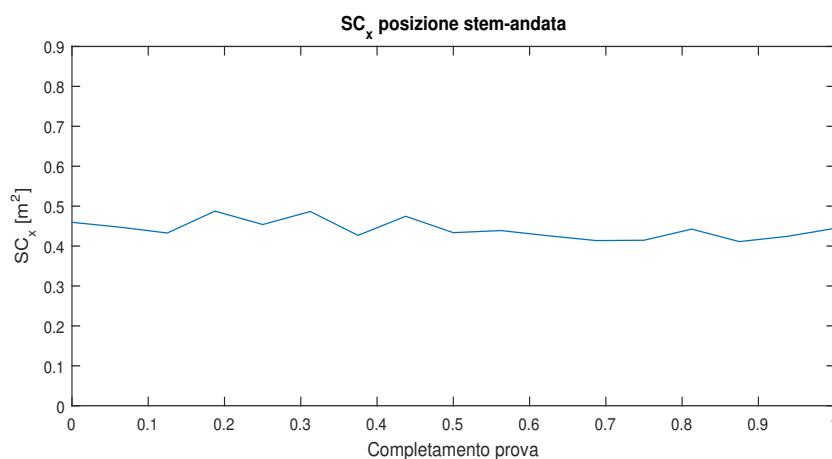
$\alpha$ [°]	50.90	$\sigma$ [°]	0.42
$\beta$ [°]	-6.17	$\sigma$ [°]	2.12
$\gamma$ [°]	-3.87	$\sigma$ [°]	0.58
$\delta$ [°]	-4.35	$\sigma$ [°]	0.73
$\epsilon$ [°]	3.51	$\sigma$ [°]	0.20
$\lambda$ [°]	6.59	$\sigma$ [°]	0.35

**Tabella 3.17:** Angoli medi, prova 8, atleta A

**Prova 9: posizione stem-andata**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.4
Velocità media relativa	[m/s]	10.9
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	376.94
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	104
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.458

**Tabella 3.18:** Prova 9, atleta A



**Figura 3.10:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 9, atleta A

$\alpha$ [°]	54.34	$\sigma$ [°]	0.81
$\beta$ [°]	-0.74	$\sigma$ [°]	1.98
$\gamma$ [°]	-4.38	$\sigma$ [°]	0.70
$\delta$ [°]	-3.66	$\sigma$ [°]	0.60
$\epsilon$ [°]	3.20	$\sigma$ [°]	0.16
$\lambda$ [°]	6.53	$\sigma$ [°]	0.34

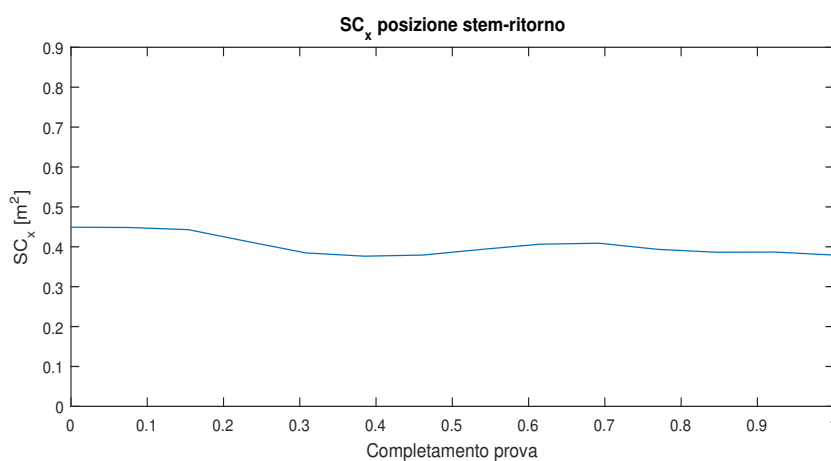
**Tabella 3.19:** Angoli medi, prova 9, atleta A



**Prova 10: posizione stem-ritorno**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.5
Velocità media relativa	[m/s]	11.8
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	390.00
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	105
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.416

**Tabella 3.20:** Prova 10, atleta A



**Figura 3.11:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 10, atleta A

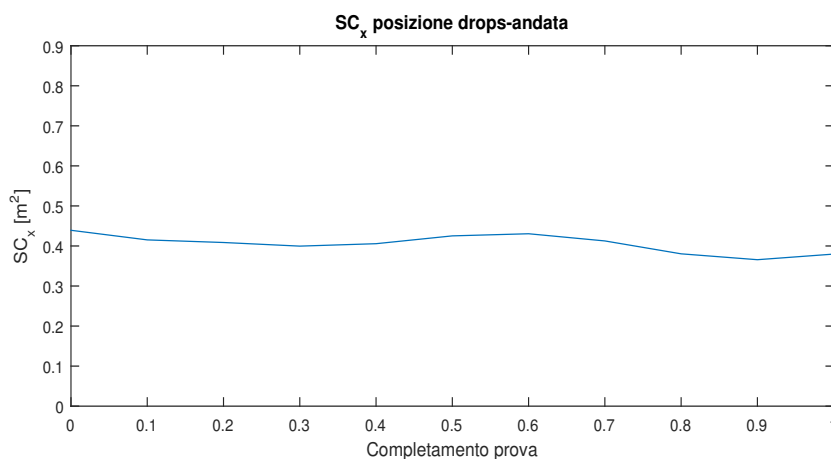
$\alpha$ [°]	54.64	$\sigma$ [°]	0.73
$\beta$ [°]	-1.59	$\sigma$ [°]	2.51
$\gamma$ [°]	-4.56	$\sigma$ [°]	0.58
$\delta$ [°]	-4.17	$\sigma$ [°]	0.66
$\epsilon$ [°]	2.99	$\sigma$ [°]	0.20
$\lambda$ [°]	6.27	$\sigma$ [°]	0.34

**Tabella 3.21:** Angoli medi, prova 10, atleta A

**Prova 11: posizione drops-andata**

Rapporto usato		53 x 15
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.5
Velocità media relativa	[m/s]	11.2
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	383.17
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	98
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.406

**Tabella 3.22:** Prova 11, atleta A



**Figura 3.12:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 11, atleta A

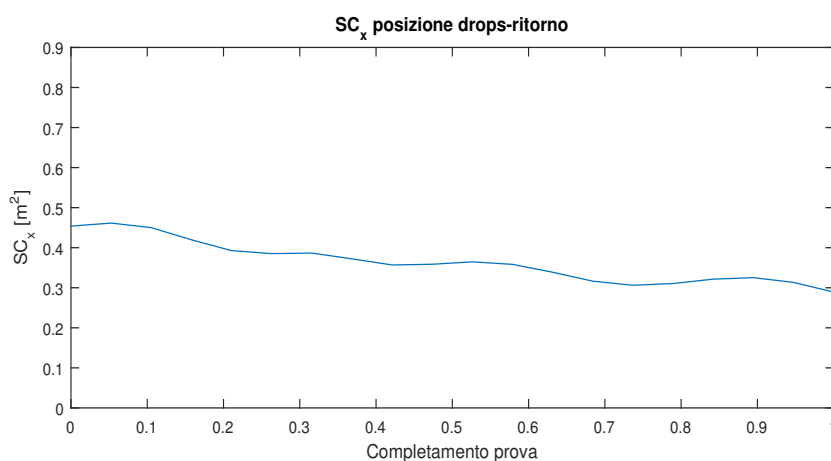
$\alpha$ [°]	46.98	$\sigma$ [°]	1.41
$\beta$ [°]	-13.39	$\sigma$ [°]	3.23
$\gamma$ [°]	-3.37	$\sigma$ [°]	0.69
$\delta$ [°]	-5.21	$\sigma$ [°]	0.70
$\epsilon$ [°]	3.17	$\sigma$ [°]	0.20
$\lambda$ [°]	6.42	$\sigma$ [°]	0.48

**Tabella 3.23:** Angoli medi, prova 11, atleta A

**Prova 12: posizione drops-ritorno**

Rapporto usato		53 x 15
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.6
Velocità media relativa	[m/s]	11.9
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	359.64
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	96
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.364

**Tabella 3.24:** Prova 12, atleta A



**Figura 3.13:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 12, atleta A

$\alpha$ [°]	46.46	$\sigma$ [°]	1.15
$\beta$ [°]	-14.38	$\sigma$ [°]	2.10
$\gamma$ [°]	-2.94	$\sigma$ [°]	0.54
$\delta$ [°]	-5.57	$\sigma$ [°]	0.76
$\epsilon$ [°]	3.01	$\sigma$ [°]	0.22
$\lambda$ [°]	6.30	$\sigma$ [°]	0.31

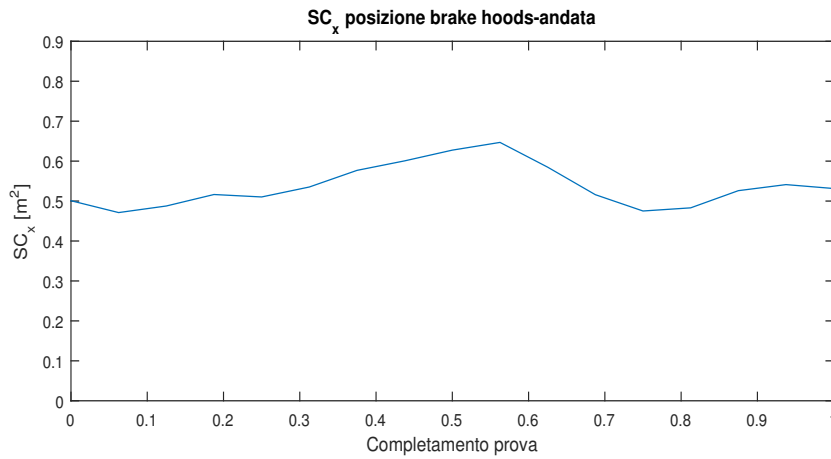
**Tabella 3.25:** Angoli medi, prova 12, atleta A

## Prova atleta B

### Prova 1: posizione brake hoods-andata

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.65
Velocità media relativa	[m/s]	6.94
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	128.88
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	80
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.537

**Tabella 3.26:** Prova 1, atleta B



**Figura 3.14:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 1, atleta B

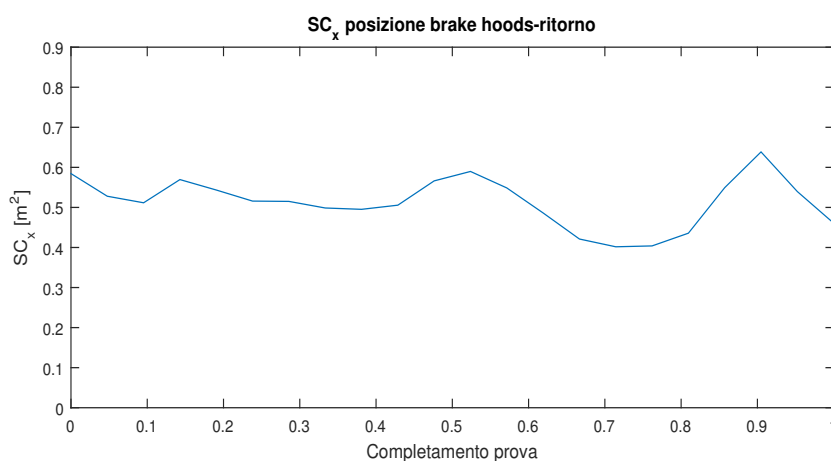
$\alpha$ [°]	50.63	$\sigma$ [°]	0.45
$\beta$ [°]	-4.19	$\sigma$ [°]	1.01
$\gamma$ [°]	-4.48	$\sigma$ [°]	0.38
$\delta$ [°]	-3.56	$\sigma$ [°]	0.66
$\epsilon$ [°]	2.82	$\sigma$ [°]	0.22
$\lambda$ [°]	4.01	$\sigma$ [°]	0.32

**Tabella 3.27:** Angoli medi, prova 1, atleta B

**Prova 2: posizione brake hoods-ritorno**

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.85
Velocità media relativa	[m/s]	8.48
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	162.70
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	82
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.479

**Tabella 3.28:** Prova 2, atleta B



**Figura 3.15:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 2, atleta B

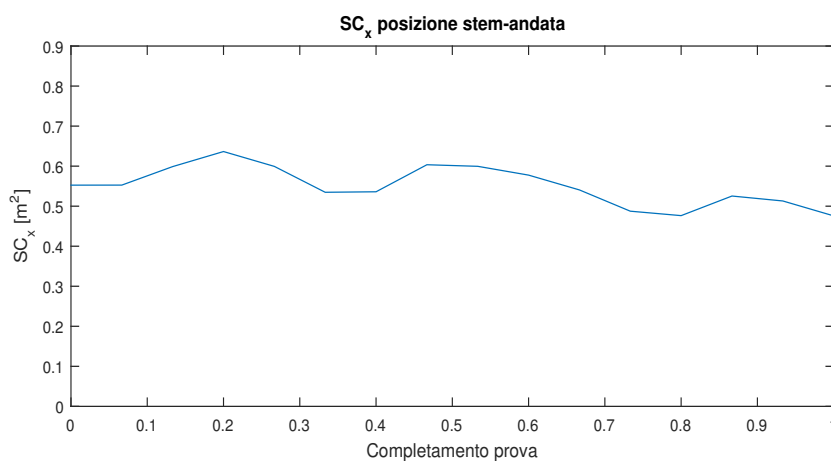
$\alpha$ [°]	49.29	$\sigma$ [°]	0.47
$\beta$ [°]	-3.284	$\sigma$ [°]	0.88
$\gamma$ [°]	-4.37	$\sigma$ [°]	0.36
$\delta$ [°]	-3.60	$\sigma$ [°]	0.48
$\epsilon$ [°]	2.78	$\sigma$ [°]	0.21
$\lambda$ [°]	3.93	$\sigma$ [°]	0.25

**Tabella 3.29:** Angoli medi, prova 2, atleta B

**Prova 3: posizione stem-andata**

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.97
Velocità media relativa	[m/s]	7.38
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	156.90
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	83
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.550

**Tabella 3.30:** Prova 3, atleta B



**Figura 3.16:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 3, atleta B

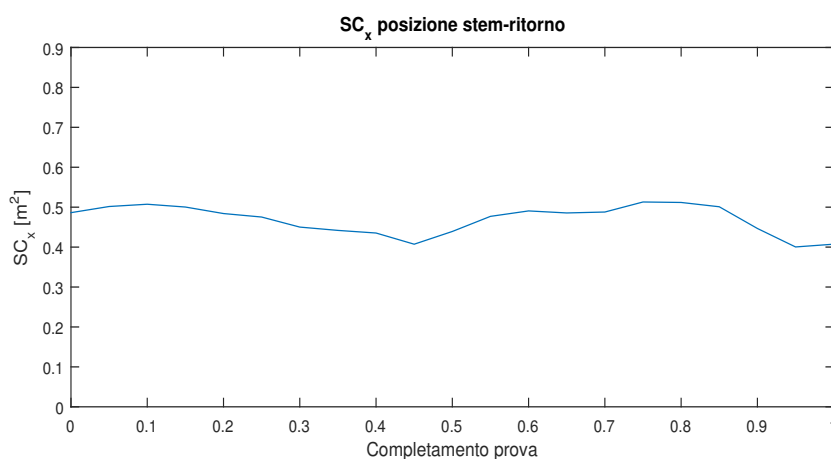
$\alpha$ [°]	54.88	$\sigma$ [°]	0.39
$\beta$ [°]	2.1599	$\sigma$ [°]	0.75
$\gamma$ [°]	-5.60	$\sigma$ [°]	0.39
$\delta$ [°]	-2.94	$\sigma$ [°]	0.40
$\epsilon$ [°]	2.6	$\sigma$ [°]	0.14
$\lambda$ [°]	3.93	$\sigma$ [°]	0.23

**Tabella 3.31:** Angoli medi, prova 3, atleta B

**Prova 4: posizione stem-ritorno**

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	8.07
Velocità media relativa	[m/s]	9.07
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	200.58
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	84
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.489

**Tabella 3.32:** Prova 4, atleta B



**Figura 3.17:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 4, atleta B

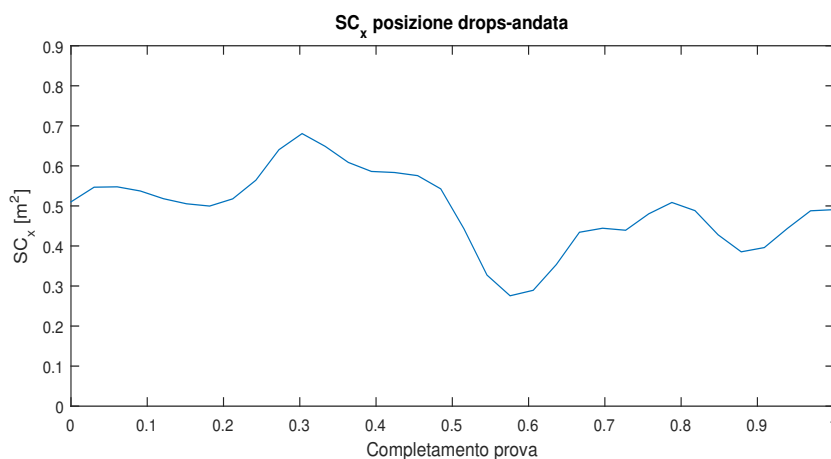
$\alpha$ [°]	54.17	$\sigma$ [°]	0.40
$\beta$ [°]	0.95	$\sigma$ [°]	0.77
$\gamma$ [°]	-5.00	$\sigma$ [°]	0.11
$\delta$ [°]	-2.84	$\sigma$ [°]	0.49
$\epsilon$ [°]	2.58	$\sigma$ [°]	0.14
$\lambda$ [°]	3.83	$\sigma$ [°]	0.24

**Tabella 3.33:** Angoli medi, prova 4, atleta B

**Prova 5: posizione drops-andata**

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	8.07
Velocità media relativa	[m/s]	7.38
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	154.29
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minutio]	84
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.506

**Tabella 3.34:** Prova 5, atleta B



**Figura 3.18:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 5, atleta B

$\alpha$ [°]	41.07	$\sigma$ [°]	0.81
$\beta$ [°]	-16.48	$\sigma$ [°]	1.25
$\gamma$ [°]	-2.49	$\sigma$ [°]	0.38
$\delta$ [°]	-3.29	$\sigma$ [°]	0.50
$\epsilon$ [°]	2.65	$\sigma$ [°]	0.16
$\lambda$ [°]	3.88	$\sigma$ [°]	0.33

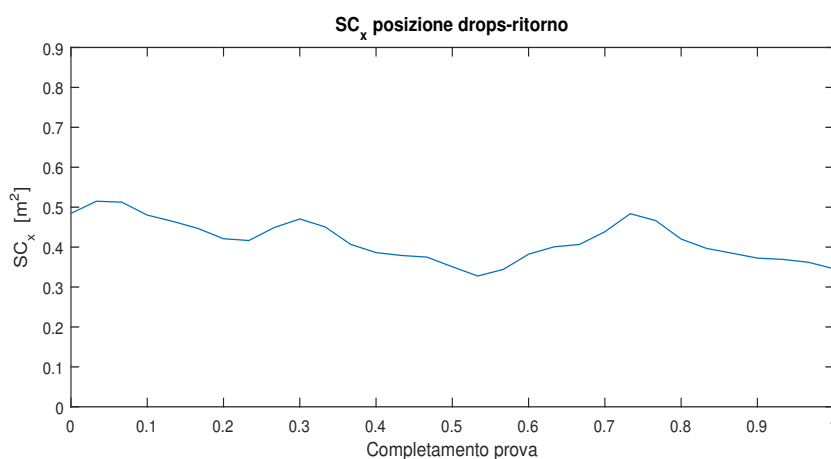
**Tabella 3.35:** Angoli medi, prova 5, atleta B



**Prova 6: posizione drops-ritorno**

Rapporto usato		53 x 19
Velocità media avanzamento	[m/s]	7.97
Velocità media relativa	[m/s]	8.96
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	< 5
Potenza media	[W]	152.21
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	84
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.460

**Tabella 3.36:** Prova 6, atleta B



**Figura 3.19:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 6, atleta B

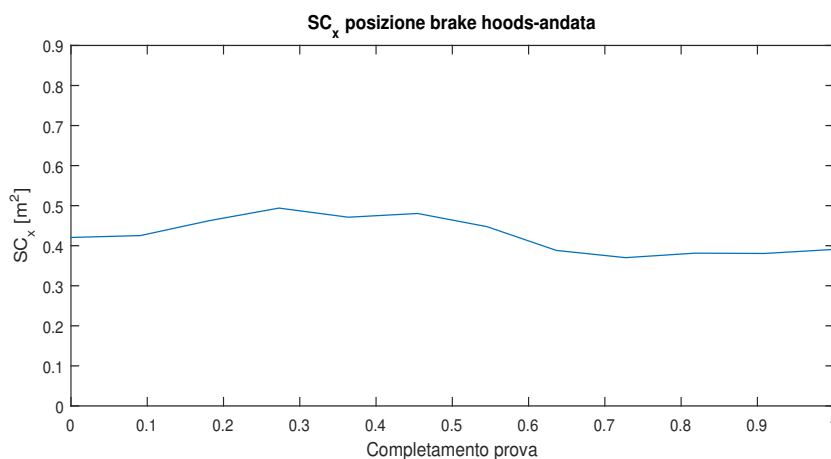
$\alpha$ [°]	40.08	$\sigma$ [°]	0.64
$\beta$ [°]	-18.29	$\sigma$ [°]	1.31
$\gamma$ [°]	-2.13	$\sigma$ [°]	0.37
$\delta$ [°]	-3.77	$\sigma$ [°]	0.51
$\epsilon$ [°]	2.46	$\sigma$ [°]	0.21
$\lambda$ [°]	3.44	$\sigma$ [°]	0.35

**Tabella 3.37:** Angoli medi, prova 6, atleta B

**Prova 7: posizione brake hoods-andata**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.0
Velocità media relativa	[m/s]	9.99
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	330.54
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	103
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.426

**Tabella 3.38:** Prova 7, atleta B



**Figura 3.20:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 7, atleta B

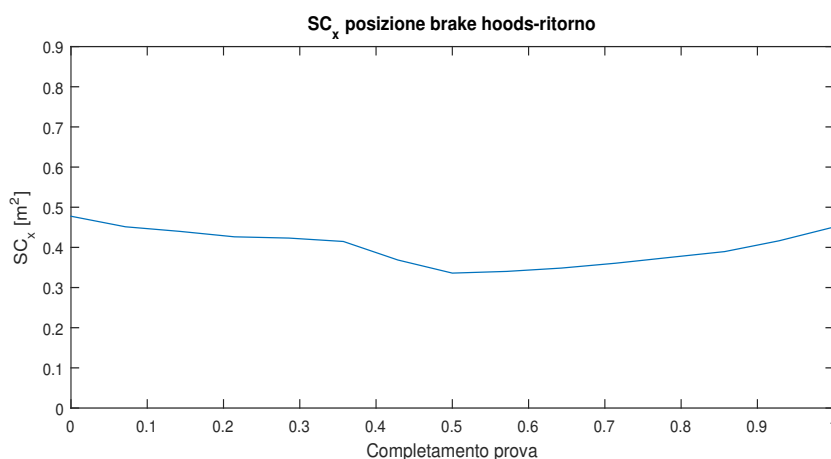
$\alpha$ [°]	47.28	$\sigma$ [°]	0.67
$\beta$ [°]	-8.92	$\sigma$ [°]	1.25
$\gamma$ [°]	-3.89	$\sigma$ [°]	0.51
$\delta$ [°]	-5.35	$\sigma$ [°]	0.79
$\epsilon$ [°]	2.77	$\sigma$ [°]	0.31
$\lambda$ [°]	3.91	$\sigma$ [°]	0.35

**Tabella 3.39:** Angoli medi, prova 7, atleta B

**Prova 8: posizione brake hoods-ritorno**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.1
Velocità media relativa	[m/s]	11.5
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	380.67
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	104.33
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.4021

**Tabella 3.40:** Prova 8, atleta B



**Figura 3.21:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 8, atleta B

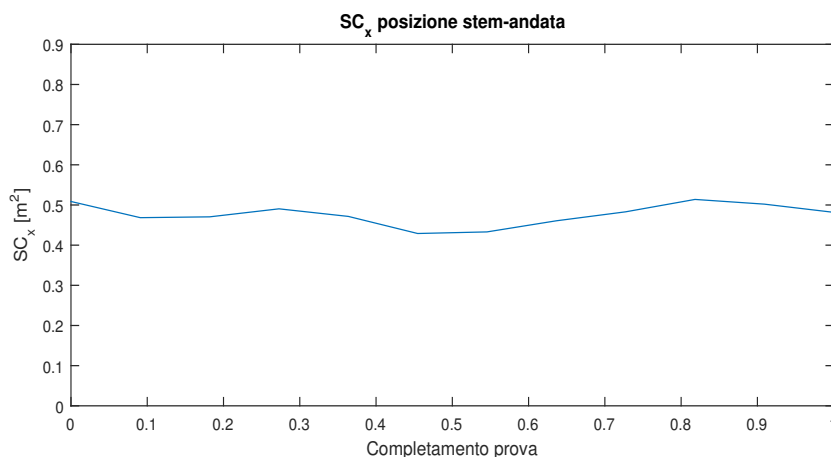
$\alpha$ [°]	46.14	$\sigma$ [°]	0.58
$\beta$ [°]	-9.71	$\sigma$ [°]	1.20
$\gamma$ [°]	-3.91	$\sigma$ [°]	0.52
$\delta$ [°]	-4.71	$\sigma$ [°]	0.62
$\epsilon$ [°]	2.52	$\sigma$ [°]	0.24
$\lambda$ [°]	3.64	$\sigma$ [°]	0.29

**Tabella 3.41:** Angoli medi, prova 8, atleta B

**Prova 9: posizione stem-andata**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.5
Velocità media relativa	[m/s]	10.7
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	426.00
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	108
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.466

**Tabella 3.42:** Prova 9, atleta B



**Figura 3.22:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 9, atleta B

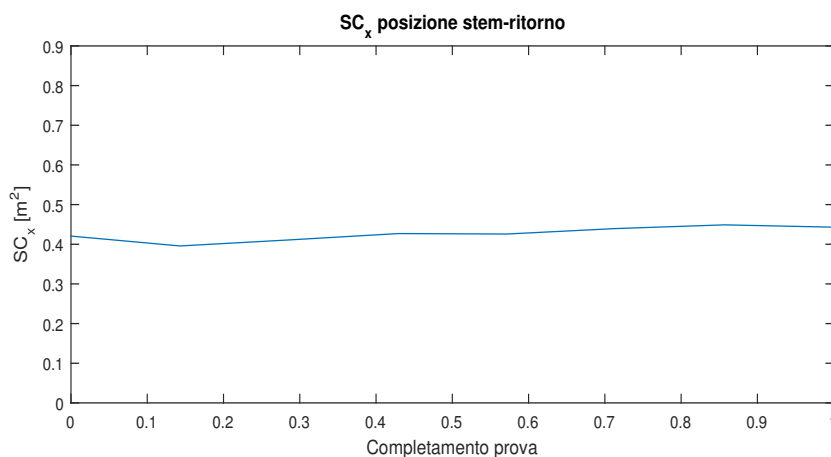
$\alpha$ [°]	52.83	$\sigma$ [°]	0.52
$\beta$ [°]	-1.92	$\sigma$ [°]	1.14
$\gamma$ [°]	-5.89	$\sigma$ [°]	0.54
$\delta$ [°]	-4.78	$\sigma$ [°]	0.65
$\epsilon$ [°]	2.66	$\sigma$ [°]	0.21
$\lambda$ [°]	3.92	$\sigma$ [°]	0.28

**Tabella 3.43:** Angoli medi, prova 9, atleta B

**Prova 10: posizione stem-ritorno**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.4
Velocità media relativa	[m/s]	11.6
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	452.55
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	107
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.410

**Tabella 3.44:** Prova 10, atleta B



**Figura 3.23:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 10, atleta B

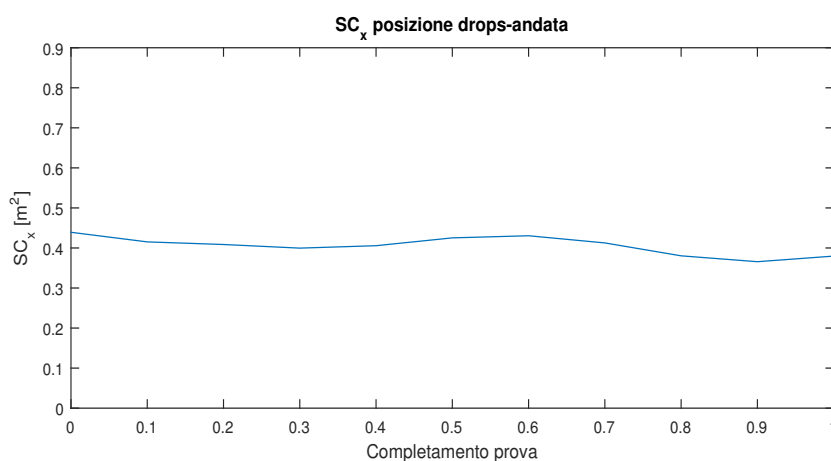
$\alpha$ [°]	52.41	$\sigma$ [°]	0.60
$\beta$ [°]	-3.14	$\sigma$ [°]	0.89
$\gamma$ [°]	-5.70	$\sigma$ [°]	0.50
$\delta$ [°]	-4.25	$\sigma$ [°]	0.65
$\epsilon$ [°]	2.36	$\sigma$ [°]	0.17
$\lambda$ [°]	3.5716	$\sigma$ [°]	0.303

**Tabella 3.45:** Angoli medi, prova 10, atleta B

**Prova 11: posizione drops-andata**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.3
Velocità media relativa	[m/s]	10.1
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	302.27
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	105
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.396

**Tabella 3.46:** Prova 11, atleta B



**Figura 3.24:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 11, atleta B

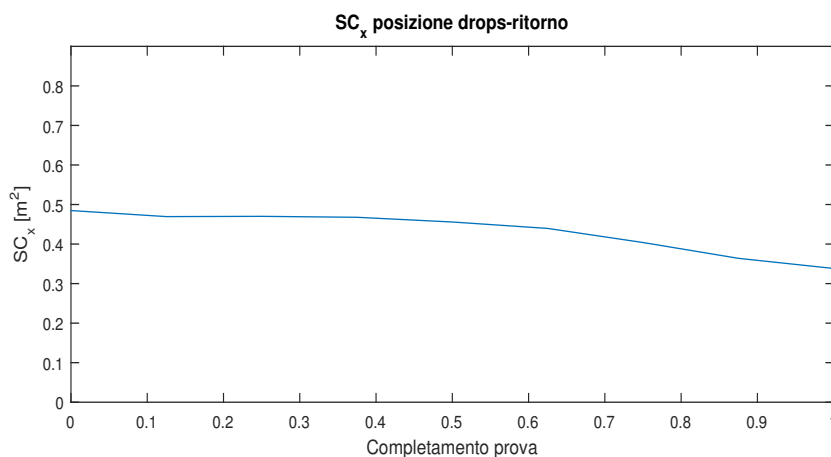
$\alpha$ [°]	41.15	$\sigma$ [°]	0.70
$\beta$ [°]	-20.31	$\sigma$ [°]	1.49
$\gamma$ [°]	-3.25	$\sigma$ [°]	0.41
$\delta$ [°]	-4.58	$\sigma$ [°]	0.67
$\epsilon$ [°]	2.29	$\sigma$ [°]	0.18
$\lambda$ [°]	3.45	$\sigma$ [°]	0.28

**Tabella 3.47:** Angoli medi, prova 11, atleta B

**Prova 12: posizione drops-ritorno**

Rapporto usato		53 x 17
Velocità media avanzamento	[m/s]	11.4
Velocità media relativa	[m/s]	10.7
Angolo massimo di freccia del vento	[°]	<5
Potenza media	[W]	387.92
Cadenza media	[N <sub>pedalate</sub> /minuto]	107
SC <sub>x</sub> medio	[m <sup>2</sup> ]	0.390

**Tabella 3.48:** Prova 12, atleta B



**Figura 3.25:** Storia temporale SC<sub>x</sub>, prova 12, atleta B

$\alpha$ [°]	40.01	$\sigma$ [°]	0.82
$\beta$ [°]	-21.90	$\sigma$ [°]	1.96
$\gamma$ [°]	-3.47	$\sigma$ [°]	0.52
$\delta$ [°]	-5.60	$\sigma$ [°]	0.86
$\epsilon$ [°]	2.44	$\sigma$ [°]	0.33
$\lambda$ [°]	3.39	$\sigma$ [°]	0.48

**Tabella 3.49:** Angoli medi, prova 12, atleta B

# Bibliografia

- Cycling Science [numeri da Dicembre 1989 a Estate 1996 ]
- “Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage”, [Vincent Chabroux, Caroline Barelle, and Daniel Favier], Journal of Applied Biomechanics, 2012
- “Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and fullscale wind-tunnel tests”, [Thijs Defraeye, Bert Blocken, Erwin Koninckx, Peter Hespel and Jan Carmeliet],Journal of Biomechanics, Gennaio 2010
- “CFD analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence modelling and boundary-layer modelling approaches”, [Thijs Defraeye, Bert Blocken, Erwin Koninckx, Peter Hespel and Jan Carmeliet],Journal of Biomechanics, Aprile 2010
- “CFD analysis of drag and convective heat transfer of individual body segments for different cyclist positions”, [Thijs Defraeye, Bert Blocken, Erwin Koninckx, Peter Hespel and Jan Carmeliet],Journal of Biomechanics, Marzo 2011
- “L’aerodinamica dei veicoli a propulsione umana”,[Albert C. Gross, Chester R. Kyle e Douglas J. Malewicki]
- “CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists”, [Thijs Defraeye, Bert Blocken, Erwin Koninckx, Peter Hespel and Jan Carmeliet],Computers & Fluids, Novembre 2012
- “A following car influences cyclist drag: CFD simulations and wind tunnel measurements”,[Blocken, Topalrar],Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015
- “Drag kings: characterizing large-scale flows in cycling aerodynamics”, [A.E. Hosoi], Focus on fluids



- “The understanding and development of cycling aerodynamics”, [R.A. Lukes, S.B. Chin and S.J. Haake], Sports Engineering, 2005
- “AERODYNAMICS OF BIKER POSITION”, [Giuseppe Gibertini, Gabriele Campanardi, Donato Grassi and Carlo Macchi], VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 2008
- “The Study of Details Effects in Cycling Aerodynamics: Comparison Between Two Different Experimental Approaches”, 2010
- “Aerodynamics of Cyclist Posture, Bicycle and Helmet Characteristics in Time Trial Stage”, [Vincent Chabroux, Caroline Barelle, and Daniel Favier], Journal of Applied Biomechanics, 2012.
- “High tech cycling”, [Edmund E. Burke]
- “Sport Aerodynamics”, [Helge Norstrud], 2003
- [www.treksegafredo.com](http://www.treksegafredo.com)
- [www.srm.de](http://www.srm.de)
- [www.dica.unict.it](http://www.dica.unict.it)
- [www.cervelo.net](http://www.cervelo.net)
- [www.uci.ch](http://www.uci.ch)
- <http://pages.jh.edu/newsinfo/news/home99/aug99/bike.html>
- [www.bdc-mag.com](http://www.bdc-mag.com)
- [www.cyclinside.com/Bicicletta-da-corsa/I-Componenti/Accessori/I-Misuratori-di-Potenza.html](http://www.cyclinside.com/Bicicletta-da-corsa/I-Componenti/Accessori/I-Misuratori-di-Potenza.html)
- [www.intern.srm.de/index.php/it/tecnologia/funzione](http://www.intern.srm.de/index.php/it/tecnologia/funzione)
- [www.armiestrumenti.com](http://www.armiestrumenti.com)
- [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it)

# Ringraziamenti

Desidero ringraziare per il lavoro di tesi in primis il *professor Gibertini*, per avermi permesso di affrontare un argomento molto interessante, specialmente per me, essendo cresciuto nel meraviglioso mondo del ciclismo. Un grazie anche al *dott. Andrea Morelli*, del centro ricerche sportive Mapei, per avermi aiutato e ben consigliato durante gli ultimi mesi di lavoro. Grande aiuto l'ho ricevuto anche dall' *ing. Donato Grassi*, soprattutto in fase di progettazione e preparazione della strumentazione. Per l'utilizzo delle piattaforme inerziali devo ringraziare l'*ing. Federico Gori*, che insieme all' *ing. Hannes Mayr* e alla *Microgate* mi hanno permesso di studiare la cinematica del ciclista. Desidero poi ringraziare i due atleti professionisti *Ivan Santaromita* e *Eugenio Alafaci* che si sono prestati per le prove.

Un ringraziamento particolare lo vorrei rivolgere ai miei genitori Andreina e Luciano. Li vorrei ringraziare sì per avermi permesso di arrivare qui, ma in particolar modo perchè hanno sempre incentivato la mia voglia di fare. Vorrei ringraziare mia madre per avermi trasmesso la passione per la matematica e la fisica e mio padre per avermi “messo in bici” da piccolo.

Vorrei ringraziare Maddalena, che mi ha accompagnato in tutto il mio percorso “aerodinamico”, prima a Pisa e poi a Milano, riuscendo anche ad insegnarmi come volano gli aerei (di carta). La sua presenza con il cuore e con il pensiero è stata di grande sostegno in questo periodo.

Vorrei ringraziare le mie sorelle Francesca e Elisa, per esserci sempre.

Un grazie va anche al mio amico e “socio” Luca per le mille avventure.

Grazie a tutti i miei compagni di Università per questi anni passati insieme. In particolare vorrei ringraziare Davide per la compagnia durante i lunghi viaggi, Simone per tutte giornate passate insieme, Luigi per la sua simpatia, i miei amici spagnoli Enrique e José ed infine Emanuele.

Un grazie anche ad Alberto, Cristian, Sara, Debora, Adriano, Mattia, Fabio e tutti gli altri amici che mi hanno fatto divertire durante questi anni.